



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
LABORATÓRIO DE PESQUISA EM FLUIDODINÂMICA E IMAGEM



TESE DE DOUTORADO

**FLUIDODINÂMICA DA DISPERSÃO DE ÓLEO A PARTIR DE VAZAMENTO
EM *RISER* SUBMARINO TIPO CATENÁRIA: ANÁLISE DE PLUMAS
MULTIFÁSICAS**

DANIELA PASSOS SIMÕES DE ALMEIDA TAVARES

Campina Grande - PB, Agosto de 2016

DANIELA PASSOS SIMÕES DE ALMEIDA TAVARES

**FLUIDODINÂMICA DA DISPERSÃO DE ÓLEO A PARTIR DE VAZAMENTO EM *RISER*
SUBMARINO TIPO CATENÁRIA: ANÁLISE DE PLUMAS MULTIFÁSICAS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Área de Concentração: Modelagem e Simulação

Orientador: **Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**

Campina Grande - PB, Agosto de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

T231f

Tavares, Daniela Passos Simões de Almeida.

Fluidodinâmica da dispersão de óleo a partir de vazamentos em *riser* submarino tipo catenária: análise de plumas multifásicas / Daniela Passos Simões de Almeida Tavares. – Campina Grande, 2016.

141 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto.

Referências.

1. Escoamento Multifásico.
 2. *Riser* tipo Catenária.
 3. Vazamento.
 4. Dispersão.
 5. Plumaz de Óleo.
 6. ANSYS CFX.
- I. Farias Neto, Severino Rodrigues de.
II. Título.

CDU 66.096.5(043)

DANIELA PASSOS SIMÕES DE ALMEIDA TAVARES

**FLUIDODINÂMICA DA DISPERSÃO DE ÓLEO A PARTIR DE VAZAMENTO EM RISER
SUBMARINO TIPO CATENÁRIA: ANÁLISE DE PLUMAS MULTIFÁSICAS**

Tese de Doutorado aprovada em: 18/08/2016

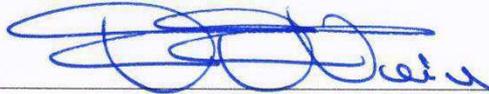
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
UAEQ/CCT/UFCG - Orientador



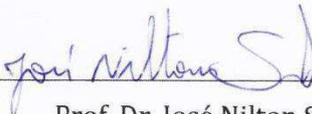
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
UAEM/CCT/UFCG - Examinador Externo



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira
DESA/CCT/UEPB - Examinador Externo



Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves
UAEQ/CCT/UFCG - Examinador Interno



Prof. Dr. José Nilton Silva
UAEQ/CCT/UFCG - Examinador Interno

Campina Grande-PB, Agosto de 2016

DEDICATÓRIA

A Deus e à minha família por todo o carinho e incentivo.

Ao meu irmão Diogo (em memória).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo amor, pela saúde, pela coragem e determinação, e pelas oportunidades que me foram dadas. Reconheço que Ele é dono de toda Ciência e Sabedoria.

Aos meus avós, aos meus pais e irmãos pelo amor, apoio e paciência; aos seus esforços e sacrifícios, que não foram poucos, e por me mostrarem o verdadeiro valor da família.

Ao meu noivo Anderson Gomes por seu amor, compreensão, companheirismo e por estarmos sempre juntos nesta jornada.

*Ao meu orientador, professor e amigo, **Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**, pelos seus sábios e valiosos ensinamentos, amizade, paciência e confiança. Meu sinceros agradecimentos por esses 8 anos de orientação e muito aprendizado, desde a minha graduação até a pós-graduação, fechando ciclos importantes da minha vida acadêmica.*

Aos colegas e amigos que fazem parte do LPFI e do LCTF, que direta ou indiretamente colaboraram com esta pesquisa, pela convivência quase diária, pela constante troca de conhecimentos e pelos momentos de descontração. Não menciono o nome de todos, pois cada um de vocês sabe o quanto contribuíram com sua parcela de conhecimento, ajudando-me durante toda esta longa caminhada.

Um agradecimento em especial às minhas queridas amigas e parceiras de trabalho, Cidronia Buriti, Gicelia Moreira e Valdeiza Tavares, sempre presentes no dia-a-dia de laboratório, nas conversas, aprendizados, nos momentos bons e de dificuldades. Meu agradecimento por estarem presentes durante esta jornada.

Aos amigos Antonio, Enivaldo e Tony pela amizade e contribuições para esta pesquisa, por sempre serem pacientes e solícitos quando precisei.

A todos os colegas e amigos da Pós-Graduação e aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química que me ajudaram a trilhar este caminho.

À banca examinadora desta Tese pelas discussões, comentários e sugestões a respeito deste trabalho.

*Ao Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem, LPFI/UAEQ/UFCEG e ao Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos, LCTF/UAEM/UFCEG, que colocaram à minha disposição os recursos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial ao **Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima** pela autorização na utilização do LCTF, por sua valiosa orientação, e por ser um grande espelho de profissional e de pessoa.*

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-25/ANP) e ao Programa de Formação de Recursos Humanos da PETROBRAS pelo financiamento para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como ao Programa de Recursos Humanos (PRH-25/UFCEG) pelo investimento na capacitação de seus bolsistas.

À CAPES, CNPq, CT BRASIL, CTPETRO, FINEP, JBR Engenharia, PETROBRAS, RPCMOD, e à Universidade Federal de Campina Grande pela parceria na realização deste trabalho.

“Nada é permanente ao longo do tempo.”

[Conceito budista]

“Tudo quanto vier às tuas mãos para realizar, faze-o com o melhor das tuas forças.”

[Eclesiastes 9:10]

RESUMO

TAVARES, Daniela Passos Simões de Almeida. **Fluidodinâmica da Dispersão de Óleo a partir de Vazamento em *Riser* Submarino Tipo Catenária: Análise de Plumas Multifásicas**. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. Tese (Doutorado).

O vazamento de fluidos tóxicos em tubulações submarinas devido à corrosão, erosão ou falhas na estrutura, geralmente conduzem a danos extensivos à vida marinha, saúde humana e recursos naturais. Quando um vazamento acidental ocorre, uma resposta rápida e adequada é necessária para reduzir as consequências ambientais. Logo, compreender, por exemplo, o comportamento da pluma de óleo vazado possibilita a determinação do percurso da pluma de óleo e a dispersão da mesma na correnteza marítima e, assim, propor técnicas e/ou tecnologias para eliminar ou minimizar os danos causados pelo vazamento. Neste sentido, foi realizado um estudo do comportamento da pluma e sua dispersão, adotando-se uma abordagem Euleriana-Euleriana. Foi utilizado um modelo matemático representativo da fluidodinâmica de uma pluma de óleo originada do vazamento em um *riser* tipo catenária. Adotou-se um escoamento bifásico (Modelo de Superfície Livre), isotérmico e turbulento (modelo k- ϵ padrão) para se resolver as equações de conservação de massa e momento linear utilizando ANSYS CFX[®] v.15. Os resultados dos campos de pressão, velocidade e fração volumétrica, além dos perfis de fração volumétrica possibilitaram a avaliação do comportamento da pluma e de sua dispersão no mar. Observou-se que a pluma atingiu a superfície marítima quando adotado altas velocidades de vazamento de óleo e baixas velocidades da correnteza marítima. Para os casos em que a densidade do óleo é maior, houve espalhamento lateral subsuperfície. Para os casos com maior velocidade do jato de óleo e menor velocidade da água do mar, na chegada do óleo à superfície observou-se que houve espalhamento horizontal a montante e a jusante do sentido de escoamento. A depender das condições de velocidade de vazamento, da correnteza marítima e da diferença de densidade percebeu-se uma tendência da pluma não atingir a superfície marítima.

Palavras-chave: Escoamento multifásico; *Riser* tipo catenária; Vazamento; Dispersão; Plumas de Óleo; ANSYS CFX[®].

ABSTRACT

TAVARES, Daniela Passos Simões de Almeida. **Fluid Dynamics of Oil Dispersion from Leak in the Subsea Catenary Riser: Analysis of Multiphase Plumes**. Campina Grande: Post Graduate Program in Chemical Engineering, Federal University of Campina Grande, 2012. Master's Thesis.

The leak of toxic fluids in submarine pipes due to corrosion, erosion or failures in the structure, generally lead to extensive damage to marine life, human health and natural resources. When occurs an accidental leak, a quick and adequate response is needed to reduce the environmental consequences. Therefore, understand, for example, the behavior of leaked oil plume enables the determination of the oil plume path and the dispersion of the same in the sea current and like this propose techniques and/or technologies to eliminate or minimize the damage caused by the leak. In this sense, it was proposed a study of the behavior of plume and its dispersion, adopting an Eulerian-Eulerian approach. It was used a representative mathematical model of the fluid dynamics of an oil plume originated from leak at riser in catenary format. It was adopted a two-phase flow (Free Surface Model), isothermal and turbulent (k- ϵ standard model) to solve the mass and momentum conservation equations using ANSYS CFX[®] v.15. The results of the pressure, velocity and volumetric fraction fields, and the volumetric fraction profiles allowed the plume behavior assessment and dispersal at sea. Also it was observed that the plume reaches the sea surface when adopted high velocities of oil leak and low velocities of sea current. For the cases in which the oil density is higher, there was lateral subsurface scattering. For the cases with higher velocity of the oil jet and lower velocity of the sea water, in the arrival of the oil to the surface it was observed that there was horizontal scattering upstream and downstream of the direction of flow. Moreover, depending on conditions of the leak velocity, of the sea current and of the density difference was noticed a tendency of the plume not reach the sea surface.

Keywords: Multiphase Flow; Catenary Riser; Leak; Dispersion; Oil Plumes; ANSYS CFX[®].

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Representação esquemática dos referenciais (a) Lagrangeano e (b) Euleriano.	06
FIGURA 2.2	Esquema de morfologias da interface que separa duas fases em sistemas multifásicos.	17
FIGURA 2.3	Enchimento de tanque de combustível com modelagem de Superfície Livre.	17
FIGURA 3.1	(a) Esquema típico de uma instalação <i>riser</i> tipo catenária ligado a uma unidade de produção com destaque para o <i>Touch Down Point</i> (TDP) e padrões de escoamento interno; (b) Esquema típico das configurações <i>Lazy-Wave</i> e Livre para as tubulações <i>riser</i> .	19
FIGURA 3.2	(a) Corpo de um <i>riser</i> flexível. (b) Camadas de um <i>riser</i> padrão.	20
FIGURA 3.3	Rompimentos na estrutura de um <i>riser</i> flexível.	23
FIGURA 3.4	Maiores incidências de vazamento em instalações de transportadoras americanas no período de 2002 a 2009.	23
FIGURA 3.5	(a) Modelo físico para o estudo experimental do vazamento de óleo a partir de dutos submersos; (b) Malha numérica gerada a partir da geometria do aparato experimental.	24
FIGURA 3.6	Campo vetorial de velocidade superficial da fase óleo próximo ao vazamento para um dos casos considerados (corte longitudinal).	27
FIGURA 3.7	Esquema de formação de pluma de óleo após <i>blowout</i> submarino.	29
FIGURA 3.8	(a) Esquema do vazamento no fundo do mar como o ocorrido após acidente com a plataforma <i>Deepwater Horizon</i> em 2010; (b) Imagem real do vazamento na cabeça do poço.	31
FIGURA 3.9	Representação da formação de pluma multifásica em ambiente <i>offshore</i> .	32
FIGURA 3.10	(a) Experimento em tanque de água com orifício de vazamento de óleo em diversas vazões consideradas; (b) Esquema de vários tipos de comportamentos de plumas multifásicas.	34
FIGURA 3.11	Distribuição de concentração na superfície livre do rio.	34
FIGURA 3.12	Distribuição do tamanho da pluma de bolhas para o caso da simulação	36

com base no (a) aparato experimental (7 metros de profundidade) e com base no (b) teste a grandes profundidades.

- FIGURA 3.13** (a) Imagens do experimento da variação da altura de fragmentação do jato com o aumento da vazão de injeção; (b) Campos de fração volumétrica da água (vermelho) e do óleo (azul) obtidos pelas simulações em diferentes velocidades durante os instantes de fragmentação. As setas indicam o ponto de fragmentação do jato. **38**
- FIGURA 3.14** (a) Domínio e condições de contorno (esquerda) e malha utilizada (direita); (b) Distribuição de frações de volume de óleo (azul) e água (vermelho) para o tempo de 92 s a partir do início do vazamento. **38**
- FIGURA 3.15** Visão geral do (a) domínio computacional e condições de contorno e da (b) malha numérica gerada. **40**
- FIGURA 3.16** Campo de fração volumétrica para um processo de vazamento de óleo desde a tubulação submarina até à superfície do mar para um caso no qual gotas de óleo alcançam a superfície em 39 segundos. **40**
- FIGURA 3.17** (a) Fração volumétrica do óleo variando de 0 a 0,25 em um dos estudos com abordagem Lagrangeana; (b) isosuperfície de fração volumétrica do óleo constante e igual a 0,01. **41**
- FIGURA 3.18** Domínio físico de um vazamento de óleo no mar a partir de duto horizontal submerso. **42**
- FIGURA 3.19** Campo de velocidade superficial da água em todo o domínio (tubo e mar) e detalhe do jato de óleo na região mar: (a) campo de velocidade, (b) campo vetorial de velocidade e (c) trecho da tubulação horizontal e da corrente marítima. **43**
- FIGURA 4.1** Esquema de uma instalação *offshore* com destaque para a região de interesse estudada nesta pesquisa. **45**
- FIGURA 4.2** Visualização da geometria criada para os dois domínios: (a) mar e (b) catenária. **45**
- FIGURA 4.3** Detalhe das vistas lateral e frontal da malha numérica não-estruturada gerada. **48**
- FIGURA 4.4** Visualização da malha numérica não-estruturada com destaque para as regiões da base e de orifício de vazamento da catenária (*riser*) com 8,7 m de altura e 3,49 m de comprimento horizontal. **48**

FIGURA 4.5	Visualização da malha numérica nas regiões de entrada e saída da catenária (<i>riser</i>).	48
FIGURA 4.6	<i>Display Mesh Quality</i> - parâmetro <i>Aspect Ratio</i> - disponibilizada no ICEM CFD v15.	49
FIGURA 4.7	<i>Display Mesh Quality</i> - parâmetro <i>Quality</i> - disponibilizada no ICEM CFD v15.	49
FIGURA 4.8	Condições de fronteira consideradas no domínio MAR e CATENÁRIA (vista tridimensional em perspectiva) com destaque para a coordenada de referência na origem.	52
FIGURA 4.9	Condições de fronteira nos domínios MAR e CATENÁRIA (Vista Plano XY).	54
FIGURA 4.10	Condições de fronteira no domínio MAR (Vista Plano YZ)	54
FIGURA 5.1	(a) Posições das linhas tomadas para avaliação das malhas numéricas (vista plano XY); Influência do grau de refinamento da malha na curva de velocidade superficial da água do mar na posição (b) $X = 4\text{m}$ e $Z=0$; (c) $Y = 7\text{m}$ e $Z = -0,2\text{m}$; (d) $Y = 11\text{m}$ e $Z = 0$.	60
FIGURA 5.2	Curva de velocidade superficial da água, comparando-se o caso monofásico com caso bifásico (com óleo a baixa velocidade) através do orifício de vazamento, usando como referência a malha 4.	61
FIGURA 5.3	Linhas horizontais e verticais tomadas no plano XY (com respectivas coordenadas de vetores) para comparação entre os perfis de fração volumétrica de óleo para as duas situações (duplo ou simples domínio).	62
FIGURA 5.4	Comparação entre os perfis de fração volumétrica de óleo para as duas situações, com linhas tomadas nas posições (a) 1H, (b) 2H, (c) 3H, (d) 1V, (e) 2V e (f) 3V.	63
FIGURA 5.5	Perfil de velocidade numérico da água do mar.	64
FIGURA 5.6	Plano XZ ($Y = 3\text{m}$) tomado para avaliação da pressão absoluta.	65
FIGURA 5.7	Campo de pressão absoluta no plano XZ ($Y = 3\text{m}$) correspondente ao caso 4 – Com empuxo.	65
FIGURA 5.8	Campo de pressão absoluta sobre os planos XY ($Z=0$) e YZ ($X = 7\text{m}$), para o caso C2.	66
FIGURA 5.9	Campo de pressão sobre os planos XZ ($Y = 2\text{ m}$ e $5,5\text{ m}$) para o caso C2 com destaque para a região no entorno da catenária.	67

FIGURA 5.10	Campo de pressão sobre cortes no plano XZ para o caso C2 em (a) $Y = 2$ m e (b) $Y = 5,5$ m.	68
FIGURA 5.11	Campo de pressão sobre o plano XZ ($Y = 5,391$ m) para o caso C2, com destaque para (a) região bem próxima ao orifício de vazamento, (b) com visualização sob a forma de linhas de contorno.	68
FIGURA 5.12	Campo de fração volumétrica de óleo sobre o plano XY ($Z=0$) com detalhe para a região próxima de formação da pluma de óleo, para o caso C2.	69
FIGURA 5.13	Isosuperfície de fração volumétrica de óleo com destaque para a aderência de óleo na parede externa da catenária, para o caso C2.	70
FIGURA 5.14	Campo de fração volumétrica de óleo (a) sobre diferentes planos XZ de 2 m de largura (no trecho $-1m \leq Z \leq 1m$) em (b) diferentes posições de Y (caso C2).	71
FIGURA 5.15	Isosuperfícies de fração volumétrica do óleo com densidade de 870 kg/m^3 , referente aos casos (a) C1 e (b) C2.	73
FIGURA 5.16	Isosuperfícies de fração volumétrica do óleo com densidade de 870 kg/m^3 , referente aos casos (a) C3 e (b) C4.	74
FIGURA 5.17	Isosuperfícies de fração volumétrica do óleo com densidade de 870 kg/m^3 , referente aos casos (a) C5 e (b) C6.	75
FIGURA 5.18	Isosuperfícies de fração volumétrica do óleo com densidade de 870 kg/m^3 , referente aos casos (a) C7 e (b) C8.	76
FIGURA 5.19	Isosuperfícies de fração volumétrica do óleo com densidade de 900 kg/m^3 , referente aos casos (a) C9 e (b) C10.	77
FIGURA 5.20	Campo vetorial normalizado do escoamento de água e óleo sobre o plano XY (trecho $4m \leq Y \leq 13,7m$ e $0 \leq X \leq 7m$), para o Caso C2.	79
FIGURA 5.21	Campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre um trecho do plano XZ delimitado por $-1,5m \leq Z \leq 1,5m$ e $0m \leq X \leq 15m$ e em diferentes posições de Y, para o Caso C2.	81
FIGURA 5.22	Campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre um trecho do plano YZ delimitado por $-1,5m \leq Z \leq 1,5m$ e em diferentes posições de X, para o Caso C2.	82
FIGURA 5.23	Campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre o plano XZ nas posições $Y = 5,5m$ e $13,7m$, para os Casos C1, C2, C3 e C4.	83

FIGURA 5.24	Campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre o plano XZ nas posições $Y = 5,5\text{m}$ e $13,7\text{m}$, para os Casos C5, C6, C7 e C8.	84
FIGURA 5.25	Campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre o plano XZ nas posições $Y = 5,5\text{m}$ e $13,7\text{m}$, para os Casos C9 e C10.	85
FIGURA 5.26	Destaque para o campo vetorial de velocidade superficial do óleo, no plano XY (delimitado por $13\text{m} \leq Y \leq 13,7\text{m}$ e $0 \leq X \leq 7,5\text{m}$), para os casos C2, C3, C9 e C10.	85
FIGURA 5.27	Destaque para o campo vetorial de velocidade superficial do óleo, no plano XY (delimitado por $13\text{m} \leq Y \leq 13,7\text{m}$ e $0 \leq X \leq 7,5\text{m}$), para os casos C1, C6, C7 e C8.	86
FIGURA 5.28	Posição das linhas tomadas para estudo do efeito da velocidade do óleo.	87
FIGURA 5.29	Fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x) para $v_{\text{mar}} = 0,04 \text{ m/s}$ nas posições (a) $Y = 5,5 \text{ m}$ e $Z=0$; (b) $Y = 8,0 \text{ m}$ e $Z=0$; (c) $Y = 13,5 \text{ m}$ e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C1, C2 e C3.	89
FIGURA 5.30	Fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x) para $v_{\text{mar}} = 0,55 \text{ m/s}$ nas posições (a) $Y = 5,5 \text{ m}$ e $Z=0$; (b) $Y = 8,0 \text{ m}$ e $Z=0$; (c) $Y = 13,5 \text{ m}$ e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C4, C5 e C6.	90
FIGURA 5.31	Fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) para $v_{\text{mar}} = 0,04 \text{ m/s}$ nas posições (a) $X = 1,5 \text{ m}$ e $Z=0$; (b) $X = 4,5 \text{ m}$ e $Z=0$; (c) $X = 8,5 \text{ m}$ e $Z=0$; (d) $X = 13 \text{ m}$ e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C1, C2 e C3.	91
FIGURA 5.32	Fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) para $v_{\text{mar}} = 0,55 \text{ m/s}$ nas posições (a) $X = 1,5 \text{ m}$ e $Z=0$; (b) $X = 4,5 \text{ m}$ e $Z=0$; (c) $X = 8,5 \text{ m}$ e $Z=0$; (d) $X = 13 \text{ m}$ e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C4, C5 e C6.	92
FIGURA 5.33	Fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x) para $v_{\text{óleo}} = 0,51 \text{ m/s}$ nas posições (a) $Y = 5,5 \text{ m}$ e $Z=0$; (b) $Y = 8,0 \text{ m}$ e $Z=0$; (c) $Y = 13,5 \text{ m}$ e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C1, C4 e C7.	95
FIGURA 5.34	Fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x)	96

para $v_{\text{óleo}} = 3,05$ m/s nas posições (a) $Y = 5,5$ m e $Z=0$; (b) $Y = 8,0$ m e $Z=0$; (c) $Y = 13,5$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C3, C6 e C8.

