



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E  
ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA**

**ESTUDO DO VAZAMENTO E CAPTURA DE ÓLEO EM  
AMBIENTE SUBAQUÁTICO**

**RAFAEL FELLER**

**FLORIANÓPOLIS – SC**

**2012**



**Rafael Feller**

**ESTUDO DO VAZAMENTO E CAPTURA DE ÓLEO EM  
AMBIENTE SUBAQUÁTICO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri

**Florianópolis – SC**

**2012**

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

Feller, Rafael

Estudo do Vazamento e Captura de Óleo em Ambiente Subaquático  
[dissertação] / Rafael Feller ; orientador, Marinho Bastos Quadri -  
Florianópolis, SC, 2012.

112 p. ; 21cm

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

Inclui referências

1. Engenharia Química. 2. Vazamento de óleo. 3. Captura de óleo.  
4. Ambiente subaquático. I. Quadri, Marinho Bastos . II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Química. III. Título.

**Rafael Feller**

**ESTUDO DO VAZAMENTO E CAPTURA DE ÓLEO EM  
AMBIENTE SUBAQUÁTICO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Química.

Florianópolis-SC, 15 de junho de 2012.

---

Prof. Leonel Teixeira Pinto, Dr. Sc.  
**Coordenador do CPGENQ**

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Marinho Bastos Quadri, Dr. Sc.  
**Presidente**

---

Prof. Mara Gabriela Novy Quadri, Dr. Sc.

---

Prof. Agostinho Plucenio, Dr.

---

Adriana Elaine da Costa, Dr.



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me dar a vida e me guiar nesse mundo com o auxílio de pessoas boas e honestas no meu caminho.

Aos meus pais, irmão e familiares que me acompanharam e incentivaram na minha formação acadêmica até os dias de hoje.

A minha eterna Professora Elisa Helena Siegel Moecke pelo incentivo a pesquisa desde a graduação em Engenharia Ambiental.

Aos meus colegas de trabalho Raquel Galante, Bruno Pergher, Jônata Biehl e Débora Simioni, pelo apoio nesse estudo tanto na parte experimental como na parte de simulação.

Aos colegas do LASIPO pela convivência harmoniosa nesse período de mestrado.

Ao Professor Marinho Bastos Quadri, por me acolher na Pós Graduação em Engenharia Química me dando à oportunidade que eu tanto queria, e por me orientar tanto no meio acadêmico quanto na vida pessoal.





“Aprender é descobrir aquilo que você já sabe.  
Ensinar é lembrar aos outros que eles  
sabem tanto quanto você.”

*Richard Bach*



## RESUMO

A ocorrência de acidentes em processos de extração de petróleo *offshore* tem sido um sério problema em virtude de vazamentos e suas conseqüências. Além das perdas econômicas, há o grande impacto ambiental ocasionado por tais derramamentos, que causam danos à fauna, à flora e a ambientes naturais (praias, recifes, etc.). Nesse contexto, estudos experimentais envolvendo a captura de óleo antes de seu espalhamento e emersão e a habilidade de simular a fluidodinâmica desse sistema pode se constituir em um elemento-chave para o desenvolvimento de tecnologias de captura. Com o intuito de analisar o comportamento de jatos de óleo em direção ao meio subaquático e sua ocupação em um balão de captura, neste trabalho foi construída uma bancada experimental como cenário para montagem dos ensaios de vazamento. Foram realizados experimentos para análise do ponto de fragmentação do jato, onde foi possível determinar a altura em que ocorre a fragmentação em função da velocidade de injeção de óleo, o que pode servir como uma estimativa no posicionamento de um balão para a captura de óleo. Experimentos tratando da formação de emulsão dentro do balão de captura também foram realizados. De acordo com a taxa de vazão de óleo em direção ao aparato de captura e o volume ocupado pelo mesmo, seria possível o controle desse processo através de um sistema de drenagem do óleo de maneira a não ser necessária a substituição do balão em condições de campo. Nos experimentos de drenagem do óleo foi atestada a viabilidade desse processo que deve levar em conta a viscosidade do óleo em questão, pois essa propriedade tem grande influência no tempo necessário para a drenagem. Na avaliação da ascensão de óleo por uma mangueira aberta a pressão atmosférica constatou-se que a coluna de óleo pode atingir a certa altura acima da superfície. A partir das simulações foi possível a reprodução das alturas de fragmentação do jato de óleo de maneira compatível com o observado nos experimentos. Aspectos de difícil visualização nos experimentos foram simulados e constatado que, uma grande quantidade de água é arrastada pela coluna ascendente de óleo através do tubo, o que pode gerar um deslocamento de água desnecessário em processos de captura de óleo. Com a observação dos contra-fluxos no bocal de recepção foi possível visualizar a existência de um fluxo reverso de água que sai do balão prejudicando a entrada de óleo em processos de captura.

Palavras-chave: *Offshore*, vazamento, subaquático, captura, simulação.



## ABSTRACT

The occurrence of accidents in the process of offshore oil drilling has been a serious problem because of leaks and their consequences. Besides the economic losses, there is a great environmental impact caused by such spills, which cause damage to fauna, flora and natural environments (beaches, reefs, etc.). In this context, experimental studies involving the capture of oil before its spread and emergence and the ability to simulate the fluid dynamics of this system may constitute a key element for the development of capture technologies. In order to analyze the behavior of jets of oil into the underwater environment and its occupation in a catch balloon, an experimental system has been developed. Experiments were performed to analyze the point of fragmentation of the jet, in which it was possible to determine the fragmentation height due to the oil injection speed, which can serve as an estimate on the positioning of a balloon to capture oil. Experiments treating the formation of emulsion in the catch balloon were also performed. In accordance with the rate of oil flow into the capture apparatus, and the volume occupied by the same, it would be possible to control this process by a drain system of the oil so as not to be necessary to replace the balloon under field conditions. In the oil drain experiments was certified the feasibility of this process that must take into account the viscosity of the oil in question, because this property has great influence on the time required for drainage. In the evaluation of the rise of oil through a hose open to atmospheric pressure it was found that the oil can flow through the column at a certain height above the surface. From the simulations it was possible to reproduce the high fragmentation of the oil jet in a manner compatible with that observed in the experiments. Aspects difficult to see in the experiments were simulated and found that a large amount of water is drawn upward by the column of oil through the tube, which can cause a displacement of unnecessary water in oil capture processes. By observing the counter-receiving flows in the nozzle was possible to visualize the existence of a reverse flow of water coming out the balloon impairing the oil inlet in capture processes.

Keywords: Offshore, leak, underwater, capture, simulation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barcos tentando conter o óleo pesado em zona de derramamento em 14 de junho de 2010. ....	25
Figura 2 - Cenário de um vazamento em águas profundas.....	31
Figura 3 - Fluxo de um jato formando vórtices anulares.....	32
Figura 4 - Diagrama de equilíbrio de fases da formação de hidratos e distribuição da temperatura em determinada região do Golfo do México. ....	33
Figura 5 - Variação da velocidade de flutuação com o tamanho da gota. Densidade da água do mar: 1024 kg/m <sup>3</sup> e densidade do óleo: 873 kg/m <sup>3</sup> . ....	34
Figura 6 - Íons (Na <sup>+</sup> e Cl <sup>-</sup> ) dissolvidos em solução de água.....	35
Figura 7 - Gradiente de temperatura desde o fundo do poço até a superfície do mar.....	36
Figura 8 - Variação da altura do rompimento do jato com a velocidade. ....	39
Figura 9 - Comprimento da ruptura do jato e tamanho de gota como funções da velocidade de um jato líquido (água) lançado em tetracloro de carbono líquido.....	40
Figura 10 - Experimentos de injeção de petróleo com aumento gradativo das velocidades de injeção em meio subaquático. Tamanho do orifício de 2 milímetros e temperatura da água de 18°C. ....	41
Figura 11 - Esquema dinâmico de dispersão/emulsão e coalescência das gotículas de óleo e água no mar. ....	43
Figura 12 - Gotas coalescendo com a formação da lamela e a drenagem do líquido das gotas até uma determinada espessura crítica, antes do rompimento e coalescência. ....	45
Figura 13 - Esquema de (a) Head-on Collision e (b) Off-centre Collision. Modelos de colisão em que uma das duas gotas está em repouso.....	47
Figura 14 - Interface definida (esquerda) e interface difusa (direita)...	49
Figura 15 - Resultados de simulação com o raio de abrangência do jato/pluma (esquerda) e somente a fase dispersa (direita).....	54

Figura 16 - Ilustração das atividades durante as simulações de ruptura abaixo da superfície.....	55
Figura 17 - Esboço do conceito DIFIS de captura de óleo <i>offshore</i> .....	56
Figura 18 - Bancada experimental. ....	59
Figura 19 - Jato de óleo (soja) apresentando uma determinada altura de fragmentação. ....	66
Figura 20 - Altura de fragmentação do jato em função da vazão de injeção de óleo em meio subaquático.....	66
Figura 21 - Imagens da variação da altura de fragmentação do jato com o aumento da vazão de injeção.....	67
Figura 22 - Comportamento do jato de óleo lubrificante no meio subaquático. ....	68
Figura 23 - Gráfico da variação da viscosidade do óleo lubrificante em função da temperatura. ....	69
Figura 24 - Gráfico da variação da viscosidade do óleo de soja em função da temperatura. ....	70
Figura 25 - Esquema do processo de captura de óleo a partir de um balão de forma esférica. ....	71
Figura 26 - Emulsificação junto à interface água/óleo com óleo de soja (esquerda) e óleo lubrificante (direita). ....	72
Figura 27 - Gotas no interior do balão que inflam com a ascensão de um jato estável (laminar) em direção à fase óleo. ....	73
Figura 28 - Balão de vidro apresentando a separação de fases após tempo de decantação de 36 segundos da emulsão formada. ....	74
Figura 29 - Experimento demonstrando o processo operacional de drenagem do óleo.	
Figura 30 - Ascensão do óleo lubrificante pela mangueira de drenagem a pressão atmosférica. ....	78
Figura 31 - Ascensão do óleo lubrificante pela mangueira de drenagem ao longo do tempo. ....	78
Figura 32 - Definição do ângulo de contato $\theta$ (esquerda) e ilustração da extensão do escorregamento $\beta$ (direita).....	82
Figura 33 - Domínio e condições de contorno utilizadas nas simulações.....	82



Figura 34 - Alturas simuladas da coluna de óleo contínua ao longo do tempo para a velocidade de injeção de 8,7 cm/s. ....	84
Figura 35 - Alturas simuladas da coluna de óleo contínua ao longo do tempo para a velocidade de injeção de 17,5 cm/s. ....	84
Figura 36 - Alturas simuladas da coluna de óleo contínua ao longo do tempo para a velocidade de injeção de 26,3 cm/s. ....	85
Figura 37 - Tempos de cálculo na resolução do modelo utilizando as diferentes malhas para as três velocidades simuladas. ....	86
Figura 38 - Médias das alturas de fragmentação do jato de óleo obtidas nas simulações com as diferentes malhas e os respectivos valores experimentais. ....	87
Figura 39 - Imagens de instantes das simulações utilizando a Malha 2 para as velocidades de 8,7, 17,5 e 26,3 cm/s. A escala de cores indica as frações volumétricas de água (vermelho) e óleo (azul). As setas indicam o ponto de fragmentação do jato. ....	88
Figura 40 - Gráfico mostrando as frações de volume das fases com linhas de isovalores de velocidade superpostas para a velocidade de injeção de 0,35 cm/s em diferentes instantes da ascensão da coluna de óleo e da gota formada. ....	89
Figura 41 - Perfis de velocidade dentro do tubo. ....	91
Figura 42 - Domínio e condições de contorno aplicadas a simulação. ....	92
Figura 43 - Gráfico mostrando a estabilização das vazões de água e de óleo para a velocidade de 0,35 m/s. ....	93
Figura 44 - Perfis de velocidade através do tubo de 7,7 cm de diâmetro. ....	94
Figura 45 - Razão entre as vazões (água/óleo) em função da velocidade de injeção de óleo na base do tubo de injeção. ....	96
Figura 46 - Domínio e condições de contorno (esquerda) e malha utilizada (direita). ....	97
Figura 47 - Distribuição de frações de volume de óleo (azul) e água (vermelho) para o tempo de 92 s a partir do início do vazamento. ....	98
Figura 48 - Contrafluxos no bocal do balão. ....	99



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação da tensão interfacial água/óleo e densidade da água em função da concentração de sal.....	35
Tabela 2: Parâmetros usados por Chen e Yapa (2004) na simulação....	55
Tabela 3: Características das malhas utilizadas nas simulações.....	83
Tabela 4: Alturas médias do jato até o ponto da fragmentação obtidas para as diferentes velocidades e para cada malha utilizada, além dos respectivos valores experimentais da altura de fragmentação. ....	86
Tabela 5: Vazões de água e óleo através do tubo para as diferentes velocidades e diâmetros. ....	95



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\phi$	Variável Phase Field
$\delta$	Mobilidade
$G$	Potencial químico
$\lambda$	Densidade de energia da mistura
$\varepsilon$	Largura capilar
$\psi$	Variável auxiliar da variável Phase Field
$u$	Campo de velocidade
$\Phi$	Função Level Set
$\zeta$	Parâmetro de espessura da função Level Set
$\chi$	Parâmetro de reinicializações da função Level Set
$\rho$	Densidade
$\mu$	Viscosidade
$\gamma$	Tensão interfacial
$m$	Massa
$g$	Gravidade
$r$	Raio
$t$	Tempo
$p$	Pressão
$I$	Sistema de vetores unitários
$u$	Vetor velocidade
$T$	Operação transposta da matriz da equação de Navier-Stokes
$F_{st}$	Tensão interfacial da equação de Navier-Stokes
$Q$	Vazão
$V$	Volume
$atm$	Atmosfera
$tpf.hmáx$	Tamanho máximo do elemento



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1	Objetivo geral .....	27
1.2	Objetivos específicos .....	27
1.3	Estrutura do trabalho.....	28
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
2.1	Aspectos fenomenológicos dos fluidos água e óleo em meio submarino .....	29
2.2	Cenário de um vazamento em águas profundas .....	30
2.3	Instabilidade de um jato em sistemas líquido-líquido .....	37
2.3.1	Fragmentação e regimes de fluxo .....	38
2.4	Formação de emulsões .....	42
2.4.1	Dispersão do óleo no meio subaquático e coalescência das gotas ...	44
2.5	Modelagem computacional .....	47
2.5.1	Modelo <i>Phase Field</i> .....	48
2.5.2	Modelo <i>Level Set</i> .....	50
2.5.3	Método dos Elementos Finitos (FEM).....	52
2.6	Experimentos e simulação de vazamentos submersos .....	53
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODO .....</b>	<b>59</b>
3.1	Bancada experimental.....	59
3.2	Procedimentos experimentais .....	61
3.3	Características dos fluidos utilizados .....	61
3.4	Equações governantes e modelos para o sistema a ser simulado ....	63
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>65</b>
4.1	Fragmentação do jato em meio subaquático .....	65
4.2	Formação de emulsão na captura de óleo por meio de um balão rígido de geometria esférica .....	71
4.3	Drenagem do óleo a partir do balão de captura.....	76
4.4	Simulação da fragmentação do jato em meio subaquático .....	80
4.5	Simulação do escoamento bifásico água/óleo através de um tubo de coleta.....	90

4.6	Simulação do preenchimento do balão e os contrafluxos no bocal de recepção.....	96
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>101</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES .....</b>	<b>105</b>
	Trabalhos publicados: .....	106
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>107</b>



# 1 INTRODUÇÃO

A contaminação do meio ambiente por vazamento de petróleo de dutos ou poços submarinos tem se constituído em sério problema. As multas e indenizações impostas pelos governos em decorrência dos prejuízos resultantes dos acidentes, somados aos custos relacionados às medidas mitigadoras motivam a procura por formas mais eficazes de combate a vazamentos. Ainda mais importantes do que as perdas econômicas, existe o grande impacto ambiental, causando danos à fauna, à flora e aos ambientes naturais (praias, recifes, manguezais, etc.).

Um exemplo disso foi a tragédia do Golfo do México em 20 de abril de 2010 quando explodiu a plataforma petrolífera *Deepwater Horizon*, que fazia uma perfuração a 1,5 mil metros de profundidade, 100 quilômetros ao sudeste do litoral do Delta do rio Mississippi, no estado americano da Louisiana. O vazamento resultante foi classificado como o pior desastre ambiental causado por um derrame de petróleo na história dos Estados Unidos. A Figura 1 mostra a imagem de barcos da guarda costeira americana tentando conter a mancha de óleo. A mancha chegou a atingir praias e refúgios de vida selvagem na Louisiana, Mississippi, Alabama e Flórida.

Figura 1 - Barcos tentando conter o óleo pesado em zona de derramamento em 14 de junho de 2010.



Fonte: The Daily Bail, 15/06/2010.

Os riscos também são iminentes no transporte de petróleo por dutos, onde existem variações de pressão no sistema de escoamento resultantes de diferentes elevações do terreno, de velocidade de escoamento e de fricção, além de uma variedade de conexões, curvas e variações abruptas de área. Esses fatores podem causar rupturas nos dutos, gerando vazamentos (FREITAS *et al.*, 2007).

Outra possibilidade de descargas de petróleo submarino inclui contribuições de oleodutos rompidos devido à corrosão. Devido às tubulações submarinas estarem sujeitas a um ambiente muito agressivo, o processo de corrosão é acelerado. Isto leva a uma fragilização do material que compõe os dutos, podendo causar o rompimento dos mesmos. Este rompimento pode se dar por *pits* de corrosão, rompimento da solda axial ou pela ancoragem do duto em virtude da irregularidade do solo onde o mesmo se encontra apoiado. Correntes marítimas fortes associadas ou não a efeitos sísmicos também podem causar esforços excessivos sobre o duto, levando ao rompimento do mesmo (PERGHER *et al.*, 2011).

Quando um duto submarino rompe, o hidrocarboneto contido em seu interior é expulso devido à elevada pressão no interior da tubulação, necessária para o deslocamento do fluido através de grandes distâncias. Essa descarga inicial muitas vezes apresenta o comportamento fluidodinâmico característico de um jato/pluma. Passada a fase inicial, seu comportamento pode ser descrito pelas equações de advecção-difusão. A extensão do comportamento do jato/pluma depende de fatores como a taxa de vazamento, da geometria e tamanho do furo, além das características do petróleo e do ambiente (LIST, 1982; DALING *et al.*, 2003).

No ambiente subaquático, fatores como temperatura, pressão e salinidade reinantes afetam propriedades como viscosidade, tensão interfacial e densidade interferindo diretamente na estabilidade hidrodinâmica do escoamento quando se estuda o fluxo bifásico de líquidos imiscíveis (MARIANO, 2008).

Os primeiros esforços empregados para se fazer frente a esse tipo de vazamento se limitam às operações de remoção do óleo da superfície da água e descontaminação da vida selvagem e terrenos adjacentes afetados. Entretanto, os custos para remover o óleo que chega à superfície do mar são muito altos e, além disso, as perdas de óleo podem ser de centenas ou milhares de barris por dia, o que resulta em uma significativa perda desse recurso (HENNING, 1993).

Diversos trabalhos encontrados na literatura tratam da remoção de óleo do ambiente marinho após sua emersão e espalhamento, sendo

que, grande parte do óleo vazado não chega à superfície. O presente trabalho compreende o estudo teórico/experimental e de simulação da captura do óleo antes do seu espalhamento em meio submarino, com a intenção de coletá-lo utilizando um aparato de captura no foco do vazamento ou ponto de rompimento.

Nesse contexto, estudos experimentais envolvendo a captura de óleo em ambiente subaquático e a habilidade de simular o comportamento fluidodinâmico de sistemas água/óleo pode se constituir em um elemento-chave para a reprodução das condições operacionais de campo.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um estudo teórico/experimental e de simulação que visa à produção de conhecimentos que venham a contribuir para o desenvolvimento de aparatos destinados a coletar óleo proveniente de poços ou oleodutos submarinos em situações de vazamento.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- **Realizar um levantamento bibliográfico** preliminar, através de pesquisa e estudo, baseando-se em livros e artigos técnico-científicos que abordem as principais propriedades e os fatores que influenciam nos aspectos fenomenológicos e de fluidodinâmica do óleo em meio subaquático.

- **Desenvolver um estudo experimental** que envolverá a construção de um modelo físico em escala reduzida que propiciará uma análise tanto qualitativa quanto quantitativa dos aspectos fenomenológicos e das condições de captação de óleo a partir de um ponto submerso em água para dentro de um balão de captura.

- **Simular o escoamento do óleo** por meio da utilização de um *software* com plataforma *Multiphysics*, buscando reproduzir comportamentos observados nos ensaios experimentais e que reflitam o tanto quanto possível a realidade física do sistema em estudo. Espera-se que o modelo desenvolvido com o auxílio desse software, uma vez validado, permita estudos de extrapolação para condições de difícil execução na escala laboratorial.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em sete capítulos. O presente capítulo traz uma breve exposição do tema abordado, onde são apresentados os objetivos e a motivação para a realização do estudo a ser desenvolvido.

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica dos fundamentos teóricos relacionados aos estudos das propriedades e da fenomenologia envolvendo o sistema parcialmente miscível água/óleo no contexto dos vazamentos da indústria *offshore* de exploração de petróleo.

O capítulo 3 descreve a metodologia empregada no estudo, apresenta a bancada experimental e os materiais e procedimentos adotados na realização dos experimentos e simulações.

O capítulo 4 descreve e discute os resultados experimentais e avalia as simulações realizadas com o fim de reproduzir o comportamento do óleo em situação de vazamento em meio subaquático. Aponta-se ainda, através das simulações, aspectos difíceis de serem visualizados e quantificados experimentalmente, como a intensidade e direção dos fluxos de escoamento dos fluidos envolvidos.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo e sugestões para futuros trabalhos. Finalmente, no capítulo 7 listam-se as referências bibliográficas utilizadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A indústria petrolífera brasileira tem sua maior porção de extração em poços submarinos localizados a grandes profundidades (abaixo de 1500m) e, portanto, está sujeita a condições de alta pressão, baixas temperaturas e salinidade. Algumas propriedades como viscosidade, tensão interfacial e densidade interferem diretamente na instabilidade fluidodinâmica dos escoamentos imiscíveis. No caso de vazamentos, o estudo das relações entre essas propriedades e os padrões de escoamento resultantes se faz necessário para o desenvolvimento de técnicas e equipamentos para a captura de petróleo em situação de vazamento. Dessa forma, neste capítulo, é apresentada uma revisão das principais propriedades e dos fatores que influenciam no comportamento do óleo ao vazarem em meio subaquático.

### 2.1 ASPECTOS FENOMENOLÓGICOS DOS FLUIDOS ÁGUA E ÓLEO EM MEIO SUBMARINO

O presente trabalho visa o estudo de um sistema bifásico, líquido – líquido, sendo os fluidos água e óleo. As principais propriedades físicas consideradas no estudo do sistema água/óleo foram densidade, viscosidade, e a tensão interfacial dos líquidos.

A água e o óleo formam um sistema heterogêneo e imiscível, composto por duas fases, que apresenta entre elas uma fronteira chamada de interface, que define a região de separação entre as duas fases. As interfaces são zonas anisotrópicas, em que as propriedades estruturais e dinâmicas são muito diferentes das propriedades do meio das fases. A espessura da interface pode se apresentar bem definida, atingindo espessuras de poucos milímetros ou mesmo alguns micra (MARIANO, 2008).

Paladino (2005) definiu sistema multifásico como uma região do espaço onde coexistem dois ou mais fluidos imiscíveis separados por uma interface, podendo ser esta conexa (por exemplo: escoamento estratificado, anular etc) ou desconexa (por exemplo, escoamento de bolhas, gotas etc) ou uma combinação de ambos os casos onde a mesma fase pode aparecer em forma contínua ou dispersa (padrão anular com gotas etc).

As principais ocorrências referentes à indústria petroquímica como a recuperação secundária de petróleo, o bombeamento de óleos de

viscosidade elevada mediante a injeção conjunta de água, e até mesmo acidentes envolvendo rompimento de dutos submersos e vazamentos a partir de explosões exemplificam situações em que o conhecimento do comportamento de escoamentos água/óleo se faz necessário, tanto para a eficiência da produção quanto para a remediação e quantificação de danos ambientais.