- FIGURA 5.35** Fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) para $v_{\text{óleo}} = 0,51$ m/s nas posições (a) $X = 1,5$ m e $Z=0$; (b) $X = 4,5$ m e $Z=0$; (c) $X = 8,5$ m e $Z=0$; (d) $X = 13$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C1, C4 e C7. **97**
- FIGURA 5.36** Fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) para $v_{\text{óleo}} = 3,05$ m/s nas posições (a) $X = 1,5$ m e $Z=0$; (b) $X = 4,5$ m e $Z=0$; (c) $X = 8,5$ m e $Z=0$; (d) $X = 13$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C3, C6 e C8. **98**
- FIGURA 5.37** Fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x) variando-se a densidade do óleo e mantendo-se $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} constantes nas posições (a) $Y = 5,5$ m e $Z=0$; (b) $Y = 8,0$ m e $Z=0$; (c) $Y = 13,5$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C3, C9 e C10. **100**
- FIGURA 5.38** Fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) variando-se a densidade do óleo e mantendo-se $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} constantes nas posições (a) $X = 1,5$ m e $Z=0$; (b) $X = 4,5$ m e $Z=0$; (c) $X = 8,5$ m e $Z=0$; (d) $X = 13$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os Casos C3, C9 e C10. **101**

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1	Características da catenária e da região de entorno.	50
TABELA 4.2	Propriedades físicas dos fluidos utilizadas nesta pesquisa.	55
TABELA 4.3	Condições gerais do problema e da solução numérica.	55
TABELA 4.4	Casos avaliados para a determinação de simples ou duplo domínio.	58
TABELA 4.5	Casos simulados para a avaliação de pressão.	58
TABELA 4.6	Variáveis e condições utilizadas nas simulações.	58
TABELA 5.1	Malhas numéricas avaliadas, considerando o caso D3.	59
TABELA 5.2	Resultados das análises de pressão absoluta.	65
TABELA 5.3	Casos para estudo do efeito da velocidade de óleo através do orifício de vazamento mantendo-se $v_{wmáx}$ constante, para $\rho_{\text{óleo}} = 870 \text{ kg/m}^3$.	87
TABELA 5.4	Casos para estudo do efeito de velocidade máxima da água do mar mantendo-se a velocidade de óleo constante através do orifício de vazamento, para $\rho_{\text{óleo}} = 870 \text{ kg/m}^3$.	93
TABELA 5.5	Casos para estudo do efeito da densidade do óleo na dispersão mantendo-se constante a velocidade máxima da água do mar e a velocidade de óleo através do orifício de vazamento.	99

LISTA DE SIGLAS

BP – *British Petroleum*
CFD – *Computational Fluid Dynamics*
CONCAWE - *Conservation of Clean Air and Water in Europe*
DPM – *Discrete Phase Model*
EUA – Estados Unidos da América
FPSO – *Floating Production Storage and Offloading*
GB - Gigabyte
HD – *Hard Disk*
LCTF - Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos
LPFI – Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem
MOHID – Modelo Hidrodinâmico
OSPM – *Oil Spill Process Model*
PETROBRAS S.A. – Petróleo Brasileiro S.A.
RAM - *Random Access Memory*
REPLAN – Refinaria de Paulínia (São Paulo)
RNG – *Renormalization Group*
RMS – Resíduo Médio Quadrático
SST – Reynold Stress Model
TDP – *Touch Down Point*
TTR – *Top Tensioned Riser*
UFMG - Universidade Federal de Campina Grande
V.C. – Volume de Controle
VOF – *Volume of Fluid*

NOMENCLATURA

Letras Latinas

$A_{\alpha\beta}$	Densidade de área interfacial	$[m^{-1}]$
C_1	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	adimensional
C_2	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	adimensional
c_μ	Constante empírica do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	adimensional
c_α	Constante empírica do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	adimensional
C_D	Coefficiente de arraste	adimensional
$c_{\alpha\beta}^{(h)}$	Coefficiente de transferência de calor volumétrico	$[W.m^{-3}.K]$
C_p	Capacidade calorífica	$[J.m^{-1}]$
$C_{p\alpha}$	Capacidade calorífica da fase <i>alfa</i>	$[J.m^{-1}]$
$C_{p\alpha\beta}$	Capacidade calorífica da mistura	$[J.m^{-1}]$
$cosh$	Cosseno hiperbólico	graus
D	Diâmetro do tubo	$[m]$
d	Diâmetro da fase dispersa	$[m]$
d_α	Diâmetro médio da partícula <i>alfa</i>	$[m]$
d_β	Diâmetro médio da partícula <i>beta</i>	$[m]$
$d_{\alpha\beta}$	Coefficiente de escala de comprimento interfacial (de mistura)	$[m]$
f	Fração volumétrica	adimensional
f_α	Fração volumétrica da fase <i>alfa</i>	adimensional
f_β	Fração volumétrica da fase <i>beta</i>	adimensional
f_o	Fração volumétrica de óleo	adimensional
f_w	Fração volumétrica de água	adimensional
G_α	Geração de energia cinética turbulenta no interior da fase <i>alfa</i>	$[kg.m^{-1}.s^{-3}]$
g	Aceleração da gravidade terrestre	$[m.s^{-2}]$
\bar{h}	Coefficiente de transferência de calor	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
$\bar{h}_{\alpha\beta}$	Coefficiente de transferência de calor global	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
h_α	Entalpia estática da fase <i>alfa</i>	$[J.kg^{-1}]$
h_β	Entalpia estática da fase <i>beta</i>	$[J.kg^{-1}]$
H	Altura da coluna de água do mar	$[m]$
k	Energia cinética turbulenta	$[m^{-2}.s^{-2}]$
k_α	Energia cinética turbulenta para fase <i>alfa</i>	$[m^{-2}.s^{-2}]$
l_α	Comprimento de escala espacial	adimensional

\vec{M}_α	Forças interfaciais agindo na fase <i>alfa</i>	[N.m ⁻²]
N_p	Número total de fases	adimensional
n	Expressão em função do Número de Reynolds	adimensional
Nu	Número de Nusselt	adimensional
$Nu_{\alpha\beta}$	Número de Nusselt da mistura	adimensional
P	Pressão	[Pa]
P_{abs}	Pressão absoluta	[Pa]
P_{ref}	Pressão de referência	[Pa]
P_{stat}	Pressão estática (termodinâmica)	[Pa]
P_{tot}	Pressão total	[Pa]
Pr	Número de Prandtl	adimensional
$Pr_{\alpha\beta}$	Número de Prandtl da mistura	adimensional
q_α	Escala de velocidade	adimensional
q_o	Vazão de óleo através do orifício de vazamento	[kg.s ⁻¹]
Q_α	Transferência de calor interfacial da fase <i>alfa</i> através da interface com outra(s) fase(s)	[W.m ⁻²]
$Q_{\alpha\beta}$	Taxa de transferência de calor por unidade de tempo da fase <i>beta</i> para a fase <i>alfa</i>	[W.s ⁻²]
$Q_{\beta\alpha}$	Taxa de transferência de calor por unidade de tempo da fase <i>alfa</i> para a fase <i>beta</i>	[W.s ⁻²]
\bar{r}	Altura local	[m]
\bar{r}_{ref}	Altura local de referência	[m]
Re	Número de Reynolds	adimensional
$Re_{\alpha\beta}$	Número de <i>Reynolds</i> da partícula	adimensional
S_α	Termo fonte de energia	[kg.m ⁻¹ .s ⁻³]
S_M	Fonte de momento devido à força de corpo externa	[N]
$S_{M,buoy}$	Termo fonte	[kg.m ⁻² .s ⁻²]
$S_{MS\alpha}$	Fonte de massa específica	[N.m ⁻³]
T_α	Temperatura da fase <i>alfa</i>	[K]
T_β	Temperatura fase <i>beta</i>	[K]
t	Tempo	[s]
\vec{U}	Vetor velocidade	[m.s ⁻¹]
U	Velocidade	[m.s ⁻¹]
\vec{U}_α	Vetor velocidade da fase <i>alfa</i>	[m.s ⁻¹]

\vec{U}_β	Vetor velocidade da fase <i>beta</i>	[m.s ⁻¹]
\bar{u}	Velocidade média	[m.s ⁻¹]
$\bar{u}_{máx}$	Velocidade máxima no centro do tubo	[m.s ⁻¹]
$V_{óleo}$	Velocidade superficial do óleo	[m.s ⁻¹]
V_{mar}	Velocidade da água do mar	[m.s ⁻¹]
$V_{wmáx}$	Valor máximo atingido pela velocidade da água do mar	[m.s ⁻¹]
V	Volume	[m ³]
V_α	Volume ocupado com a fase <i>alfa</i>	[m ³]
\hat{x}	Comprimento horizontal do duto em formato catenária	[m]
\hat{y}	Comprimento vertical do duto em formato catenária	[m]

Letras Gregas

α, β, γ	Fases envolvidas	adimensional
\mathcal{E}	Taxa de dissipação turbulenta	[m ² .s ⁻³]
ε_α	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase <i>alfa</i>	[m ² .s ⁻³]
ϕ	Quantidade transportada em um processo	adimensional
ϕ_α	Quantidade da fase <i>alfa</i> transportada no processo	adimensional
ϕ_o	Diâmetro do orifício de vazamento	[m]
ρ	Densidade	[kg.m ⁻³]
ρ_m	Densidade da mistura	[kg.m ⁻³]
ρ_α	Densidade da fase <i>alfa</i>	[kg.m ⁻³]
ρ_β	Densidade da fase <i>beta</i>	[kg.m ⁻³]
$\bar{\rho}_\alpha$	Densidade efetiva da fase <i>alfa</i>	[kg.m ⁻³]
$\rho_{\alpha\beta}$	Densidade da mistura <i>alfa e beta</i>	[kg.m ⁻³]
ρ_{ref}	Densidade de referência	[kg.m ⁻³]
ρ_o	Densidade do óleo	[kg.m ⁻³]
ρ_w	Densidade da água do mar	[kg.m ⁻³]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
μ_α	Viscosidade dinâmica da fase <i>alfa</i>	[Pa.s]
μ_β	Viscosidade dinâmica da fase <i>beta</i>	[Pa.s]
$\mu_{\alpha\beta}$	Viscosidade da mistura	[Pa.s]
$\mu_{t\alpha}$	Viscosidade turbulenta	[Pa.s]
σ_k	Constante k do modelo de turbulência <i>k</i> – ε	adimensional
σ_ε	Constante ε do modelo de turbulência <i>k</i> – ε	adimensional
λ	Condutividade térmica	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_α	Condutividade térmica da fase <i>alfa</i>	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]

$\lambda_{\alpha\beta}$	Condutividade térmica da mistura	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
Γ	Taxa de fluxo de massa por unidade de volume	$[\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}]$
$\Gamma_{\alpha\beta}$	Taxa de fluxo de massa por unidade de volume da fase <i>alfa</i> para <i>beta</i>	$[\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}]$
$\Gamma_{\alpha\beta}^+$	Taxa positiva de fluxo de massa por unidade de volume da fase <i>beta</i> para a fase <i>alfa</i>	$[\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}]$
$\Gamma_{\beta\alpha}^+$	Taxa positiva de fluxo de massa por unidade de volume da fase <i>alfa</i> para a fase <i>beta</i>	$[\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}]$

Letras Especiais

∇	Operador nabla	adimensional
$\frac{\partial}{\partial t}$	Derivada parcial com relação ao tempo	$[\text{s}^{-1}]$

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE SIGLAS.....	viii
NOMENCLATURA	ix
1. INTRODUÇÃO	01
1.1 OBJETIVO GERAL.....	03
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	03
2. ESCOAMENTO MULTIFÁSICO.....	04
2.1 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	04
2.2 MODELAGEM DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO	05
2.2.1 <i>Sistema Euleriano-Lagrangeano</i>	06
2.2.2 <i>Sistema Euleriano-Euleriano</i>	07
2.2.2.1 <i>Modelo Não-Homogêneo</i>	07
2.2.2.2 <i>Modelo Pseudo-Homogêneo</i>	12
2.2.3 <i>Forças Interfaciais</i>	14
2.2.4 <i>Modelo de Turbulência</i>	15
2.3 ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS COM SUPERFÍCIE LIVRE	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 DUTOS SUBMARINOS	18
3.2 VAZAMENTO EM DUTOS	20
3.3 DISPERSÃO DE POLUENTES EM CORPOS D'ÁGUA.....	27
3.4 FORMAÇÃO DE PLUMAS MULTIFÁSICAS	31
4. METODOLOGIA.....	44
4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	44
4.2 GERAÇÃO DA MALHA NUMÉRICA.....	46
4.3 MODELO MATEMÁTICO	50
4.4 CASOS AVALIADOS.....	57

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1 AVALIAÇÃO DA DEPENDÊNCIA DA MALHA NUMÉRICA	59
5.2 DETERMINAÇÃO DO TIPO DE DOMÍNIO – SIMPLES OU DUPLO	61
5.3 PERFIL DE VELOCIDADE DA ÁGUA DO MAR E ANÁLISE DE PRESSÃO ABSOLUTA.....	64
5.4 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA PLUMA DE ÓLEO	66
5.4.1 Campos de Pressão	66
5.4.2 Campos de Fração Volumétrica de Óleo	69
5.4.3 Campos Vetoriais de Velocidade.....	78
5.5 ANÁLISE DOS EFEITOS DA VELOCIDADE DA ÁGUA DO MAR, VELOCIDADE DO ÓLEO E DENSIDADE DO ÓLEO	86
5.5.1 Efeito da Velocidade de Óleo Através do Orifício de Vazamento Mantendo-se a Velocidade Máxima da Água do Mar Constante	86
5.5.2 Efeito da Velocidade Máxima da Água do Mar Mantendo-se Constante a Velocidade de Óleo Através do Orifício de Vazamento	93
5.5.3 Efeito da Densidade do Óleo Mantendo-se Constante a Velocidade Máxima da Água do Mar e a Velocidade de Óleo Através do Orifício de Vazamento	98
6. CONCLUSÕES.....	102
7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	104
REFERÊNCIAS	105

1. INTRODUÇÃO

Existem quatro grandes grupos que compõem basicamente a cadeia produtiva do petróleo: Exploração (Petróleo e Gás Natural), Refino (Gasolina, Óleo Diesel, Querosene, Nafta, etc.), Indústria Petroquímica (produção de olefinas, aromáticos e polímeros) e Indústria de Transformação (embalagens, filmes, componentes automotivos, fios, tubos, cabos, eletrodomésticos e fibras). Um dos principais pontos a serem destacados é o transporte de óleo e derivados ou o escoamento de fluidos, em geral, as misturas multifásicas (como por exemplo, óleo, água e gás).

A crescente demanda por petróleo traz a necessidade de descoberta de novas reservas com reservatórios cada vez mais profundos. Desta forma, a produção em sistemas marítimos utilizando componentes como os *risers* (dutos flexíveis ou rígidos) têm sido foco de muitos estudos, em diversas áreas do conhecimento. Esses dutos são utilizados no transporte de fluidos multifásicos resultantes do processo de produção (óleo, água e gás) desde o poço de petróleo localizado no fundo do mar até a plataforma de produção na superfície. Devido às condições extremas presentes nos campos de produção marítima, os equipamentos e o transporte de fluidos produzidos operam próximos aos seus limites. Por isso, eventualmente, os dutos flexíveis podem apresentar falhas de integridade estrutural, que podem provocar prejuízos na produção, acidentes com vítimas fatais e desastres ambientais graves, como o derramamento de óleo bruto no mar (SILVA, 2006; VALDIVIA, 2010; QUEIROZ, 2011; SIMÕES, 2011; FALCÃO, 2015).

O aparecimento de um vazamento em tubulações submarinas que transportam fluidos tóxicos pode ser devido principalmente à corrosão ou erosão por fluxo. O óleo que vaza a partir do orifício de vazamento causa danos extensivos à vida marinha, saúde humana e recursos naturais. Exemplos de vazamentos acidentais foram o que ocorreu no Golfo do México (costa da Louisiana, EUA) com aproximadamente 20 mil barris de óleo vazados por dia, resultando em uma devastação ecológica em áreas adjacentes ao acidente e aquele ocorrido em uma plataforma de petróleo no Mar de Bohai (China) no qual aproximadamente 700 barris de óleo e 2500 barris de lama de perfuração à base de óleo foram derramados. O Mar de Bohai é uma espécie de baía com profundidade média de 14,5 metros, o que torna o risco de contaminação relativamente alto (WANG *et al.*, 2013; ZHU *et al.*, 2014).

Quando um vazamento acidental ocorre, uma resposta rápida e adequada é necessária para reduzir as consequências ambientais. O estabelecimento de barreiras de contenção é um dos exemplos das formas de contenção de óleo que depende do crescimento das gotas de óleo (aglomeração das partículas), da velocidade e da tendência de propagação. Em outras palavras, compreender o comportamento desses fluidos no ambiente marinho, a exemplo do comportamento da pluma de óleo vazado e a direção do deslocamento é importante para prever o resultado de um possível vazamento em águas submarinas. Neste sentido, percebe-se a real importância da detecção, identificação e alerta de vazamento a partir de furos, trincas ou rachaduras em tubulações para que se faça o fechamento de válvulas e parada das bombas, o que impedirá um acidente ambiental de maiores proporções. De acordo com Colombaroli (2008), Zhu *et al.* (2014) e Falcão (2015), para que se faça a detecção e identificação com precisão do vazamento se faz necessário conhecer o comportamento do(s) fluido(s) no interior do duto o que possibilita determinar a perda de carga ou queda de pressão devido à perda de fluido.

Embora existam avanços significativos no desenvolvimento de materiais mais leves, mais fortes e seguros para a construção de dutos de unidades de produção e do crescente número de gasodutos e oleodutos, os diversos problemas de vazamentos observados vêm estimulando o desenvolvimento de técnicas confiáveis e eficientes para inspecionar e detectar com rapidez e precisão possíveis vazamentos ao longo desses dutos, com o objetivo de eliminar ou minimizar os danos causados à indústria do petróleo e de outros segmentos e danos ao meio ambiente (COLOMBO e KARNEY, 2002; SOUSA, 2007).

Nesse contexto, a proposta desta pesquisa vem dar uma contribuição no estudo de vazamento e dispersão de poluentes na água e auxiliar na compreensão dos fenômenos empregando a fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) como ferramenta de estudo, por possibilitar a obtenção de dados baseados em modelos. Observa-se, no entanto, que na literatura existem poucos trabalhos relacionados ao escoamento multifásico em tubulações submarinas na presença de vazamento e consequente dispersão de fluidos no mar. Para dar suporte às atividades referentes a este trabalho, os grupos de pesquisa das áreas de Engenharia Química (LPFI – Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem) e Engenharia Mecânica (LCTF – Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), atuantes na área de Termo-Fluidodinâmica Computacional, proporcionam um apoio de fundamental importância para esta pesquisa, trazendo contribuição ao setor de Petróleo e Gás, especificamente no setor de

construção de dutos para transporte ou elevação de fluidos do petróleo e no que diz respeito à minimização de danos ambientais provocados pelo óleo.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a formação e dispersão da pluma de óleo em águas submarinas proveniente de um vazamento originado em orifício de pequeno diâmetro em um *riser* tipo catenária.

1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pode-se citar:

- Apresentar uma modelagem matemática para analisar a fluidodinâmica da dispersão de óleo na água do mar no entorno do *riser* tipo catenária a partir de um orifício de vazamento;
- Avaliar os resultados da distribuição de pressão, fração volumétrica de óleo e velocidade superficial do óleo na água do mar;
- Avaliar a dispersão de óleo em águas submarinas e o comportamento da pluma multifásica após o vazamento;
- Comparar os efeitos da velocidade da água do mar, velocidade de óleo que sai através do orifício de vazamento e densidade de óleo sobre o comportamento da pluma de óleo.

2. ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

2.1 Fluidodinâmica Computacional

Um fluido (líquido ou gás) pode ser considerado uma substância que tem a facilidade de escoar e cujo volume toma a forma do recipiente em análise e se deforma facilmente. Fluidos são geralmente encontrados escoando em tubulações industriais, estagnados em reservatórios, movimentando-se em uma chaminé, entre outros.

A Fluidodinâmica Computacional (ou CFD – do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta computacional capaz de analisar sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e outros fenômenos associados tais como dissipação, difusão, convecção, ondas de choque, superfícies deslizantes, camadas-limite e turbulência. No campo da aerodinâmica todos os fenômenos são governados pelas equações de Navier-Stokes. Muitos dos mais importantes aspectos dessas relações são não-lineares e, como consequência, frequentemente, não têm solução analítica. A Fluidodinâmica Computacional tem como objetivo entender o comportamento físico do escoamento de fluidos em um volume de controle através de simulação computacional. Seu intuito é complementar e não substituir os estudos teóricos e experimentais (este último de grande importância para a validação das simulações numéricas) sobre o movimento dos fluidos, mas, o emprego de ambas proporciona um entendimento mais claro do processo como um todo (LOMAX *et al.*, 1999; FORTUNA, 2000; KORKISCHKO, 2006; BIGARELLA, 2007; SANTOS, 2009).

Os códigos de CFD se baseiam em três etapas: pré-processamento, que consiste na entrada de dados de um problema de escoamento (definição de geometria, geração da malha, subdivisão do domínio, seleção dos fenômenos físicos e/ou químicos e das propriedades do fluido, especificação das condições de contorno, etc.); execução, que consiste em resolver as equações usando algum tipo de técnica numérica (que aproxima as variáveis de fluxo desconhecidas por meio de funções simples, discretiza por substituição de aproximações dentro das equações de fluxo e manipulação matemática, e soluciona as equações algébricas); pós-processamento, que consiste em analisar e interpretar os resultados por meio da visualização gráfica no *display* (gráficos de linhas e de superfícies 2D e 3D, etc.).