A diferença de densidades entre a água e o óleo é a principal promotora do deslocamento das fases quando na ausência de forças externas (excetuando-se a força gravitacional) ou gradientes de pressão dinâmica. A densidade da água no ambiente marinho varia de acordo com a profundidade e se constitui em uma propriedade extremamente importante para o estudo de vazamentos em sistemas imiscíveis ou parcialmente miscíveis.

A movimentação ou distribuição de um fluido é ocasionada pelo cisalhamento, definido como a força necessária para causar o movimento de 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, sendo esta última diretamente proporcional à viscosidade e inversamente proporcional à temperatura (FOX e MC DONALD, 1992). Portanto essa propriedade pode influenciar na taxa de vazamento, assim como a temperatura no ambiente subaquático poderá modificá-la de forma significativa.

A tensão superficial é o mais importante parâmetro na descrição de fenômenos interfaciais e é definida como a quantidade mínima de trabalho necessário para aumentar a área interfacial em uma unidade de área. A origem de forças tensivas no limite entre duas fases é atribuída ao seu caráter anisotrópico resultante da ausência de uniformidade em termos de número e de distribuição de moléculas na interface. A tensão interfacial, em misturas água/óleo, é o principal fator na imiscibilidade dos fluidos (SANTOS, 2003).

Um conhecimento prévio a respeito dessas propriedades nos possibilita a previsão do comportamento do óleo em meio subaquático, e seu domínio se torna útil no desenvolvimento de técnicas de captura.

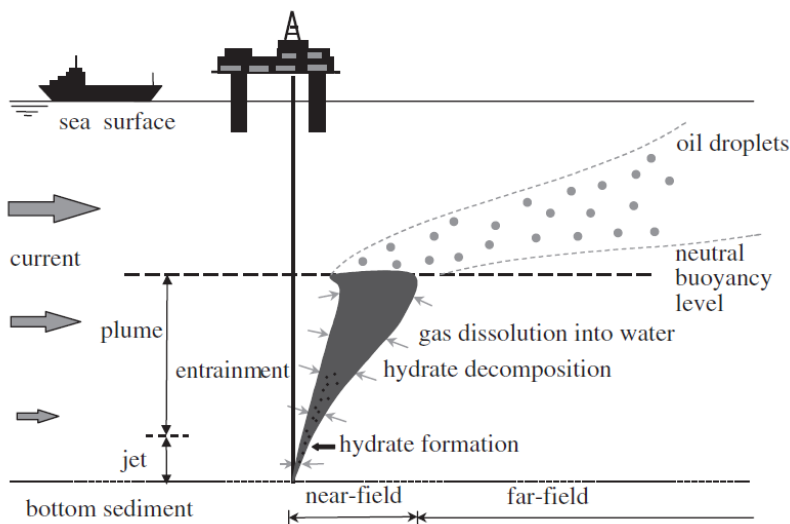
## 2.2 CENÁRIO DE UM VAZAMENTO EM ÁGUAS PROFUNDAS

No ambiente marinho a temperatura da água, a salinidade e a pressão do meio variam significativamente entre a superfície e o fundo do mar. Essas propriedades são muito significativas no que diz respeito

ao estabelecimento da interface água/óleo, pois influenciam fortemente nas suas propriedades e portanto devem ser consideradas (YAPA e ZHENG, 1998; GHANNAM e CHALAL, 2003).

A Figura 2 mostra esquematicamente o cenário de um vazamento de petróleo em águas profundas.

Figura 2 - Cenário de um vazamento em águas profundas.

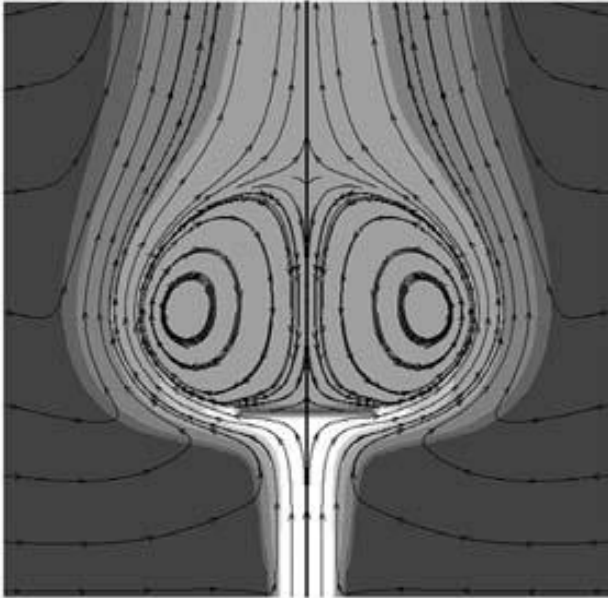


Fonte: Zheng *et al.*, 2002.

Inicialmente a mistura óleo/gás vazado sobe como um jato/pluma (*near-field*), que pode gradualmente perder sua força e fluidez devido ao arrastamento de líquido em um ambiente oceânico estratificado. O gás se expande à medida que sobe devido à queda da pressão e, portanto, aumenta a fluidez do jato/pluma. Em condições de campo, sabe-se que o petróleo e gás se movem na forma de gotas individuais (*far-field*) além do nível de flutuabilidade neutra (*neutral buoyancy level*) (RYE *et al.*, 1997; YAPA *et al.*, 1999). A extensão do comportamento do jato/pluma depende de fatores como: a profundidade, a taxa de vazamento, as dimensões do furo, além das características do petróleo e do ambiente (YAPA *et al.*, 1999; LIST, 1982).

O jato/pluma apresenta um comportamento fluidodinâmico característico. O fluxo do jato em alta velocidade faz surgir uma camada laminar instável e que cresce rapidamente, formando vórtices anulares (pluma), que carregam fluido do jato para o ambiente ao redor e vice-versa, como mostrado na Figura 3. Passada a fase inicial, seu comportamento pode ser descrito pelas equações de advecção-difusão.

Figura 3 - Fluxo de um jato formando vórtices anulares.

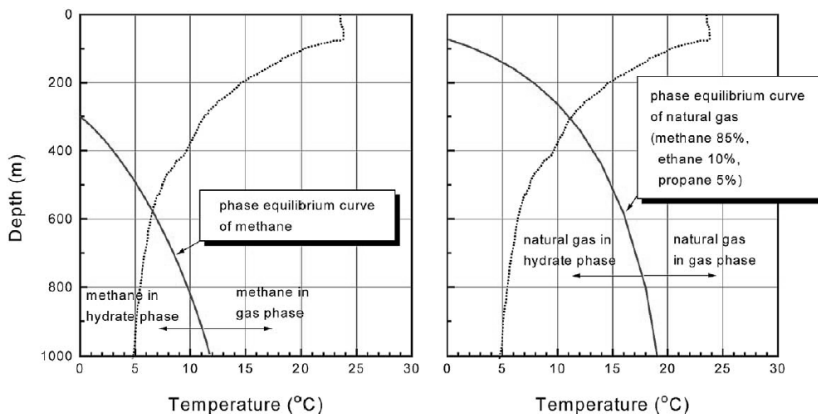


Fonte: Huai e Fang, 2006.

Em águas profundas devido à alta pressão e baixa temperatura, os gases (metano e gás natural) formados juntamente com o petróleo, têm grande probabilidade de formar “hidratos gasosos” (*hydrate formation*), como descrito na Figura 4. Hidratos gasosos são compostos formados de uma mistura de água e gás. A formação de hidratos é um processo reversível. A Figura 4 mostra as condições de equilíbrio dinâmico para o metano e gás natural em um determinado ambiente submarino no Golfo do México.



Figura 4 - Diagrama de equilíbrio de fases da formação de hidratos e distribuição da temperatura em determinada região do Golfo do México.



Fonte: Chen e Yapa, 2004.

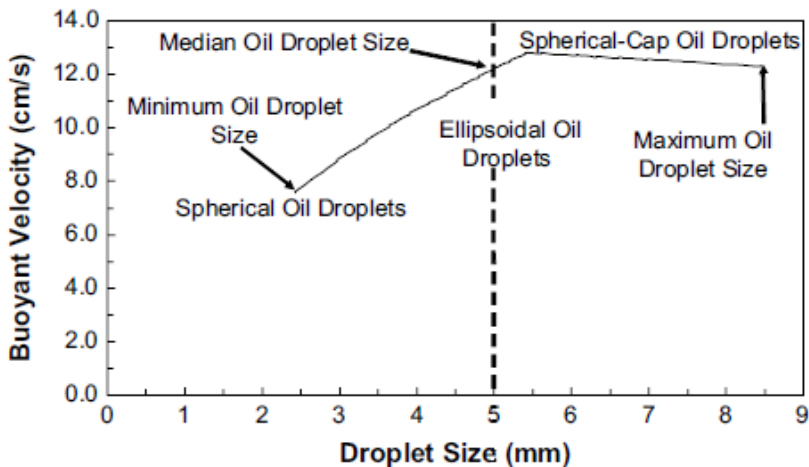
Como esses hidratos que são flutuantes viajam verticalmente em direção a superfície, eles encontram regiões de baixa pressão. Como indicado na Figura 2, os hidratos podem se decompor em gás livre em regiões de baixa pressão e se dissolver na água (*hydrate decomposition*). A presença ou ausência de hidratos tem um impacto significativo no comportamento de um vazamento de petróleo em águas profundas, pois causam uma alteração na flutuabilidade o que influencia na trajetória da descarga.

Em seu comportamento, o jato/pluma eventualmente alcança em certo ponto o nível de flutuabilidade neutro (NBL), ou de acordo com a Figura 2, *neutral buoyancy level*, onde a dinâmica do mesmo termina. O NBL é o resultado da estratificação da densidade no ambiente marinho. A densidade da água do mar varia de acordo com a profundidade devido às variações de temperatura e salinidade, com a sobrecarga da pressão (DASANAYAKA e YAPA, 2009).

Perto do nível do leito do mar, a densidade da água salgada é maior e a densidade da pluma é menor. À medida que a pluma sobe penetrando na água sua densidade vai aumentando. Portanto, NBL é o nível que a pluma atinge, quando sua densidade se aproxima da densidade da água do mar. Depois do NBL, o óleo se move como gotículas de óleo individual, seguindo a corrente, e sobe devido à flutuabilidade da gotícula (CHEN e YAPA, 2004).

O trabalho realizado por Dasanayaka e Yapa (2009) demonstra que depois que o NBL é atingido, as gotículas, que possuem diferentes tamanhos, seguem seu trajeto com diferentes velocidades de flutuação (Figura 5).

Figura 5 - Variação da velocidade de flutuação com o tamanho da gota. Densidade da água do mar:  $1024 \text{ kg/m}^3$  e densidade do óleo:  $873 \text{ kg/m}^3$ .



Fonte: Dasanayaka e Yapa, 2009.

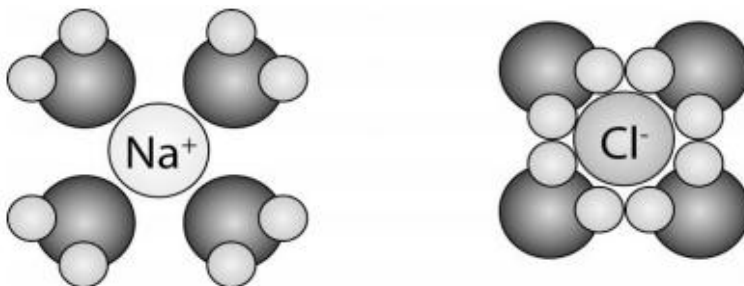
De acordo com a variação da velocidade da gota de óleo em função do seu tamanho, é possível constatar que a velocidade não aumenta continuamente para todos os tamanhos de gota. Experimentos de derramamentos em campo mostram que 95% das gotículas de óleo são menores que 7,5 mm em diâmetro e o diâmetro médio é em torno de 5 mm.

Como se tem afirmado, a salinidade no ambiente marinho também é um fator relevante no estudo de vazamentos. Acidentes envolvendo derramamento de óleo podem ocorrer em ambientes com diferentes concentrações de sal, portanto é importante a investigação da variação dessa concentração e sua influência na interface água/óleo.

As moléculas de água possuem um dipolo, com uma “ponta” positiva e outra negativa, por isso, elas podem circundar um íon negativo com sua “ponta” positiva, removendo-o do cristal de sal. Os íons assim dissolvidos podem se mover pela solução, com uma camada

de moléculas de água “grudadas” nele, isto é chamado de camada de hidratação do íon (Figura 6). Dessa maneira a carga desse íon hidratado altera a orientação das moléculas de água diminuindo as forças de coesão que irão influenciar na tensão interfacial.

Figura 6 - Íons ( $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ ) dissolvidos em solução de água.



Fonte: Levin *et al.*, 2010.

De acordo com o trabalho de Ghannam e Chaalal (2003), um aumento na concentração de sal na água de 0 a 30  $\text{kg/m}^3$  mostra uma mudança nas propriedades de densidade e tensão interfacial, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Variação da tensão interfacial água/óleo e densidade da água em função da concentração de sal.

Concentração de Sal (Kg NaCl/ $\text{m}^3$ )	Densidade (Kg/ $\text{m}^3$ )	Tensão Interfacial (mN/m)
0.0	996	48.0
10.0	998	45.0
20.0	1010	27.2
30.0	1020	25.5

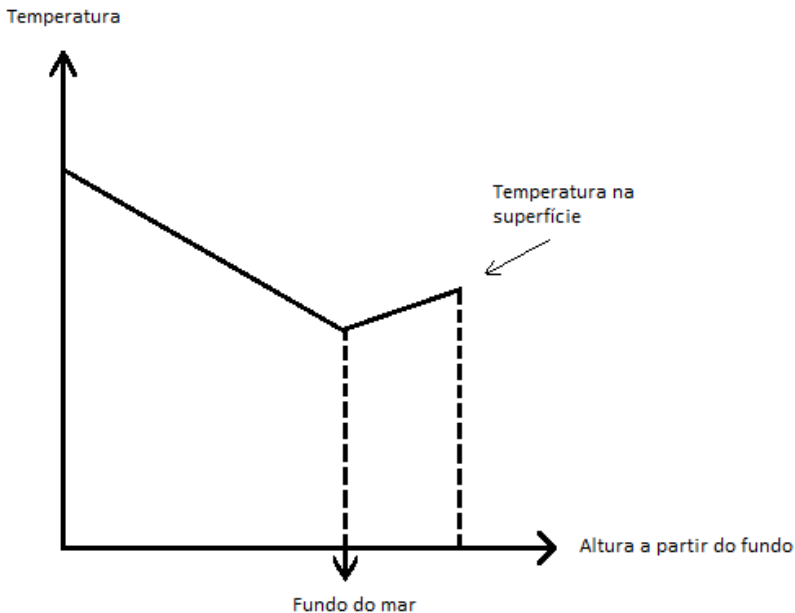
Fonte: Ghannam e Chaalal, 2002.

Tais resultados evidenciam que a presença do sal na água provoca um decréscimo na tensão interfacial, e um aumento na diferença entre as densidades dos fluidos. Como consequência dessa mudança, ocorre um aumento significativo na força de fluatibilidade do óleo e uma

aceleração no processo de formação de gotas devido ao decréscimo da tensão interfacial. Em estudo experimental realizado pelos autores, essas alterações nas propriedades dos fluidos tornaram os processos de separação água/óleo mais acelerados.

O contato do petróleo que se encontra no poço com o meio subaquático promove alterações em suas propriedades. O petróleo quando segue do fundo do poço em direção ao fundo mar apresenta um perfil de temperatura linear decrescente, seguindo o comportamento do gradiente geotérmico, desde o fundo, onde as temperaturas são elevadas, até o fundo do mar, onde há baixas temperaturas. No solo marinho a temperatura atinge um mínimo e volta a crescer moderadamente até a superfície do mar, conforme é esquematizado na Figura 7.

Figura 7 - Gradiente de temperatura desde o fundo do poço até a superfície do mar.



Fonte: Assmann, 1993.

De acordo com estudos publicados por Yijie *et al.* (2010), Cazarez-Candia e Vásquez-Cruz (2005) e Sajgó (2000) a temperatura no

poço possui um gradiente geotérmico muito amplo que pode variar de 60°C até mais de 200° C na fase de maturação.

A variação da temperatura altera continuamente a viscosidade do óleo. A partir do fundo do mar essa mudança de viscosidade leva a uma instabilidade na fluidodinâmica do óleo em direção ao fluido imiscível (água), o que influencia no comportamento de um jato de óleo submerso; portanto, esse fator também deve ser considerado com cuidado no caso do estudo de vazamentos.

De acordo com o exposto até agora, a previsão do comportamento de um vazamento é muito complexa e depende muito dos fatores citados anteriormente, como a taxa de vazamento, o tamanho e forma geométrica da abertura, das características do petróleo e também do meio ambiente, que pode apresentar correntes marítimas, e da influência da geografia do terreno.

Nesse item, apresentou-se um cenário geral de um vazamento em águas profundas, abordando as principais variáveis do processo. Devido às condições laboratoriais, fatores como a presença de gás, formação de hidratos, presença de correntes marítimas não serão levados em conta no estudo experimental.

Portanto, o presente trabalho se direciona para o estudo do comportamento do escoamento do óleo submerso em água, aspectos de instabilidade e fragmentação com formação de gotículas e de emulsão. Também, alguns aspectos sobre a captura e drenagem de óleo com o emprego de um balão rígido submerso fazem parte deste estudo.

## 2.3 INSTABILIDADE DE UM JATO EM SISTEMAS LÍQUIDO-LÍQUIDO

Quando o óleo escapa de poços submarinos ou oleodutos em direção à superfície, a coluna ou jato irá se fragmentar em gotículas. O tamanho dessas gotículas irá influenciar na trajetória, determinando se vão chegar à superfície ou permanecer dispersas na água, como se dissolverão e a condição resultante da mancha de óleo na superfície.

A ruptura em uma fase dispersa (gotas) de um jato líquido em direção a outro líquido ainda é pouco compreendida. Apesar dos estudos de instabilidade de jatos existirem por quase 170 anos, não existem teorias geralmente aceitas, regimes, ou até mesmo uma terminologia comum (MASUTANI e ADAMS, 2001). A maioria dos esforços até a presente data tem sido voltada para estudos de jatos de líquido no ar. Embora os fenômenos de instabilidade no estado líquido-gás e líquido-

líquido sejam semelhantes, eles não são idênticos; o rompimento é afetado pelas propriedades da fase (ambiente) contínua e da condição de interface do fluido injetado que pode ser significativamente diferente nos dois sistemas.

Investigações sobre a instabilidade de escoamentos líquido-líquido são limitadas, e em grande parte restritas ao regime de fluxo laminar. Pouca informação existe sobre tamanhos de gotas produzidas pelo fluxo de transição e eventos de separação turbulenta que possam ocorrer durante um derramamento de óleo em águas profundas.

A instabilidade da emissão de um jato líquido cilíndrico em outro fluido imiscível (ou pouco miscível) pode ser causada pela tensão interfacial, efeitos gravitacionais, ou por forças hidrodinâmicas. Em muitas aplicações, incluindo derramamentos de petróleo submarino, a força gravitacional (força do corpo) é relativamente desprezível frente a tensão interfacial e as forças hidrodinâmicas. A instabilidade do jato depende principalmente de forças de superfície como: tensão interfacial, forças viscosas e forças hidrodinâmicas atuando na interface dos fluidos (do jato com o meio). Devido a essas forças, o jato se torna instável e se divide em gotas (TENG *et al.*, 1994).

A formação de gotículas é mal compreendida devido a informações insuficientes sobre os efeitos das forças hidrodinâmicas (para jatos de alta velocidade) e da transferência de massa, bem como da influência das propriedades dos fluidos envolvidos. Para sistemas líquido-líquido, informações referentes à formação de gotículas são amplamente baseadas em observações experimentais. Como resultado, na maioria das aplicações práticas, a previsão do tamanho das gotas depende de correlações empíricas obtidas para apenas alguns sistemas (HOMMA *et al.*, 2006).

### **2.3.1 Fragmentação e regimes de fluxo**

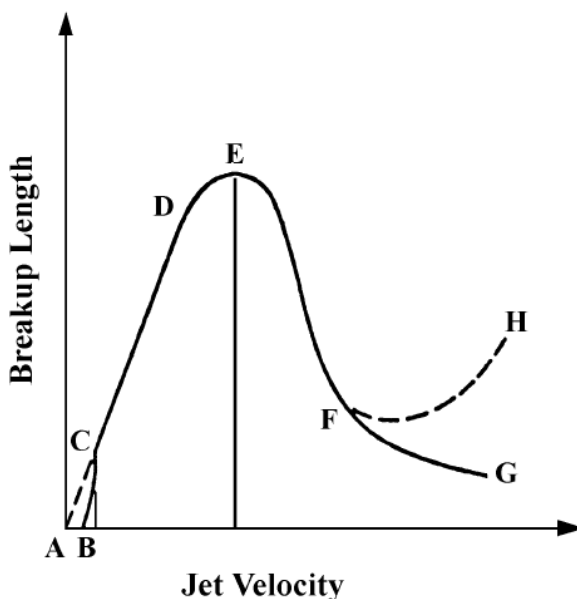
A ruptura de jatos de líquidos em gotículas é conduzida por uma competição entre forças coesivas e dispersivas. Instabilidades que podem levar a deformação da superfície do jato podem ser ampliadas ou amortecidas. O modo dominante de instabilidade depende de uma série de fatores, incluindo velocidade do jato e propriedades do fluido, e se manifesta na ocorrência da desintegração do jato.

Estudos identificaram uma série de regimes de escoamento distintos onde a fragmentação aparentemente ocorre por diferentes mecanismos que alteram as características do conjunto de gotas geradas. Uma compreensão dos limites destes regimes é importante, a fim de se

poder antecipar o tipo (ou seja, tamanho, mono ou polidispersão) de gotículas produzidas por diferentes cenários de vazamento de óleo.

A Figura 8 de Grant e Middleman apud Masutani (1999) mostra a evolução típica da altura de fragmentação de um jato líquido em um meio gasoso à medida que a velocidade de descarga aumenta. O comprimento de separação é a distância entre o orifício e o ponto onde as gotas discretas são formadas. À montante desse ponto, o jato permanece contínuo e intacto.

Figura 8 - Variação da altura do rompimento do jato com a velocidade.



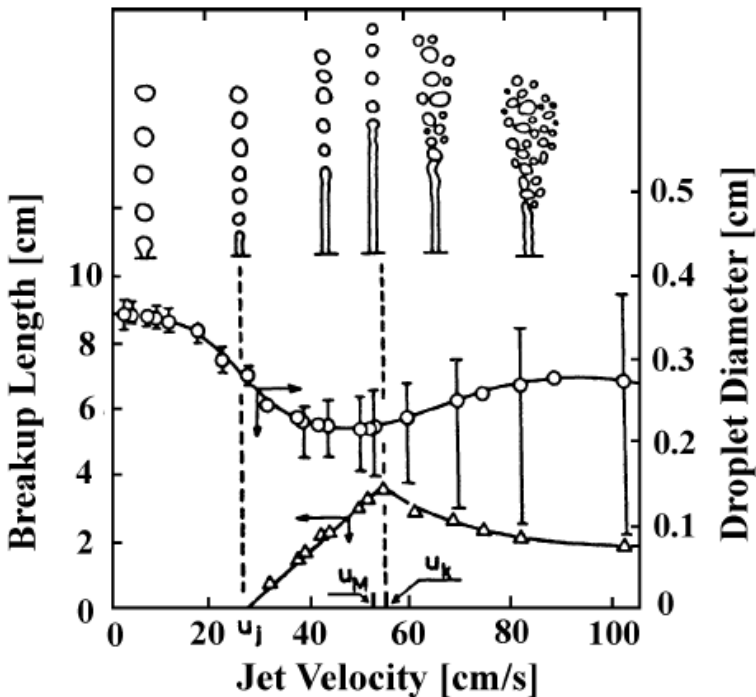
Fonte: Grant e Middleman, 1996.

Em velocidades muito baixas, gotas grandes são produzidas no orifício, situação às vezes referenciada como fluxo de gotejamento. A partir do ponto C, como a velocidade é maior, há o surgimento de um jato de natureza laminar e o comprimento aumenta linearmente até atingir um máximo. Em baixas velocidades, distúrbios crescem em amplitude na superfície do jato no plano axissimétrico, levando eventualmente a um estrangulamento da coluna para gerar um fluxo

essencialmente de gotas monodispersas de cerca de duas vezes o diâmetro do jato inicial. As forças de tensão superficial são dominantes ao longo dessa faixa (HOMMA, *et al.*, 2006).

A Figura 9 de Kitamura e Takahashi apud Masutani e Adams (2001) apresenta alturas de fragmentação medidas e tamanhos de gotas de um sistema líquido-líquido (água injetada em tetracloreto de carbono). A figura também contém esboços do aparecimento do jato em velocidades diferentes.

Figura 9 - Comprimento da ruptura do jato e tamanho de gota como funções da velocidade de um jato líquido (água) lançado em tetracloreto de carbono líquido.



Fonte: Kitamura e Takahashi, 1986.

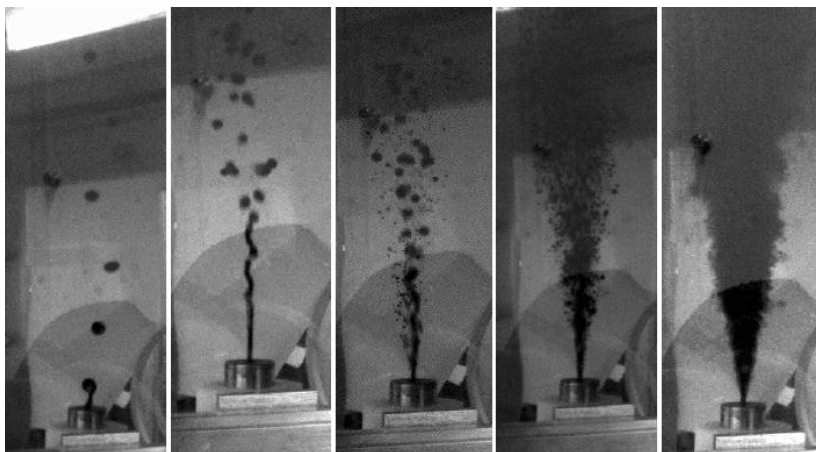
A forma da curva em geral se assemelha à figura anterior, no entanto, a não uniformidade no tamanho das gotas (indicado pela altura das barras em torno dos dados de diâmetro das gotas) aparece muito



mais cedo e pode ser muito mais pronunciada do que na maioria dos sistemas líquido-gás. Com o aumento da velocidade de injeção, há um decréscimo no tamanho das gotas formadas após o ponto de fragmentação. Com base no modo bastante desordenado de separação, Kitamura e Takahashi (1986) propuseram que o processo designado como jato turbulento corresponde à velocidade que excede o valor correspondente à máxima altura do jato, e nessa fase o tamanho das gotas tem uma variação desordenada. O diâmetro do orifício foi de 0,118 cm.

Estudos realizados por Masutani e Adams (2001) ilustram através da Figura 10 a progressão no modo de ruptura do jato de petróleo em meio subaquático. Nesse caso, a velocidade de injeção foi aumentada, enquanto que as outras condições foram mantidas constantes.

Figura 10 - Experimentos de injeção de petróleo com aumento gradativo das velocidades de injeção em meio subaquático. Tamanho do orifício de 2 milímetros e temperatura da água de 18°C.



Fonte: Masutani e Adams, 2001.

A baixas velocidades é produzida uma monodispersão de gotas próximo ao bocal de injeção, com diâmetro maior que a saída do bocal. Com o aumento da velocidade o ponto de fragmentação se distancia do bocal de injeção e a coluna de óleo adquire uma instabilidade sinuosa gerando uma polidispersão de gotas relativamente grandes. A altas

velocidades a superfície do jato torna-se instável e se desintegra perto do bocal em gotas pequenas.

Como consequência da ruptura do jato, o chamado fluxo de gotejamento poderá formar emulsões em situações de confinamento. Na indústria do petróleo existem diversos estudos que tratam de processos de separação, tratamento e transporte de óleo envolvendo a formação de emulsões.

## 2.4 FORMAÇÃO DE EMULSÕES

Devido à captura de óleo se dar em um espaço confinado, e havendo a possibilidade de formação de emulsões, nesse item se faz uma breve apresentação dos mecanismos relacionados a esse fenômeno.

Durante as operações de produção de petróleo, em razão da agitação, pode haver a formação de emulsões (FIORESE, 2004). Define-se por emulsão um sistema líquido heterogêneo formado por dois líquidos imiscíveis com um dos líquidos intimamente disperso na forma de gotículas no segundo líquido (BRADLEY, 1992). Emulsões geralmente envolvem a presença de surfactantes ou agentes tensoativos inibidores da coalescência e promotores da dispersão de gotículas em decorrência da diminuição da tensão interfacial entre os fluidos. As emulsões podem ser fáceis ou difíceis "quebradas" em função das propriedades do óleo, da água e dos seus percentuais. Havendo tempo para decantação, as emulsões podem romper-se naturalmente (FIORESE, 2004).

Segundo Lyons (1996) e Bradley (1992) existem dois tipos de emulsões relacionadas às operações na indústria do petróleo: emulsões óleo/água (emulsões inversas) e emulsões água/óleo (emulsões normais). Emulsões óleo/água são as que possuem óleo como fase dispersa e água como fase contínua e emulsões água/óleo são as que possuem água como fase dispersa e óleo como fase contínua.

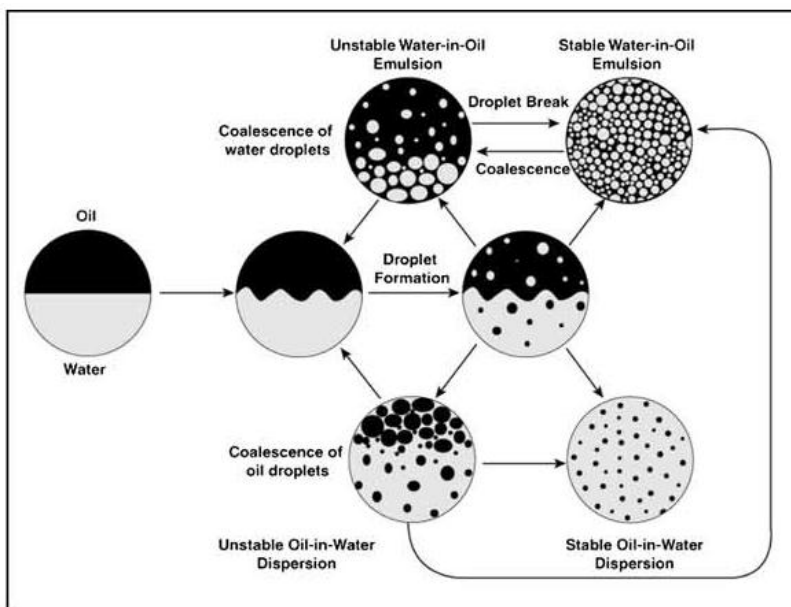
A inversão de fase se refere a um fenômeno em que, com uma pequena alteração nas condições do meio, a fase contínua e a fase dispersa espontaneamente são invertidas. Essa transição é geralmente associada a uma mudança abrupta das taxas de momento, calor e transferência de massa entre a fase contínua e a dispersa, e entre a dispersão e os limites do sistema sólido (BRAUNER e ULLMANN, 2002).

Em uma emulsão, a viscosidade do sistema depende dos fatores: viscosidade das fases contínua e dispersa, temperatura, fração

volumétrica da fase dispersa, o grau de agitação aplicado no sistema, taxa de cisalhamento, presença de partículas sólidas, tamanho médio e distribuição física das gotículas e concentração e natureza de agentes emulsificantes presentes (MILANKOVIC, 2005).

Óleos combustíveis pesados formam, lentamente, emulsões de água em óleo. No entanto, em casos de derrame no mar, muitos óleos brutos de petróleo derramado formam emulsões (a/o) rapidamente. Essas emulsões terão, inicialmente, baixa viscosidade e serão instáveis, formando uma mistura de gotículas de água e petróleo (Figura 11), que será resultado do equilíbrio dinâmico de formação e desagregação da emulsão (DALING *et al.*, 2003).

Figura 11 - Esquema dinâmico de dispersão/emulsão e coalescência das gotículas de óleo e água no mar.



Fonte: Daling *et al.*, 2003.

Conforme Daling *et al.* (2003), experimentos usando um amplo espectro de óleos revelaram que as propriedades físico-químicas dos óleos e as condições de lançamento são determinantes fundamentais da

taxa de formação de emulsões, para as propriedades reológicas da emulsão formada e para a taxa de dispersão natural no mar.

Em casos de vazamentos em águas profundas, a captura do óleo pode possivelmente mostrar a presença de emulsão. Devido à alta taxa de transferência de quantidade de movimento, aos limites impostos pelo aparato de captura, dentre outros fenômenos, a emulsão se comportará de acordo com algumas das diferentes formas esquematizadas na Figura 11. Neste estudo, a presença de emulsão também será levada em conta nos aspectos qualitativos e quantitativos de volume de óleo capturado.

#### **2.4.1 Dispersão do óleo no meio subaquático e coalescência das gotas**

Em uma situação de captura subaquática de óleo vazante a eficiência na separação das fases água/óleo por sedimentação gravitacional depende do tamanho das gotas de óleo dispersas na fase contínua (ambiente marinho), da diferença de densidade entre os líquidos, entre outros fatores. A separação de fases pode tornar-se difícil quando as gotas da fase dispersa são muito pequenas, e altamente complicada no caso do petróleo quando elas são cobertas por camadas de impurezas, como asfaltenos e resinas (EOW, 2002).

No caso da possível formação de emulsões por fluxos turbulentos causados pela agitação no interior do aparato de captura, o conhecimento sobre o tamanho e distribuição das gotas e/ou bolhas de óleo na água pode possibilitar prever as condições finais de separação da emulsão formada.

Quando uma gota e/ou bolha é pressionada por uma força externa (por exemplo: empuxo ou ação de um fluxo laminar ou turbulento) contra uma grande interface líquida, ou contra uma outra gota, podem ocorrer diferentes comportamentos na coalescência, dependendo das características físico-químicas do sistema (tipo e concentração do agente tensoativo, regime hidrodinâmico, interações moleculares, presença de uma estrutura sólida impondo limites aos fluxos etc).

É de especial relevância para estimativa do tempo de separação de fases de um sistema que apresenta uma emulsão instável, o conhecimento da influência do tamanho da gotícula sobre o tempo de coalescência. Algumas evidências experimentais a este respeito têm sido relatadas por um grande número de autores na literatura (BASHEVA et al. 1999).

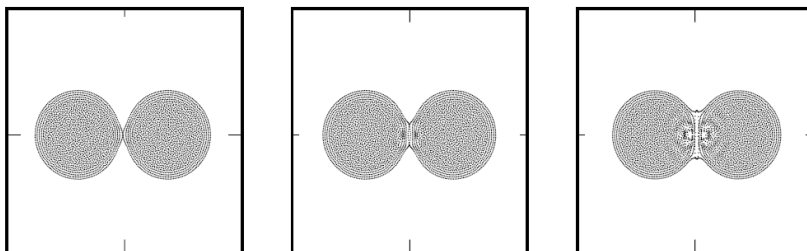
De acordo com estudos de Dickinson *et al.* (1998) apud Basheva et al.(1999) na realização de experimentos com emulsões apresentado gotículas de diferentes tamanhos, foi observado que as gotículas maiores

rebutam mais rápido do que as mais pequenas. Dependendo do tamanho da gota o comportamento da coalescência varia e se manifesta com uma dependência do tempo de vida funcional da gota em função do seu raio.

Ivanov e Kralchevsky (1997) apresentaram uma previsão teórica de que o tempo para a coalescência das gotas está ligado ao fluxo hidrodinâmico na interface dos fluidos. Esse efeito está relacionado com a deformabilidade da superfície da gota. Gotas maiores são deformadas mais facilmente por forças hidrodinâmicas do que gotas pequenas, dessa maneira as gotas de tamanho maior têm mais facilidade em coalescer.

Quando um par de gotas colide numa dispersão líquido - líquido, as interfaces que separam as gotas da fase contínua se distorcem para formar uma lamela plana, drenando o líquido das gotas até uma determinada espessura crítica, antes de finalmente romper e levar à coalescência. A taxa de drenagem pelo filme vai, então, determinar a taxa de coalescência. Quando as gotas se tocam, as forças de tensão superficial dirigem um fluxo para o ponto de contato para formar uma minúscula ponte líquida. Este fenômeno está representado na Figura 12.

Figura 12 - Gotas coalescendo com a formação da lamela e a drenagem do líquido das gotas até uma determinada espessura crítica, antes do rompimento e coalescência.



Fonte: Kufas, 2008.

Nem toda colisão leva necessariamente à coalescência. Diversos modelos existem para descrever quando uma colisão leva à coalescência e quando isso não acontece. Para a coalescência acontecer, as partículas têm de permanecer em contato umas com as outras por um tempo suficientemente longo para que a película de líquido entre elas possa atingir o tamanho crítico necessário para rompê-la. Isto é um requisito comum para todos os modelos. Isto significa também que a taxa de

afinamento do filme é um parâmetro para a ocorrência de coalescência (KUFAS, 2008).

Quando duas gotas colidem, existem diversos resultados possíveis, dependendo da energia cinética da colisão, os tamanhos das gotas envolvidas, o parâmetro de impacto e as propriedades dos fluidos. Todos estes fatores podem ser parametrizados em termos adimensionais através do número de Reynolds ( $Re$ ), número de Weber ( $We$ ) e o parâmetro de impacto  $\chi$  que para igual tamanho de gotas são definidos como:

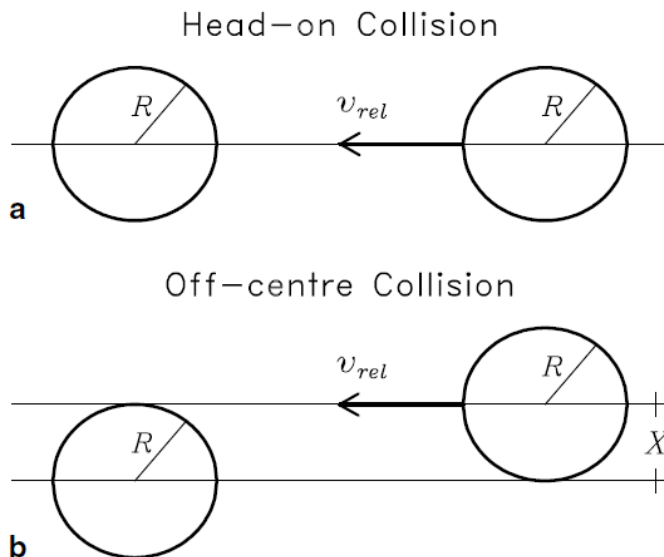
$$Re = \frac{\rho v_{rel} D}{\eta}, \quad We = \frac{\rho v_{rel}^2 D}{\sigma}, \quad \chi = \frac{X}{D}$$

em que  $\rho$ ,  $\eta$  e  $\sigma$  representam a densidade, viscosidade de cisalhamento e a tensão superficial do fluido (gota), respectivamente,  $v_{rel}$  é a velocidade relativa das gotas em colisão,  $D$  é o diâmetro e  $X$  é a projeção da distância de separação entre os centros de colisão normal ao vetor de velocidade relativa e dá uma medida do grau em que a colisão está fora do centro.

Para as colisões chamadas *Head-on collision* (Figura 13(a)) com o aumento do  $We$ , o impacto pode resultar em coalescência permanente, ou coalescência temporária seguida de separação reflexiva em duas ou mais gotas. Foi descoberto que esses limites dependem do líquido e da pressão do gás circundante.

Como representado na Figura 13(a), uma colisão frontal refere-se ao caso em que o vetor velocidade relativa coincide com os centros das gotas rendendo  $X = 0$  e, portanto,  $\chi = 0$ . Um modelo simples para colisão fora do centro é obtido por deslocamento do centro da gota incidente na direção vertical a uma distância igual ao raio  $R$ , resultando em um parâmetro de impacto adimensional  $\chi = 0,5$  (Figura 13 (b)) (MELEÁN e SIGALOTTI, 2005).

Figura 13 - Esquema de (a) Head-on Collision e (b) Off-centre Collision. Modelos de colisão em que uma das duas gotas está em repouso.



Fonte: Meleán e Sigalotti, 2005.

Em vazamentos subaquáticos, dependendo da taxa de vazamento, pode ocorrer um fluxo laminar e/ou um fluxo disperso turbulento de óleo com escoamento na forma de gotas dentro da fase contínua (água). Neste tipo de fluxo as gotas dispersas podem interagir com os vórtices turbulentos, causados pelo escoamento ascendente de óleo (vazamento) no meio subaquático, influenciando o comportamento e ascensão do óleo de muitas maneiras diferentes (KUFAS, 2008). Todos esses comportamentos fluidodinâmicos, desde o ponto de vazamento até a captura e preenchimento com óleo do reservatório de coleta irão influenciar na formação de emulsão e no processo de coalescência até a separação de fases.

## 2.5 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A busca por abordagens analíticas para problemas envolvendo vazamentos de óleo tem se tornado uma alternativa importante. Modelos computacionais são comumente usados para tomar decisões

relacionadas a controle e contenção de vazamentos de óleo durante emergências (YAPA e ZHEING, 1998).

Um componente importante de um plano para o resgate de petróleo é a utilização de uma ferramenta que possibilite simular o comportamento do óleo liberado acidentalmente em águas profundas. Dessa maneira é possível reproduzir o comportamento experimental dos fluidos em estudo, além das condições operacionais que muitas vezes não podem ser estabelecidas em laboratório.

Antes de se escolher um *software* como ferramenta base, vários aspectos devem ser avaliados. Por exemplo, a facilidade de uso, a capacidade de gerar geometrias e malhas, a eficiência e robustez das técnicas numéricas implementadas e, por fim, a amplitude dos problemas físicos que o pacote pode resolver (SILVA, 2008).

Atualmente existem diversos *softwares* de modelagem matemática capazes de simular diferentes fenômenos físicos. Para a simulação de vazamentos de óleo no mar, estes *softwares* se tornam uma importante ferramenta que pode auxiliar no estudo do comportamento dos fluidos.

Para o escoamento bifásico, o acompanhamento da interface é objeto de interesse. A resolução da interface simulada visa descrever em detalhes a sua deformação e evolução na separação entre os fluidos. A principal dificuldade da resolução da interface simulada é a interface móvel cuja forma é parte da solução. Lembrando que quantidades físicas como densidade, viscosidade e pressão são descontínuas ao longo da interface (WÖRNER, 2003).

Uma grande variedade de modelos e métodos numéricos tem sido aplicados a diferentes problemas computacionais de fluxo de fluidos. No caso do presente trabalho foram utilizados os modelos *Phase Field* e *Level Set* para a modelagem do sistema em estudo e o Método dos Elementos Finitos para a discretização e resolução das simulações através do software COMSOL *Multiphysics v. 4.2a*.

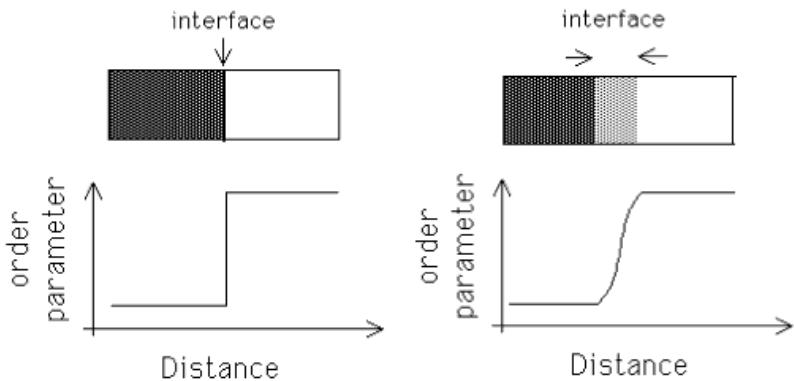
### **2.5.1 Modelo *Phase Field***

No modelo *Phase Field* a interface entre dois fluidos é tratada como uma fina camada de mistura, através da qual as propriedades físicas variam de forma abrupta, mas contínua. As propriedades e a evolução da camada interfacial é governada pela variável *Phase Field* ( $\phi$ ) que faz o papel de um parâmetro de ordem, obedecendo a equação de Cahn-Hilliard (YUE *et al.*, 2006).



A variável adimensional *Phase Field* atribui dois valores distintos para cada uma das fases  $((1+\phi)/2)$  e  $(1-\phi)/2)$  que define a fração de volume para cada uma delas, com uma mudança suave entre os dois valores na zona da interface, que é de natureza difusa com uma largura finita. A interface nessa descrição matemática é representada na Figura 14.

Figura 14 - Interface definida (esquerda) e interface difusa (direita).



Fonte: Bhadeshia, 2010.

A Equação 1 de Cahn-Hilliard que governa a evolução da variável *Phase Field* pode ser visualizada abaixo.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \delta \nabla G \quad (1)$$

onde  $G$  é o potencial químico, ou seja, a força motriz para a difusão das fases e  $\delta$  a mobilidade. A mobilidade determina a escala de tempo da difusão de Cahn-Hilliard e deve manter uma espessura interfacial constante não amortecendo excessivamente os termos convectivos (YUE *et al.*, 2006). A mobilidade é determinada por um parâmetro de ordem (Figura 14) que é função da espessura da interface. O potencial químico é dado pela Equação 2:

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

onde  $\lambda$  é a densidade de energia da mistura, ou seja, a quantidade de energia armazenada na interface por unidade de volume e  $\varepsilon$  é a largura capilar que é dimensionada com a espessura da interface.

O modelo *Phase Field* reduz a equação de Cahn-Hilliard a duas equações de ordem inferior, ou seja, a equação diferencial parcial (EDP) inicial de 4º ordem é decomposta em duas EDP's de 2º ordem, conforme as Equações 3 e 4, sendo  $\psi$  uma variável auxiliar da variável *Phase Field* (COMSOL *Multiphysics v. 4.2a*, 2011).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \frac{\gamma^\lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi \quad (3)$$

$$\psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1)\phi \quad (4)$$

### 2.5.2 Modelo *Level Set*

No modelo *Level Set* a interface é representada por um isocontorno de uma função global definida, a função *Level Set*  $\phi$ . A  $\phi$  se torna igual a 0 em um domínio e igual a 1 no outro, onde através da interface, existe uma transição suave entre esses dois valores. A interface é definida pelo isocontorno de 0.5, onde o padrão da  $\phi$  é definida para ser uma função de distância deste isocontorno (COMSOL *Multiphysics v. 4.2a*, 2011).

O mecanismo da advecção no modelo *Level Set* não é feito de modo conservativo, isto implica que a zona delimitada pelo conjunto de nível 0 não é conservada (OLSSON e KREISS, 2005). O movimento é analisado por convecção dos “valores” (níveis) da função, com o campo de velocidade  $\mathbf{u}$ . A Equação 5 é a equação elementar que governa o sistema (OSHER e FEDKIW, 2001).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (5)$$

No COMSOL, o modelo *Level Set* usa um reinicializador, que conserva o método para descrever a convecção na interface entre fluidos, modificando a equação elementar de acordo com a Equação 6:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = \chi \nabla \cdot \left( \zeta \nabla \varphi - \varphi (1 - \varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) \quad (6)$$

Os termos do lado esquerdo fornecem o movimento correto da interface, enquanto que os termos do lado direito são necessários para a estabilidade numérica. O parâmetro  $\zeta$ , determina a espessura da região onde a  $\varphi$  varia de zero a um, e é tipicamente da mesma ordem que o tamanho dos elementos da malha. Pelo padrão,  $\zeta$  é constante dentro de cada domínio e é igual ao maior valor do tamanho da malha, dentro do domínio total.

O parâmetro  $\chi$  determina a quantidade de reinicializações ou estabilizações da  $\varphi$ . Esse parâmetro precisa ser ajustado para cada problema específico. Se  $\chi$  for muito pequeno, a espessura da interface não pode não se manter constante, e oscilações podem aparecer por causa de instabilidades numéricas. Por outro lado, se  $\chi$  for muito grande, a interface se move de forma incorreta. Um valor adequado para  $\chi$  é a magnitude máxima do campo de velocidades  $\mathbf{u}$ . No caso do presente estudo, o isocontorno 0,5 da  $\varphi$  define a interface entre os fluidos da seguinte forma:

Quando  $\varphi = 0$ , corresponde ao óleo;

Quando  $\varphi = 1$ , corresponde à água.

Paralelamente à definição da interface, o método usa um suavizador de densidade e viscosidade que é definido a cada valor da interface através das Equações 7 e 8:

$$\rho = \rho_{\text{óleo}} + \left( \rho_{\text{óleo}} - \rho_{\text{água}} \right) \varphi \quad (7)$$

$$\mu = \mu_{\text{óleo}} + \left( \mu_{\text{óleo}} - \mu_{\text{água}} \right) \varphi \quad (8)$$

### 2.5.3 Método dos Elementos Finitos (FEM)

O processo de subdividir os sistemas em seus componentes ou “elementos” individuais e depois reconstruir o sistema original desses componentes para estudar seu comportamento é um caminho natural de procedimento do engenheiro e do cientista.