A simulação corresponde ao processo de desenvolvimento de um modelo matemático e de seu tratamento numérico que resulta em um conjunto de informações a serem analisadas

e interpretadas. Os resultados da simulação devem possibilitar o entendimento do comportamento do sistema, imitando o comportamento do sistema experimental ou real. Para que a modelagem matemática seja validada, ela deve ser avaliada, e os resultados comparados aos experimentais e/ou numéricos de um sistema; deve ser capaz de apoiar teorias ou hipóteses que explicam o comportamento observado; deve ser capaz de prever o comportamento futuro, ou seja, os efeitos produzidos por mudanças nas variáveis do sistema ou em seu modo de operação; deve ser capaz de responder às mudanças de variáveis com a mesma sensibilidade apresentada pelo modelo experimental (CORREIA, 2009).

2.2 Modelagem do Escoamento Multifásico

Escoamento multifásico se refere a qualquer escoamento simultâneo em que mais de uma fase está presente em contato direto em um determinado sistema. Ainda pode ser entendido como uma região no espaço onde coexistem dois ou mais fluidos imiscíveis separados por uma interface. Este tipo de escoamento pode ser encontrado na maioria dos processos industriais como, por exemplo, na indústria de petróleo e na indústria química. Ressalta-se que não se faz uma distinção rigorosa do conceito de fase e componente; por exemplo, um sistema óleo-água-gás (fase líquida, líquida e gasosa, respectivamente) é uma mistura multifásica, porém, na realidade, o que existe é uma mistura bifásica multicomponente. O termo *fase* não deve ser confundido com o seu outro significado termodinâmico utilizado em outras áreas científicas para definir o estado da matéria (sólido, líquido ou gasoso, por exemplo).

Na indústria do petróleo, o escoamento multifásico (na maioria, um sistema trifásico óleo-água-gás, proveniente de poços brasileiros e em boa parte de poços mundiais) é geralmente encontrado em instalações de transporte (fluidos transportados para outras áreas por meio de dutos), na produção (fluidos em reservatórios escoam até as instalações de superfícies passando por poços, linhas de surgência, *risers*) e no refino do petróleo e gás natural (condicionamento dos fluidos produzidos), entre outros (MUNIZ *et al.*, 2005; PEREIRA FILHO, 2010).

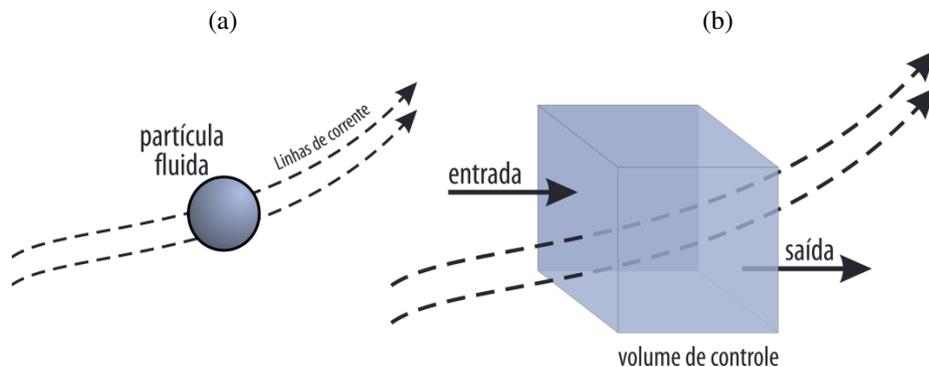
As leis que descrevem esse tipo de escoamento são representadas em termos de equações diferenciais parciais não-lineares e estas por não possuírem solução analítica devido

a não-linearidade, quando submetidas a condições de contorno iniciais apropriadas, podem ser resolvidas através técnicas de CFD para a obtenção de solução (SANTOS, 2010).

Na literatura encontram-se diversas classificações para a modelagem dos escoamentos multifásicos. A mais utilizada classifica os modelos em dois grandes grupos que tratam diferentemente as fases dispersas: a abordagem Euleriana-Euleriana e a abordagem Euleriana-Lagrangeana (PALADINO, 2005; SANTOS, 2009).

De acordo com Roma (2006), um referencial Lagrangeano estuda o comportamento individual de cada partícula de um sistema isolado e, a partir dessas informações isoladas, infere o comportamento de todo o sistema. Este método tem por base o conceito de sistema, entendido como uma massa definida de matéria e individualizada em relação ao meio. Em um referencial Euleriano, as grandezas ligadas ao escoamento são tratadas em uma posição fixa, fazendo com que o equacionamento do problema se torne mais fácil, uma vez que as grandezas características do campo de escoamento são determinadas em função do tempo, na superfície de controle e no volume de controle (V.C.), atravessado pelo escoamento em estudo, considerando-se o equacionamento nas áreas de entrada e saída deste (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Representação esquemática dos referenciais (a) Lagrangeano e (b) Euleriano.



Fonte: Próprio Autor, 2016.

2.2.1 Sistema Euleriano-Lagrangeano

Na abordagem Euleriana-Lagrangeana, a fase líquida é tratada como contínua e resolvida pelas equações de *Navier-Stokes* nas médias temporais; a fase dispersa é resolvida pelo acompanhamento da trajetória de um grande número de partículas através do campo de escoamento contínuo, ou seja, o escoamento da fase contínua determina a trajetória da

partícula. Esse tipo de abordagem resolve um sistema de equações de conservação para a fase contínua e, com os campos de velocidades dessa fase, são calculadas as forças exercidas sobre as partículas dispersas e as trajetórias destas partículas. O modelo limita-se a escoamentos com baixas frações volumétricas para a fase dispersa e por considerar as partículas pontuais, sem volume. Esta abordagem se torna inadequada na modelagem de escoamentos líquido-líquido ou em situações em que a fração volumétrica da segunda fase é significativa (PALADINO, 2005; SANTOS, 2010; ANDRADE, 2013).

2.2.2 Sistema Euleriano-Euleriano

A abordagem Euleriana-Euleriana leva em consideração as diferentes fases do sistema como fases contínuas e interpenetrantes. É aí que surge o conceito de fração volumétrica das fases (uma vez que o volume de uma fase não pode ser ocupado pela outra) que são consideradas como funções contínuas no espaço e no tempo cuja soma é igual a 1. Desta forma, cada fase terá sua própria equação de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. O modelo Euleriano resolve um conjunto de equações que incluem a quantidade de movimento e conservação da massa para cada fase e o acoplamento da pressão é feito através dos coeficientes de troca entre as fases. Atualmente, a abordagem Euleriana-Euleriana é a mais utilizada na solução de escoamentos multifásicos e adequada para escoamentos nos quais as fases se misturam e as velocidades relativas entre elas são consideráveis (PALADINO, 2005; SANTOS, 2010).

No escoamento multifásico Euleriano-Euleriano (também conhecido como Modelo de Dois Fluidos ou Multi-Fluido) existem dois sub-modelos avaliados: o Modelo Pseudo-Homogêneo e o Modelo Não-Homogêneo, apresentados a seguir (RANADE, 2002; Manual ANSYS, 2013).

2.2.2.1 Modelo Não-Homogêneo

Neste tipo de modelo, cada fluido possui um campo de velocidade, separadamente, e os fluidos apresentam interação a partir dos termos de transferência interfacial. As fases dos

fluidos podem ser denotadas através de letras gregas (α, β, γ), sendo N_p o número total de fases. A fração volumétrica da fase α é denotada por f_α ; o volume V_α ocupado com a fase α é um pequeno volume V ao redor do ponto de fração volumétrica f_α , dado por:

$$V_\alpha = f_\alpha V \quad (2.1)$$

para $1 \leq \alpha \leq N_p$.

Definindo-se ρ_α como a densidade do fluido se este estiver na fase presente sozinho (densidade do material), ou seja, massa de α por unidade de volume de α . A densidade efetiva é definida como:

$$\bar{\rho}_\alpha = f_\alpha \rho_\alpha \quad (2.2)$$

A densidade da mistura é determinada por:

$$\rho_m = \sum_{\alpha} f_\alpha \rho_\alpha \quad (2.3)$$

A transferência interfacial de quantidade de movimento, calor e massa depende diretamente da área superficial de contato entre as duas fases. Esta é caracterizada por uma área interfacial por unidade de volume entre a fase α e a fase β , conhecida como densidade de área interfacial, $A_{\alpha\beta}$. Esta grandeza pode ser dada baseando-se no modelo teórico adotado, que pode ser o **Modelo de Partículas**, o **Modelo de Mistura** e o **Modelo de Superfície Livre**. Estes três sub-modelos diferem, portanto, na forma como a densidade de área interfacial e a transferência interfacial são trabalhadas (ANDRADE, 2013).

O modelo de transferência interfacial de partículas é considerado quando há uma fase contínua e outra dispersa. Considerando, no **Modelo de Partículas**, que a fase β está presente como partículas esféricas de diâmetro médio d_β , tem-se que a área de contato entre as fases é:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{6f_\beta}{d_\beta} \quad (2.4)$$

onde f_β é a fração volumétrica da fase β .

Os coeficientes de transferência interfacial adimensional podem ser correlacionados em termos do $Re_{\alpha\beta}$ (número de Reynolds das partículas) e $Pr_{\alpha\beta}$ (número de Prandtl do

fluido). Estes podem ser definidos usando o diâmetro médio da partícula, e as propriedades da fase contínua:

$$\text{Re}_{\alpha\beta} = \frac{\rho |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| d_\beta}{\mu_\alpha} \quad (2.5)$$

$$\text{Pr}_{\alpha\beta} = \frac{\mu_\alpha C_{p\alpha}}{\lambda_\alpha} \quad (2.6)$$

Onde μ_α , $C_{p\alpha}$, λ_α são a viscosidade, a capacidade calorífica e a condutividade térmica da fase contínua α , respectivamente.

O **Modelo de Mistura** é considerado como o mais simples, uma vez que trabalha com ambas as fases de maneira simétrica. É utilizado em sistemas com mais de duas fases, sendo todas tratadas como contínuas. A área superficial por unidade de volume é calculada por:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{f_\alpha f_\beta}{d_{\alpha\beta}} \quad (2.7)$$

onde $d_{\alpha\beta}$ é uma escala de comprimento interfacial que deve ser especificada.

O coeficiente de transferência interfacial pode ser correlacionado em termos do número de Reynolds e do número de Prandtl da mistura, definidos como:

$$\text{Re}_{\alpha\beta} = \frac{\rho_{\alpha\beta} |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| d_{\alpha\beta}}{\mu_{\alpha\beta}} \quad (2.8)$$

$$\text{Pr}_{\alpha\beta} = \frac{\mu_{\alpha\beta} C_{p\alpha\beta}}{\lambda_{\alpha\beta}} \quad (2.9)$$

onde, $\mu_{\alpha\beta}$, $\rho_{\alpha\beta}$, $C_{p\alpha\beta}$ e $\lambda_{\alpha\beta}$ são a viscosidade, a densidade, a capacidade calorífica específica e a condutividade térmica da mistura, respectivamente. A viscosidade e a densidade da mistura são calculadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \rho_{\alpha\beta} &= f_\alpha \rho_\alpha + f_\beta \rho_\beta \\ \mu_{\alpha\beta} &= f_\alpha \mu_\alpha + f_\beta \mu_\beta \end{aligned} \quad (2.10)$$

O **Modelo de Superfície Livre** refere-se a uma situação de escoamento multifásico onde as fases são separadas por uma interface definida e aberta, ou seja, elas estão em contato entre si em um determinado sistema onde ocorre a combinação de informações. Podem-se

citar, como exemplo, vazões em canais abertos, escoamento em torno de cascos de navios, problemas envolvendo enchimento de tanques de combustíveis, escoamento de fluidos através de orifícios de vazamento em tubulações, além de outros. Se há apenas duas fases na mistura, a Equação (2.11) é utilizada no cálculo da densidade de área interfacial:

$$A_{\alpha\beta} = |\nabla f_\alpha| \quad (2.11)$$

Quando estão presentes mais de duas fases, a densidade de área interfacial é dada por:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{2|\nabla f_\alpha||\nabla f_\beta|}{|\nabla f_\alpha| + |\nabla f_\beta|} \quad (2.12)$$

O escoamento multifásico pode ser modelado utilizando-se as seguintes equações:

- **A equação de conservação da massa ou equação da continuidade:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (2.13)$$

Onde $S_{MS\alpha}$ descreve a fonte de massa específica utilizada; $\Gamma_{\alpha\beta}$ é taxa do fluxo de massa por unidade de volume da fase α para a fase β .

- **A equação de momento linear ou equação da quantidade de movimento:**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = & -f_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_\alpha \left[\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] \right\} + \\ & + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_\alpha) + \vec{S}_{M\alpha} + \vec{M}_\alpha \end{aligned} \quad (2.14)$$

onde $\vec{S}_{M\alpha}$ descreve as forças de momento devido às forças de corpo externas; \vec{M}_α descreve as forças interfaciais agindo na fase α devido à presença de outras fases; o termo $(\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_\alpha)$ representa a transferência de momento induzido pela transferência de massa na interface.

A força interfacial por unidade de volume sobre a fase α devido à interação com a fase β é uma soma de diversas parcelas que se referem às forças de arraste interfacial, de sustentação, de massa virtual, de lubrificação na parede e de interação partícula-fluido. No caso do modelo de mistura onde apenas a força de arraste interfacial é considerada, as forças interfaciais podem ser definidas por:

$$\bar{M}_\alpha = C_D \rho_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} |\bar{U}_\beta - \bar{U}_\alpha| (\bar{U}_\beta - \bar{U}_\alpha) \quad (2.15)$$

onde C_D é o coeficiente de arraste adimensional e $\rho_{\alpha\beta}$ corresponde à densidade da mistura.

Na equação da conservação da fração volumétrica, admite-se que a soma das frações volumétricas de cada uma das fases tem valor unitário:

$$\sum_{\alpha=1}^{N_p} f_\alpha = 1 \quad (2.16)$$

Essa equação pode ser combinada com as equações da continuidade para obter as equações de conservação do volume transportado, dada por:

$$\sum_{\alpha} \frac{1}{\rho_\alpha} \left[\frac{\partial \rho_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) \right] = \sum_{\alpha} \frac{1}{\rho_\alpha} \left(S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta}^+ \right) \quad (2.17)$$

- **A equação de conservação da energia:**

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_\alpha \rho h_\alpha) + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \bar{U}_\alpha h_\alpha - \lambda_\alpha \nabla T_\alpha)] = \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ h_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ h_\alpha) + Q_\alpha + S_\alpha \quad (2.18)$$

onde h_α , λ_α , T_α correspondem a entalpia estática, a condutividade térmica e a temperatura da fase α , respectivamente; S_α descreve a fonte de calor externa; Q_α descreve a transferência de calor para a fase α através das interfaces com outras fases; $(\Gamma_{\alpha\beta}^+ h_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ h_\alpha)$ representa a transferência de calor induzida pela transferência de massa.

A transferência de calor na interface ocorre devido ao não equilíbrio térmico através da interface das fases. O calor total por unidade de volume transferido para a fase α devido à interação com outras fases (Q_α) é dado por:

$$Q_\alpha = \sum_{\beta \neq \alpha} Q_{\alpha\beta} \quad (2.19)$$

onde:

$$Q_{\alpha\beta} = Q_{\beta\alpha}, \quad \sum_{\alpha} Q_{\alpha} = 0 \quad (2.20)$$

A transferência de calor através de uma fronteira é usualmente descrita em termos de um coeficiente de transferência de calor global ($h_{\alpha\beta}$) que é a quantidade de energia calorífica através da unidade de área por unidade de tempo por unidade de diferença de temperatura entre as fases. Deste modo, a taxa de transferência de calor, $Q_{\alpha\beta}$, por unidade de tempo através do contorno de fase da área interfacial por unidade de volume $A_{\alpha\beta}$, da fase β para a fase α , é:

$$Q_{\alpha\beta} = h_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} (T_{\beta} - T_{\alpha}) \quad (2.21)$$

De forma análoga à transferência de momento, tem-se:

$$Q_{\alpha\beta} = c_{\alpha\beta}^{(h)} (T_{\beta} - T_{\alpha}) \quad (2.22)$$

onde $c_{\alpha\beta}^{(h)}$ é o coeficiente de transferência de calor volumétrico, descrito por:

$$c_{\alpha\beta}^{(h)} = h_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} \quad (2.23)$$

Na Equação 2.23, $h_{\alpha\beta}$ pode ser determinado por uma equação apropriada para tal.

2.2.2.2 Modelo Pseudo-Homogêneo

Em um escoamento multifásico pseudo-homogêneo, um campo de fluxo comum (além de outros campos como temperatura e turbulência) é compartilhado por todos os fluidos, o que faz com que algumas simplificações possam ser feitas para que o modelo multifásico resulte em um modelo homogêneo.

Para um determinado processo de transporte, o modelo pseudo-homogêneo assume que a quantidade transportada (com exceção da fração volumétrica) para aquele processo é a mesma para todas as fases:

$$\phi_\alpha = \phi \quad (2.24)$$

para $1 \leq \alpha \leq N_p$.

Uma vez que as quantidades transportadas são compartilhadas em um escoamento multifásico, é suficiente resolver para os campos compartilhados usando as equações de transportes ao invés de resolver as equações de transporte para cada fase separadamente.

As equações de transporte podem ser derivadas somando as equações de transporte individuais das fases envolvidas para obter uma única equação de transporte para ϕ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\phi - \Gamma\nabla\phi) = S \quad (2.25)$$

onde:

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_p} f_\alpha \rho_\alpha \quad (2.26)$$

$$\vec{U} = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=1}^{N_p} f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha \quad (2.27)$$

$$\Gamma = \sum_{\alpha=1}^{N_p} f_\alpha \Gamma_\alpha \quad (2.28)$$

O modelo pseudo-homogêneo não precisa ser aplicado a todas as equações. Por exemplo, o campo de velocidade pode ser modelado como não-homogêneo, mas junto com um modelo de turbulência homogêneo.

As equações de momento no modelo pseudo-homogêneo assumem que:

$$\vec{U}_\alpha = \vec{U} \quad (2.29)$$

para $1 \leq \alpha \leq N_p$, sendo dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{U}) + \nabla \cdot \left\{ \rho\vec{U} \otimes \vec{U} - \mu \left[\nabla\vec{U} + (\nabla\vec{U})^T \right] \right\} = \vec{S}_M - \nabla_p \quad (2.30)$$

onde:

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_p} f_\alpha \rho_\alpha \quad (2.31)$$

$$\mu = \sum_{\alpha=1}^{N_p} f_{\alpha} \mu_{\alpha} \quad (2.32)$$

Observa-se que esta é uma equação de transporte de uma única fase, mas com densidade e viscosidade variáveis.

2.2.3 Forças Interfaciais

De forma geral, na interface dos fluidos, podem existir diversas forças interfaciais atuantes, como por exemplo, força de arraste, força de sustentação, força de lubrificação da parede, força de massa virtual e força de dispersão turbulenta (essas três últimas conhecidas como forças de não-arraste), que agem sobre a fase α devido à interação com outras fases. A soma de todas essas forças interfaciais representa \vec{M}_{α} , dada por:

$$\vec{M}_{\alpha} = \sum_{\beta \neq \alpha} \vec{M}_{\alpha\beta} = \vec{M}_{\alpha\beta}^D + \vec{M}_{\alpha\beta}^L + \vec{M}_{\alpha\beta}^{LUB} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{VM} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{TD} + \vec{M}_{\alpha\beta}^S + \dots \quad (2.33)$$

onde os sub-índices D, L, LUB, VM, TD e S, representam, respectivamente, a força de arraste (*drag force*), força de sustentação (*lift force*), força de lubrificação da parede (*wall lubrication force*), força de massa virtual (*virtual mass force*), força de dispersão turbulenta (*turbulence dispersion force*) e força de pressão do sólido (*solids press force*) que só é considerado se a fase particulada for um sólido denso (LOTH, 2009; RAHIMI e MOSLEH, 2012; Manual ANSYS, 2013).

A força de arraste representa a maior parcela da transferência de quantidade de movimento interfacial e é definida por:

$$\vec{M}_{\alpha} = \frac{C_D}{8} A_{\alpha\beta} \rho_{\beta} (\vec{U}_{\alpha} - \vec{U}_{\beta}) |\vec{U}_{\beta} - \vec{U}_{\alpha}| \quad (2.34)$$

onde $A_{\alpha\beta}$ é a área de transferência interfacial dado pelo modelo de partícula e representa a relação da área interfacial por unidade de volume; $|\vec{U}_{\beta} - \vec{U}_{\alpha}|$ representa a resultante da velocidade de deslizamento entre a fase contínua e a fase dispersa, na direção da fase dispersa.

Existem diversas correlações para o cálculo do coeficiente de arraste que pode variar dependendo do sistema considerado. Essas correlações podem ser: *Schiller Naumann*, *Ishii-Zuber* e *Grace*, disponibilizadas no *software* Ansys CFX[®].

2.2.4 Modelo de Turbulência

As equações de *Navier-Stokes* e da continuidade formam um conjunto fechado de 4 equações com 4 incógnitas (as 3 componentes de velocidade e a componente de pressão). Quando as componentes flutuantes das propriedades do escoamento são adicionadas nas equações que regem o escoamento de um fluido obtêm-se como resultado, a adição de seis termos extras, as tensões de Reynolds, nas equações de momento linear. A adição destes termos torna o problema indeterminado, surgindo o problema de fechamento de turbulência (*turbulence closure*). Desta forma, a utilização de modelos de turbulência como procedimentos computacionais para o fechamento do sistema de equações é fundamental para resolver uma variedade de problemas com efeito de turbulência (VERSTEEG e MALALASEKERA, *apud* MOTA, 2014).