Em muitas situações um modelo adequado é obtido usando um número finito de componentes bem definidos. Devemos expressar esses problemas discretamente. Com o advento dos computadores digitais, problemas discretos podem geralmente ser resolvidos de maneira facilitada, mesmo se o número de elementos for muito grande. Como a capacidade dos computadores é finita, problemas do contínuo podem somente ser resolvidos com exatidão por manipulação matemática. A disponibilidade de técnicas matemáticas para soluções exatas geralmente limitam as possibilidades de situações mais específicas.

Para superar a intratabilidade dos diferentes tipos de problemas do contínuo, vários métodos de discretização tem sido, de tempos em tempos, propostos por engenheiros, cientistas e matemáticos. Todos envolvem uma aproximação que esperançosamente, abordam no limite a verdadeira solução continuada (ZIENKIEWICZ *et al.*, 2005).

O método dos elementos finitos é uma técnica numérica para resolver equações diferenciais parciais (PDE's). Sua primeira característica essencial é que o campo contínuo, ou domínio, é subdividido em células, chamadas elementos, que formam uma malha. Os elementos possuem diferentes formas e podem ser retilíneos ou curvos. A malha não precisa ser estruturada. Com malhas não estruturadas e células curvas, geometrias complexas podem ser criadas com facilidade. Essa importante vantagem do método não é compartilhada pelo método das diferenças finitas (FDM) que precisa de uma grade estruturada, no entanto pode ser curva. O método dos volumes finitos (FVM), por outro lado, tem a mesma flexibilidade geométrica do que o FEM.

A segunda característica do FEM é que a solução do problema discretizado é assumida a priori para se ter uma forma prescrita. A solução tem que pertencer a uma função espaço, que é construída variando os valores de função de uma forma determinada, em instância linearmente ou quadraticamente, entre valores nos pontos nodais. Os pontos nodais ou nós são pontos típicos dos elementos, tal como vértices. Devido a essa escolha, a representação da solução é fortemente ligada à representação da geometria do domínio. Essa ligação, por exemplo, não é tão forte no FVM.

A terceira característica essencial é que o FEM não busca uma solução da PDE em si, mas para uma solução da forma integral da PDE. A forma integral mais geral é obtida pela formulação residual ponderada. Por essa formulação o método adquire a habilidade de incorporar naturalmente condições de contorno diferenciais e permite facilmente a construção de métodos com maior ordem de precisão. A facilidade de se obter uma maior ordem de precisão e de fácil implementação de condições de contorno formam a segunda vantagem importante do FEM. Com respeito à precisão, o FEM é superior ao FVM, onde uma formulação com precisão de ordem superior é bastante complicada.

A combinação da representação da solução numa dada função espaço, com uma formulação integral tratando rigorosamente as condições de contorno, fornece ao método uma extremamente forte e rigorosa fundamentação matemática (WENDT e ANDERSON, 2009).

## 2.6 EXPERIMENTOS E SIMULAÇÃO DE VAZAMENTOS SUBMERSOS

Aliadas às simulações que utilizam modelos computacionais, existem referências de diferentes experimentos práticos com óleo realizados em diferentes partes do mundo. Contam-se desde análises laboratoriais para caracterização física e química dos óleos, passando por laboratórios de testes em bancadas e em escala mediana para avaliação do comportamento do óleo em vazamentos, até a realização de derramamentos experimentais de pequenos volumes de óleo no mar.

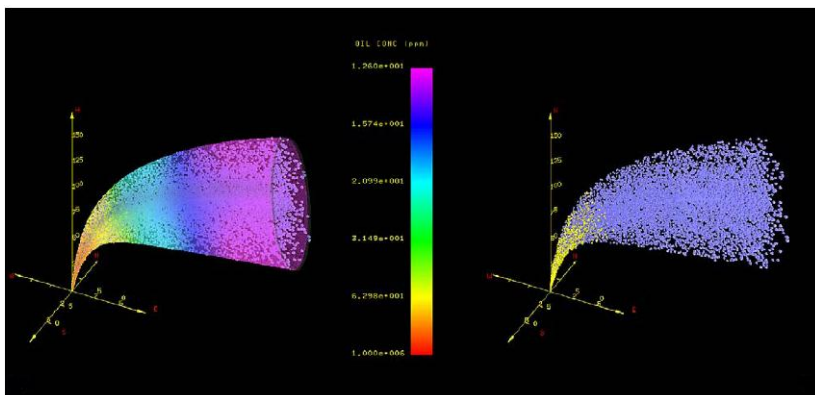
Em geral, no que diz respeito à simulação de jatos e plumas, os principais modelos numéricos utilizados são modelos do tipo  $k-\varepsilon$  turbulentos ou modelos integrais. Modelos integrais são caracterizados por hipóteses de arraste que tornam possível o fechamento das equações jato/pluma sem turbulência. Os modelos integrais podem ser classificados em eulerianos e lagrangeanos. Segundo Yapa e Zheng (1998), os modelos integrais eulerianos simulam jatos flutuantes baseados em um conjunto de volumes de controle fixos no espaço e os modelos integrais lagrangeanos tratam jatos flutuantes como uma série de elementos móveis sem interferência.

Os autores citados acima desenvolveram um modelo numérico tridimensional baseado no método integral de Lagrange para simular derramamentos de óleo que inicialmente comportam-se como jatos ou plumas. Para a descrição do problema físico algumas equações na forma

diferencial foram requeridas; o método numérico utilizado foi o de diferenças finitas na forma lagrangeana. O modelo considerou forças de arraste e cisalhamento e obteve êxito ao simular o comportamento de óleo e também uma mistura óleo/gás em águas profundas.

Em outro estudo, com o objetivo da visualização tri-dimensional de plumas multi-fase (óleo/gás/hidrato), um modelo utilizando o *software* OpenGL, foi utilizado por Chen e Yapa (2004). A Figura 15 mostra a simulação com o raio de abrangência do jato/pluma (em formato cônico) com a fase dispersa e também a fase dispersa sem o raio de abrangência.

Figura 15 - Resultados de simulação com o raio de abrangência do jato/pluma (esquerda) e somente a fase dispersa (direita).



Fonte: Chen e Yapa, 2004.

A profundidade para esse caso foi de 700 metros e os dados de entrada utilizados na simulação estão dispostos na Tabela 2.

Através desse estudo, resultados importantes foram obtidos: 1º) a trajetória da pluma em três dimensões; 2º) a variação da concentração de óleo ao longo da trajetória da pluma; 3º) o crescimento da pluma; 4º) a forma como o gás é convertido da fase gás livre para a fase hidrato sólido e vice-versa, e 5º) as transformações na concentração gás/hidrato no interior da pluma.

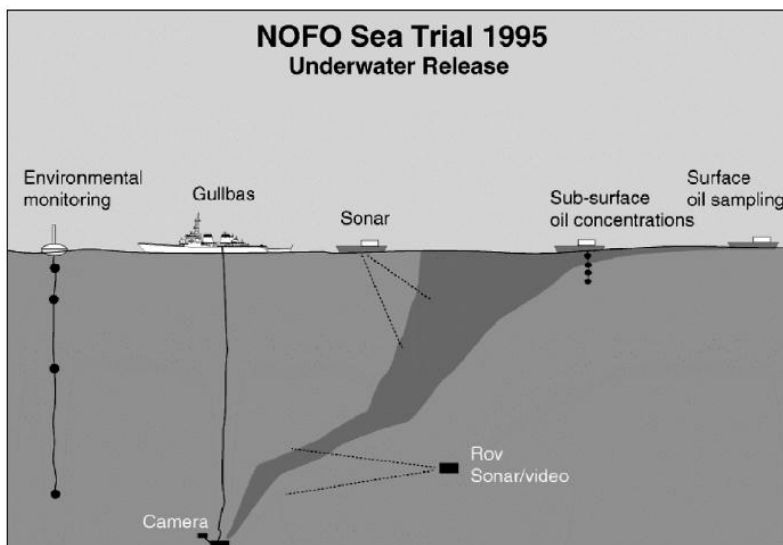
Rye *et al.* (1997), realizaram experimentos no Mar do Norte para simular o óleo derramado de uma ruptura de dutos. A Figura 16 ilustra as atividades relacionadas às simulações de ruptura abaixo da superfície.

Tabela 2: Parâmetros usados por Chen e Yapa (2004) na simulação.

Parâmetros	
Taxa de descarga de óleo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	0,0184
Taxa de descarga de gás ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	3,2752
Razão gás-óleo ( $\text{N.m}^3.\text{s}^{-1}/\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	178
Diâmetro da abertura (m)	0,0889
Temperatura da descarga de óleo ( $^{\circ}\text{C}$ )	80
Densidade da descarga de óleo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	842
Raio inicial das bolhas de gás (m)	$6.10^{-3}$
Densidade do hidrato de metano ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	900

Fonte: Chen e Yapa (2004).

Figura 16 - Ilustração das atividades durante as simulações de ruptura abaixo da superfície.



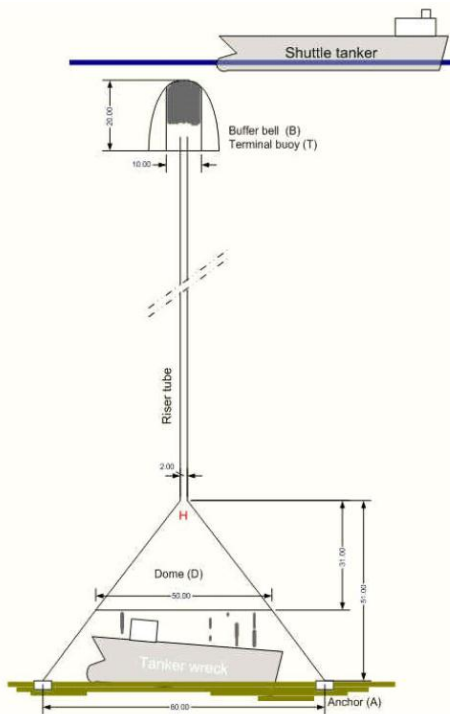
Fonte: Rye *et al.*, 1996.

O primeiro experimento ( $43 \text{ m}^3$  de óleo bruto) simulou uma ruptura a 106 m de profundidade com uma razão gás/óleo igual a 67. Através destes testes eles observaram que a mancha de óleo formada na superfície por lançamentos abaixo da superfície é significativamente maior e mais fina do que se causada por um lançamento na superfície.

Somente 15-20% do óleo liberado foi detectado na superfície. Essa porcentagem depende de fatores como profundidade, razão gás/óleo, tipo de óleo e velocidade de lançamento. As primeiras gotículas de óleo podem ser observadas na superfície do mar 10 minutos após o lançamento. Além disso, o tamanho observado das maiores gotículas chegou a 5 mm de diâmetro.

Recentemente, uma técnica que vem ao encontro do estudo abordado nesse trabalho foi encontrada na literatura. Um procedimento de remoção de óleo a partir de navios naufragados foi desenvolvido. O método é chamado de DIFIS (*Double Inverted Funnel for the Intervention on Ship Wrecks*). O esboço do conceito DIFIS é encontrado na Figura 17.

Figura 17 - Esboço do conceito DIFIS de captura de óleo *offshore*.



Fonte: Cozijn, 2010.



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 (*Dome*), o tubo de ascensão (*Riser tube*) e um compartimento de armazenamento temporário (*Buffer bell*), localizado logo abaixo da superfície da água.

Conforme o artigo publicado por Cozijn (2010) foram realizados testes no *Marin's Offshore Basin*, onde puderam ser impostas diferentes condições ao ambiente marinho. O *Offshore Basin* é um ambiente realístico desenvolvido para testes de modelos utilizados em operações *offshore*. O seu sistema de geração de correntes atinge diferentes profundidades. A combinação de ventos, ondas e ondulações, são geradas a partir de um gerador de ondas, localizados nos dois lados da bacia e com o auxílio de ventiladores móveis. Um piso móvel permite testes em pequenas e grandes profundidades. No *Offshore Basin* existe um espaço onde é possível a instalação de protótipos de sistemas para testes em profundidades que chegam a 3000 metros (MARIN, 2010). Durante os testes o comportamento do sistema operacional DIFIS atendeu às expectativas se mostrando viável; nenhum comportamento instável foi observado em condições extremas de ventos ou ondulações.

Com exceção deste último conceito abordado, a maioria das técnicas e procedimentos relacionados ao combate de vazamentos provenientes de operações *offshore* existentes na literatura, tem como principal objetivo somente retirar o óleo da água do mar, sem recuperá-lo. Ainda assim existe uma grande carência de dispositivos mecânicos para a retirada e recuperação do óleo devido aos altos custos para remover o óleo que chega à superfície.

No campo das simulações computacionais, a maioria dos trabalhos tem o intuito de estudar as características da mancha submarina, tais como seu comportamento e dimensões, a fim de prevenir e diminuir os impactos ambientais, enfatizando somente a retirada do óleo da água do mar e não sua recuperação.

Tendo em vista a presente revisão, concluiu-se que atualmente não existem muitas técnicas e procedimentos disponíveis para o resgate de óleo no foco do vazamento ligadas a operações *offshore* da indústria do petróleo, assim como simulações computacionais relacionadas a esse problema. Essa falta de informações faz com que estudos experimentais e de simulação se tornem uma necessidade para atender aos aspectos de preservação ambiental, de resgate e redução das perdas de óleo.



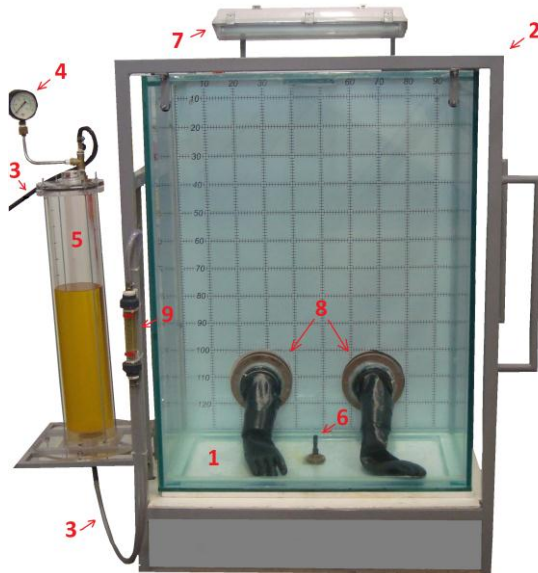
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e procedimentos adotados na realização dos experimentos e simulações. Com o intuito de analisar o comportamento para posterior simulação matemática de jatos de óleo submersos em água e eventual captura dos mesmos em um balão rígido, uma bancada experimental foi construída para a montagem e execução dos ensaios de vazamento.

#### 3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental é composta por um conjunto de materiais necessários para a injeção de óleo em meio subaquático e sua eventual captura por um dispositivo adequado. A Figura 18 mostra a bancada experimental, seguindo-se a descrição de seus componentes.

Figura 18 - Bancada experimental.



1 – Cuba de vidro: construída com vidros temperados de 15 mm de espessura, com dimensões de 130 cm x 100 cm x 50 cm, apresenta um orifício no fundo de 3,5 cm de diâmetro para adaptação de um bocal de

injeção de óleo. Possui dois furos de 11,5 cm de diâmetro na parte traseira da cuba para adaptação de flanges que permitem a fixação de luvas. Essas luvas facilitam a montagem dos experimentos tornando possíveis os procedimentos no fundo do aquário.

2- Carrinho: projetado para acomodar e suportar a cuba de vidro, dotado de rodas, com o objetivo de locomoção para eventuais limpezas e procedimentos como enchimento e esgotamento de água. Possui também suportes para luminária e para o cilindro de armazenamento de óleo.

3- Mangueiras de injeção: suprem ar do cilindro de compressão até o cilindro de armazenamento e óleo do cilindro de armazenamento até o bocal de injeção. Possuem 1/2 polegada de diâmetro.

4- Manômetro: para medição da pressão no cilindro de armazenamento de óleo durante os ensaios experimentais.

5- Cilindro de armazenamento de óleo: construído em acrílico para uma melhor visualização do esgotamento do óleo, com dimensões de 85 cm de altura e 15 cm de diâmetro. Tem o objetivo de armazenar o óleo e injetado-lo para dentro do aquário quando submetido a uma pressão desejada. Possui vedação e capacidade para suportar uma pressão em torno de 2 atm ou  $\sim 30 \text{ lb/in}^2$ , duas tampas superiores, uma maior para manutenção e limpeza e outra menor de 5 cm de diâmetro para a reposição do óleo. Apresenta uma saída no fundo para adaptação da mangueira de injeção de óleo até o bocal de injeção no fundo do aquário.

6- Bocal de injeção: orifício de 1,1 cm de diâmetro que corresponde ao ponto de vazamento submerso.

7- Luminária: composta por duas lâmpadas fluorescentes com o objetivo de fornecer a iluminação necessária para o registro das imagens dos ensaios.

8- Luvas: necessárias para o manuseio dos materiais na montagem dos ensaios no fundo do aquário.

9- Rotâmetro: para medição da vazão de óleo durante os ensaios de vazamento.

O aparato experimental consiste ainda de um cilindro de compressão para a injeção de ar no cilindro de armazenamento do óleo utilizado nos experimentos, registros para o corte e liberação do fluxo de ar e óleo e traseira do aquário graduada para visualização das medidas de altura de gotejamento, referência de dimensões e auxiliar o posicionamento dos materiais utilizados na captura do óleo.

### 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a realização dos experimentos, primeiramente, o cilindro de compressão de ar é acionado, o ar passa pelo manômetro que mede a pressão imposta ao sistema, sendo então pressurizado o óleo contido no cilindro de armazenamento. Assim, o óleo é expulso do cilindro devido à pressão exercida pelo ar em direção ao bocal de injeção passando antes pelo rotâmetro onde são medidas as vazões.

Diferentes vazões são testadas com o intuito de analisar e revelar aspectos relacionados ao comportamento do jato de óleo subaquático, como por exemplo, a estabilidade, fragmentação e dispersão do jato. O estudo também aborda aspectos relacionados aos perfis de velocidade, escoamento, e a acomodação do óleo que se direciona para o balão de captura. Estes aspectos são abordados na discussão dos resultados tanto experimentais como de simulação.

Os valores de velocidade de óleo injetado foram obtidos através da leitura dos dados de vazão no rotâmetro. Os dados de volume injetado e volume coletado foram obtidos através da visualização dos níveis de óleo através das marcações feitas no cilindro de armazenamento e no balão esférico de coleta. Aspectos relacionados à formação e decantação da emulsão formada dentro do balão de captura também foram levados em conta.

Todos os experimentos foram conduzidos em temperatura ambiente ( $\approx 22^\circ$  C) e filmados com uma câmera digital (SONY Handycam HDR-XR550V).

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS UTILIZADOS

Nos experimentos foram utilizados água, óleo de soja e óleo lubrificante (SAE 20w 40). As propriedades intrínsecas ao comportamento fluidodinâmico dos fluidos se referem à densidade,

viscosidade e tensão interfacial. As medições de densidade e viscosidade dos óleos utilizados foram realizadas no Laboratório de Sistemas Porosos (LASIPO) e na Central de Análises, ambas no Departamento de Pós- Graduação em Engenharia Química e Alimentos da UFSC.

As densidades dos óleos foram determinadas em duplicata, utilizando um picnômetro de 10 ml e uma balança digital da marca Bioprecisa modelo FA2104N. A metodologia utilizada foi a divisão da massa pelo volume em temperatura ambiente ( $\approx 22^\circ\text{C}$ ). O valor da densidade ( $\rho$ ) do óleo de soja utilizado é de  $0,877 \text{ g/cm}^3$  e do óleo lubrificante de  $0,820 \text{ g/cm}^3$ .

A viscosidade foi medida utilizando um viscosímetro digital HAAKE Viscotester 6L. As viscosidades do óleo de soja e do óleo lubrificante foram medidas a temperatura ambiente ( $\approx 22^\circ\text{C}$ ) e ficaram em torno 60 cP e 275 cP respectivamente.

A tensão interfacial foi determinada somente para o óleo de soja pelo fato de ser um tipo de óleo que apresenta uma composição mais homogênea sem a adição de diferentes compostos (aditivos) como o óleo lubrificante utilizado em motores. A tensão interfacial entre a água e o óleo é muito variável, pois depende da origem produtora do óleo que pode 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 algo entre a tensão superficial do óleo de soja e o ar ( $28 \text{ mN/m}$ ) e a tensão superficial entre a água e o ar ( $75 \text{ mN/m}$ ). Outro fator, já mencionado neste trabalho, é o fato da presença de sal na água alterar a tensão interfacial entre a água e o óleo.

O método do peso da gota foi utilizado para a determinação da tensão interfacial água/óleo através da Equação 9:

$$\gamma = \frac{m g}{2 \pi r} \quad (9)$$

onde  $m$  é a massa efetiva da gota,  $g$  é a gravidade e  $r$  o raio da pipeta utilizada.

No procedimento adotado colocou-se a água na pipeta graduada, mergulhando sua ponta dentro de um becker com óleo de soja, deixando a gota de água crescer dentro do becker com óleo e obtendo-se a massa da gota de água por diferença de pesagem. Foi tomado o cuidado de se deixar crescer parcialmente a gota de água antes de mergulhar a ponta da pipeta no óleo, para que a mesma não ficasse contaminada.

Após este procedimento, utilizou-se a Equação 9, onde a massa efetiva da gota é a massa da gota medida por diferença na balança menos a massa do líquido deslocado (empuxo). A massa do líquido deslocado foi obtida multiplicando-se a densidade do óleo pelo volume da gota formada. O procedimento adotado foi realizado em duplicata e o resultado foi uma média entre dois valores que ficou em 33 mN/m. Esse valor foi utilizado na realização das simulações.

A escolha do óleo de soja e do óleo lubrificante para utilização no presente trabalho se justifica pela disponibilidade, aspecto visual e por apresentarem propriedades bastante diferenciadas (em especial a viscosidade), permitindo obter resultados de alcance mais geral com possibilidade de atender aos fenômenos observáveis com uma substância tão heterogênea e variável quanto o petróleo.

### 3.4 EQUAÇÕES GOVERNANTES E MODELOS PARA O SISTEMA A SER SIMULADO

As simulações são desenvolvidas em um PC com processador Intel Core i7 de 8 GB (RAM) através do *software COMSOL Multiphysics 4.2a*. São consideradas as principais propriedades físicas dos fluidos, como: massas específicas, viscosidades e tensão interfacial, além dos efeitos de pressão próprios das condições operacionais.

Assume-se escoamento laminar e isotérmico (22°C) para todas as simulações realizadas neste trabalho. A discretização das equações diferenciais que regem o fenômeno é feita através da técnica dos elementos finitos.

Em um sistema bifásico, os campos de velocidades e pressão para os fluidos em regime laminar em presença da força gravitacional são descritos pelas equações de Navier-Stokes e equação da continuidade da massa que em notação vetorial são dadas respectivamente, pelas Equações 10 e 11:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{st} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (11)$$

Onde  $\rho$  é a densidade,  $u$  é o vetor velocidade,  $t$  é o tempo,  $p$  é a pressão,  $I$  é o sistema de vetores unitários,  $T$  é a operação transposta da matriz,  $g$  é a aceleração gravitacional e  $F_{st}$  é a tensão interfacial.

Para modelar a interface do escoamento bifásico água/óleo, foi selecionado o modelo *Phase Field* (item 2.5.1) para as simulações realizadas no item 4.5 e o modelo *Level Set* (item 2.5.2) para as simulações do item 4.4 e 4.6 de forma a melhor representar as observações experimentais.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados e o estudo dos aspectos fluidodinâmicos que intervêm no comportamento da fase óleo em meio subaquático com vistas a sua captura. Os ensaios foram desenvolvidos para análise de aspectos referentes ao escoamento do jato, formação de emulsão e drenagem do óleo para a superfície. São observados e comentados alguns aspectos do comportamento do óleo nos experimentos e reproduzidas algumas situações por simulação. Aspectos difíceis de serem visualizados e mensurados experimentalmente, como as intensidades e direções dos fluxos de escoamento dos fluidos, são revelados através das simulações.

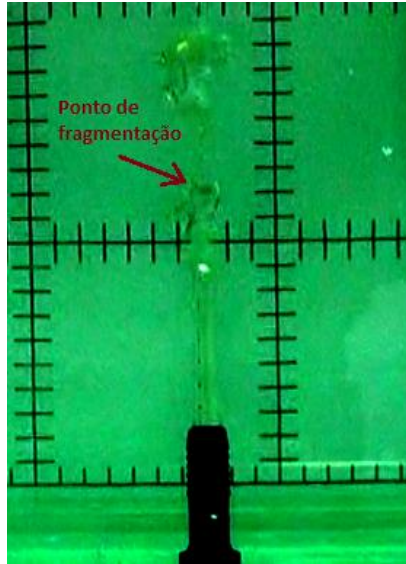
### 4.1 FRAGMENTAÇÃO DO JATO EM MEIO SUBAQUÁTICO

Através da determinação do ponto de ruptura do jato de óleo em função da sua taxa de vazamento, é possível estimar uma altura de segurança no posicionamento de um bocal de captação de maneira a evitar a dispersão de óleo no ambiente marinho.

Para a observação do comportamento do jato de óleo e sua fragmentação, um experimento onde se varia a vazão de vazamento foi concebido. Nestes ensaios foi injetado óleo (soja) em meio subaquático nas vazões de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 5,0 e 6,0 L/min. Essas vazões foram impostas em função da escala do rotâmetro adquirido, apropriado às condições experimentais. Na Figura 19, ilustra-se o vazamento de um jato de óleo a partir do fundo da cuba de vidro cheia de água, conforme relatado no item 3.2 sobre os procedimentos experimentais.

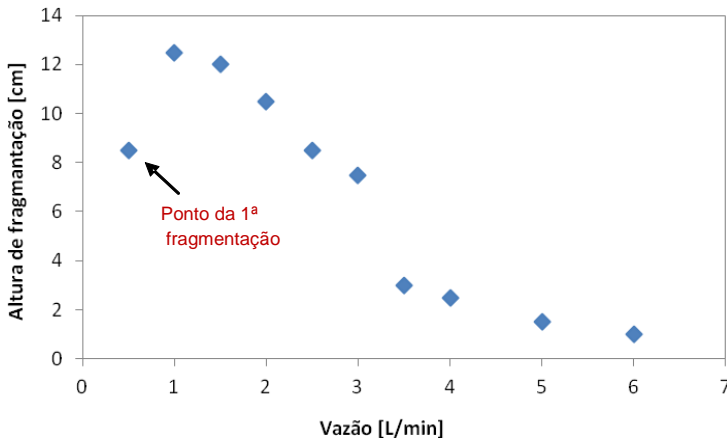
A altura onde se dá a ruptura da coluna de óleo está associada a um mecanismo de instabilidade ao nível da interface água/óleo, dependendo da velocidade de penetração do óleo bem como de suas propriedades intrínsecas (BENTSEN, 1998; DALING *et al.*, 2003).

Figura 19 - Jato de óleo (soja) apresentando uma determinada altura de fragmentação.



Na Figura 20, registram-se os valores experimentais da altura de fragmentação do jato em função da vazão de injeção de óleo.

Figura 20 - Altura de fragmentação do jato em função da vazão de injeção de óleo em meio subaquático.

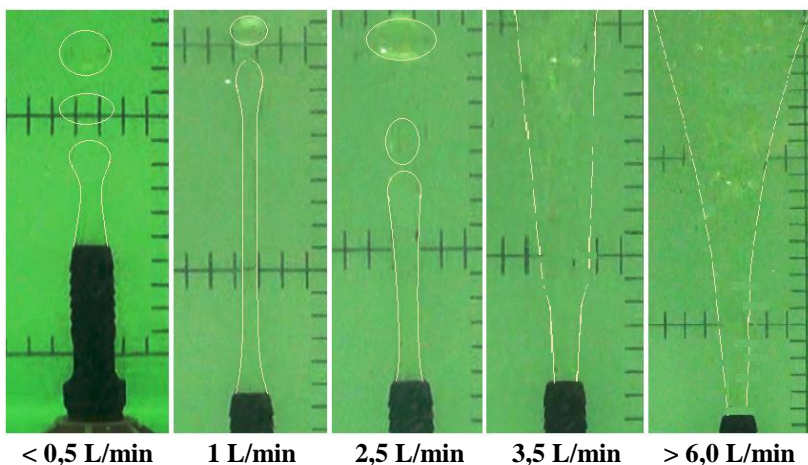


Nesses experimentos a vazão foi bem controlada, com a altura de fragmentação do jato determinada somente após a estabilização de uma vazão fixa na escala do rotâmetro e assim sucessivamente para todas as vazões.

Observou-se que a coluna de óleo formada começa a fragmentar a uma altura de 8,5 cm na vazão de 0,5 L/min e aumenta para 12,5 cm na vazão de 1,0 L/min. A partir desse ponto, com o aumento da velocidade de injeção de óleo a altura de fragmentação começa a decrescer.

Também foram testadas outras duas vazões fora da escala do rotâmetro, uma menor que 0,5 e outra maior que 6,0 L/min. As imagens do comportamento do jato com estas vazões podem ser observadas na primeira e quinta imagem da Figura 21.

Figura 21 - Imagens da variação da altura de fragmentação do jato com o aumento da vazão de injeção.



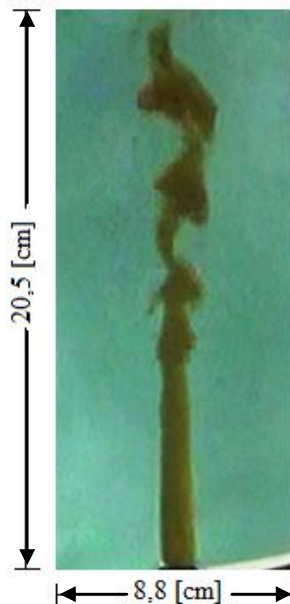
A menor vazão produz um gotejamento próximo ao bocal com a ascensão de gotas monodispersas. Na segunda e terceira imagens, com o aumento da vazão há a variação da altura de fragmentação do jato também na forma de gotas. A partir da quarta imagem, ocorre diminuição no tamanho e aumento da dispersão das gotas que ascendem em direção a superfície. As linhas claras contínuas presentes nessas figuras indicam a posição da interface e as tracejadas demarcam a região de fragmentação do jato em pequenas gotículas com grande instabilidade e sinuosidade no escoamento.

Na última imagem ( $> 6,0$  L/min) a dispersão do jato em gotículas ocorre já bem próximo do bocal. Nesta imagem também se observa um aumento no raio de dispersão associada à elevada vazão de injeção do óleo. Devido a essa polidispersão de gotículas, produz-se uma emulsão de óleo na água. De acordo com estudos de Dasanayaka e Yapa (2009), o tamanho das gotas influencia na velocidade de ascensão e conseqüentemente na trajetória do óleo vazado no meio submarino.

Na comparação deste gráfico com a Figura 10 de Masutani e Adams (2001), comprova-se o mesmo padrão de comportamento, onde existe uma velocidade em que o jato atinge uma altura máxima e depois decresce com o aumento da velocidade, produzindo gotículas que são lançadas por um amplo e crescente raio de dispersão. Esses resultados comprovam que o óleo de soja utilizado no presente trabalho apresenta semelhança de comportamento com aquele da referência acima citada, apoiando a escolha do mesmo.

Testes com o óleo lubrificante também foram realizados, constando-se, como pode ser observado na Figura 22, um padrão diferente de escoamento.

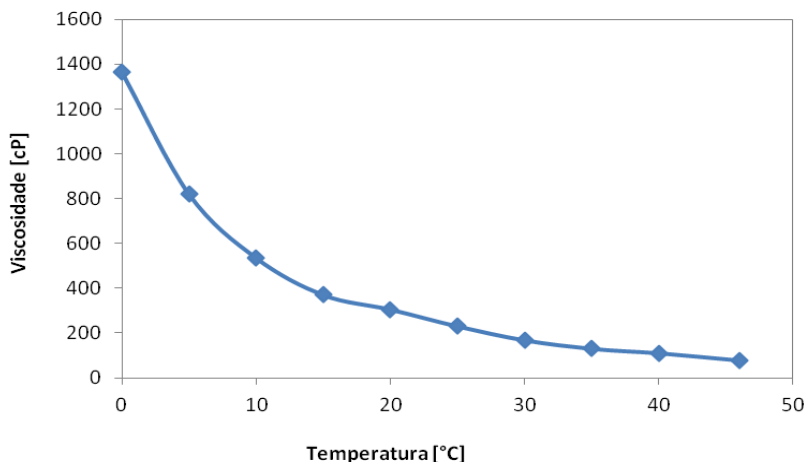
Figura 22 - Comportamento do jato de óleo lubrificante no meio subaquático.



Em uma baixa vazão, observa-se um escoamento sinuoso, sem a fragmentação do jato em gotas, o que normalmente aconteceria com o óleo de soja nessa vazão. Percebe-se o aparecimento da forma em cogumelo na frente de deslocamento da fase óleo seguida de um estrangulamento na base do "chapéu" com formação de uma "seta" para cima, cujas abas se dobram para dentro assim como o próprio "chapéu" que segue para cima. Este comportamento pode estar relacionado à grande diferença de viscosidade existente entre o óleo de soja e o óleo lubrificante.

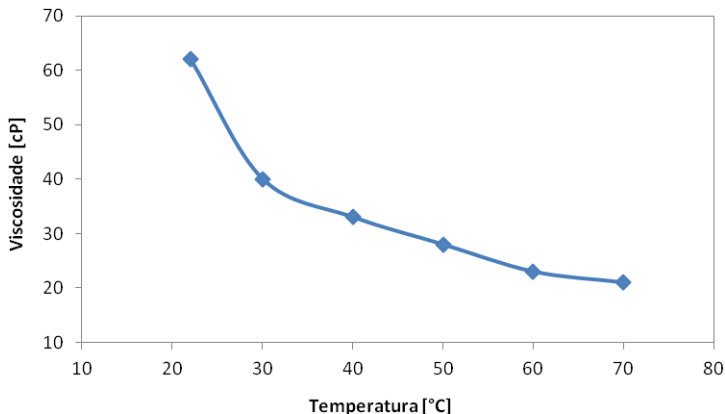
A variação na viscosidade possui grande influência no escoamento dos fluidos, assim, alterações na temperatura do meio devem ser consideradas. Fox e Mc Donald (1992) atestam que a viscosidade aumenta rapidamente com a diminuição da temperatura. Na Figura 23 é mostrado um gráfico com valores da viscosidade do óleo lubrificante em função da temperatura.

Figura 23 - Gráfico da variação da viscosidade do óleo lubrificante em função da temperatura.



Através do gráfico acima é possível perceber que numa faixa de 0°C a 46°C a viscosidade do óleo varia de 1365 a 78 cP. Na Figura 24 a variação da viscosidade do óleo de soja é mostrada, a faixa de abrangência de temperatura foi de 22°C a 70°C.

Figura 24 - Gráfico da variação da viscosidade do óleo de soja em função da temperatura.



Comprovou-se, portanto, grande diferença nos valores de viscosidade para os dois tipos de óleos nas faixas de temperaturas investigadas. Devido às diferenças nas características dos óleos, o estudo do seu escoamento em diferentes temperaturas merece ser investigado. No caso do petróleo, além da grande variação nas suas características próprias do sítio onde se encontra e do tipo de formação natural, deve-se atentar para o fato de que podem se manifestar grandes diferenças de temperatura entre o fundo de poços de exploração e o ponto onde aflora no fundo do mar, passando a partir daí a trocar calor com a água até eventualmente atingir a superfície do mar.

Através da observação do ponto em que o jato (óleo de soja) sofre o rompimento do seu fluxo laminar em forma de gotas, foi possível se obter uma relação entre a altura do ponto de fragmentação e a vazão do jato. Para as condições experimentais testadas, a Figura 20 fornece uma estimativa para a altura de segurança no posicionamento de um bocal de captação do óleo vazado, uma vez que se conheça a vazão de vazamento, evitando-se ou minimizando-se uma possível dispersão de óleo no ambiente marinho.

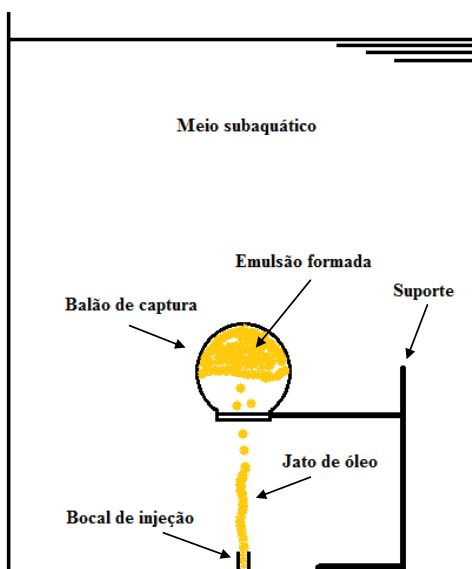
Evidencia-se, portanto, que as instabilidades no escoamento do óleo e o comportamento sinuoso que geram as fragmentações e a formação de gotas variaram de acordo com a taxa de vazamento e as características do óleo. O raio de dispersão de gotas menores produzidas pela injeção de óleo em velocidades elevadas pode variar bastante.

Assim, esse é outro aspecto que merece ser investigado, seja pela dificuldade imposta na captação seja pela tendência à formação de emulsão mesmo no interior do dispositivo de captura do óleo.

#### 4.2 FORMAÇÃO DE EMULSÃO NA CAPTURA DE ÓLEO POR MEIO DE UM BALÃO RÍGIDO DE GEOMETRIA ESFÉRICA

Para a realização desses experimentos foi utilizado um balão esférico de vidro com dimensões de 19,0 cm de diâmetro e com bocal de entrada de 7,7 cm de diâmetro. O balão foi posicionado a uma altura de 8,5 cm em relação ao topo do bocal de injeção conforme a Figura 25.

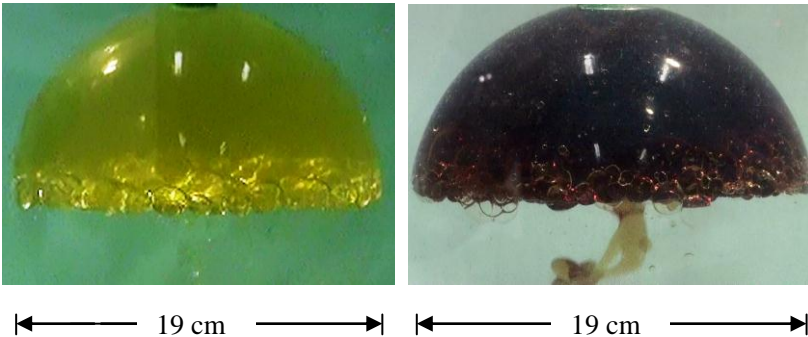
Figura 25 - Esquema do processo de captura de óleo a partir de um balão de forma esférica.



Essa geometria impõe limites ao escoamento do óleo e possibilita uma análise da possível formação de emulsão no interior da esfera de vidro. A ocorrência da formação de emulsão, devido à alta taxa de transferência de quantidade de movimento juntamente com a barreira imposta pelas paredes do balão, possibilita avaliar o comportamento do óleo no que diz respeito à separação das fases água/óleo em situação de confinamento.

Na Figura 26 é mostrado um instante intermediário do enchimento do balão onde se focaliza a interface água/óleo. Neste momento, constata-se a formação de grandes gotas de óleo no nível de separação entre as fases óleo e água tanto para o caso do óleo de soja como para o óleo lubrificante. Adicionalmente, é perfeitamente visível o aparecimento de grandes gotas de água envolvidas por um tênue filme de óleo no caso do óleo lubrificante. Esse fenômeno de emulsificação é regulado pela tensão interfacial existente entre os dois fluidos. Percebe-se essa camada de emulsão na base da região da fase óleo a qual coalesce rapidamente.

Figura 26 - Emulsificação junto à interface água/óleo com óleo de soja (esquerda) e óleo lubrificante (direita).



Para a identificação e comparação do tempo de preenchimento do balão e separação das fases, foram escolhidas três vazões a serem impostas, de acordo com a escala do rotâmetro para injeção de óleo de soja no meio subaquático. Uma vazão menor que 0,5 L/min e outras duas injeções numa vazão intermediária (3 L/min) e máxima (6 L/min).

Devido a um controle manual por meio de um registro até a estabilização de uma vazão fixa no rotâmetro, as vazões foram recalculadas com base no volume do balão de vidro graduado e o tempo de preenchimento através da Equação 12.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (12)$$

onde,  $Q$  é a vazão,  $V$  é o volume preenchido e  $t$  é o tempo de preenchimento. Neste caso, o preenchimento inclui o efeito de emulsão,

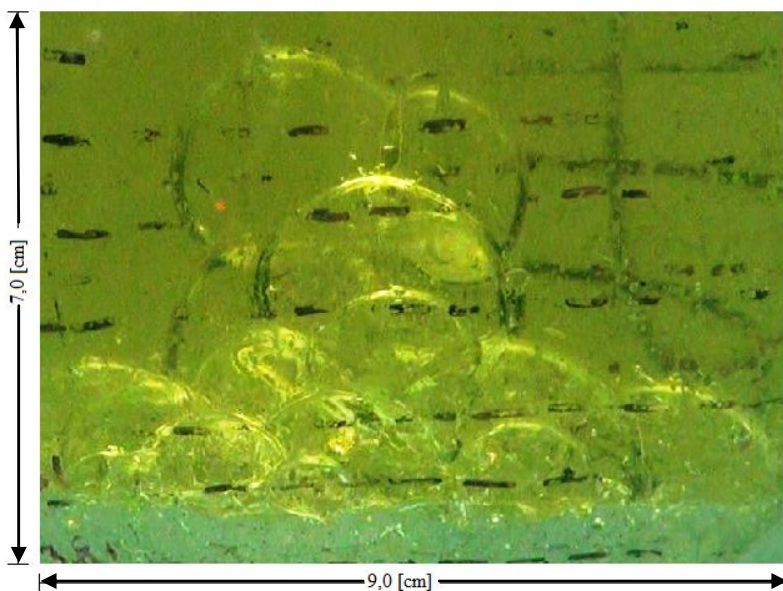


o que eleva o volume aparente em relação ao volume de óleo efetivamente coletado.

Os resultados de vazões médias impostas ao sistema foram de 0,52 L/min, 1,82 L/min e 10,85 L/min. O tempo de preenchimento do balão para o ensaio de menor vazão foi de 437 segundos, para o ensaio de vazão intermediária foi de 125 segundos e para o ensaio de maior vazão foi de 21 segundos. O tempo de separação das fases foi de 13 segundos para a menor vazão, 15 segundos para a vazão intermediária e 36 segundos para a maior vazão.

Nas vazões de 0,52 e 1,82 L/min a emulsão apresentou grandes gotas de óleo na água, separadas por interfaces bem definidas na forma de cachos, estando o balão quase que totalmente preenchido com óleo. Uma constatação muito interessante nestes experimentos foi que, como a altura de posicionamento do bocal de recepção do balão esteve abaixo do ponto em que o jato de óleo fragmenta, o jato encontra e alimenta as gotas de óleo emulsionado no interior do balão, fazendo com que as mesmas inflam conforme se vê na Figura 27. Uma vez que o jato cesse, as grandes gotas diminuem de tamanho e coalescem rapidamente desfazendo-se a emulsão.

Figura 27 - Gotas no interior do balão que inflam com a ascensão de um jato estável (laminar) em direção à fase óleo.

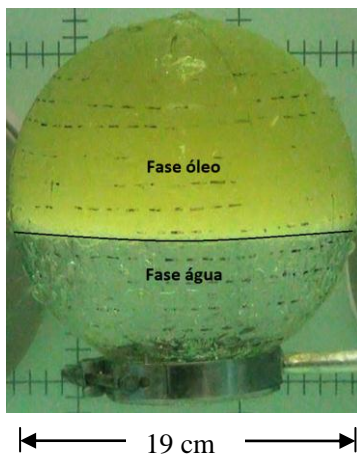


Este aspecto se torna de grande importância, uma vez que quanto maior a bolha formada mais facilitada é a coalescência, fato observado em experimento posterior que apresentou a formação de bolhas menores as quais tomaram um tempo maior para a quebra da emulsão. Portanto se houver a possibilidade de ocorrer esse encontro do jato com a fase óleo, com o bocal do balão posicionado o mais próximo possível do ponto de vazamento, o tempo de coalescência das gotas tenderá a ser reduzido e os efeitos da emulsificação minimizados.

Já para a maior vazão de óleo, o tempo de separação das fases foi maior, devido à formação de gotas ainda menores resultantes da polidispersão causada pelo rompimento do jato. Devido à alta taxa de transferência de quantidade de movimento, o volume de água contido na emulsão foi bem maior para esse caso. O preenchimento do balão se deu de forma totalmente emulsionada.

A quantidade de água dentro do balão no ensaio de maior vazão foi avaliada em 1,2 litros após o tempo de 36 segundos; esse volume ficou disposto na parte inferior do balão após a separação. Isso caracteriza uma perda de eficiência no recolhimento do óleo e que o balão não foi completamente preenchido com óleo, levando a uma vazão de óleo efetiva recalculada menor do que 10,85L/min que, de fato, correspondia ao volume de emulsão. Na parte superior do balão foi encontrado um volume de 2,6 litros de óleo isento de água. A disposição das fases pode ser visualizada na Figura 28.

Figura 28 - Balão de vidro apresentando a separação de fases após tempo de decantação de 36 segundos da emulsão formada.



De acordo com o observado nos experimentos, a formação de emulsão depende da vazão de vazamento. Nas vazões de 0,52 L/min e 1,82 L/min pouca emulsão foi formada e a coalescência das gotas aconteceu rapidamente devido ao tamanho maior das gotas geradas pela fragmentação do jato e também pelo fenômeno constatado na Figura 27. Devido ao preenchimento lento, a água residual ocupou uma porcentagem muito pequena do volume total disponível no balão.

Na vazão de 10,85 L/min o preenchimento do balão ocorreu de forma totalmente emulsionada, com a fuga de algumas gotículas que devido ao seu tamanho são arrastadas e dispersas para o meio em redor. A ocorrência dessa fuga se deu devido ao raio do bocal de entrada não abranger o raio de dispersão do jato de óleo como consequência da excessiva distância (altura) do bocal de coleta em relação ao ponto de vazamento. A formação da emulsão se intensificou em razão da desintegração do jato a caminho do balão.

Gotas pequenas geradas pela instabilidade do jato formaram uma emulsão a qual coalesceu num tempo de 36 segundos, separando a fase óleo da fase água. De fato, a presença da água no interior do aparato de captura não é interessante; neste caso, constatou-se após a separação das fases que a quantidade de água residual dentro do balão foi de aproximadamente 32% do volume total.

Levando-se em conta as possíveis similaridades entre as propriedades do óleo utilizado nesses experimentos (soja) e o petróleo, os aspectos até aqui estudados apontam para uma separação natural e rápida das fases água e óleo a partir de emulsões formadas a pequenas distâncias dos dispositivos de coleta. Ressalta-se, contudo, conforme Daling *et al.* (2003), que as propriedades físico-químicas dos óleos e as condições de lançamento são determinantes fundamentais das características dessas emulsões.

As características das emulsões formadas em cada um dos casos estudados dependeu da vazão imposta no sistema e do comportamento fluidodinâmico do óleo que sofre a influência do meio ao seu redor. Como sugerido por Brauner e Ullmann (2002), mudanças abruptas das taxas de momento entre a fase contínua e a dispersa, e entre a dispersão e os limites do sistema sólido, com a dispersão instável de óleo em água, promovem a coalescência das gotas até a separação das fases.

Segundo as condições do sistema, instabilidades, fragmentações, dispersões e polidispersões da fase óleo podem acontecer. A emulsão formada e sua quebra, com a separação das fases, também sofre a influência da geometria utilizada na captura, pois existem os

contrafluxos da fase água expulsa do balão pela entrada de óleo e que não puderam ser visualizados experimentalmente.

Com um estudo mais abrangente, envolvendo vários casos, seria possível obter uma estimativa a respeito do tempo de separação das fases água e óleo para diferentes vazões. Isso permitiria estabelecer um processo operacional de drenagem do óleo de dentro do balão de captura à medida que o mesmo fosse sendo ocupado sem a captação de água ou emulsão.

Tomando como exemplo o caso do experimento com maior formação de emulsão, a partir do tempo de 36 segundos poderia ser iniciado um processo de drenagem do óleo pelo topo do balão com uma vazão equivalente a do enchimento, mantendo-se um resgate contínuo de óleo.