O modelo de turbulência *k-ε* padrão é um modelo de viscosidade turbulenta no qual se assume que os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média, com a constante de proporcionalidade sendo caracterizada pela viscosidade turbulenta, idealização esta conhecida como hipótese de *Boussinesq*. Nesse tipo de modelo, duas equações de transporte são modeladas separadamente e resolvidas para o comprimento turbulento e a escala de tempo ou para quaisquer duas combinações linearmente independentes delas. As equações de transporte para a energia cinética turbulenta, *k*, e a taxa de dissipação turbulenta, *ε*, são:

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \bullet \left\{ f_\alpha \left[\rho_\alpha \vec{U}_\alpha k_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla k_\alpha \right] \right\} = f_\alpha (G_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha \varepsilon_\alpha)}{\partial t} + \nabla \bullet \left\{ f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha \varepsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right\} = r_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (2.36)$$

onde G_α é a geração de energia cinética turbulenta no interior da fase α , C_1 e C_2 são constantes empíricas, respectivamente iguais a 1,44 e 1,92; σ_k e σ_ε são constantes iguais a

1,0 e 1,3, respectivamente. Ainda nesta equação, ε_α corresponde à taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase α e k_α a energia cinética turbulenta para a fase α definidas, respectivamente, por:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{c_\mu q_\alpha^3}{l_\alpha} \quad (2.37)$$

$$k_\alpha = \frac{q_\alpha^2}{2} \quad (2.38)$$

onde l_α é o comprimento de escala espacial, q_α é a escala de velocidade, c_μ é uma constante empírica calculada por:

$$c_\mu = 4c_\alpha^2 \quad (2.30)$$

onde c_α também é uma constante empírica.

A variável $\mu_{t\alpha}$ é a viscosidade turbulenta, definida por:

$$\mu_{t\alpha} = c_\mu \rho_\alpha \frac{k_\alpha^2}{\varepsilon_\alpha} \quad (2.40)$$

onde c_μ é uma constante igual a 0,09 (válida para fases contínuas).

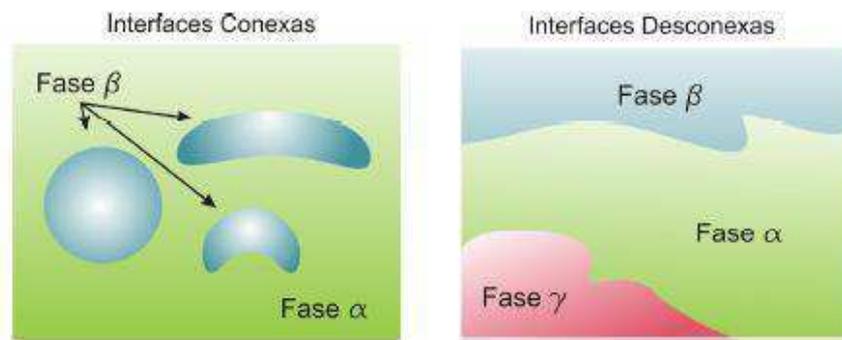
2.3 Escoamentos Multifásicos com Superfície Livre

No escoamento de fluidos multifásicos, as fases interagem por meio da interface que as separa, podendo esta ser conexa (como bolhas de gás ou gotas de líquido em líquidos, por exemplo) ou desconexas (interface poluente gasoso-ar atmosférico, por exemplo), conforme ilustra a Figura 2.2. Nesta interface existe troca de informações como transferência de quantidade de movimento, de massa e/ou de energia (REZENDE, 2008).

Quando se denomina *superfície livre*, isso indica que existe uma superfície fluida que não é restringida ou confinada por nenhuma parede ou condição, ou seja, a interface tem seu comportamento dinâmico livre de impedimentos. Como exemplo bastante típico tem-se o escoamento de água no leito de um rio: a interface ar-água tem seu comportamento dinâmico

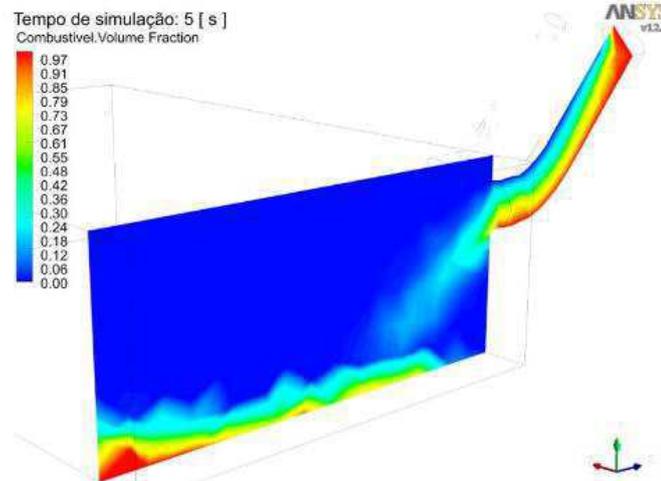
totalmente livre. Na Figura 2.3 tem-se a visualização em *software* de CFD do enchimento de um tanque de combustível utilizando-se a modelagem de Superfície Livre. Na figura está representado o campo de fração volumétrica ocupada pelo combustível e onde é possível visualizar a dinâmica na interface entre os fluidos (ar-combustível), quando o combustível adentra o tanque e passar a ocupar a região com a presença do fluido ar.

Figura 2.2 - Esquema de morfologias da interface que separa duas fases em sistemas multifásicos.



Fonte: Rezende, 2008.

Figura 2.3 - Enchimento de tanque de combustível com modelagem de Superfície Livre.



Fonte: Dutra e Duque *et al.*, 2010.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

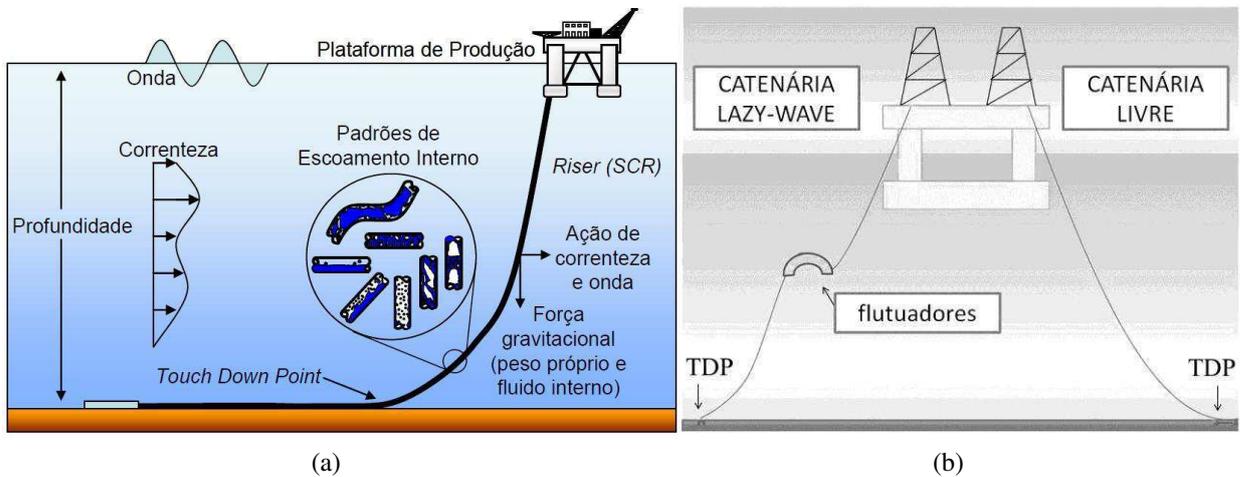
3.1 Dutos submarinos

Risers são estruturas em forma tubular com baixa razão entre diâmetro e o comprimento e, por isso, consideradas estruturas esbeltas. Os *risers* rígidos são, geralmente, compostos por tubos soldados e fabricados em aço, podendo apresentar-se tensionado no topo (*Top Tensioned Riser* - TTR), ou vertical, e algumas configurações mais complexas que utilizam bóias e flutuadores. O TDP – *Touch Down Point* – é o ponto onde a estrutura do *riser* toca no leito marinho (Figura 3.1a). Os *risers* flexíveis são produzidos a partir de entrelaçamento de materiais poliméricos (que garantem isolamento e proteção) e armaduras (que conferem resistência mecânica) e podem apresentar-se no formato de catenária livre e catenária complexa (do tipo *Lazy-Wave*, por exemplo).

A configuração do *riser* deve ser em forma de catenária para que seja possível a conexão da plataforma com a árvore de natal em pontos mais afastados. A configuração *Lazy-Wave* (Figura 3.1b) possui a característica de fazer uso de flutuadores para que a tensão em toda a estrutura da tubulação seja menor, ou seja, os movimentos impostos pela plataforma e condições marinhas são suavizados, reduzindo-se as fadigas. Por ter um alto grau de complacência aos deslocamentos, o *riser* flexível pode ser utilizado em sistemas de produção do tipo navio FPSO (*Floating Production Storage and Offloading* - Sistema Flutuante de Produção, Armazenamento e Alívio) e plataforma semi-submersível. (CHAKRABARTI, 2005; TANAKA e MARTINS, 2010; QUEIROZ, 2011; ANDRADE, 2012; ARRUDA *et al.*, 2012).

No Brasil, desde o início da exploração de petróleo e gás em águas profundas, os *risers* flexíveis foram considerados a melhor opção para o transporte de fluidos em instalações *offshore*. Este tipo de duto é de fácil transporte, instalação e operação, em comparação com os *risers* rígidos. Além disso, podem ser facilmente recuperados e reinstalados. Os primeiros dutos flexíveis foram instalados em 1977 no Campo de Garoupa, na Bacia de Campos no Rio de Janeiro (CARNEVAL *et al.*, 2006).

Figura 3.1 - (a) Esquema típico de uma instalação *riser* tipo catenária ligado a uma unidade de produção com destaque para o *Touch Down Point* (TDP) e padrões de escoamento interno; (b) Esquema típico das configurações *Lazy-Wave* e *Livre* para as tubulações *riser*.



Fonte: Valdivia, 2010.

Fonte: Adaptado de Tanaka e Martins, 2010.

Silva (2006) e Simões (2011) definem *risers* flexíveis como dutos constituídos de diferentes camadas de materiais e, em seu centro, uma armadura espiralada (Figura 3.2):

- **Carcaça interna** - formada por uma fita metálica de aço inoxidável, espiralada e intertravada. Sua principal função é evitar o colapso da camada de pressão caso ocorra algum dano em outras camadas do duto ou ocorra difusão de gás;
- **Camada de pressão** - consiste em um material termoplástico extrudado sobre a carcaça interna. Sua função é garantir a estanqueidade interna do duto e assim transmitir os esforços internos devido à pressão para as armaduras de pressão e tração;
- **Armadura de pressão** – fabricada em aço carbono. Suas principais funções são a resistência a esforços radiais devido a diversos fatores operacionais;
- **Armadura de tração** - compostas de camadas de arames, aplicadas em forma helicoidal ao longo de todo o comprimento do tubo. Oferecem melhor resistência a cargas axiais;
- **Capa polimérica** – fabricada com material plástico extrudado (poliamida ou polietileno) logo após as fitas utilizadas para manter os arames da armadura de tração alinhados. Esta camada pode ser utilizada como uma barreira externa à difusão do gás que se encontra confinada no anular do duto.

Figura 3.2 - (a) Corpo de um *riser* flexível. (b) Camadas de um *riser* padrão.



Fonte: Martins, *apud* Simões, 2011.

Um dos principais mecanismos de falhas nos *risers* flexíveis é o rompimento dos arames da sua armadura de tração, o que faz desgastar suas paredes e levar a um eventual derrame de fluidos no meio (ambiente marinho). Atualmente, a maneira mais comum de verificar a ocorrência desse tipo de falha tem sido por meio da inspeção visual das grandes deformações que surgem na capa externa do *riser* provocadas pelo escorregamento dos arames rompidos. Essa técnica apresenta resultados muito imprecisos e demorados, havendo necessidade de técnicas mais avançadas como, por exemplo, emissão acústica, monitoramento de vibração, monitoramento com câmeras de televisão, técnicas magnéticas, simulação numérica, dentre outras (SIMÕES, 2011; CAMERINI, 2012).

3.2 Vazamento em Dutos

A integridade do material da tubulação, liberação de fluidos, emissão de ruído característico, comportamento fluidodinâmico multifásico característico ou manifestação de algum outro tipo de sinal são exemplos de uma série de fatores que podem identificar a presença de um vazamento. O comportamento do fluido no interior da tubulação seria outra fonte de identificação de vazamento, tendo em vista que o vazamento nada mais é do que um fenômeno hidráulico. Os vazamentos podem surgir como consequência de corrosão, fadiga mecânica, falhas de soldagem, mudanças bruscas de pressão, falhas operacionais, presença de conexões ou curvas, fenômenos naturais e ações externas não intencionais ou não autorizadas, manutenção inadequada, entre outros (BUIATTI, 1995; PALADINO, 2000; YUE *et al.*, 2006; BEZERRA, 2008; AZEVEDO, 2009; COLOMBO *et al.*, 2009; AGUIAR, 2010).

De acordo com Azevedo (2009), vazamento pode ser definido como a perda de determinada quantidade de fluido (balanço de massa alterado) através de uma abertura inesperada e indesejada na estrutura de um duto e que pode ocorrer geralmente sob a forma de furos pontuais, rasgos, trincas, colapso ou rompimento do duto, tendo como origem diversas causas. A alteração no balanço de massa do duto pode causar mudanças permanentes nas condições estacionárias de escoamento tais como pressão e vazão, e alterações nas propriedades do(s) fluido(s) ou do sistema de escoamento (temperatura, densidade, vibração na parede do duto, etc.). Azevedo (2009) comenta ainda que se as mudanças ocorridas devido a alterações no balanço de massa forem percebidas por sensores adequados, estes possibilitarão a detecção do vazamento no momento em que ele ocorrer ou após o escoamento no duto ter atingido uma nova condição estacionária. O volume de fluido perdido a cada instante é fundamental para determinar o impacto dessas mudanças no escoamento e se elas serão perceptíveis ou não para a instrumentação utilizada no duto. Porém, somente a utilização de sensores para detectar essas alterações não basta, uma vez que existem outros fenômenos transitórios causados por acionamentos de equipamentos e manobras operacionais. Desta maneira, é importante distinguir quando essas alterações têm como origem um vazamento ou alguma ação operacional.

Ainda de acordo com Azevedo (2009), a maior parte dos acidentes com oleodutos relaciona-se à ocorrência de vazamentos ou rompimentos em sua estrutura. Uma associação de empresas de petróleo européias voltada para a segurança, meio ambiente e saúde em processos de refino e distribuição (CONCAWE) publicaram um relatório em 2002 com estatísticas relativas aos vazamentos ocorridos nos oleodutos da Europa Ocidental em 30 anos (de 1970 a 2000). As causas dos vazamentos foram agrupadas em cinco categorias:

- (a) Falha mecânica – causas relacionadas à qualidade do material e à montagem do duto;
- (b) Falha operacional – causas relacionadas a falhas humanas e operacionais do sistema de transferência;
- (c) Corrosão – causas relacionadas ao desgaste provocado por agentes internos e externos ao duto;
- (d) Acidentes naturais – causas relacionadas a eventos naturais, tais como movimentação de terrenos e inundações;
- (e) Terceiros – Danos causados por agentes estranhos ao ambiente do duto, geralmente atividades humanas executadas na área.

Alguns fatores como modificações termo-físicas, mudanças na estrutura da tubulação ou dos acessórios (junções de restrições, expansões, bloqueio, etc.), mudanças na rugosidade, variação de temperatura, entre outros, podem provocar alterações no comportamento do escoamento do(s) fluido(s) fazendo com que haja uma variação na queda de pressão na posição do vazamento que origina ondas de pressão negativa que se propagam (à velocidade do som) a montante e a jusante do local de vazamento.

De acordo com Colombo *et al.* (2009), as ondas de pressão são, em teoria, perceptíveis em outros locais na rede e sua identificação e caracterização têm o potencial de revelar informações úteis sobre a natureza do sistema como um todo. Quando se alteram as condições de um escoamento este fenômeno é facilmente observado. Isto faz com que seja possível mudanças do estado estacionário para o transiente devido a perturbações provenientes de modificações acidentais ou planejadas como: abertura, fechamento ou vibração de válvulas; partida ou parada de bombas; falha ou colapso de uma tubulação ou tanque; vazamento ao longo de uma tubulação; etc. Teoricamente, um vazamento deve ser possível de localizar uma vez que, quando existe uma comparação do sinal de pressão (registrado por dispositivos de controle) em relação ao sinal que seria observado se o sistema não tiver um vazamento, haverá um comportamento particular ou singular.

Embora os pontos positivos associados à utilização de dutos na indústria de petróleo sejam consideráveis, deve-se ressaltar que os riscos associados ao transporte em dutos são muito altos. Um vazamento ou rompimento de dutos que transportam fluidos tóxicos pode levar a danos ambientais relevantes e com consequências desastrosas, em especial se o duto for construído em regiões alagadas, submersas ou em reservas ambientais (BEZERRA, 2008; AGUIAR, 2010).

Na Figura 3.3 estão ilustrados os rompimentos na estrutura de um *riser*, mais especificamente nos arames da armadura de tração, onde se apresenta uma forte concentração de tensão ou contato com soluções corrosivas (gases e água do mar), acelerando o surgimento de falhas. Na Figura 3.4 estão representadas as maiores incidências de vazamentos, que ocorrem na estrutura (ou corpo) do duto, enquanto que vazamentos ocorridos em flanges, válvulas e outros acessórios apresentam as menores estatísticas.

Diversos autores na literatura (WIKE, 1986; BILLMANN e ISERMANN, 1987; BAGHDADI e MANSY, 1988; SANDBERG *et al.*, 1989; NAVES, 1991; STOUFSS e MICHEL, 1993; WATANABE *et al.*, 1993; ZHANG, 1996; BAPTISTA *et al.*, 2001; BRAGA, 2001; CAMERINI, 2004) estudaram métodos diretos e indiretos para detectar

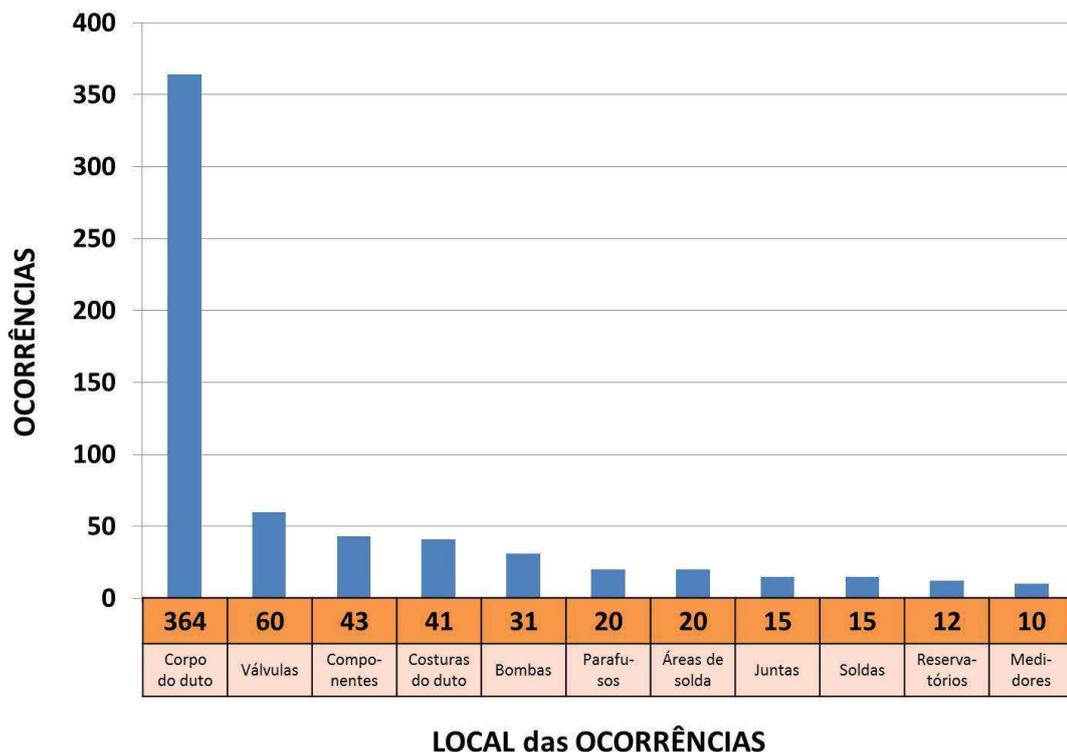
vazamentos em dutos, utilizando modelagem matemática e aparatos experimentais. Baptista e Moura (2002), Sousa *et al.* (2007) e Colombaroli (2008) estudaram métodos acústicos de detecção de vazamentos. Métodos de detecção de vazamentos utilizando análises de transientes hidráulicos foram estudados por Naves (1991), Jönsson (1994), Buiatti (1995), Braga (2001), Jönsson (2001), Macias *et al.* (2005), Sousa (2007), Bezerra (2008) e Azevedo (2009).

Figura 3.3 - Rompimentos na estrutura de um *riser* flexível.



Fonte: Marinho, *apud* Simões, 2011.

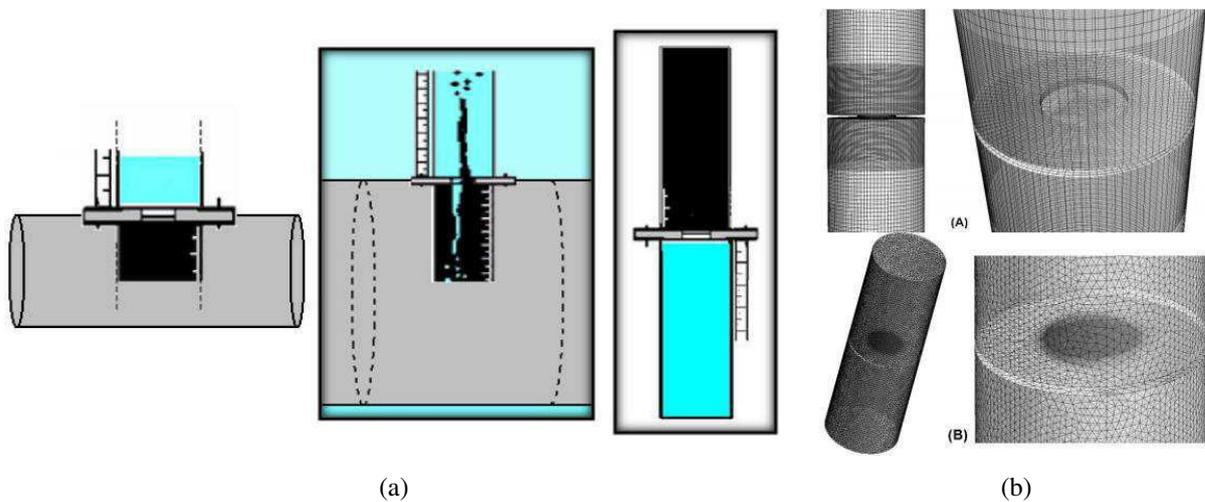
Figura 3.4 - Maiores incidências de vazamento em instalações de transportadoras americanas no período de 2002 a 2009.



Fonte: Adaptado de PHMSA, 2010.

Oliveira *et al.* (2009) propuseram uma modelagem CFD (*Computational Fluid Dynamic*) de um vazamento submarino utilizando o *software* ANSYS CFX[®] baseando-se em um estudo prévio realizado em laboratório que analisou experimentalmente um vazamento submarino resultando em um modelo semi-empírico para estimar a quantidade de óleo vazado. Os dados experimentais foram obtidos a partir de um aparato experimental (Figura 3.5a) para a observação do fenômeno de inversão de fases água/óleo através de um orifício e medição do volume de óleo vazado ao longo do tempo. O modelo computacional foi capaz de simular em 3D a inversão de fases água/óleo fornecendo informações do escoamento bifásico e imiscível. Nesta etapa foi utilizado o *software* ICEM CFD para a geração da geometria e das malhas tetra (Figura 3.5b) e hexaédricas que foi construída a partir do modelo experimental para que os resultados obtidos pudessem ser comparados com os dados experimentais. O resultado da simulação foi de boa precisão em relação à velocidade de vazamento e reproduziu de forma adequada as características geométricas (*fingers* ou dedos) observadas durante o experimento.

Figura 3.5 - (a) Modelo físico para o estudo experimental do vazamento de óleo a partir de dutos submersos; (b) Malha numérica gerada a partir da geometria do aparato experimental.



Fonte: Oliveira *et al.*, 2009.

Simões (2011) exemplificou alguns métodos de monitoramento óptico que objetiva analisar direta e continuamente deformações (axiais, circunferenciais e torcionais) da capa polimérica dos *risers*, associando estas deformações com rupturas nos arames da armadura de tração. Também foi utilizada uma linha de monitoramento direto onde os arames são individualmente instrumentados com sensores ópticos, que monitoram as

tensões/deformações dos mesmos. Resultados de ensaios em escala real mostraram que a probabilidade de detecção do monitoramento indireto aumenta significativamente quando o sistema é empregado em conjunto com outros tipos de monitoramento indireto. O autor relata que o interesse no monitoramento da integridade estrutural de *risers* flexíveis tem crescido significativamente nos últimos anos, podendo ajudar na antecipação de alertas de possíveis falhas e auxiliar programação de paradas para manutenção.

Camerini (2012) mostrou que um dos principais mecanismos de falha em *risers* flexíveis é o rompimento de arames da armadura de tração, o que ocorre de forma progressiva, podendo ser causada por diferentes processos, tais como corrosão pelo ingresso de fluido no espaço anular entre capa e armadura, desgaste excessivo associado com o contato e atrito entre arames adjacentes ou entre as diferentes camadas metálicas da armadura, ou mesmo a presença de níveis elevados de tensões produzidas pelos carregamentos mecânicos aos quais o *riser* é submetido durante a operação. O duto flexível é capaz de manter-se em operação mesmo com alguns dos arames de suas armaduras rompidos, porém uma sequência de rupturas pode levar à ocorrência de vazamentos ou mesmo a falhas catastróficas. Uma das principais alternativas é fazer monitoramento contínuo, em tempo real, para evitar que o dano progressivo resulte em acidentes com severas consequências econômicas e ambientais. É possível identificar diretamente a existência de um dano/falha na integridade do duto ou indiretamente através de um sistema de sensoriamento que registra indicações secundárias, possivelmente consequência da falha. O autor desenvolveu um sistema de monitoramento baseado em vibrações. Foram realizados ensaios em escala real, utilizando acelerômetros instalados na capa polimérica externa do *riser*, para captar sinais de vibração no momento de ruptura do arame. Os resultados mostraram que a resposta vibratória do sinal de ruptura apresenta características específicas, garantindo uma boa confiabilidade na detecção. Porém, as probabilidades de detecção dos eventos de rupturas aumentam significativamente quando dois sistemas de monitoramento de naturezas complementares são empregados simultaneamente.

Araújo (2012), Barbosa (2012) e Sousa (2012) utilizaram o *software* ANSYS CFX[®] para simular numericamente escoamentos multifásicos em dutos com orifícios de vazamentos, apresentando resultados de campos de pressão, fração volumétrica, temperatura e velocidade das fases envolvidas. Os autores identificaram que o maior gradiente de pressão se dá na região próxima ao orifício de vazamento, ou seja, pequenas variações nos valores da pressão são observadas antes e após a ocorrência do vazamento. Araújo (2012) destacou que o tempo

necessário para que o comportamento de pressão atinja a estabilidade após o vazamento depende do diâmetro do orifício de escape dos fluidos no duto. Barbosa (2012) verificou que, quanto maior a viscosidade de um óleo, maior é a queda de pressão durante o escoamento. Um aumento na fração volumétrica de gás na mistura (trifásica) gera, possivelmente, um amortecimento na queda de pressão total do fluido, diminuindo assim o valor da queda de pressão total na superfície avaliada. A autora também analisou que o vazamento acarreta um pequeno aumento da temperatura apenas na região vazante. Sousa (2012) observou que, em todos os casos bifásicos (água-óleo) analisados, houve uma oscilação na queda de pressão total nos instantes iniciais do vazamento, sendo o período transiente muito curto (inferior a 0,03 s), devido à baixa vazão mássica no orifício de vazamento. A oscilação na queda de pressão total foi maior nos casos de maior fração volumétrica de água na mistura ou a velocidade de escoamento da mesma.

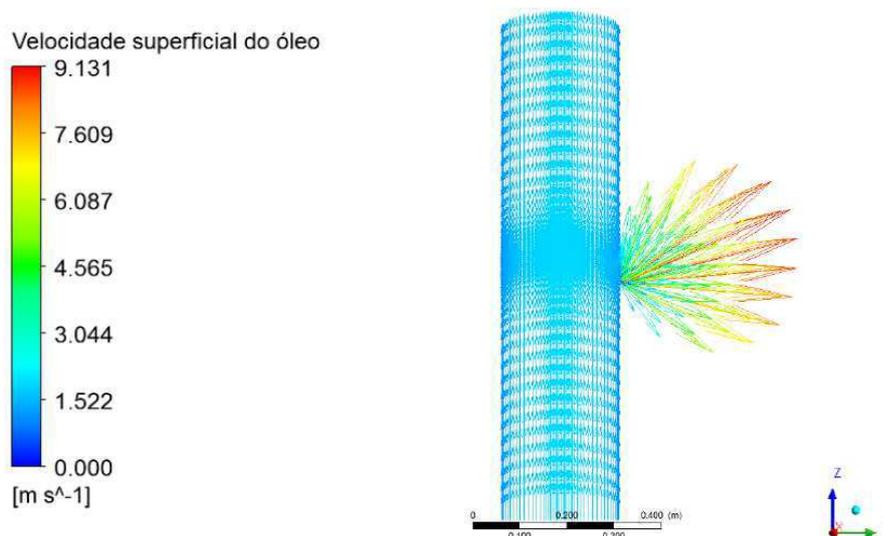
Tavares (2012) avaliou a termo-fluidodinâmica do escoamento trifásico (óleo-água-gás) com vazamento. As equações de conservação de massa, momento linear e de energia para cada fase (óleo, fase contínua e água e gás, fases dispersas) foram resolvidas numericamente usando o *software* ANSYS CFX[®], com auxílio de uma malha estruturada representativa do tubo horizontal com um orifício de vazamento. Foi adotada a abordagem Euleriana-Euleriana e o modelo de turbulência RNG k- ϵ . Foi possível avaliar a influência do vazamento sobre o escoamento e sobre a evolução da pressão e queda de pressão com o tempo por meio dos campos de fração volumétrica, temperatura e os perfis de velocidade e pressão. Os resultados das simulações numéricas evidenciaram um papel importante com relação à escolha das condições de contorno no orifício de vazamento (velocidade ou pressão prescrita). A utilização da condição de pressão prescrita proporcionou resultados mais condizentes comparados com os disponibilizados na literatura.

Santos (2014) avaliou o escoamento multifásico transiente, não-isotérmico e tridimensional de óleo, água e gás em dutos verticais com e sem vazamento, com ênfase na influência da rugosidade da parede do duto e dimensões do orifício do vazamento. Foi verificado que a rugosidade da parede do duto, fase gás e a temperatura de alimentação da mistura influenciaram diretamente na queda de pressão média do escoamento. A Figura 3.6 mostra um dos resultados do campo vetorial de velocidade superficial da fase óleo próximo ao vazamento para um dos casos considerados (corte longitudinal).

Out *et al.* (1995), Henderson e Watson (1996), Andersen *et al.* (2001), Marinho *et al.* (2007a, 2007b), Martins (2008), Jacques *et al.* (2009), Soares *et al.* (2009),

Weppenaar e Kristiansen (2009), Morikawa *et al.* (2010) são autores que estudaram e analisaram técnicas de inspeção e monitoramento de *risers* flexíveis através de diversas metodologias.

Figura 3.6 - Campo vetorial de velocidade superficial da fase óleo próximo ao vazamento para um dos casos considerados (corte longitudinal).



Fonte: Santos, 2014.

3.3 Dispersão de Poluentes em Corpos d'Água

Existe um grande potencial de acidentes que podem surgir devido à ocorrência de vazamentos durante a exploração de petróleo e gás natural em águas rasas (até 300 metros), profundas (de 300 a 1500 metros de lâmina d'água) e ultraprofundas (acima de 1500 metros). Os vazamentos acidentais podem estar relacionados a ruptura de poços ou tubulações de transporte e transferência ou até mesmo naufrágio de embarcações. As consequências são diversas como danos ambientais de grandes proporções, perda financeira devido a danos estruturais (em plataformas, cabeças de poço, redes de tubulações), e perdas humanas, uma vez que há risco de incêndio, explosão, liberação de material tóxico, entre outras situações (FALCÃO, 2015; *site* PETROBRAS, 2015).

Derramamentos de óleo em corpos d'água podem ocorrer em rios, lagos, baías e no mar (*offshore*). Quando o óleo e seus derivados entram em contato com o ambiente marinho,

o tipo e o volume de óleo e as condições meteorológicas locais (vento, temperatura, intensidade luminosa, ondas, correntes, etc.) desempenham um importante papel durante e após o vazamento. Os processos físicos e químicos que ocorrem de forma contínua que dominam no ambiente marinho são a evaporação, emulsificação, dispersão natural, dissolução, foto-oxidação, sedimentação e biodegradação. A persistência no meio ambiente ou o desaparecimento ao longo do tempo depende da natureza da substância derramada (VALDIVIA, 2010; TESTA e JACOBS, 2014).

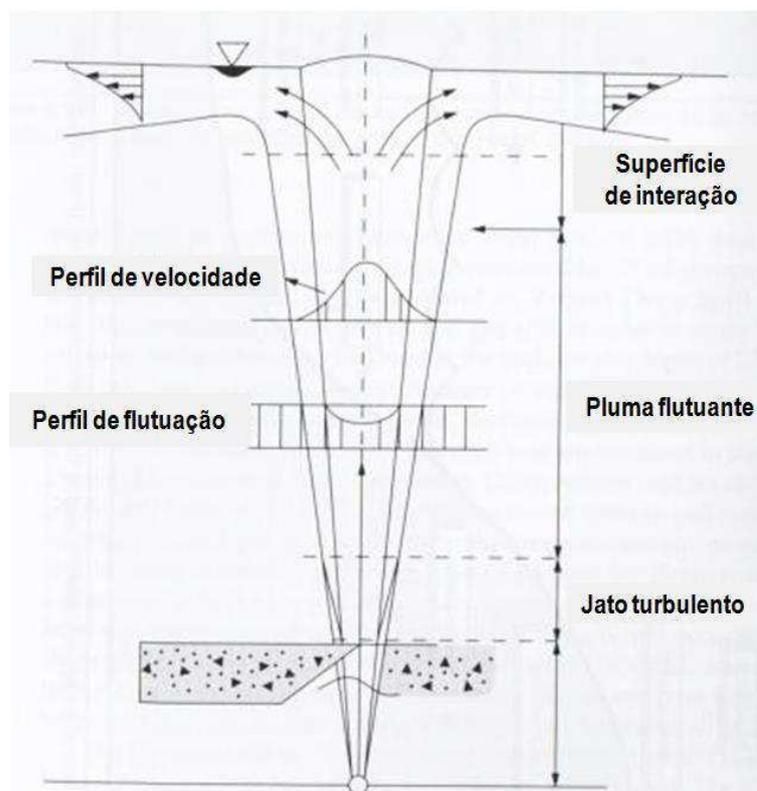
As transformações sofridas pelo petróleo ou seus derivados no ambiente (ou intemperizações) são regidas por processos de (PALADINO, 2000):

- Evolução primária: afeta características físicas do produto (densidade, viscosidade, solubilidade, etc.) sem alteração na natureza química dos componentes. Concentra processos de espalhamento do produto derramado (em inglês o termo é denominado “*spill*”), evaporação de componentes leves, emulsificação, dispersão, sedimentação por aderência de partículas suspensas na água;
- Evolução secundária: engloba processos mais lentos que podem se estender de meses a anos, atuando sobre o produto já envelhecido. Os processos atuantes sobre as moléculas nesta fase são a oxidação química ou fotoquímica.

A dispersão natural é o processo de geração de pequenas gotículas (com menos de 0,02 mm de diâmetro, aproximadamente) do produto derramado que ficam suspensas na coluna de água facilitando o processo de biodegradação. Seu máximo é atingido em aproximadamente dez horas e continua por muitas semanas participando da redução do volume da mancha, mas dependente de turbulências geradas pelo vento e ondas. Quando derramada no ambiente, a mancha formada se desloca periféricamente como resultado do processo de expansão e em uma determinada direção que é a resultante da ação dos ventos e das correntes.

Os derivados de petróleo lançados no mar devido a um *blowout*, por exemplo, passam através de três diferentes zonas (Figura 3.7): zona de alta velocidade e turbulência próximo à cabeça do poço; zona de formação de pluma e uma terceira zona que vai até à superfície do mar (PALADINO, 2000; TESTA e JACOBS, 2014). De acordo com Wörner (2003), a força de flutuação (diferença entre a força gravitacional e a força de empuxo) é um dos fatores mais importantes que contribuem para a elevação do óleo proveniente de um vazamento em alto mar.

Figura 3.7 - Esquema de formação de pluma de óleo após *blowout* submarino.



Fonte: Adaptado de Testa e Jacobs, 2014.

A aplicação de modelos a corpos de águas naturais consiste na modelagem hidrodinâmica e do transporte de substâncias dissolvidas ou em suspensão. Estes fenômenos são representados pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento. Devido à complexidade dessas equações, nem sempre é possível alcançar a solução analítica facilmente, e é a partir daí que entram as técnicas numéricas, em que as equações diferenciais que descrevem o fenômeno do escoamento e o transporte em domínios contínuos são transformadas em equações algébricas que descrevem estes fenômenos em domínios discretos. Com o surgimento dos computadores aliados ao conhecimento sobre Mecânica dos Fluidos, a solução de modelos matemáticos de elevada complexidade tornou-se possível, através da Fluidodinâmica Computacional (ALVES, 2006; GOBIRA, 2008; SOUZA, 2010).

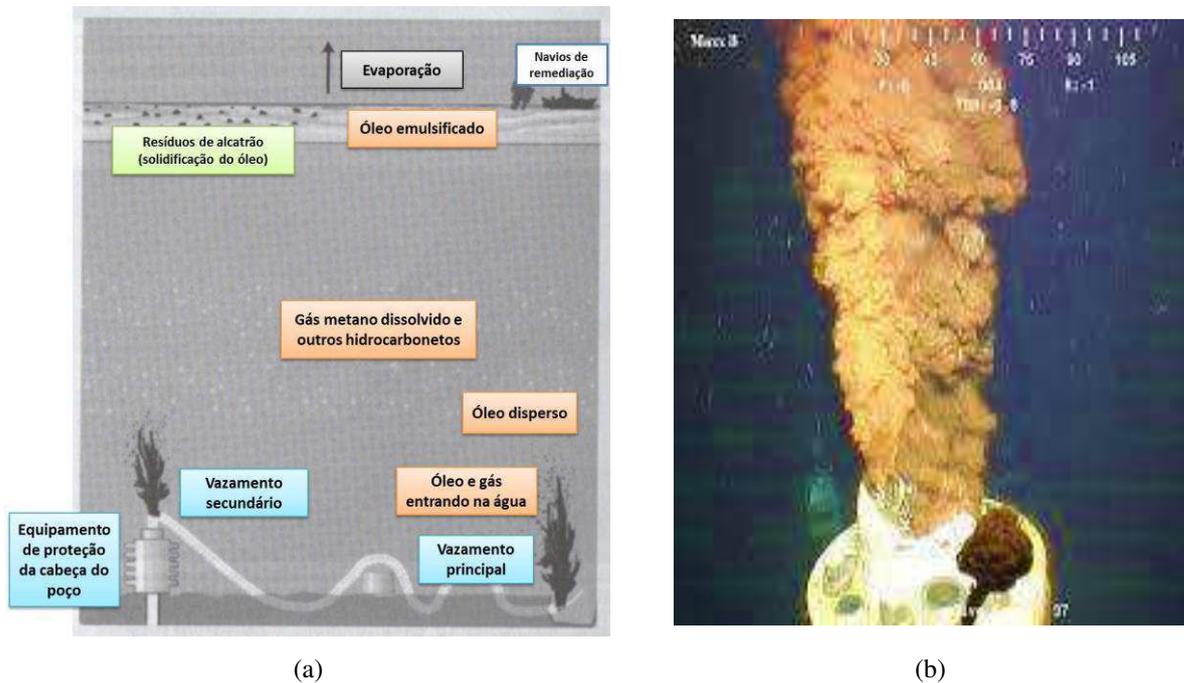
Roberts (*apud* Baptistelli, 2008) comenta que a dispersão de um poluente pode se dar em duas regiões distintas nas escalas temporal e espacial: o campo próximo, dominado pela turbulência gerada por jatos efluentes da fonte, forças de empuxo, escoamento ambiente e perfis de densidade; e o campo afastado, onde predominam a turbulência gerada pela hidrodinâmica local.

De acordo com Bleninger (*apud* Baptistelli, 2008), quando um efluente é lançado em forma de jato submerso, uma força de empuxo proporcional à diferença entre a densidade do efluente e a densidade do corpo receptor, faz com que o fluxo se eleve à superfície. Nesse processo, o jato mistura-se com a água e tanto a quantidade de movimento quanto o empuxo decrescem, enquanto que a energia cinética e a energia potencial são transformadas pelas forças tangenciais. Esse processo é denominado de diluição inicial e ocorre no campo próximo. Quando o jato atinge o nível de equilíbrio hidrostático na superfície, ou abaixo desta, a mistura sofre uma transição entre o fluxo vertical e o espalhamento horizontal, iniciando-se a transição entre campo próximo e o campo afastado.

Uma vez que a substância contaminante esteja no meio receptor, esta é transportada e dispersada de acordo com suas características e as condições hidrodinâmicas da zona. O sistema de transporte é composto por duas categorias: a advecção (que move o contaminante devido ao fluxo do fluido) e a difusão (dada pela mistura do contaminante por movimento aleatório do fluido). Na escala microscópica, a difusão ocorre como difusão molecular resultante do movimento aleatório Browniano das partículas do fluido; em escalas maiores, ocorre uma difusão turbulenta, devido a redemoinhos. Ambos têm a tendência de minimizar os gradientes (isto é, diferenças em concentração) devido ao movimento de massa de uma região de alta concentração para uma região de baixa concentração (SOTO, 2004).

Em abril de 2010, a plataforma *Deepwater Horizon* da empresa BP - *British Petroleum* posicionada em águas ultra-profundas (1522 m), na região do Golfo do México (66 km da costa da Louisiana, EUA), explodiu devido a um *blowout* durante o processo final de perfuração de um dos poços. A explosão na plataforma ocorreu devido à presença de grande quantidade de gás metano presente durante o evento de *blowout*, que chegou até à plataforma e encontrou fontes de ignição (Figura 3.8a). Havia 126 trabalhadores na plataforma durante o acidente, dentre os quais 11 morreram e 17 ficaram feridos, além do grande e histórico desastre ambiental que se seguiu. Após 1 dia de chamas, a plataforma afundou e, durante a descida, a coluna de perfuração se rompeu vazando mais quantidade de óleo e gás na cabeça do poço (Figura 3.8b). O processo de controle do vazamento e fechamento do poço no fundo mar só foi bem sucedido após 3 meses, após ter vazado cerca de 4,9 milhões de barris, equivalente a cerca de 780 mil m³ de óleo cru e gás natural. Regiões situadas a 1070 km da costa foram impactadas pelo óleo, além do grande e custoso esforço para as remediações ambientais (TESTA e JACOBS, 2014).