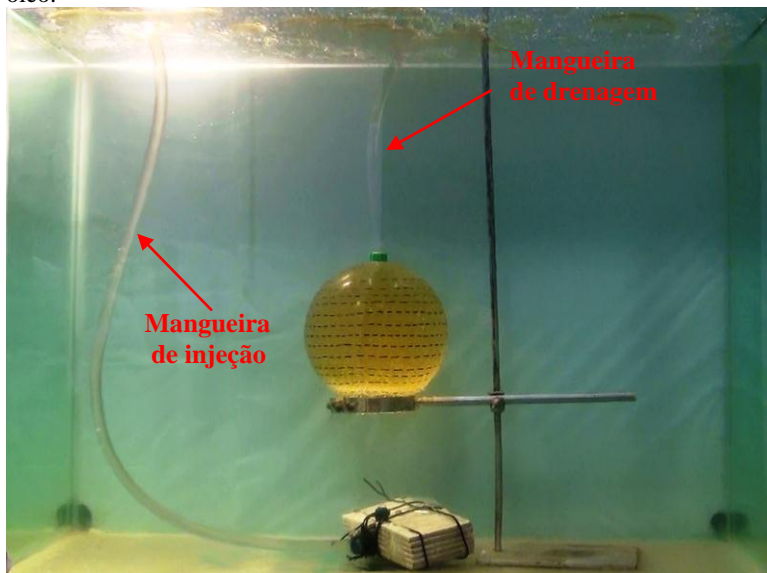
De acordo com a vazão de óleo e um volume parcial ocupado pelo mesmo no interior do balão, seria possível controlar esse processo de maneira a se atingir um regime permanente de drenagem do óleo para a superfície de modo a não ser necessária a substituição do balão nas operações de campo.

#### 4.3 DRENAGEM DO ÓLEO A PARTIR DO BALÃO DE CAPTURA

Para testar a viabilidade de uma operação de resgate do óleo de dentro do balão de captura, foram realizados experimentos de drenagem por efeito sifão a partir do balão de vidro cheio de óleo. Também foi avaliada a ascensão do óleo pela mangueira de drenagem até a superfície da água. Uma observação a ser feita é que estes ensaios experimentais foram realizados ainda em uma fase preliminar dos trabalhos, antes da construção da bancada experimental definitiva, utilizando-se uma cuba de vidro já existente, mas não devidamente aparelhada.

Neste ensaio (Figura 29) foi adaptada uma mangueira de 1/2 polegada para drenagem a partir do topo do balão de vidro graduado e aplicada uma pressão de sucção cerca de 1/3 atm.

Figura 29 - Experimento demonstrando o processo operacional de drenagem do óleo.

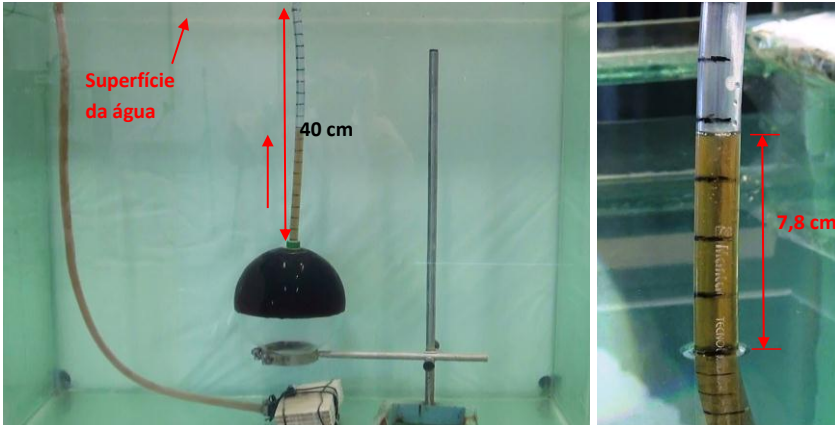


No caso do óleo de soja foi possível a drenagem do óleo a uma vazão próxima a 0,042 L/s, já para o óleo lubrificante foi produzida uma vazão de drenagem de cerca de 0,011 L/s, isso certamente devido à maior viscosidade deste óleo. O processo de drenagem durou aproximadamente 90 segundos para o óleo de soja e 345 segundos para o óleo lubrificante.

Tais resultados indicam que, nas operações de campo, tempos relativamente longos podem ser esperados na drenagem de óleo bruto, dependendo principalmente da viscosidade desse óleo e naturalmente das condições operacionais. Ressalta-se portanto a importância do estudo das características do fluido em questão frente à grande diversidade na composição dos petróleos encontrados em diferentes sítios (Yijie *et al.*, 2010).

Em outro ensaio utilizando óleo lubrificante (Figura 30), procurou-se avaliar a ascensão do óleo pela mangueira de drenagem estando a mesma inicialmente pressurizada com nitrogênio, fechada no topo, de modo a se manter na partida o nível de óleo posicionado na junção entre o balão e a mangueira.

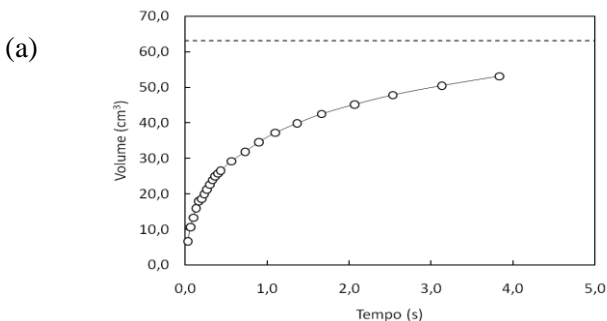
Figura 30 - Ascensão do óleo lubrificante pela mangueira de drenagem a pressão atmosférica.

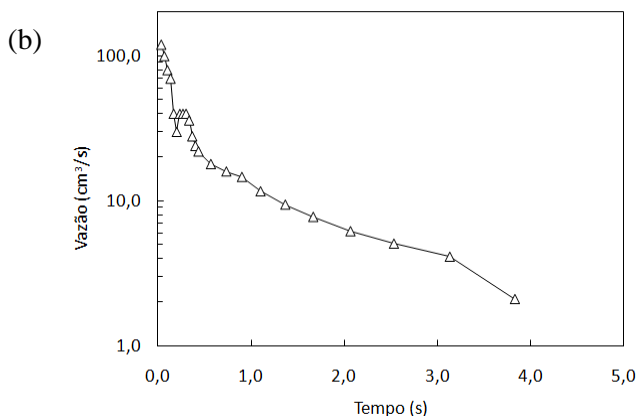


Em certo momento o topo da mangueira é aberto à pressão atmosférica e o óleo ascende pela ação da coluna d'água até uma altura de 7,8 cm acima do nível da água, de acordo com a diferença de densidades entre a água ( $1\text{g/cm}^3$ ) e o óleo ( $0,82\text{g/cm}^3$ ).

A Figura 31 mostra (a) a evolução do volume da coluna de óleo que ascende pela mangueira bem como (b) da vazão instantânea ao longo do tempo. O tempo total de estabilização da coluna de óleo é de cerca de 30 segundos, mas, como pôde ser observado, 80% da altura da coluna é atingida de forma acelerada em 4 segundos, seguindo-se uma etapa assintótica até a altura final de 47,8 cm.

Figura 31 - Ascensão do óleo lubrificante pela mangueira de drenagem ao longo do tempo.





Seguidas vezes a coluna de óleo acumulada foi empurrada de volta ao balão de vidro mediante a retomada da pressurização com nitrogênio a partir do topo da mangueira. Ao final de cada ciclo, sempre que se abria a mangueira à pressão atmosférica, o óleo ascendia da mesma forma, atingindo a altura final de 47,8 cm.

Como já era esperado, devido à diferença de densidades entre o óleo e a água, o óleo apresenta potencial para ascender acima da

superfície um percentual de  $100 \left( \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{óleo}}} - 1 \right)$  em relação a altura da

coluna de água. A dificuldade técnica reside justamente na vazão de óleo a ser obtida na superfície. Superado o problema da vazão, seria possível acoplar a mangueira a um dispositivo flutuante de armazenamento de óleo na superfície do mar, ou mesmo a um navio.

Como relatado no item 2.5.2 da revisão bibliográfica, a tecnologia DIFIS apesar de não apresentar problemas operacionais, conforme relato dos autores, pode ser passível de aprimoramentos. Avaliando os ensaios de drenagem de óleo do balão do presente trabalho, foi possível constatar a viabilidade operacional na acumulação prévia de óleo (no balão), seguida da drenagem somente da fase óleo. Dessa maneira a separação água/óleo aconteceria no fundo do mar e durante a ascensão pela mangueira, não sendo necessária a utilização de um componente de separação de água/óleo próximo à superfície.

#### 4.4 SIMULAÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO DO JATO EM MEIO SUBAQUÁTICO

Para o estudo de simulação do fenômeno da fragmentação do jato observado nos experimentos, foram escolhidas três velocidades lineares de injeção de óleo: 8,7; 17,5 e 26,3 cm/s. Nos experimentos com essas velocidades foram alcançadas alturas de fragmentação de 8,5, 12,5 e 12 cm, respectivamente, já com o desconto da altura do bocal de injeção (5,5 cm).

Para essas simulações foi selecionado o método de resolução *Level Set*, pois apresentou melhor definição da interface, permitindo uma visualização adequada da fragmentação e apresentando comportamento mais próximo ao observado nos experimentos. As simulações foram desenvolvidas no plano bidimensional em regime transiente e escoamento laminar. Os parâmetros de espessura ( $\zeta$ ) e de reinicializações ( $\gamma$ ) da função *Level Set* assim como a tensão interfacial ( $\gamma$ ) foram fixados em  $\text{tpf.hmáx}/6$  (m), 1 (m.s/kg) e 0,0331 (N/m), respectivamente.

Para o domínio das simulações foi considerada somente a área de interesse (área que abrange as alturas de fragmentação do jato) não se incorporando toda a área de 1,3 m x 1,0 m correspondente aos experimentos. Dessa forma, economizou-se malha, obtendo-se uma redução no tempo de cálculo e possibilidade de maior refinamento da malha, dentro das limitações de *hardware* disponível.

O domínio simulado tem dimensões de 20 cm de largura por 25 cm de altura totalizando uma área de 500 cm<sup>2</sup>, impondo-se uma pressão no limite superior do domínio simulado equivalente ao restante da coluna de água no experimento. O diâmetro do bocal de injeção de óleo (1,1cm) foi mantido conforme os experimentos.

Uma condição de parede molhada na face interna do bocal de injeção foi adotada, prescrevendo-se um ângulo de contato da interface água/óleo com a parede de 90°. Este procedimento estabilizou o fluxo de vazamento do óleo principalmente para a menor velocidade, onde se observava uma tendência da água invadir o bocal pela ação da pressão hidrostática da coluna d'água. No modelo *Phase Field* as Equações 13 e 14 governam esta condição.

$$\mathbf{n} \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi = \varepsilon^2 \cos(\theta_w) |\nabla \phi| \quad (13)$$



$$\mathbf{n} \cdot \frac{\delta^\lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi = 0 \quad (14)$$

onde  $\mathbf{n}$  é o vetor normal;  $\varepsilon$  é a escala de comprimento capilar (m) que depende da espessura da interface;  $\phi$  é a variável de campo de fase adimensional;  $\theta_w$  é o ângulo de contato entre a interface e a parede do lado do fluido 2 (tomado igual a  $\pi/2$ );  $\delta$  é a mobilidade ( $\text{m}^3 \cdot \text{s} / \text{kg}$ );  $\lambda$  é a densidade de energia da mistura (N); e  $\psi$  é a variável auxiliar do modelo *Phase Field*.

Para o modelo *Level Set*, a condição de parede molhada reforça a condição de escorregamento  $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}_{\text{wall}} = 0$  e adiciona uma força de atrito na forma da Equação 15.

$$\mathbf{F}_{\text{fr}} = \frac{\mu}{\beta} \mathbf{u} \quad (15)$$

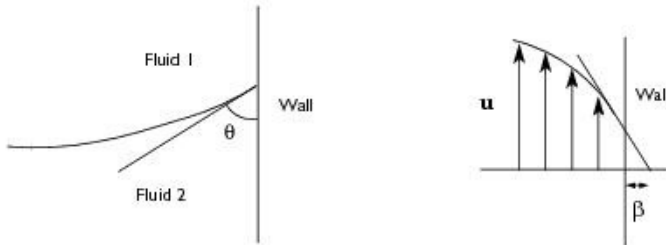
onde  $\beta$  é a extensão do escorregamento.

Para cálculos numéricos é adequado definir  $\beta=h$ , onde  $h$  é o tamanho do elemento local na malha. A condição de contorno não define a componente da velocidade tangencial a zero, entretanto a componente da velocidade tangencial extrapolada é zero na distância  $\beta$  fora da parede (Figura 32). Então é adicionado um termo de contorno conforme a Equação 16.

$$\int_{\partial\Omega} \text{test}(\mathbf{u}) \cdot [\sigma(\mathbf{n}_{\text{wall}} - (\mathbf{n} \cos \theta_w)) \kappa] dS \quad (16)$$

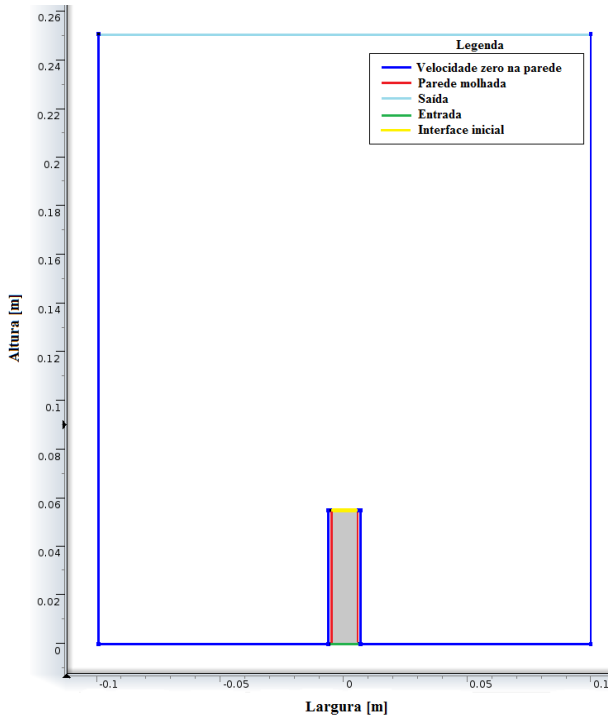
Este termo de contorno é o resultado de uma integração parcial da força de tensão superficial da equação de *Navier-Stokes* que define o ângulo de contato  $\theta_w$  (que é o ângulo entre a interface do fluido e a parede). A Figura 32 também ilustra a definição do ângulo de contato.

Figura 32 - Definição do ângulo de contato  $\theta$  (esquerda) e ilustração da extensão do escorregamento  $\beta$  (direita). Fonte: Documentação do COMSOL Multiphysics 4.3.



Esta condição na modalidade *Level Set* foi então empregada para todas as velocidades de jato simuladas. O domínio de cálculo e as condições de contorno são apresentados na Figura 33.

Figura 33 - Domínio e condições de contorno utilizadas nas simulações.



Nas simulações, para o fluido 1 foram adotadas as características da água que constam na biblioteca do *software* COMSOL e para o fluido 2 as propriedades do óleo de soja determinadas em laboratório.

Para a resolução das simulações foi selecionado o *solver* PARDISO que usa matrizes fatoradas da forma LU, que são armazenadas no disco rígido. Tais matrizes são utilizadas para a resolução dos sistemas lineares durante a simulação e obtenção de soluções numéricas para as equações diferenciais em cada elemento. A utilização deste *solver* implica um maior tempo de simulação, porém há o benefício de se utilizar menos memória, visto que há menos operações a serem realizadas. As simulações empregaram malhas triangulares não estruturadas e cobriram um tempo de 4 segundos de fenômeno com passo máximo de 0,01 segundos.

Devido ao fato de o escoamento do óleo nos experimentos ocorrer no espaço 3D e as simulações serem conduzidas no plano 2D, uma comparação direta entre essas duas situações não é *a priori* adequada. Assim, antes de mais nada, procedeu-se a um estudo de convergência comparando-se os resultados obtidos à medida que a malha era sucessivamente refinada. Justificam-se as simulações em 2D, pois não se logrou convergência ao se utilizar um domínio tridimensional, nem mesmo no plano 2D axissimétrico. Na Tabela 3 estão descritas as características das malhas utilizadas no estudo.

Tabela 3: Características das malhas utilizadas nas simulações.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Tipo triangular não estruturada</b>	<b>Número de elementos</b>	<b>Qualidade dos elementos*</b>
Malha 1	Fina com um refinamento	14.332	0,9781
Malha 2	Extra fina	20.324	0,9881
Malha 3	Fina com dois refinamentos	57.328	0,9781
Malha 4	Extremamente fina	78.863	0,9851

\*A qualidade média dos elementos está inserida numa escala de 0 a 1 em que quanto mais próximo o valor de 1, melhor a qualidade do elemento.

Um total de 12 simulações foi realizado, utilizando-se as quatro malhas apresentadas na Tabela 3 para cada uma das três velocidades. Primeiramente, testou-se uma malha que não fosse demasiadamente grosseira devido à complexidade do problema. Esse problema é de difícil resolução, pois é necessário seguir a interface água/óleo

acompanhando sua evolução local a fim de que se possa determinar o ponto onde se produzirá a descontinuidade que trará como consequência a ruptura do jato. As Figuras 34 a 36 mostram os resultados de simulação para a altura da coluna de óleo até o ponto de fragmentação, percebendo-se que são bastante sensíveis à malha utilizada.

Figura 34 - Alturas simuladas da coluna de óleo contínua ao longo do tempo para a velocidade de injeção de 8,7 cm/s.

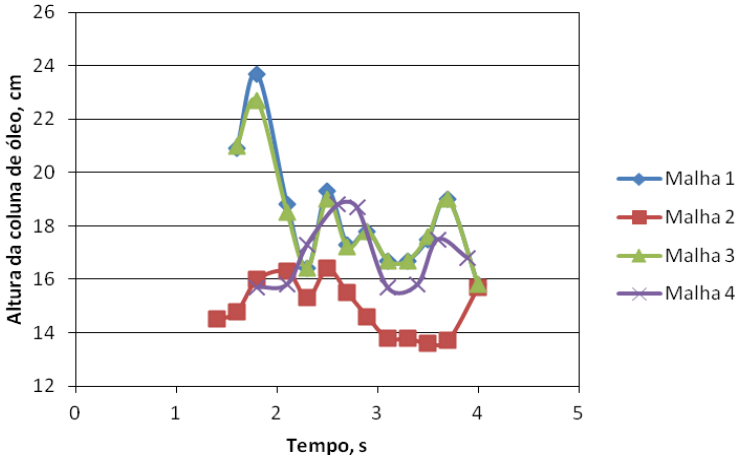


Figura 35 - Alturas simuladas da coluna de óleo contínua ao longo do tempo para a velocidade de injeção de 17,5 cm/s.

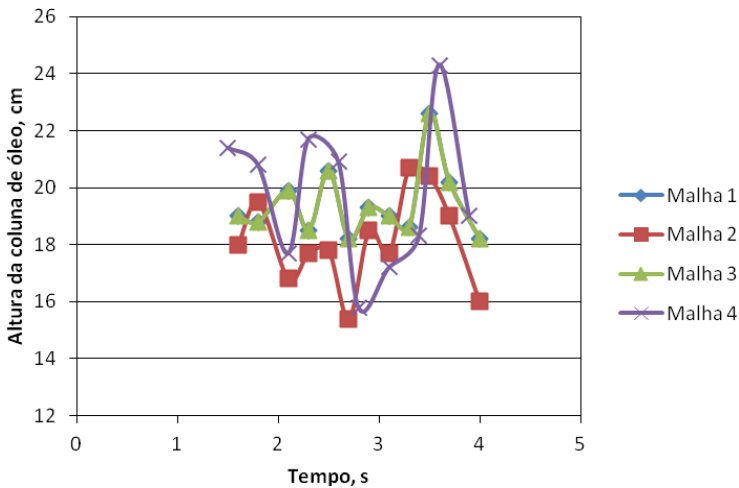
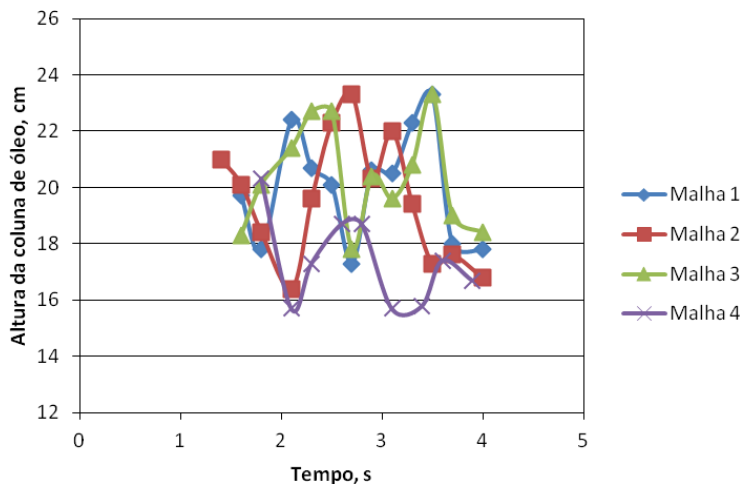


Figura 36 - Alturas simuladas da coluna de óleo contínua ao longo do tempo para a velocidade de injeção de 26,3 cm/s.

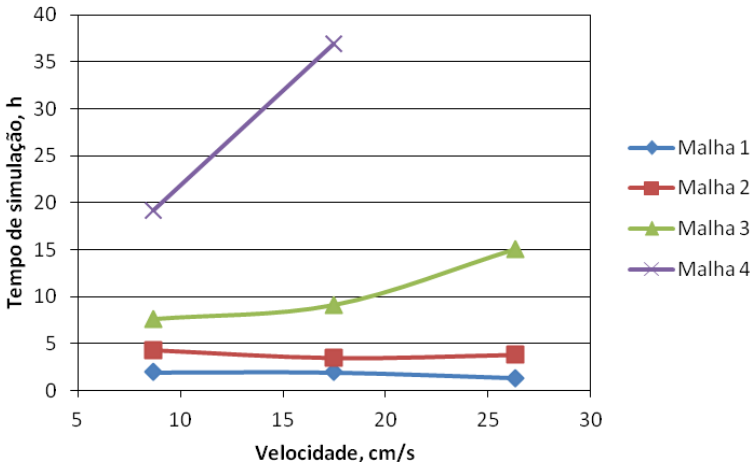


As malhas 1 e 3 apresentaram praticamente o mesmo resultado para as velocidades de 8,7 e 17,5 cm/s e pequenas diferenças para 26,3 cm/s. De fato, essas malhas partiram da mesma malha inicial (denominada configuração fina no COMSOL), fazendo-se dois refinamentos sucessivos. Aparentemente, esses refinamentos pouco influenciaram nos resultados. Seguiu-se testando uma malha de configuração extrafina (malha 2) que produziu resultados com comportamento fluidodinâmico mais semelhante ao observado nos experimentos. Notou-se um comportamento periódico oscilatório na altura da coluna de óleo até o ponto de fragmentação com variação de amplitudes de cerca de 2, 4 e 8 cm correspondentes às velocidades de injeção de 8,7; 17,5 e 26,3 cm/s. O período das oscilações foi de aproximadamente 2,5 s para a menor velocidade, tendendo a diminuir com o aumento da velocidade embora apresentando oscilações menos regulares.

Em um próximo passo, buscou-se refinar ainda mais a malha, utilizando-se uma configuração extremamente fina, mas a qualidade dos resultados não melhorou, além de aumentar grandemente o tempo de cálculo. Particularmente, o padrão oscilatório se mostrou menos regular e coerente, com a variação de amplitudes se reduzindo para a maior velocidade.

A Figura 37 apresenta os tempos de cálculo necessários para a resolução do modelo utilizando as diferentes malhas para as três velocidades simuladas.

Figura 37 - Tempos de cálculo na resolução do modelo utilizando as diferentes malhas para as três velocidades simuladas.