Figura 3.8 - (a) Esquema do vazamento no fundo do mar como o ocorrido após acidente com a plataforma *Deepwater Horizon* em 2010; (b) Imagem real do vazamento na cabeça do poço.



Fonte: Adaptado de Testa e Jacobs, 2014.

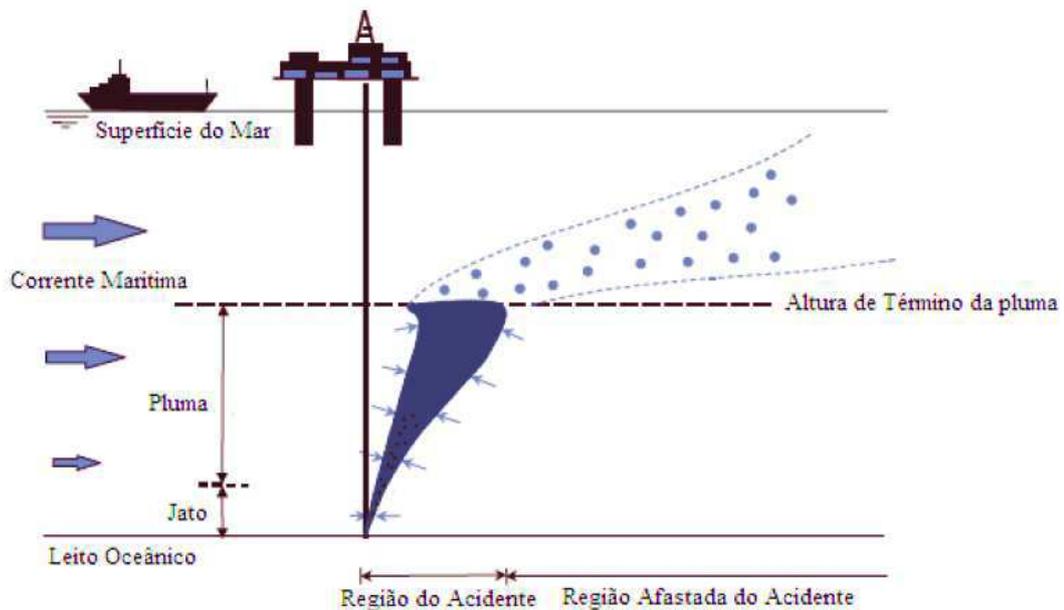
3.4 Formação de Plumais Multifásicas

A dispersão de um efluente no mar é bastante complexa e, para compreender seu comportamento, deve-se levar em consideração diversos fatores como: o tipo de efluente, os pontos de descarga, a hidrodinâmica das correntes marítimas, a influência das marés e dos fatores meteorológicos, a profundidade do solo marinho, entre outros. Os tipos mais comuns de efluentes leves (menos densos que a água) são os esgotos sanitários (provenientes de emissários submarinos ou poluição difusa), vazamentos acidentais de hidrocarbonetos em área de complexos industriais e portuários e a descarga de águas de lastro de navios. O óleo proveniente de vazamento no mar de navios ou por dutos é uma mistura complexa que envolve uma grande quantidade de substâncias químicas (BAPTISTELLI, 2008).

Do ponto de vista de contaminação marinha por poluentes provenientes de petróleo, a palavra pluma é definida como uma espécie de “nuvem” de fluido que se espalha e se estende desde seu ponto de origem (ou ponto de vazamento) até a superfície da água. As plumas multifásicas são caracterizadas quando o meio e as fases dispersas são de materiais (ou

substâncias) diferentes, como por exemplo, a dispersão de óleo na água do mar, ocorrendo a formação de uma pluma bifásica (Figura 3.9). Pode ocorrer que, durante o movimento de ascensão da pluma, algumas gotas de óleo sejam liberadas, o que se denomina de quebra de gotas e suas formações dependem da vazão de óleo lançada. No movimento inicial do vazamento as fases (água e óleo) sobem com a mesma velocidade mas, após uma determinada altura, a pluma se dispersa devido à redução das velocidades das gotas de óleo que, por terem tamanhos diferentes, se dispersam também em velocidades diferentes. A vazão de fluido e o tamanho do orifício de vazamento determinarão se realmente haverá formação de uma pluma e de pequenas gotas de óleo (CHAN, 2013; LINDERSEN, 2013; FALCÃO, 2015).

Figura 3.9 - Representação da formação de pluma multifásica em ambiente *offshore*.



Fonte: Adaptado de Lindersen, *apud* Falcão, 2015.

Na literatura existem poucos trabalhos relacionados ao escoamento multifásico em tubulações submarinas na presença de vazamento e consequente dispersão de fluidos no mar (YAPA e ZHENG, 1997; YAPA *et al.*, 1999; MASUTANI e ADAMS, 2001; OLIVEIRA *et al.*, 2009; BIEHL *et al.*, 2014; ZHU *et al.*, 2014; FALCÃO, 2015; MOREIRA, 2016). Muitos trabalhos tratam de dispersão e formação de plumas de óleo na superfície do mar (PALADINO, 2000; SOTO, 2004; ALVES, 2006; MACHADO, 2006; CUNHA *et al.*, 2007; BAPTISTELLI, 2008; GOBIRA, 2008; SOUZA, 2010) e poucos relatam estudos via fluidodinâmica computacional a respeito da formação de plumas em águas rasas, profundas

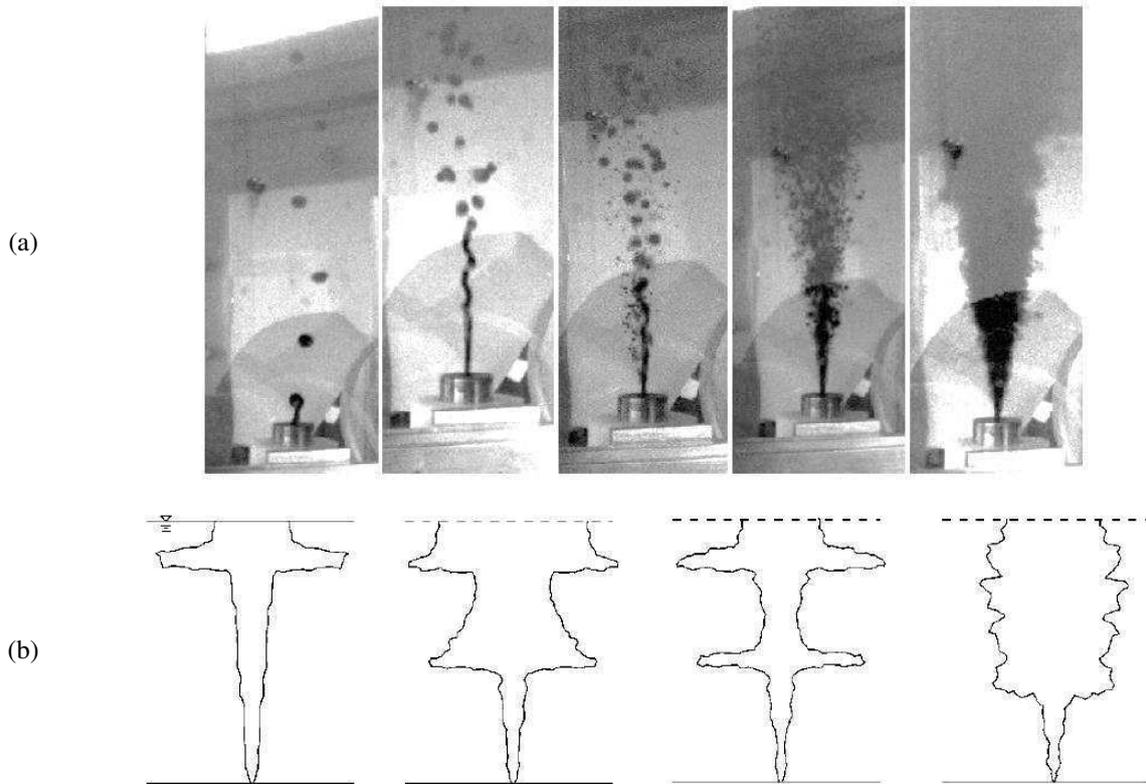
ou ultra-profundas e como se comporta a trajetória dos fluidos contaminantes a partir de um vazamento subsuperfície. Desta forma, há necessidade de uma abordagem mais ampla acerca do processo de escoamento de misturas multifásicas e, em especial, no contexto de dispersão do petróleo na água empregando a fluidodinâmica computacional.

Gobira (2008), Cloete (2009), Souza (2010), Zhu *et al.* (2014) e Falcão (2015) comentam que os modelos, recursos computacionais e programas ou pacotes de programas em CFD assumem papel importantíssimo como ferramentas de gerenciamento de acidentes em corpos d'água provenientes de vazamentos bem como simulação de redes de escoamento, especialmente em cenários dinâmicos. Os modelos integram e extrapolam informações a partir de medições e descrevem a hidrodinâmica do escoamento de fluidos e de processos de dispersão de contaminantes, otimizando redes de monitoramento e permitindo a definição de estratégias de ação, gerando benefícios secundários como treinamento de operadores e condução de análises de riscos e prevenção de falhas.

Masutani e Adams (2001) utilizaram a técnica experimental para mostrar o vazamento de óleo liberado através de um orifício de 2 mm de diâmetro em um tanque com água de 1,3 m de altura aberto para a atmosfera. Os resultados variando-se a vazão de saída de óleo pelo orifício mostraram que, em vazões mais altas, houve formação de uma pluma de óleo com dispersão e quebra de óleo em gotas, conforme mostrado na Figura 3.10a. Os autores mostraram ainda alguns tipos de comportamento de plumas multifásicas, conforme Figura 3.10b.

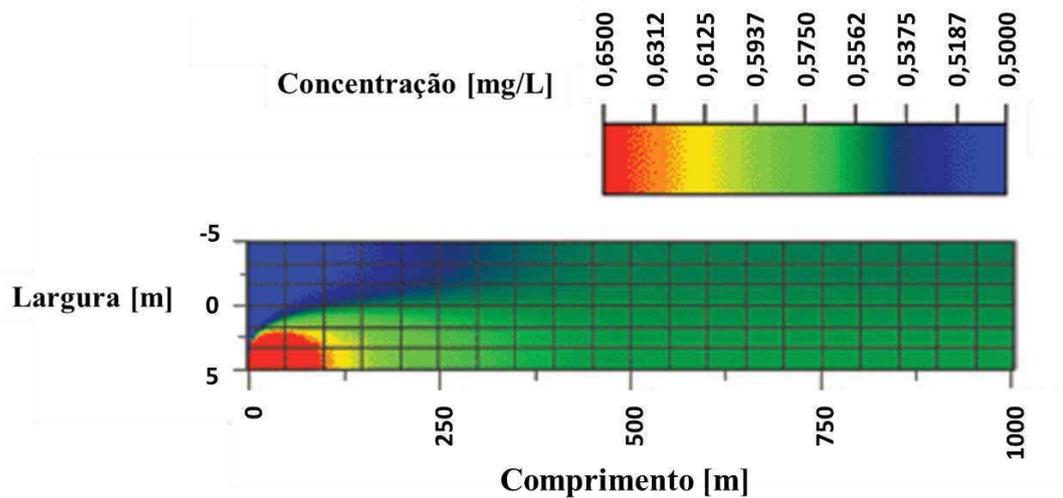
Modenesi *et al.* (2004) apresentaram um modelo tridimensional da metade de uma seção transversal elíptica cilíndrica de 1 km de extensão de um rio utilizando um código rápido baseado em técnicas de CFD para analisar e prever a dispersão de partículas ou substâncias. Os dados experimentais utilizados para a validação do modelo foram obtidos do Rio Atibaia, no Estado de São Paulo (Brasil), que recebe efluentes de várias indústrias. Perfis de velocidade e concentração para a substância foram obtidos através de uma solução numérica de equações de conservação de massa e momento. Verificou-se a aplicabilidade do modelo para três estudos de caso. Os resultados se mostraram em boa concordância. A Figura 3.11 mostra a distribuição de concentração do efluente (contaminante) sendo disperso na superfície livre do rio. O tempo computacional para as simulações tridimensionais não levaram mais que duas horas para o primeiro estudo de caso, mostrando que o modelo é bastante rápido tornando-se uma ferramenta poderosa para avaliações de risco.

Figura 3.10 - (a) Experimento em tanque de água com orifício de vazamento de óleo em diversas vazões consideradas; (b) Esquema de vários tipos de comportamentos de plumas multifásicas.



Fonte : Masutani e Adams, 2009; Testa e Jacobs, 2014.

Figura 3.11 - Distribuição de concentração na superfície livre do rio.



Fonte: Adaptado de Modenesi *et al.*, 2004.

Machado (2006) estudou a dispersão de substâncias orgânicas ao longo de um rio através de um modelo tridimensional utilizando técnicas de CFD. Dados experimentais utilizados para a validação do modelo foram obtidos do Rio Atibaia, em São Paulo (Brasil),

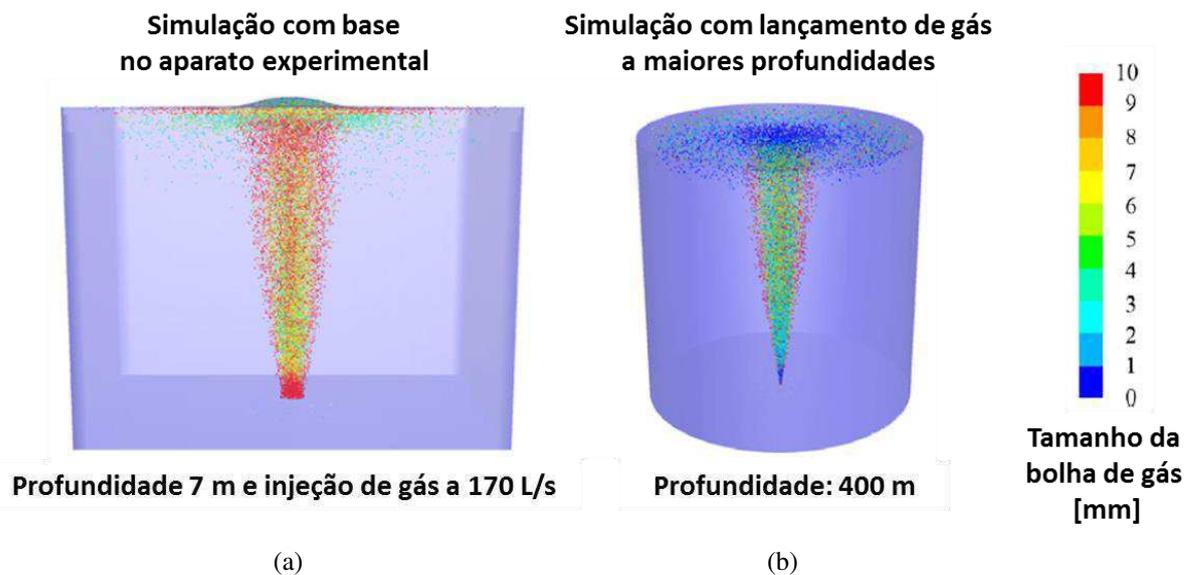
que recebe efluente da maior refinaria de petróleo no Brasil, a REPLAN. Implementou-se uma metodologia de solução das equações de conservação da massa e de momento com o uso do Método dos Volumes Finitos, utilizando uma malha tridimensional, o que permitiu obter perfis de velocidade e concentração para a substância. Foi utilizado um modelo algébrico de turbulência de ordem zero. O modelo de *Streeter-Phelps* foi usado para prever a concentração de substâncias orgânicas e de oxigênio dissolvido ao longo do rio. Desenvolveu-se um programa em linguagem Fortran capaz de resolver o modelo matemático proposto. Fez-se uma comparação dos resultados obtidos pelo modelo matemático com resultados experimentais e numéricos. Um modelo do rio foi gerado e simulado utilizando o *software* FLUENT, versão 6.1.22, da *Fluent Inc.*. A malha numérica em 3D, representada por um domínio de 3 metros de altura, 10 metros de largura e 10 metros de comprimento, possui 150 mil elementos hexaédricos. A metodologia proposta se mostrou uma boa ferramenta para a avaliação do impacto ambiental causado por emissões de poluentes nos rios. Os resultados do modelo matemático desenvolvido não mostraram boa concordância com os resultados numéricos do *Fluent*, porém mostraram boa concordância com os dados experimentais.

Cunha *et al.* (2007) simularam as principais características do escoamento do Rio Matapi (Distrito Industrial do Município de Santana – Amapá), aplicando o modelo de turbulência SST para avaliar o comportamento da dispersão de plumas de poluentes, de acordo com o regime transiente das correntes de marés, e analisar os picos máximos de concentração das mesmas em dois pontos diferentes previamente escolhidos e ao longo de um ciclo de maré (12,6 horas). A largura média do trecho estudado do Rio Matapi variou na ordem de 200-300 m, com profundidade média considerada em torno de 10 m. O comprimento total do trecho simulado foi de 7 km. A geração da malha (com 820.854 elementos tetraédricos) foi executada ICFM CFD v 5.10 da Ansys. O modelo de turbulência SST se mostrou suficientemente capaz de capturar os principais nuances da dispersão de plumas de poluentes, os picos de concentração, bem como os movimentos hidrodinâmicos do escoamento real esperado para o sistema fluvial em questão. O uso da ferramenta numérica é bastante útil para os estudos de escoamentos ambientais e da dispersão de poluentes em corpos naturais de água.

Cloete *et al.* (2009) desenvolveu um modelo matemático, tridimensional e transiente para simular o comportamento de uma pluma multifásica (gás-água) resultante de uma ruptura em gasoduto submarino. Um modelo VOF (*Volume of Fluid Model*) e DPM (*Discrete Phase Model*) foram utilizados em conjunto para levar em consideração os aspectos multifásicos,

além do uso do modelo de turbulência k-ε padrão. Foram utilizados aparatos experimentais para validação do modelo matemático, consistindo de recipientes retangulares de 7 metros de profundidade e com área transversal de 54 m², preenchidos com água e ar, e injeção de gás a diferentes vazões saindo através da base. As simulações no FLUENT da Ansys® foram realizadas a partir de uma malha numérica com 464.500 elementos representando o aparato experimental (Figura 3.12a). Além disso, também foram realizadas uma série de simulações de uma grande quantidade de gás lançado em um domínio de um oceano a diferentes profundidades (Figura 3.12b). Os autores obtiveram boa aproximação dos resultados numéricos com os resultados experimentais, incluindo altura da pluma, tempo de subida e perfis de velocidades. A modelagem matemática também foi aplicável nos testes de simulação para os lançamentos em maiores profundidades.

Figura 3.12 – Distribuição do tamanho da pluma de bolhas para o caso da simulação com base no (a) aparato experimental (7 metros de profundidade) e com base no (b) teste a grandes profundidades.



Fonte: Cloete *et al.*, 2009.

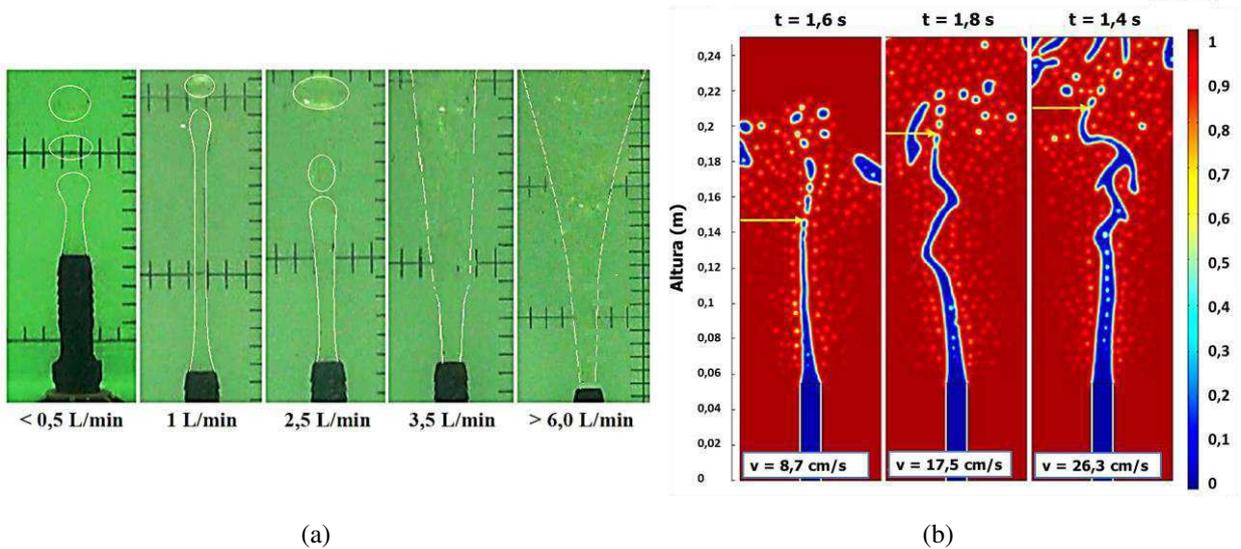
Souza (2010) utilizou modelagem computacional para avaliar a dispersão de um derrame hipotético de óleo no canal de acesso ao Porto de Tubarão, na Baía do Espírito Santo. Foram identificadas as regiões impactadas e o tempo em quem o óleo demorou em chegar até a costa. Utilizou-se uma modelagem Lagrangeana da trajetória do óleo utilizada para definir a área de influência do derramamento. O sistema computacional MOHID foi utilizado para avaliar a hidrodinâmica (forçada pela maré e ventos) e a trajetória do óleo. Os resultados das simulações (considerando apenas a influência das marés) reproduziram os padrões de

circulação de trabalhos da literatura. Os resultados com a influência também do vento, mostraram novos padrões de circulação, apresentando maior influência na direção de deslocamento da pluma de óleo.

Feller (2012) construiu uma bancada experimental como cenário para montagem de ensaios com vazamento com o intuito de analisar o comportamento de jatos de óleo em meio subaquático e sua ocupação em um balão de captura. Foram analisados pontos de fragmentação do jato (Figura 3.13a), onde foi possível determinar a altura em que ocorre a fragmentação em função da velocidade de injeção de óleo, sendo possível servir de estimativa do posicionamento de um balão para a captura de óleo. Além disso, foram realizadas simulações onde foi possível reproduzir as alturas de fragmentação do jato de óleo de maneira semelhante com o observado nos experimentos (Figura 3.13b). O autor relatou que 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. Também foi reproduzido por meio de simulação computacional o preenchimento de um balão com óleo (Figura 3.14) para mostrar contrafluxos no bocal de recepção. Observou-se ainda que a existência de um fluxo reverso de água que sai do balão prejudica a entrada de óleo em processos de captura.

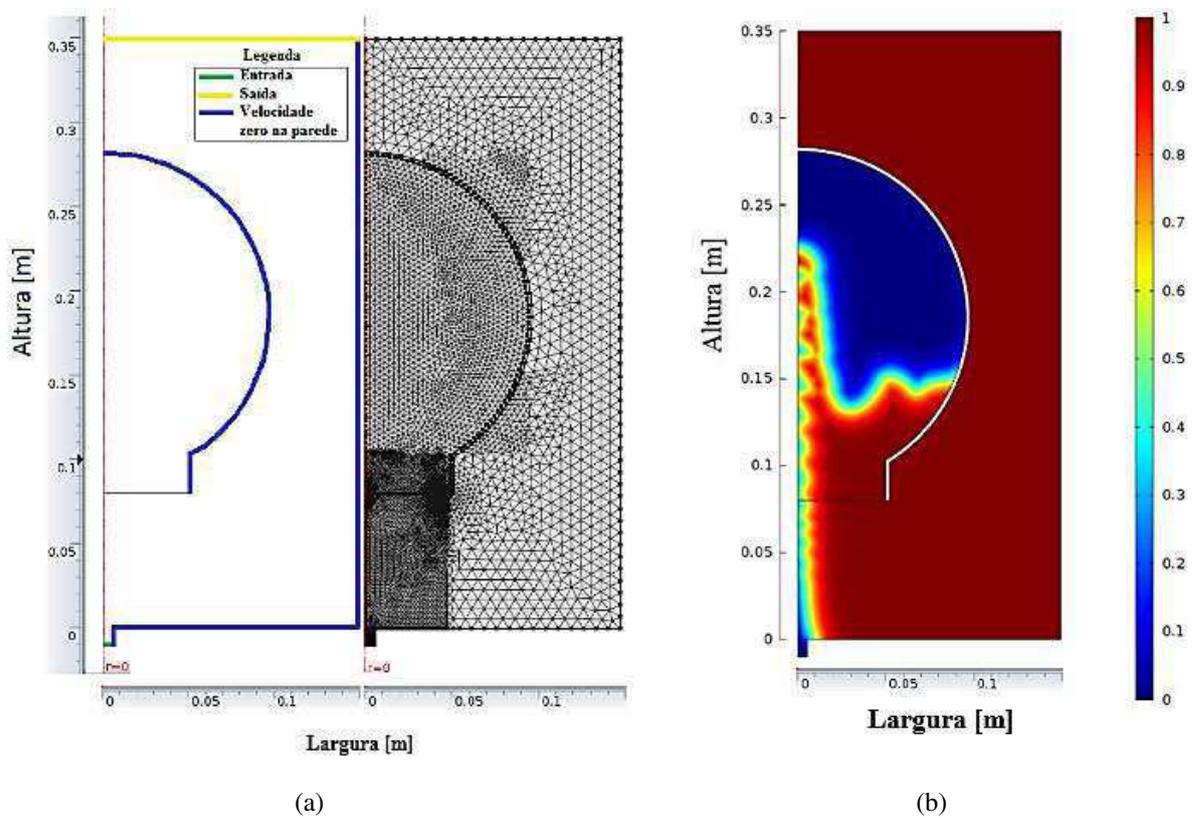
Li *et al.* (2012) comentaram que existem poucos trabalhos na literatura baseados em estudos de derramamento submarino de óleo; geralmente a maioria é baseada em estudos de derramamento de óleo na superfície do mar. Os autores utilizaram o FLUENT da Ansys para prever a trajetória de óleo em uma simulação de vazamento de óleo a partir de um orifício em um duto submarino. A quantidade e a trajetória de óleo derramado sob diferentes pressões de operação e velocidades de corrente foram comparados e analisados. Além disso, a interatividade entre a água e o óleo também foi discutida. Os resultados mostraram que a dispersão de óleo na água foi menor em maiores pressões de operação ou a baixas velocidades de corrente.

Figura 3.13 - (a) Imagens do experimento da variação da altura de fragmentação do jato com o aumento da vazão de injeção; (b) Campos de fração volumétrica da água (vermelho) e do óleo (azul) obtidos pelas simulações em diferentes velocidades durante os instantes de fragmentação. As setas indicam o ponto de fragmentação do jato.



Fonte: Feller, 2012.

Figura 3.14 - (a) Domínio e condições de contorno (esquerda) e malha utilizada (direita); (b) Distribuição de frações de volume de óleo (azul) e água (vermelho) para o tempo de 92 s a partir do início do vazamento.



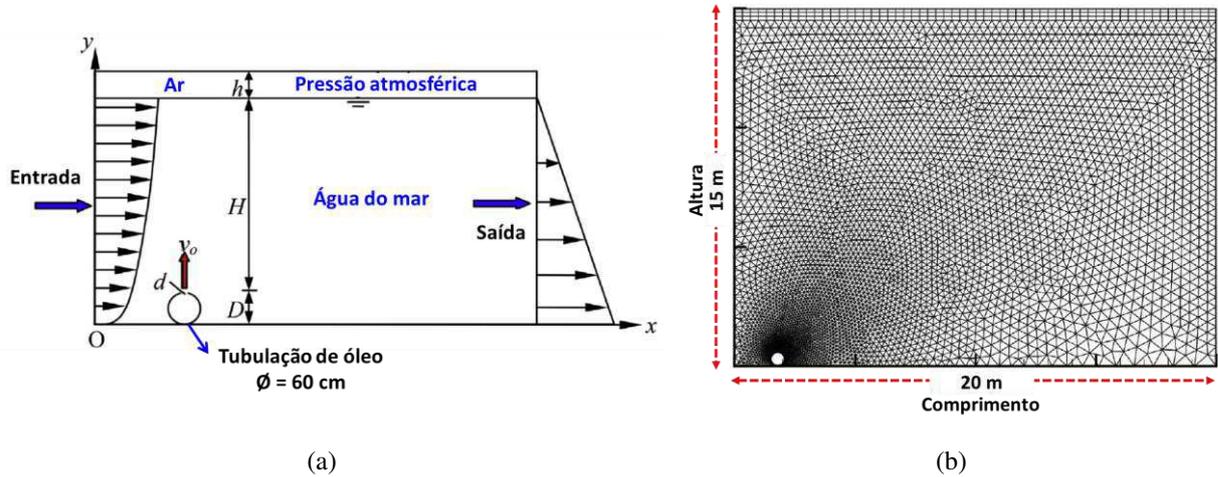
Fonte: Feller, 2012.

Biehl *et al.* (2014) mostraram, por meio de simulações no *software* COMSOL *Multiphysics*® 4.3a e no *Wolfram Mathematica* v.8, o escoamento de um jato de óleo vertical através de um bocal de coleta (tubo submerso sem contra fluxo de água) para estudar o fenômeno de ascensão do óleo. O bocal de recepção funciona como um dispositivo para coletar e armazenar o óleo sem que este consiga atingir a superfície. Assumiu-se um sistema bifásico óleo/água, em regime laminar, isotérmico, domínio bidimensional axissimétrico para modelar a ascensão do óleo. No *software* COMSOL, os autores utilizaram um modelo de interface denominado de *phase-field* para modelar o fluxo de dois diferentes líquidos imiscíveis. No *software* *Wolfram Mathematica* foi utilizado um modelo simplificado a partir de ajuste dos resultados obtidos pelo COMSOL. Os autores testaram diferentes velocidades de injeção do óleo e diâmetros do bocal de coleta. Os resultados dos modelos numéricos utilizados se mostraram satisfatórios.

Zhu *et al.* (2014) utilizaram a técnica CFD por meio do *software* FLUENT para estudar o fluxo de óleo por meio de orifício de vazamento de diferentes tamanhos. O intuito era investigar o processo de derramamento de óleo a partir de uma tubulação submarina até à superfície do mar. A malha numérica com 9011 elementos (Figura 3.15b) foi gerada a partir de um domínio 2D retangular com 15 metros de altura e 20 metros de comprimento (Figura 3.15a), que foi tomado como modelo de comparação com o Campo de Kenli, localizado no Mar de Bohai (China) que tem uma profundidade média de 14,5 metros. Além disso, no domínio computacional foi inserido um tubo submarino com diâmetro de 60 cm, posicionado no leito marinho. Os autores analisaram os efeitos da densidade do óleo, taxa de vazamento de óleo, tamanho do orifício de vazamento e velocidade da água do mar. Foi observado que, para maiores densidades do óleo, menores taxas de vazamento de óleo, menores tamanhos de orifício de vazamento ou maiores velocidades da corrente de água, o óleo leva maior tempo para alcançar a distância máxima horizontal quando atinge a superfície. Esta distância máxima horizontal aumenta com o aumento do tamanho do vazamento ou velocidade da água do mar, e diminui diretamente proporcional à taxa de vazamento. A Figura 3.16 mostra o processo de vazamento de óleo desde a tubulação submarina até à superfície para um caso padrão (densidade do óleo = 870 kg/m³; velocidade máxima da corrente = 0,1 m/s; diâmetro do vazamento = 5 mm) no qual 39 segundos são necessários para que gotas de óleo alcancem a superfície do mar. Foi observado que, sob ação conjunta da gravidade, força de inércia, empuxo e tensão de cisalhamento, o óleo vazado aparece na forma de gotículas e aglomerados de gotículas na região do domínio. Conforme as gotas de óleo sobem, estas se tornam mais

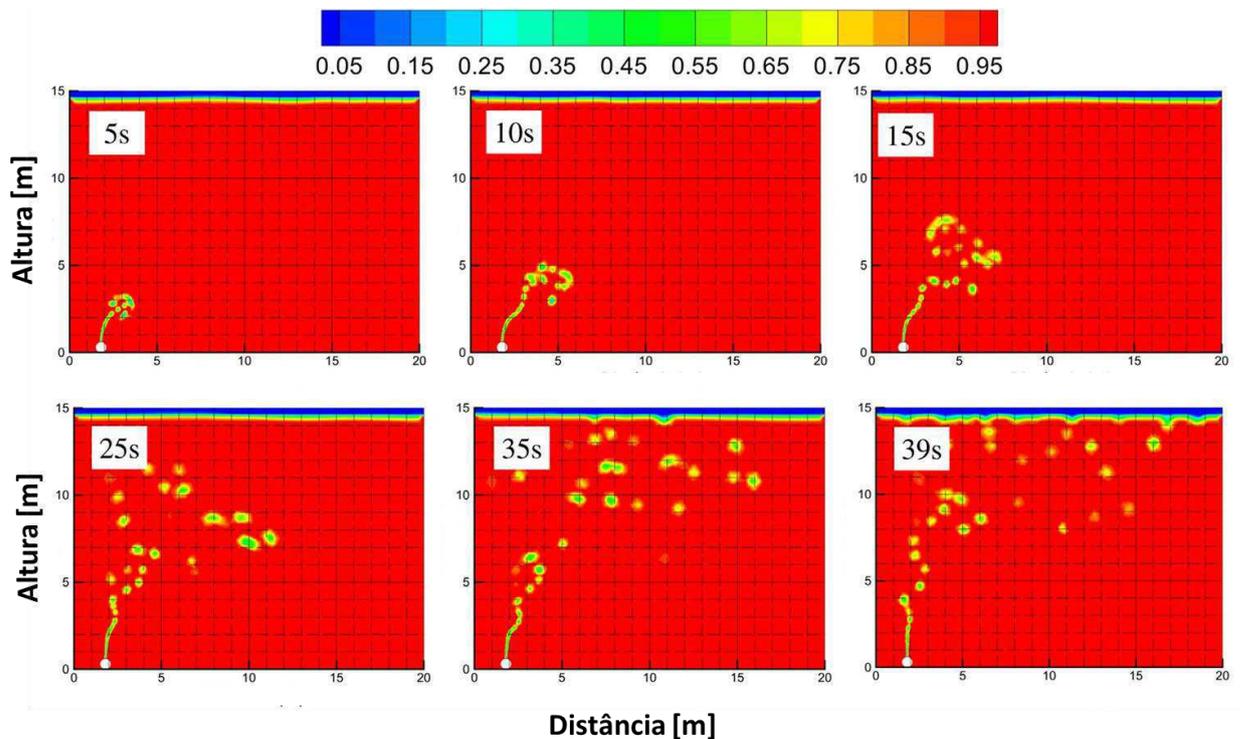
dispersas. Em $t = 39$ s, a extensão horizontal das gotículas é cerca de 3 vezes maior que em $t = 15$ s, por exemplo. Os autores utilizaram também uma equação preditiva para o cálculo do distanciamento máxima da pluma de óleo até a superfície.

Figura 3.15 - Visão geral do (a) domínio computacional e condições de contorno e da (b) malha numérica gerada.



Fonte: Adaptado de Zhu *et al.*, 2014.

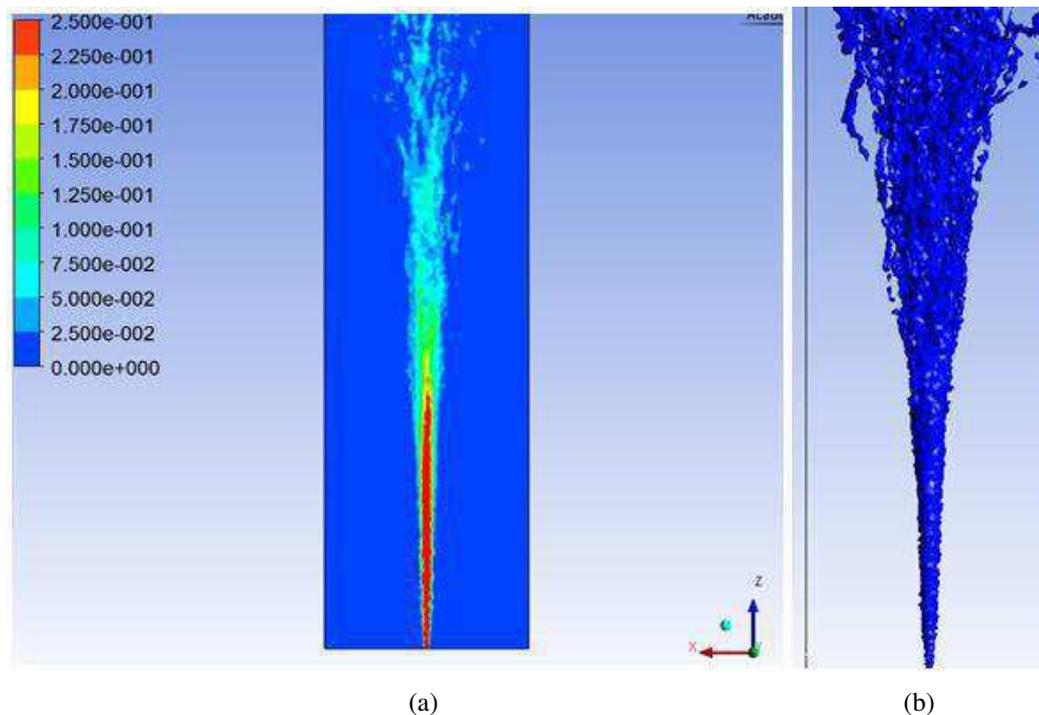
Figura 3.16 - Campo de fração volumétrica para um processo de vazamento de óleo desde a tubulação submarina até à superfície do mar para um caso no qual gotas de óleo alcançam a superfície em 39 segundos.



Fonte: Adaptado de Zhu *et al.*, 2014.

Falcão (2015) reproduziu o sistema experimental de Masutani e Adams (2001) utilizando a técnica de Fluidodinâmica Computacional para realizar simulações de vazamento de óleo em água em grandes profundidades. Para isso, foram criados dois diferentes problemas, um representando um pequeno tanque com água e o outro representando uma região marinha de mais de 800 metros de profundidade. As simulações do tanque com água serviram como teste para as diferentes condições de contorno empregadas necessárias para reproduzir o vazamento de óleo em grandes profundidades. Foi utilizado o *software* ANSYS CFX[®] 15 para simular e dar informações sobre como o óleo se comporta em condições extremas, através da dispersão em gotas ou pela formação de pluma. Foram utilizadas as abordagens Euleriana e Lagrangeana, e foram testados modelos de turbulência, modelos de forças de dissipação turbulenta, dentre outros. Na Figura 3.17, o autor mostra a dispersão de uma pluma de óleo com desprendimento de gotas para uma baixa vazão de óleo, em um dos casos com abordagem Lagrangeana, mostrando uma boa reprodutibilidade com o sistema experimental de Masutani e Adams (2001). Em abordagens Eulerianas foi observado, na maioria das simulações, a formação da pluma de óleo e o seu desvio devido a correntes marítimas, porém não foi possível visualizar desprendimento de gotas de óleo da pluma.

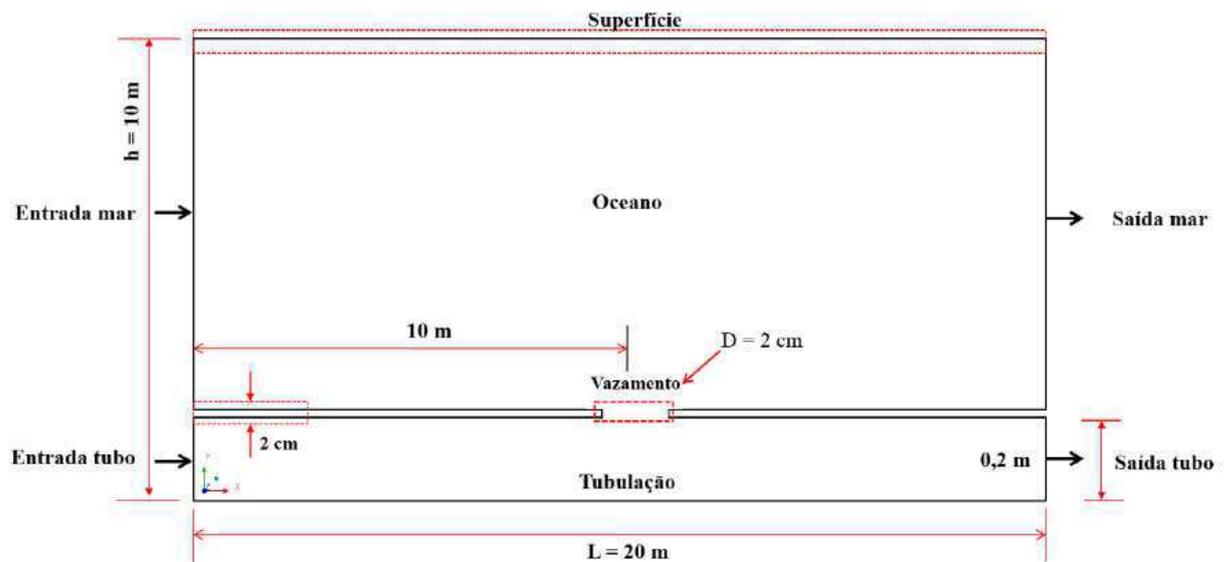
Figura 3.17 - (a) Fração volumétrica do óleo variando de 0 a 0,25 em um dos estudos com abordagem Lagrangeana; (b) isosuperfície de fração volumétrica do óleo constante e igual a 0,01.



Fonte: Falcão, 2015.

Moreira (2016) estudou numericamente, utilizando o *software* ANSYS CFX[®] 15, o comportamento do vazamento de óleo no mar a partir de duto horizontal submerso (de 20 cm de diâmetro com um orifício circular de vazamento com 2 cm de diâmetro) e vice-versa (entrada de água para dentro da tubulação de óleo). A autora adotou regime transiente e modelo bidimensional com base nas equações de conservação de massa, momento linear além do modelo de turbulência k-ε padrão. O domínio físico utilizado foi o apresentado na Figura 3.18. Uma malha numérica foi gerada com 139.488 elementos hexaédricos e 93.666 pontos nodais. O comportamento dinâmico do óleo e da água foi representado com auxílio de campos de pressão, velocidade superficial e fração volumétrica de óleo e da água, e vetores de velocidade. Os resultados indicaram a presença de vazamento de óleo na correnteza marítima e de entrada de água para a corrente de óleo no tubo através do orifício de vazamento.