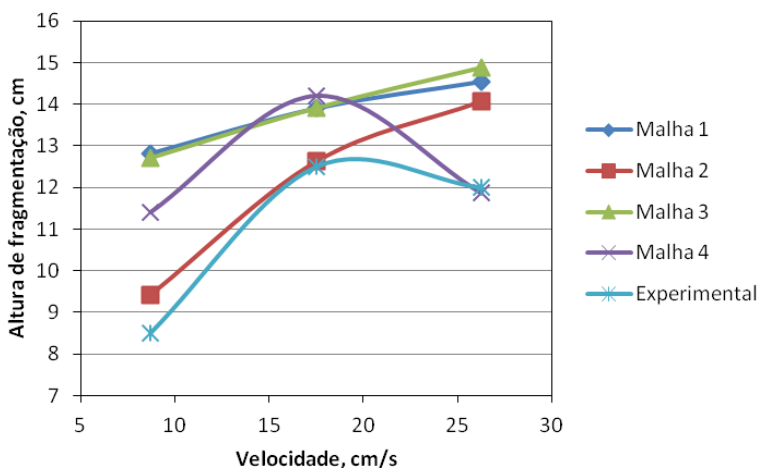
Os valores médios obtidos para as alturas de fragmentação do jato para cada velocidade e para cada malha, além dos observados experimentalmente, estão registrados na Tabela 4.

Tabela 4: Alturas médias do jato até o ponto da fragmentação obtidas para as diferentes velocidades e para cada malha utilizada, além dos respectivos valores experimentais da altura de fragmentação.

Malha	Altura de fragmentação, cm		
	8,7 [cm/s]	17,5 [cm/s]	26,3 [cm/s]
Malha 1	12,82	13,90	14,54
Malha 2	9,42	12,62	14,07
Malha 3	12,70	13,90	14,87
Malha 4	11,40	14,21	11,86
Experimental	8,5	12,5	12,0

A Figura 38 mostra o gráfico com os pontos relativos às alturas de fragmentação em função da velocidade de injeção de óleo com as diferentes malhas utilizadas. Embora, por causa da diferença entre geometrias 2D e 3D, os resultados de simulação não devam ser comparados diretamente com os experimentais, a malha 2 apresentou os resultados mais próximos dos experimentais para as duas velocidades menores. De outro lado, se observado o comportamento, com queda na altura da fragmentação para a maior velocidade, a malha 4 parece estar, nesse aspecto, mais adequada. De qualquer modo, optou-se pela malha 2 que apresentou elementos de melhor qualidade (índice de 0,9881 na Tabela 3) e menor esforço de computação frente aos tempos proibitivos necessários para os cálculos de simulação com a malha 4.

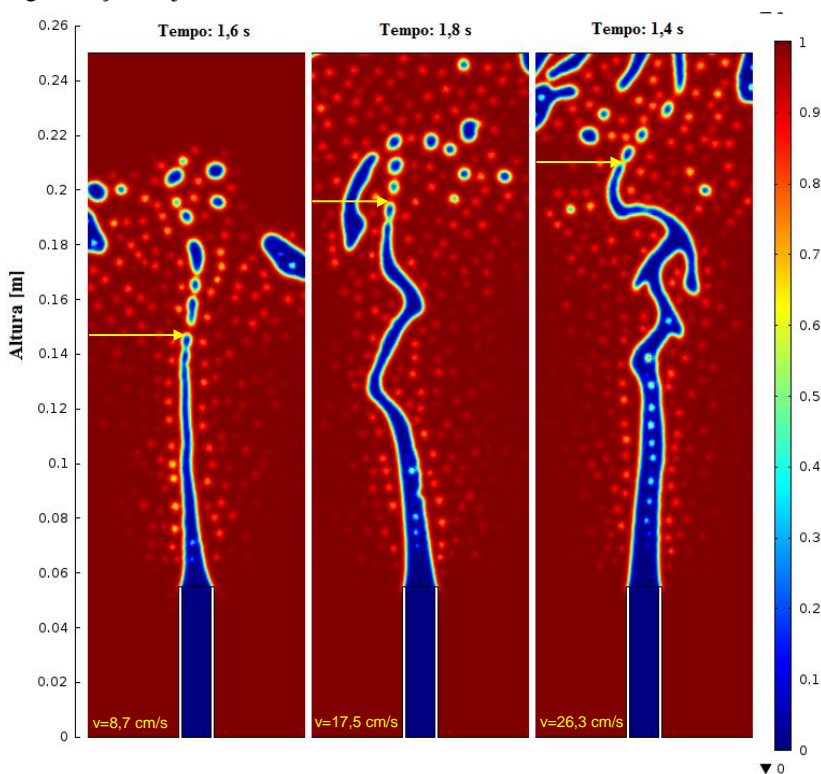
Figura 38 - Médias das alturas de fragmentação do jato de óleo obtidas nas simulações com as diferentes malhas e os respectivos valores experimentais.



Quadros ilustrativos das simulações mostrando a fragmentação do jato para as diferentes velocidades testadas utilizando a Malha 2 são exibidos na Figura 38.

As imagens da Figura 39 ilustram o tipo de padrão de escoamento obtido nas simulações. Como sinalizado anteriormente, as simulações foram desenvolvidas no plano 2D, mesmo assim os resultados de simulação reproduzem algo do comportamento experimental.

Figura 39 - Imagens de instantes das simulações utilizando a Malha 2 para as velocidades de 8,7, 17,5 e 26,3 cm/s. A escala de cores indica as frações volumétricas de água (vermelho) e óleo (azul). As setas indicam o ponto de fragmentação do jato.



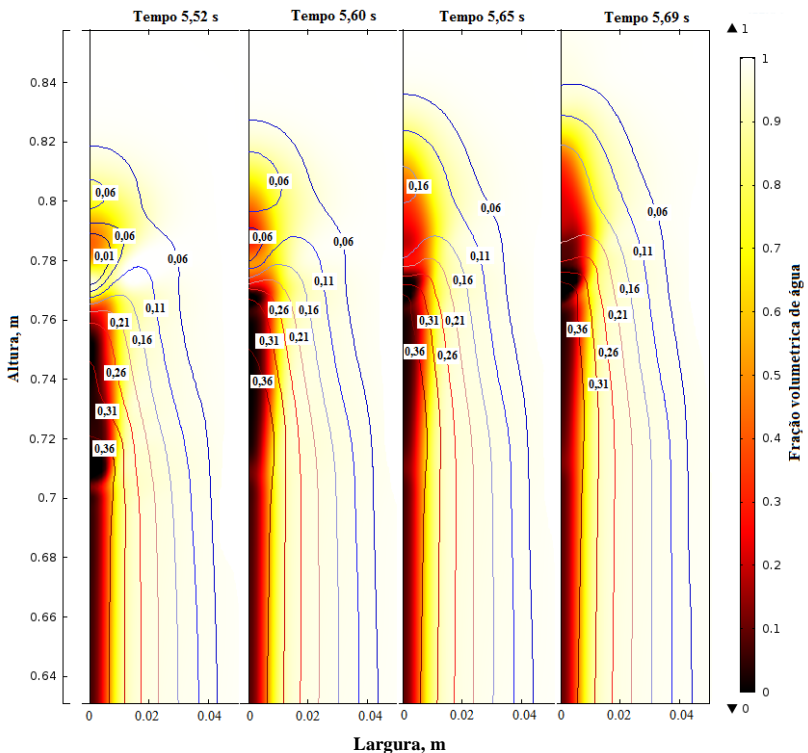
Nos experimentos (intrinsecamente tridimensionais) a instabilidade de um jato líquido cilíndrico através de outro fluido imiscível (ou pouco imiscível) depende principalmente de forças de superfície como: tensão interfacial, forças viscosas e forças hidrodinâmicas atuando na interface dos fluidos (do jato com o meio). Devido a essas forças, o jato se torna instável podendo se fragmentar em gotas (TENGG *et al.*, 1994). No espaço 3D essas forças atuam ao redor de toda a superfície do jato cilíndrico. Já no plano 2D elas atuam apenas lateralmente, como se fossem placas planas. Esse talvez seja um dos motivos pelos quais o comportamento fluidodinâmico do óleo mostrou-se algo diferente daquele observado nos experimentos. De fato, a coluna de óleo ascendente simulada apresentou-se menos fragmentada,



oscilante e com muitas sinuosidades, com o aparecimento de fragmentos alongados (não observáveis com óleo de soja) e também de gotas arredondadas como observado nos experimentos com óleo de soja.

Procurando ampliar o estudo do fenômeno de fragmentação do jato e ascensão da gota formada, utilizou-se também o modelo *Phase Field* em plano 2D axissimétrico que, embora conservativo, apresenta a tendência de degradação difusiva da interface. Construiu-se, para uma velocidade nominal de injeção de óleo de 0,35 cm/s, a Figura 40 segundo uma sequência de quatro gráficos mostrando as frações de volume das fases com linhas de isovalores de velocidade superpostas.

Figura 40 - Gráfico mostrando as frações de volume das fases com linhas de isovalores de velocidade superpostas para a velocidade de injeção de 0,35 cm/s em diferentes instantes da ascensão da coluna de óleo e da gota formada.



Na Figura 40, observa-se, no tempo de 5,52 s, no *front* da coluna ascendente de óleo o surgimento de uma instabilidade fluidodinâmica caracterizada pela zona de baixa velocidade ( $< 0,1$  m/s) mostrando a princípio o desprendimento de uma fração de volume rica em óleo, que corresponderia à formação da gota em uma altura entre 0,78 e 0,80 m. Nos quadros seguintes, a instabilidade torna-se mais suave e o que parecia uma gota prestes a se soltar acaba por se difundir e se incorporar novamente ao volume de óleo ascendente. De fato, na realidade a gota de óleo se forma, mas devido à tendência difusiva do modelo, a mesma se dilui na água impedindo que se veja o seu gotejamento. Entretanto, o modelo é capaz de mostrar em alguma extensão a natureza e o grau da instabilidade responsável pelo fenômeno do gotejamento.

As observações experimentais no aquário de testes atestam que após a fragmentação do jato em baixas velocidades ( $< 0,35$  m/s) onde são formadas gotas monodispersas, a ascensão da gota se dá com uma velocidade maior que a do próprio jato.

Apesar das discrepâncias assinaladas, os modelos matemáticos explorados foram capazes de revelar aspectos fenomenológicos compatíveis com as observações feitas durante os testes experimentais. É, portanto, promissora a utilização dessa abordagem para auxiliar no desenvolvimento de projetos envolvendo o escoamento de sistemas água/óleo, particularmente sob condições de difícil abordagem laboratorial como as elevadas pressões a grandes profundidades no mar.

Aponta-se ainda para a importância do desenvolvimento de simulações tridimensionais ou pelo menos no plano 2D axissimétrico, a fim de avaliar o impacto da geometria sobre os fenômenos de fluidodinâmica dos sistemas água/óleo aqui discutidos.

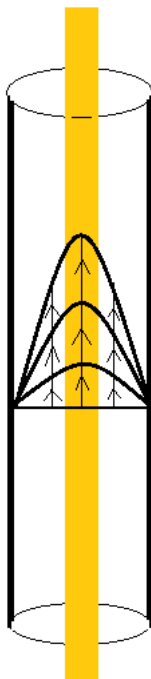
#### 4.5 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO ÁGUA/ÓLEO ATRAVÉS DE UM TUBO DE COLETA

Numa situação de vazamento em ambiente subaquático, ocorre o deslocamento de água gerado pela passagem da coluna de óleo através do meio. O volume de água que é arrastado pelo fluxo da coluna de óleo através de um tubo deve ser conhecido, pois quanto menos água for carregada, mais eficiente será a operação de captura.

Devido à dificuldade de visualização desse deslocamento e perfis de velocidade de água e de óleo nos experimentos, simulou-se o fluxo de uma coluna de óleo ascendente e concêntrica através de um tubo (aberto na saída). Essas simulações procuram mostrar os perfis de

velocidade dentro do tubo (Figura 41), relacionando o diâmetro do tubo e a velocidade do jato de óleo para a determinação do volume de água que é arrastado no escoamento.

Figura 41 - Perfis de velocidade dentro do tubo.



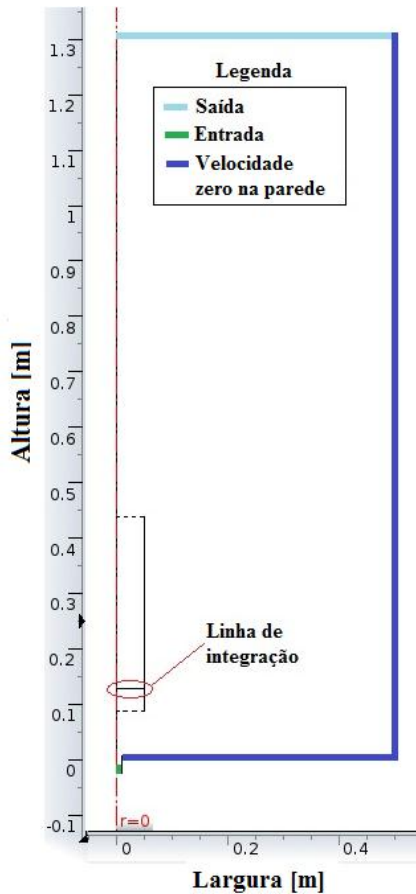
Para estudar os perfis de velocidade de água e óleo dentro do tubo e determinar o volume de água que ascende juntamente com a coluna de óleo foram escolhidas três velocidades de injeção de óleo e estipulados três raios diferentes para o tubo. As velocidades de injeção impostas na base do tubo de injeção foram de 0,35; 0,70 e 1,05 m/s e os diâmetros de tubo coleta utilizados foram de 5,7; 7,7 e 9,7 cm. O comprimento desses tubos foi fixado em 35 cm.

Para essas simulações, o método *Phase Field* foi utilizado e o problema resolvido em domínio 2D axissimétrico em regime transiente. Os parâmetros de largura capilar ( $\epsilon$ ) e mobilidade ( $\delta$ ) da função *Phase*

*Field* assim como a tensão interfacial ( $\gamma$ ) foram fixados em  $\text{tpf.hmáx}/6$  (m), 1 (m.s/kg) e 0,0331 (N/m) respectivamente.

As mesmas características do óleo e da água utilizadas nas simulações anteriores foram dadas aos fluidos e o solver PARDISO foi selecionado para a resolução. O problema foi resolvido empregando-se uma discretização de segunda ordem, para um tempo de simulação de 40 segundos de fenômeno com passo de tempo de 0,01 segundo. O domínio do problema é apresentado na Figura 42.

Figura 42 - Domínio e condições de contorno aplicadas a simulação.

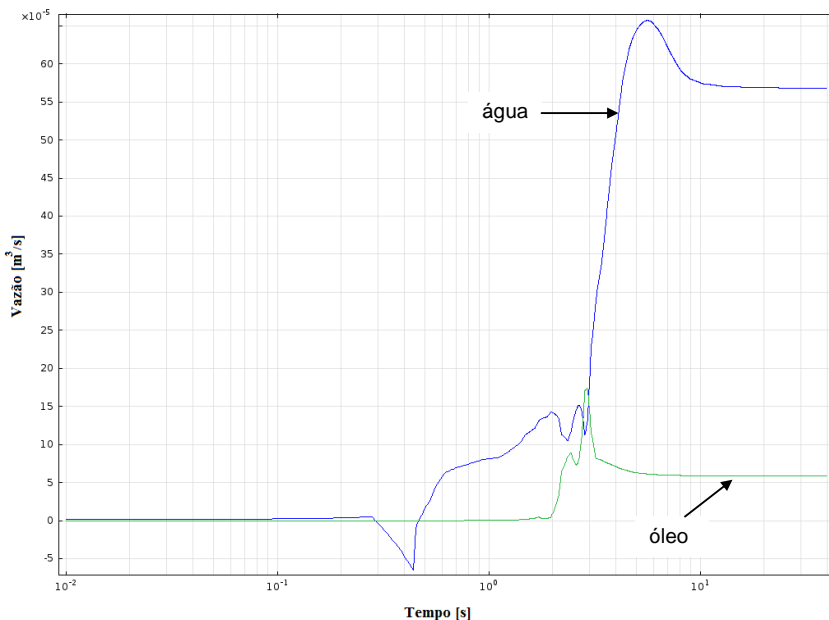


Na Figura 42, dentro do tubo, está identificada uma linha de integração, situada a 4 cm do bocal de entrada do cilindro, que será utilizada para o cálculo do volume de água e de óleo que passam através do tubo. O diâmetro do bocal de injeção de óleo foi fixado em 1,50 cm.

As malhas utilizadas nas simulações constam de 62480 elementos (triangulares) com qualidade média de 0,9693 para o tubo de 5,7 cm, 65579 elementos com qualidade média de 0,9713 para o tubo de 7,7 cm e 79015 com qualidade média de 0,9750 para o tubo de 9,7 cm. As malhas foram refinadas (três vezes) na área de interesse (desde o bocal de injeção até a altura de 1,30 cm dentro do raio de abrangência do tubo) buscando-se atingir soluções estáveis. O tempo médio das simulações foi de aproximadamente 20 minutos.

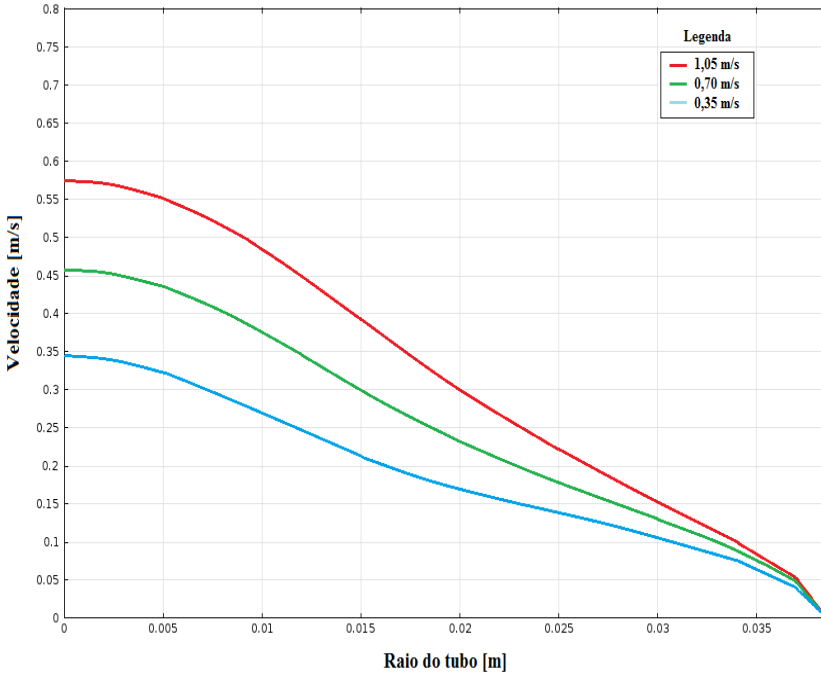
As simulações atingiram o estado estacionário após o tempo de 30 segundos de fenômeno, observando-se a estabilização de todas as vazões, conforme exemplificado na Figura 43 para a velocidade de 0,35 m/s e tubo com diâmetro de 7,7 cm.

Figura 43 - Gráfico mostrando a estabilização das vazões de água e de óleo para a velocidade de 0,35 m/s.



Após a estabilização das vazões foi gerado o gráfico dos perfis de velocidade. Na Figura 44 o gráfico mostra os perfis de velocidade dentro do tubo de 7,7 cm de diâmetro. É possível observar uma velocidade máxima no centro da geometria (raio igual a zero), e um decréscimo ao longo do raio.

Figura 44 - Perfis de velocidade através do tubo de 7,7 cm de diâmetro.



No gráfico acima é possível observar um decréscimo nas velocidades calculadas a partir do eixo central seguindo ao longo da linha de integração posicionada a 4 cm da entrada até a parede do tubo. Percebe-se, principalmente para as maiores velocidades, que a velocidade máxima no eixo central é inferior à velocidade nominal de injeção. Isto pode ser explicado pela força de arraste imposta pela fase água que se opõe ao avanço do jato de óleo. De outro lado, os perfis de velocidade obtidos evidenciam o arraste de água pela coluna ascendente de óleo.

Foi possível calcular através da linha de integração que o aumento na velocidade de injeção de óleo produz um aumento no volume de água que acompanha o jato, isto para os três diâmetros de tubo testados. Também, verificou-se que, para uma dada velocidade de injeção, quanto maior o raio do tubo maior o volume de água arrastada. Estes dados se encontram na Tabela 5.

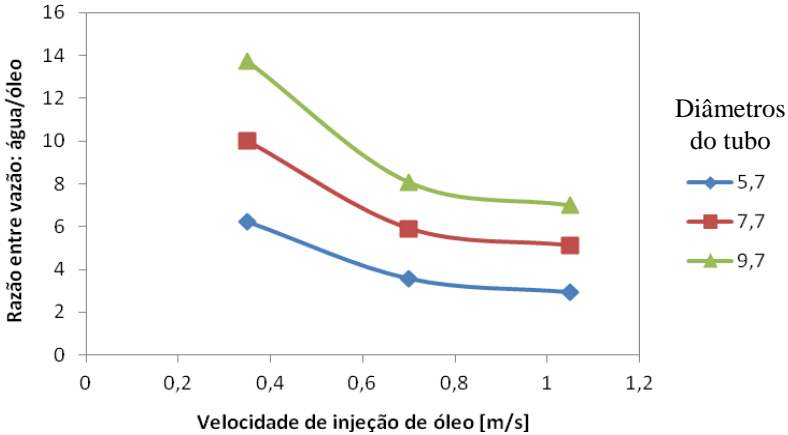
Tabela 5: Vazões de água e óleo através do tubo para as diferentes velocidades e diâmetros.

Diâmetro do tubo (cm)	5,7	7,7	9,7	
Velocidade de injeção(m/s)	Vazão de água arrastada (L/s)			Vazão de óleo injetado (L/s)
0,35	0,343	0,568	0,771	0,058
0,70	0,416	0,710	0,964	0,116
1,05	0,484	0,856	1,190	0,174

Considerando que 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 pode gerar um deslocamento de água desnecessário no processo de captura do óleo em situação de vazamento.

Outro aspecto relevante constatado foi que (através da razão entre a vazão de água pela vazão de óleo) quanto maior a velocidade de injeção de óleo menor proporcionalmente o volume de água arrastada em relação ao volume de óleo coletado. A razão entre as vazões de água e de óleo em função da velocidade de injeção do óleo para os três diâmetros testados é apresentada na Figura 45.

Figura 45 - Razão entre as vazões (água/óleo) em função da velocidade de injeção de óleo na base do tubo de injeção.



Portanto, admitindo-se a ausência de refluxo, conclui-se que, dentro da faixa de valores testados, a operação de captura de um jato de óleo teria as condições mais favoráveis com a maior velocidade de injeção e o menor diâmetro do tubo, pois nesta situação ocorreria um menor arraste de água proporcionalmente ao óleo em ascensão.

#### 4.6 SIMULAÇÃO DO PREENCHIMENTO DO BALÃO E OS CONTRAFLUXOS NO BOCAL DE RECEPÇÃO

Quanto maior forem os contrafluxos de água no processo de captura de óleo, mais arraste e perturbação entre as fases podem ocorrer, prejudicando a ascensão e entrada de óleo no balão e aumentando a probabilidade de formar emulsões no ambiente confinado.

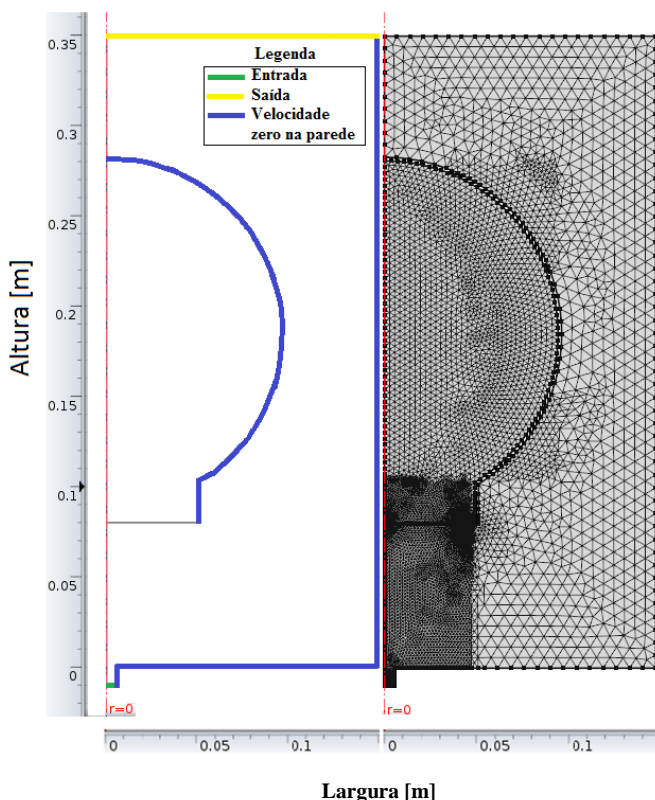
Nesta simulação, pretende-se reproduzir um ensaio experimental do preenchimento do balão com óleo e mostrar os contrafluxos no bocal de recepção. As condições operacionais utilizadas correspondem ao experimento de vazão igual a 1,82 L/min, conforme relatado no item 4.2 sobre a formação de emulsão durante a captura de óleo com o emprego de um balão de geometria esférica, o diâmetro do tubo de injeção de óleo definido nesta simulação foi o mesmo do experimento (1,10cm).



Para essa simulação foi utilizado o método *Level Set* em domínio 2D axissimétrico em regime transiente. Os parâmetros de espessura ( $\zeta$ ) e de reinicializações ( $\chi$ ) da função *Level Set* assim como a tensão interfacial ( $\gamma$ ) foram fixados em  $\text{tpf.hmáx}/2$  (m),  $1(\text{m.s}/\text{kg})$  e  $0,0331$  (N/m) respectivamente.

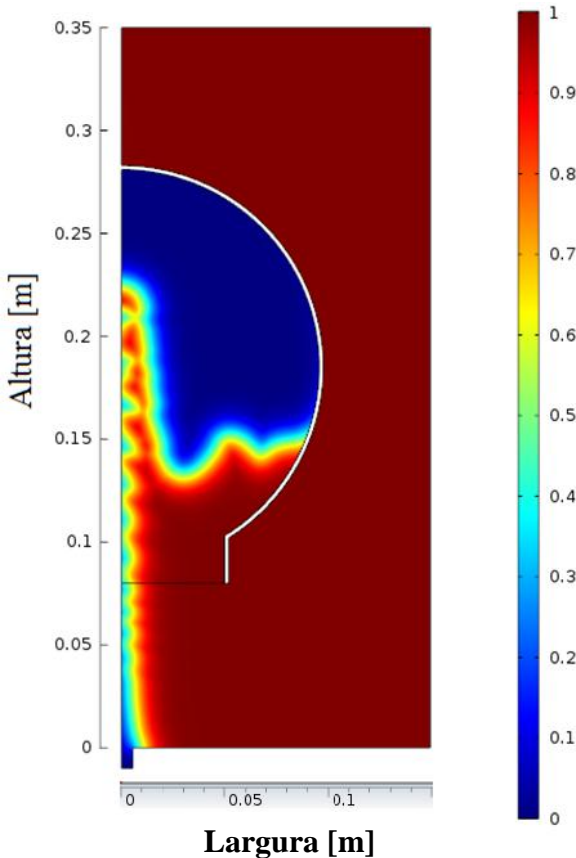
Assim como nas simulações anteriores o problema foi resolvido através de discretização quadrática, para um tempo de fenômeno simulado de 125 segundos com passo máximo de 0,01 segundo. As mesmas propriedades do óleo e da água utilizadas nas simulações anteriores foram atribuídas aos fluidos. O domínio do problema no plano axissimétrico, reduzido a 35 cm de altura e 15 cm de largura, juntamente com a malha utilizada podem ser observados na Figura 46.

Figura 46 - Domínio e condições de contorno (esquerda) e malha utilizada (direita).



A malha utilizada nas simulações consta de 11934 elementos (triangulares) com qualidade média dos elementos de 0,9536 e tempo médio de cálculo de 9 horas. A distribuição das frações de óleo (azul) e água (vermelho) para um tempo de 92 s de fenômeno simulado é apresentada na Figura 47. A região de transição de cores entre o azul e o vermelho corresponde à interface água/óleo que nesse caso aparece algo degradada pelo efeito de difusão inerente ao modelo de escoamento bifásico utilizado. Também é possível observar nesta região um padrão de escoamento oscilatório do jato que é de natureza numérica regulada pelo parâmetro reinicializações da função *Level set* ( $\chi$ ).

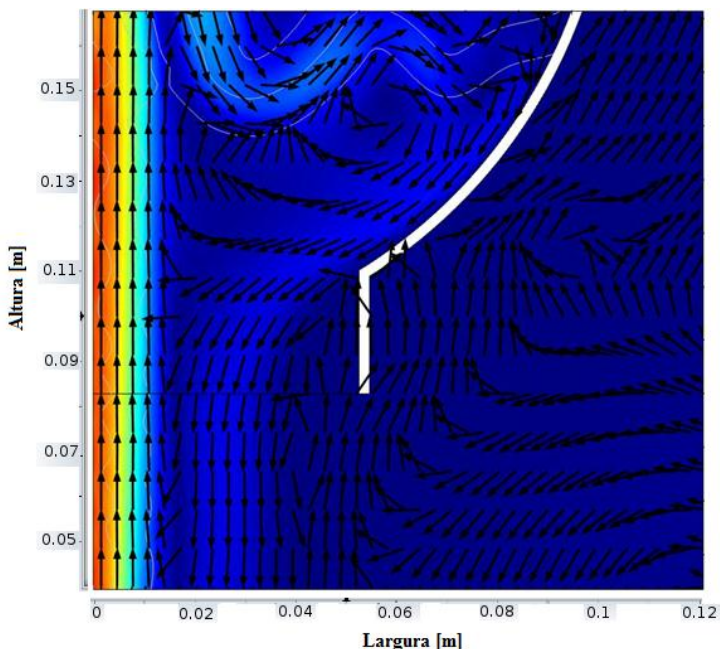
Figura 47 - Distribuição de frações de volume de óleo (azul) e água (vermelho) para o tempo de 92 s a partir do início do vazamento.



Para o tempo de 125 segundos o volume ocupado pelo óleo dentro do balão foi de 3,73 litros. É possível observar ondulações na interface que surgem desde a altura de 5 cm, mostrando a instabilidade da coluna de óleo, algo também constatado nos experimentos. Através dessa simulação foi possível reproduzir o tempo de preenchimento do balão segundo o ensaio realizado no aquário, constatando-se uma diferença de 0,07 litros para menos em relação ao total de 3,8 litros do balão utilizado. Esse resultado é um ponto favorável na defesa da viabilidade do modelo para a representação do fenômeno estudado.

Os contrafluxos que ocorrem no nível do bocal de recepção do balão e que são de difícil visualização nas condições experimentais podem facilmente ser observados a partir dos resultados de simulação. A Figura 48 mostra vetores de velocidade normalizados na região do bocal de recepção. Os vetores foram normalizados segundo um mesmo comprimento arbitrário de modo a poder-se melhor visualizar o sentido de movimentação das fases na região sob estudo. O momento da simulação mostrado corresponde à metade do preenchimento do balão.

Figura 48 - Contrafluxos no bocal do balão.



Ao se observar a Figura 48, fica evidente a existência de um fluxo reverso de água que sai do balão prejudicando a entrada de óleo. Também é possível constatar correntes de recirculação da água no interior do balão promovidas pelo arraste de água que acompanha a entrada do óleo. As cores variando do vermelho para o azul correspondem às velocidades de escoamento maiores para as menores, respectivamente. A faixa azul clara no interior do balão seguindo para fora do mesmo mostra o caminho seguido pela água que está sendo expulsa pela entrada do óleo. Então, na concepção de um balão rígido submerso, inicialmente preenchido com água, fica patente a necessidade de um estudo detalhado envolvendo os aspectos geométricos e fluidodinâmicos do sistema de maneira a se obter condições ótimas de operação. Nesse sentido, as metodologias experimentais e de simulação aqui apresentadas podem contribuir grandemente para o desenvolvimento de dispositivos e projetos destinados à captura de óleo em situação de vazamento no fundo do mar.

## 5 CONCLUSÕES

A partir de um levantamento bibliográfico preliminar e da construção da bancada experimental foi possível a realização de experimentos envolvendo importantes aspectos fenomenológicos presentes na captação de óleo vazando a partir de um ponto submerso em água para dentro de um balão de captura.

Para as condições experimentais testadas foi possível determinar a altura em que ocorre a fragmentação de um jato de óleo em função de sua velocidade de vazamento. Adicionalmente, constatou-se que, dependendo das características do óleo, a coluna ascendente resultante do vazamento pode vir a se fragmentar em gotas ou então apresentar comportamento oscilante com o aparecimento de formas alternadas de setas e "chapéus" que se alternam segundo um padrão de escoamento bastante sinuoso. A partir de dados experimentais foi possível a obtenção de uma curva (válida no âmbito das condições testadas) que poderia ser útil para estimar o posicionamento (distância vertical do bocal de recepção em relação ao ponto de vazamento) limite mais favorável para um balão de captura de vazamento de óleo submerso. O raio de dispersão de gotas menores produzidas pela injeção de óleo em velocidades elevadas ( $> 0,50$  m/s) também variou com a velocidade de injeção. Tais aspectos merecem estudos mais aprofundados visando a obtenção de critérios bem definidos para o dimensionamento e definição de geometria adequada de bocais de recepção e do dispositivo de coleta como um todo.

Através dos ensaios que permitiram a observação da formação de emulsão no interior do balão de coleta, concluiu-se que, de acordo com a intensidade da vazão de óleo em direção ao aparato de captura e o volume preenchido pelo óleo, seria possível o controle da operação através de um sistema de drenagem do óleo de maneira a não ser necessária a substituição do balão nas operações de campo. Essa operação se torna possível devido à separação de fases água/óleo de maneira natural dentro do balão.

Com óleo de soja, nas vazões de 0,52 e 1,82 L/min, a emulsão apresentou grandes gotas de óleo na água, separadas por interfaces bem definidas na forma de cachos, estando o balão quase que totalmente preenchido com óleo. Uma constatação muito interessante nestes experimentos foi que, com a altura de posicionamento do bocal de recepção do balão abaixo do ponto em que o jato de óleo fragmenta, o jato encontra e alimenta as gotas de óleo emulsionado no interior do

balão, fazendo com que as mesmas inflem. Uma vez que o jato cessou, as grandes gotas diminuíram de tamanho e coalesceram rapidamente, desfazendo-se a emulsão. Constatou-se que a formação de gotas maiores facilita a coalescência, enquanto que, ao se formarem gotas pequenas, um tempo maior é necessário para a quebra da emulsão. Esse fenômeno indica que se houver a possibilidade de ocorrer esse encontro do jato com a fase óleo, com o bocal do balão posicionado o mais próximo possível do ponto de vazamento, o tempo de coalescência das gotas tenderá a ser reduzido e os efeitos da emulsificação minimizados.

Atestou-se a viabilidade da drenagem do óleo capturado no interior de um balão submerso. Também foi avaliada a ascensão do óleo pela mangueira de drenagem até a superfície da água. Essa operação deve levar em conta a viscosidade do óleo em questão, pois essa propriedade tem grande influência no tempo necessário para a drenagem. A dificuldade técnica reside justamente na vazão de óleo a ser obtida na superfície. Superado o problema da vazão, seria possível acoplar a mangueira a um dispositivo flutuante de armazenamento de óleo na superfície do mar, ou mesmo a um navio.

Ressalta-se a importância do estudo das características do óleo em questão frente à grande diversidade na composição dos petróleos encontrados em diferentes sítios.

A partir das simulações foi possível reproduzir a fragmentação do jato de óleo de maneira compatível com o observado nos experimentos.

Também, constatou-se que uma grande quantidade de água pode ser arrastada pela coluna ascendente de óleo através de um tubo (bocal) de coleta, o que pode gerar um deslocamento de água desnecessário nas operações de captura de óleo. Dessa maneira, o dimensionamento de um bocal com diâmetro muito maior de que o diâmetro do jato pode gerar um deslocamento de água desnecessário no processo de captura do óleo em situação de vazamento. Outro aspecto relevante constatado foi que (através da razão entre a vazão de água pela vazão de óleo) quanto maior a velocidade de injeção de óleo, menor proporcionalmente o volume de água arrastada em relação ao volume de óleo coletado. Adicionalmente, com os resultados de simulação e a representação gráfica dos contrafluxos no bocal de recepção foi possível mostrar a existência de um fluxo reverso de água que sai do balão prejudicando a entrada de óleo. Assim, os dois aspectos, envolvendo o arraste e o contrafluxo de água no bocal de coleta, devem ser objeto de cuidadosa análise ao se projetar a geometria do dispositivo de captura.

Com o presente estudo, procurou-se atestar a viabilidade da metodologia computacional para modelagem de escoamentos

multifásicos como forma de apoio ao desenvolvimento de um projeto experimental. Nesta abordagem, vários aspectos fenomenológicos do sistema puderam ser tratados quantitativamente, o que é de importância vital na elaboração de propostas aptas à utilização nas atividades *offshore* de exploração de petróleo. Além disso, a mútua interação entre os estudos experimental e numérico podem permitir ampliar a validade e faixas dos valores dos parâmetros operacionais destinados às operações de campo.

Um trabalho com esse cunho científico torna possível novas frentes de estudo no futuro desenvolvimento de técnicas e equipamentos, criando alternativas mais eficientes de coleta de óleo em situações de vazamento de petróleo em grandes profundidades.

Prevê-se que sem aplicado em escala real, esta tecnologia proporcionaria a captura do óleo vazante sem que houvesse a necessidade do uso de surfactantes, bóias de contenção etc., em um cenário de desastre já consumado com resultados pouco efetivos.





## 6 SUGESTÕES

- Utilizar uma gama maior de diferentes tipos de óleos nos experimentos para a avaliação e comparação do escoamento em meio subaquático;
- Estudar diferentes geometrias para a captação de óleo, de maneira a minimizar os contrafluxos gerados pela água;
- Buscar alternativas para eliminar ou minimizar o efeito de contrafluxo nos bocais de recepção evitando assim a desintegração do jato e a formação de emulsão, prejudicando o processo de captura de óleo;
- Utilizar um traçador para ambas as fases, com o objetivo de visualizar os fluxos e contrafluxos de água e óleo nos experimentos;
- Avaliar o comportamento do escoamento do óleo em meio subaquático em função da variação de temperatura entre os fluidos;
- Estudar a influência da concentração de sal na fluidodinâmica do sistema água/óleo;
- Analisar o afloramento e escoamento do óleo em meio subaquático para diferentes geometrias da fonte de vazamento;
- Estudar o empuxo atuante sobre o óleo acumulado no balão através de medidas das forças de flutuação agindo sobre o sistema com vistas a se estimar o grau de ancoragem necessário para o mesmo;
- Aprofundar o estudo da drenagem do óleo do balão de captura até um local de recepção na superfície da água através de tubulação apropriada;

## TRABALHOS PUBLICADOS:

- *Estudo da Captura e Contenção de Vazamentos de Óleos em Ambiente Submarino*, 2º Encontro Petrobrás e Universidades de Novas Tecnologias para Avaliação de Petróleos. Rio de Janeiro, 11 a 13 de maio de 2011;
- *Experimental And Modelling Study To Capture Of Leaking Oil In Underwater Environment*, Rio Pipeline 2011;
- *Estudo Teórico/Experimental sobre as Condições de Captura e Remoção de Óleo Proveniente de Vazamentos Subaquáticos*, 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 2011.

## REFERÊNCIAS

ALENCAR, H. S. **Estudo da Distribuição da Velocidade em Tubo Venturi Utilizando Medidas Experimentais e Técnicas de CFD.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.14, n.4, pp.81-92, 2009.

ASSMANN, B. W. **Previsão do Comportamento de Pressão e Temperatura Transitórios em Poços de Petróleo e Oleodutos.** *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo)*. Universidade Estadual de Campinas. 140p. 1993.

BASHEVA, E. S.; GURKOV, T. D.; IVANOV, I. B.; BANTCHEV, B. C.; BORWANKAR, R. P. **Size Dependence of the Stability of Emulsion Drops Pressed against a Large Interface.** *American Chemical Society*, n. 15, pp. 6764-6769, 1999.

BHADESHIA, H.K.D.H. **Lecture 15: Phase Field Modelling.** *Materials Science and Technology*, v. 26, n. 7, 2010.

BENTSEN, R.G. **Influence of hydrodynamic forces and interfacial momentum transfer on the flow of two immiscible phases.** *Journal of Petroleum Science & Engineering*, v. 19, p.177-190, 1998.

BRADLEY, H.B. **Petroleum Engineering Handbook.** 3rd ed. SPE, 1992.

BRAUNER, N.; ULLMANN, A. **Modeling of phase inversion phenomenon in two-phase pipe flows of .** *International Journal of Multiphase Flow*, n. 28, pp. 1177–1204, 2002.

CAZAREZ-CANDIA, O.; VÁSQUEZ-CRUZ, M. A.; **Prediction of Pressure, Temperature, and Velocity Distribution of Two-Phase Flow in Oil Wells.** *Journal of Petroleum Science & Engineering*, n.46, pp. 195-208, 2005.

CHEN, F.; YAPA, P. D. **Three-dimensional visualization of multi-phase (oil/gas/hydrate) plumes.** *Environmental Modelling & Software*, n. 19, pp. 751-760, 2004.

COMSOL Multiphysics 4.2a. **COMSOL Documentation**, Outubro 2011.

COZIJN H. **DIFIS Concept for the Removal of Oil from Ship Wrecks – Hydrodynamic Scale Model Tests for Operational, Survival and Offloading Conditions and System Deployment**. *Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*, China, 20-26 June, 2010.

DALING, P. S.; MOLDESTAD, M. O.; JOHANSEN, O.; LEWIS, A.; RODAL, J. **Norwegian Testing of Emulsion Properties at Sea—The Importance of Oil Type and Release Conditions**. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 8, n. 2, pp. 123–136, 2003.

DASANAYAKA, L.K. YAPA, P.D. **Role of plume dynamics phase in a deepwater oil and gas release model**. *Journal of Hydro-environment Research*, n. 2, pp. 243-253, 2009.

EOW, J. S.; GHADIRI, M.; SHARIF, A. O. **Eletrostatic and hydrodynamic of aqueous drops in a flowing viscous oil**. *Chemical Engineering and Processing*, n. 41, pp. 649-657, 2002.

FIGIORESE, E. K. **Estudo Experimental e de modelagem da fluidodinâmica de sistemas água/óleo**. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)*. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 81p. 2004.

FOX, R.W. MC DONALD, A.T. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. 4ª Edição. Editora LTC, 1992. 662p.

FREITAS, A. G. B.; SANTANA, C. R.; SILVA, R. P.; SILVS, G. F. **Investigação das facilidades e métodos utilizados atualmente no processamento primário de petróleo em campos onshore e offshore**. 4º *PDPETRO*. Campinas, SP, 2007.

GHANNAN, M. T.; CHAALAL, O. **Oil spill cleanup using vacuum technique**. *Fuel*, n. 82, pp. 789-797, 2003.

HENNING, C. D. **Oil/gas collector/separator for underwater oil leaks**. 1993.

HOMMA, S.; KOGA, J.; MATSUMOTO, S.; SONG, M.; TRYGGVASON, G. **Breakup mode of axisymmetric liquid Jet injected into another immiscible liquid.** *Chemical Engineering Science*, n. 61, pp. 3986-3996, 2006.

HUAI, W.; FANG, S. **Rounded flowing states of obstructed buoyant jet.** *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, n.27, v. 8, pp. 1133-1139, 2006.

IVANOV, B. I.; KRALCHEVSKY, P. A. **Floculation and coalescence of micron-size emulsion droplets.** *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, n.152, pp.161-182, 1998.

KUFAS, E. **Mathematical Modeling of Coalescence of Oil Droplets in Water Flow.** *Dissertação (Master of Science in Energy and Environment)*. Norwegian University of Science and Technology – NTNU. 76p. 2008.

LEVIN, Y.; SANTOS, A. P.; DIEHL, A. **A Surface Attraction.** *Physycal Review Letters*. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.103.257802>. Acesso em: 15 de dezembro de 2010.

LYONS, W. C.; **Standard handbook of petroleum & natural gas engineering.** 1996.

LIST, E. J. **Turbulent jets and plumes.** *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, n. 14, pp. 189-212, 1982.

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

MARIN. **Maritime Research Institute Netherlands.** Offshore Basin. 2010.

MASUTANI, S.M. **Laboratory Experiments to simulate CO<sub>2</sub> ocean disposal.** Final Technical Report by University of Hawaii to U.S. Department of Energ, 1999.

MASUTANI, S. M.; ADAMS, E.E. **Experimental Study of Multi-Phase Plumes with Application to Deep Ocean Oil Spills**. *Final Report by University of Hawaii to U.S. Department of the Interior Minerals Management Service. Contract N° 1435-01-98-CT-30964*.2001.

MELEÁN, Y.; SIGALOTTI, L. D. G. **Coalescence of colliding van der Waals liquid drops**. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, n. 48, pp. 4041-4061, 2005.

MILANKOVIC, A. **Modelagem matemática e simulação numérica do escoamento em emulsão de água em óleo em tubulações**. *Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica)*. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET/PR. 79p. 2005.

OLSSON, E.; KREISS, G. **A Conservative level set method for two phase flow**. *Journal of Computational Physics*, n. 210, pp. 225-246, 2005.

OSHER, S; FEDKIW, R. P. **Level Set Methods: An Overview and Some Recent Results**, *Journal of Computational Physics*, n.169, pp. 463-502, 2001.

PALADINO, E. E.; **Estudo do escoamento multifásico em medidores de vazão do tipo pressão diferencial**. *Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)*. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 263p. 2005.

PERGHER, B. B., QUADRI, M. B., SOARES, G. S., FELLER, R., SANTOS, M. C., BOLZAN, A., **Estudo Teórico/Experimental sobre as Condições de Captura e Remoção de Óleo Proveniente de Vazamentos Subaquáticos**, 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, CLME'2011-IIICEM, Maputo, pp. 793-794, 2011.

PULLIAM, T. H. **Solution Methods In Computational Fluid Dynamics**. *NASA Ames Research Center, MS T27B-1 Moffett Field CA, 94035*. January, 1986.

RYE, H.; BRANDVIK, P. J.; STROM, T. **Subsurface blowouts: results from field experiments**. *Spill Science & Technology Bulletin*. v. 4, n. 4, pp. 239-256, 1997.

SAJGÓ, Cs. **Assessment of generation temperatures of crude oils.** *Organic Geochemistry*, n. 31, pp. 1301-1323, 2000.

SANTOS, R G., **Avaliação da molhabilidade de superfícies de oleodutos através de medidas de ângulo de contato: Efeito de asfaltenos e de ácidos naftênicos.** *Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)*. Universidade Estadual de Campinas, 105p. 2003.

SILVA, L. F. L. R. **Desenvolvimento de metodologias para simulação de escoamentos polidispersos usando código livre.** *Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Química)*. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 244p. 2008.

YAPA, P.D.; ZHENG, L. **Modelling oil and gas releases from deep water: a review.** *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 4, n. 4, pp. 189-198, 1998.

YAPA, P. D.; ZHENG, L.; NAKATA, K. **Modeling underwater oil/gas jets and plumes.** *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 481-491, May, 1999.

YIJIE, Z.; JIAN, C.; WENXUAN, H. **Timing of petroleum accumulation and the division of reservoir-forming assemblages, Junggar Basin, NW China.** *Petroleum Exploration and Development*, v. 37, n. 3, pp. 257-262, 2010.

YUE, P.; ZHOU, C.; FENG, J.J.; GOOCH, C. F. O. HU, H.H. **Phase-Field simulations of interfacial dynamics in viscoelastic fluids using finite elements with adaptive meshing.** *Journal of Computational Physics*, n.219, pp. 47-67, 2006.

TENG, H.; KINOSHITA, C. M.; MASUTANI, S. M. **Prediction of droplet size from the breakup of cylindrical liquid jets.** *International Journal of Multiphase Flow*, v. 21, n. 1, pp. 129-136, 1995.

The Daily Bail. **National Debt & Deficit Portal. Bailout News. QE - The New American Bloodsport.** <http://dailybail.com/>. Acesso em: 15 de junho de 2010.

WENDT, J. F. ANDERSON, J. D. **Computational fluid dynamics: an introduction.** Editora Springer, USA, 332p, 2009.

WÖRNER, M. **A Compact Introduction to the Numerical Modeling of Multiphase Flows.** *Institut für Reaktorsicherheit Programm Nukleare Sicherheitsforschung.* Karlsruhe, 2003.

ZIENKIEWICZ, O. C. TAYLOR, R. L. ZHU, J. Z. **The finite element method: its basis and fundamentals.** Editora Elsevier, Barcelona, ESP, 733p, 2005.

ZHENG, L.; YAPA, P. D.; CHEN, F. **A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – Part I: Theory and model formulation.** *Journal of Hydraulic Research*, n. 4, v. 8, pp. 339-3351, 2002.