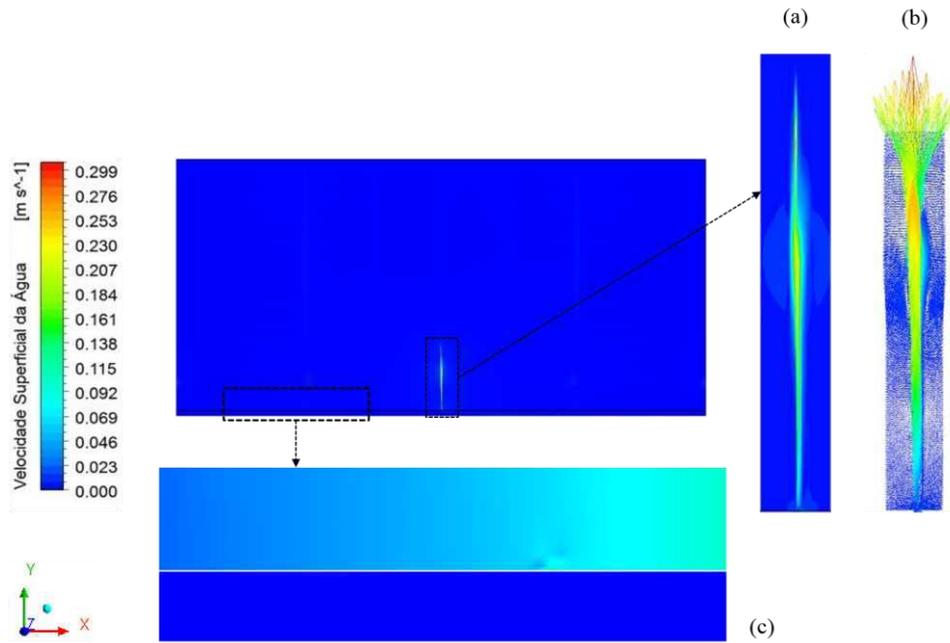
Figura 3.18 - Domínio físico de um vazamento de óleo no mar a partir de duto horizontal submerso.



Fonte: Moreira, 2016.

Na Figura 3.19 está representado o campo de velocidade superficial da água em todo o domínio (tubo e mar), obtido por Moreira (2016), com um destaque para a região do vazamento, representado pelo jato de óleo, ilustrando a distribuição e campo vetorial de velocidade, parte da tubulação e da correnteza marítima, para uma velocidade de óleo igual a 2,16 m/s. Foi observado que o óleo adentra na forma de um jato decorrente da diferença de pressão entre o vazamento e o domínio mar e sua velocidade superficial atinge um valor de aproximadamente 0,3 m/s.

Figura 3.19 - Campo de velocidade superficial da água em todo o domínio (tubo e mar) e detalhe do jato de óleo na região mar: (a) campo de velocidade, (b) campo vetorial de velocidade e (c) trecho da tubulação horizontal e da corrente marítima.



Fonte: Moreira, 2016.

4. METODOLOGIA

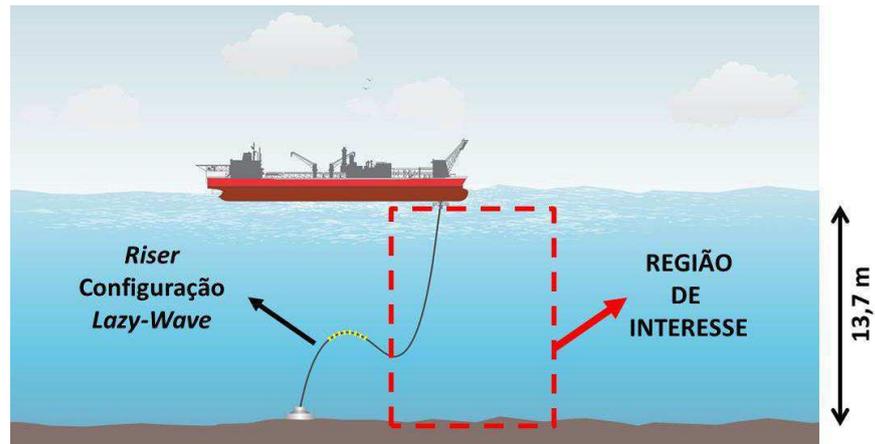
Todas as atividades foram desenvolvidas no Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI) e no Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos (LCTF) das Unidades Acadêmicas de Engenharia Química e Engenharia Mecânica, respectivamente, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (CCT/UFCG).

4.1 Descrição do Problema

O problema físico avaliado consiste na dispersão de óleo advindo de um orifício de vazamento em um duto submarino para uma região externa a este, correspondente a uma parcela do oceano, conforme ilustra a área destacada na Figura 4.1. O domínio é tridimensional cuja forma foi assumida igual à de um paralelepípedo de dimensões 15 x 13,7 x 10 m (Figura 4.2a), onde a profundidade de 13,7 m representa uma lâmina d'água baseada no trabalho de Zhu *et al.* (2014) que levaram em consideração o campo de Kenli, localizado no Mar de Bohai (China) e que tem uma profundidade média de 14,5 m. Esta profundidade é respaldada de forma semelhante por Queiroz (2011) que, ao analisar a estabilidade de dutos rígidos submarinos, sujeitos à ação de ondas e correntes marítimas, adota uma profundidade relativamente rasa, de 35 m, para um oleoduto de 51 cm de diâmetro a 3,0 km da costa do Rio de Janeiro, na Bacia de Campos. A escolha de uma lâmina d'água muito rasa (regiões costeiras, estuários, baías) se deve ao fato do limite computacional restrito das máquinas utilizadas para esta pesquisa. Dimensões maiores produziriam uma malha numérica com um número de elementos muito grande, o que poderia aumentar muito o tempo computacional para a obtenção dos resultados. Além disso, é importante lembrar que, em uma situação real, os danos ambientais devido ao vazamento de fluidos tóxicos em pequenas profundidades tornam-se relativamente altos (Zhu *et al.*, 2014), uma vez que a dispersão é mais acentuada.

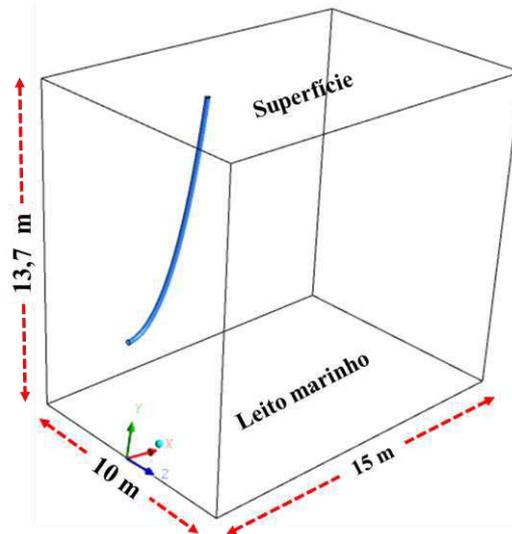
Em uma situação real da indústria do petróleo, as tubulações de escoamento ou transporte de fluidos possuem dimensões consideráveis. É conveniente ressaltar que o esquema da Figura 4.1 é apenas representativo e não está em escala real, podendo parecer desproporcional do ponto de vista do leitor. As dimensões consideradas (Figuras 4.2a e 4.2b) são utilizadas apenas para estudo e análise do problema.

Figura 4.1 Esquema de uma instalação offshore com destaque para a região de interesse estudada nesta pesquisa.

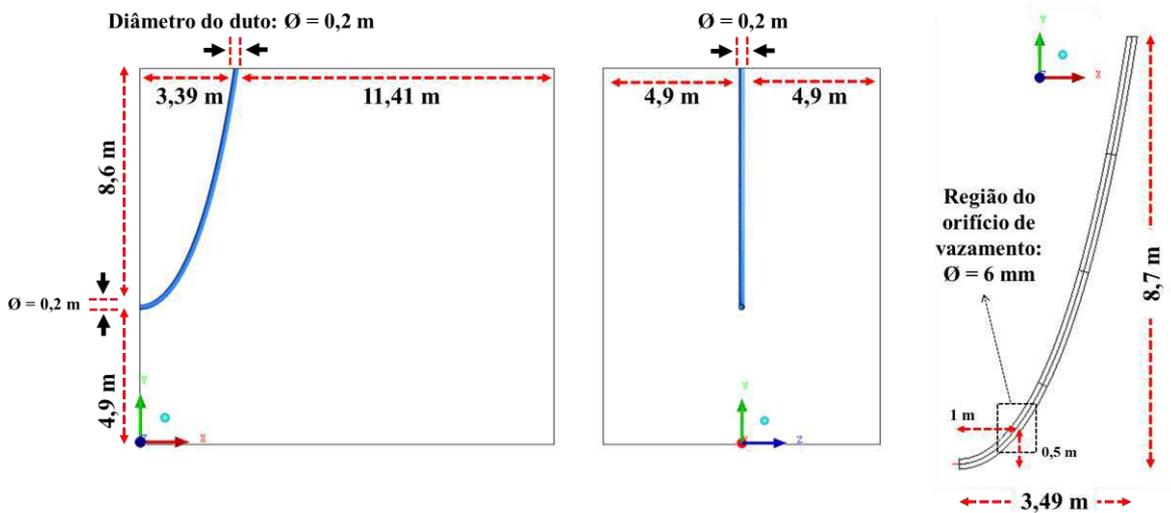


Fonte: Próprio Autor, 2016.

Figura 4.2 – Visualização da geometria criada para os dois domínios: (a) mar e (b) catenária.



(a)



(b)

O orifício de vazamento é tratado no formato circular como forma de simplificação da geometria e está localizada na parede do duto (*riser*) em formato de catenária (com configuração *Lazy-Wave*). O domínio externo ao *riser*, conforme ilustrado na Figura 4.2a, é apresentado em formato de um paralelepípedo, apresentando-se delimitado na parte inferior pela topografia do terreno (leito marinho), e na parte superior por uma camada de água (lâmina d'água). As fronteiras laterais limitam a região de interesse do problema, posicionadas de maneira a assumir condições de controle apropriadas para o caso estudado. As faces de menor área a montante e a jusante representam, respectivamente, a entrada e saída da corrente marítima no domínio, que foi considerada escoando unidirecionalmente através da parcela do oceano estudado. A fase poluente (óleo) adentra no domínio de estudo através do orifício de vazamento adotando-se uma condição de contorno adequada.

O *riser* no formato de uma catenária foi construído a partir da equação geral para a catenária (AMARANTE, 2009):

$$\hat{y}(\bar{x}) = 3,51 \cdot \cosh(0,549576 \cdot \bar{x}) - 3,505 \quad (4.1)$$

onde \hat{y} é dependente de \bar{x} (comprimento horizontal) e representa a altura da catenária.

A solução $\hat{y}(\bar{x})$ dada pela Equação 4.1 é aplicada a um cabo flexível e inextensível, suspenso em dois pontos e sujeito a seu próprio peso e toma a forma do gráfico cosseno hiperbólico; essa curva leva o nome de “catenária”. Ressalta-se que embora o significado da palavra “catenária” seja a de uma trajetória curva, aqui será utilizada para denominar o próprio duto submarino (*riser*). Partindo desta equação, utilizou-se o *software* Excel para definir os pontos para a geração da curva da catenária com 8,7 metros de comprimento vertical, 3,49 metros de comprimento horizontal e diâmetro de 20 cm. Os domínios de estudo foram criados por meio da definição de pontos, curvas e superfícies definindo-se tamanho e formato da catenária utilizando o Ansys ICEM CFD v.15.

4.2 Geração da Malha Numérica

A geração da malha consiste em dividir o domínio de estudo em um determinado número de células computacionais, sendo estas estruturadas ou não-estruturadas. A obtenção da malha que represente adequadamente o domínio de estudo tem um impacto significativo sobre a taxa de convergência (ou divergência) dos resultados, a precisão da solução, o tempo

de simulação requerido, entre outros. A qualidade da malha está associada à precisão dos resultados numéricos obtidos e depende de sua densidade, da relação entre o tamanho de cada elemento em relação ao elemento de referência (fator de expansão), quantidade de elementos tetraédricos e/ou hexaédricos, refinamento da malha, entre outros. A construção da geometria e geração da malha numérica não é uma tarefa fácil e requer uma boa estratégia de elaboração o que, quase na totalidade dos estudos de casos em pesquisas com CFD, pode levar um período de tempo relativamente alto.

Inicialmente optou-se pelo desenvolvimento de uma malha estruturada utilizando elementos hexaédricos adotando uma estratégia de construção de blocos (*blocking*). Esta estratégia gerou problemas em regiões específicas do domínio que conduziram a uma malha de baixa qualidade e, em alguns casos, com elementos com volumes de controle negativos, o que inviabilizava a sua utilização nas simulações numéricas. Neste sentido, optou-se por geração de malhas empregando volumes de controle prismáticos e piramidais que, de acordo com o que é reportado por Maliska (2004), estas malhas são mais versáteis, com mais facilidade de adaptatividade, embora tenha a desvantagem da não uniformidade na ordenação dos elementos. Nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente, observa-se o detalhe das vistas frontal e lateral da malha numérica não-estruturada e detalhe da região junto à seção de entrada da catenária e região do orifício de vazamento com diâmetro de 6 mm. Na Figura 4.5, observa-se o detalhe da malha numérica não-estruturada nas regiões de entrada e saída da catenária, que apresenta 20 cm de diâmetro. Nestas figuras são mostradas uma malha numérica com 1.465.650 elementos tetraédricos e 244.221 nós.

A escolha para o tamanho do orifício de vazamento (6 mm) foi baseada no trabalho de Zhu *et al.* (2014), onde os autores relatam que testes em tubulações submarinas do campo petrolífero de Bohai (China) mostram que furos ou rachaduras presentes nestas estruturas são devido à corrosão ou erosão por fluxo (poucos apresentam danos mecânicos) e que estes orifícios de vazamento apresentam formato circular ou aproximadamente circular, variando entre 0,006 a 0,08 m de diâmetro.

Na Figura 4.6, tem-se a visualização do histograma gerado por meio do *Display Mesh Quality*, disponibilizado no ICEM CFD v15, indicando o parâmetro de razão de aspecto (*aspect ratio*) obtida. Este parâmetro indica que a razão entre a maior e menor aresta de um determinado elemento ou entre a menor ou maior aresta (ANSYS, 2013). Isso significa dizer que se a razão de aspecto for muito grande, o elemento está muito “deformado”.

Figura 4.3 – Detalhe das vistas lateral e frontal da malha numérica não-estruturada gerada.

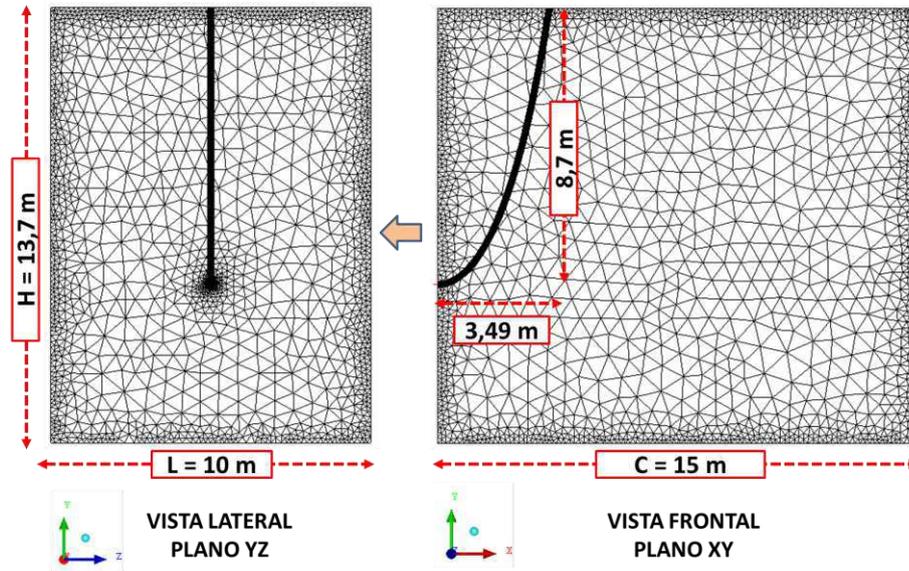


Figura 4.4 – Visualização da malha numérica não-estruturada com destaque para as regiões da base e de orifício de vazamento da catenária (*riser*) com 8,7 m de altura e 3,49 m de comprimento horizontal.

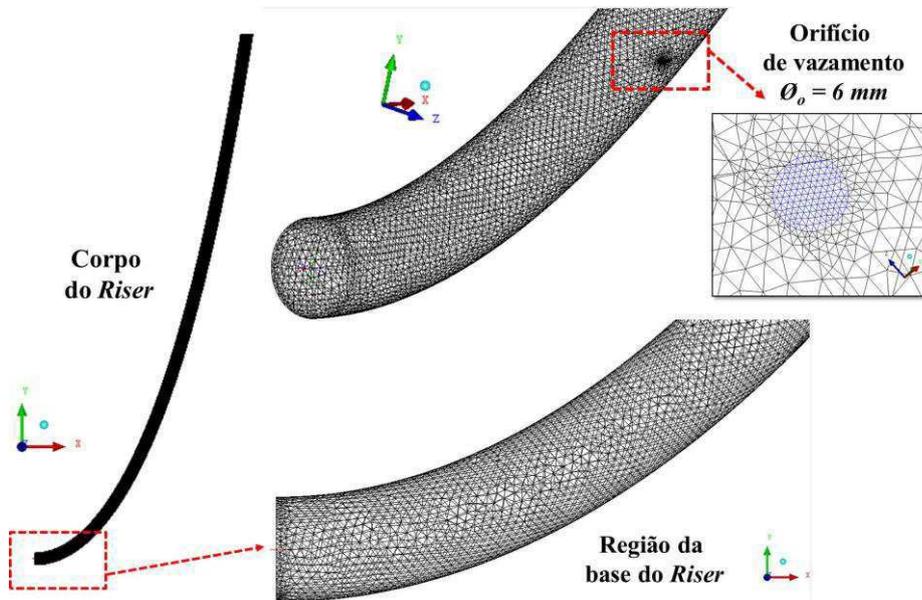


Figura 4.5 – Visualização da malha numérica nas regiões de entrada e saída da catenária (*riser*).

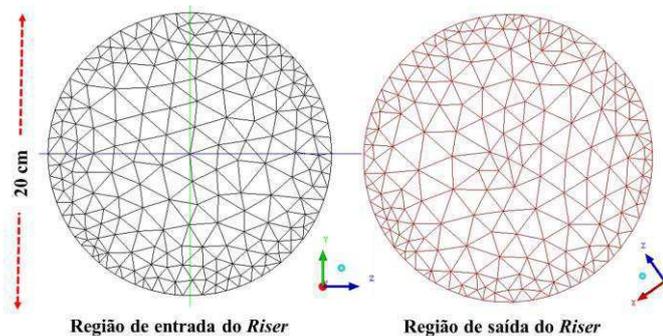
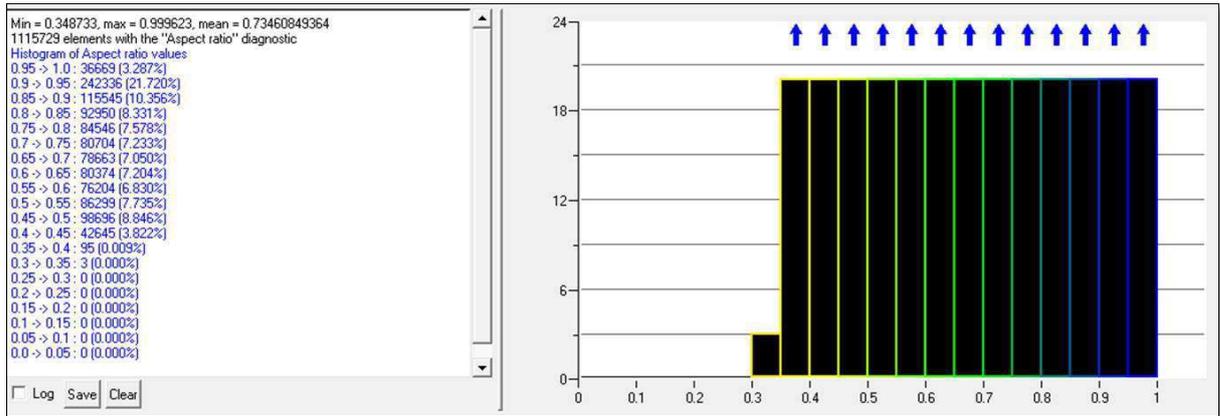


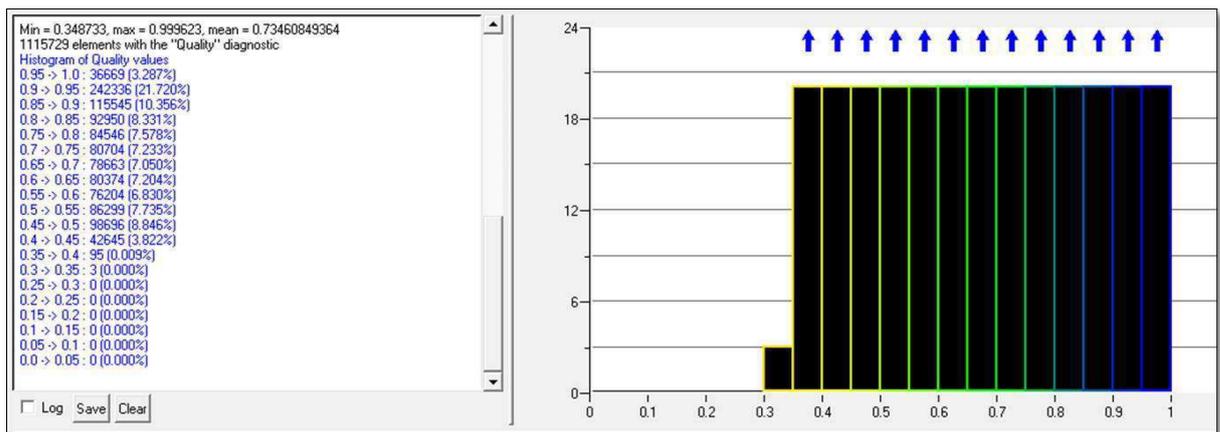
Figura 4.6 – *Display Mesh Quality* - parâmetro *Aspect Ratio* - disponibilizada no ICEM CFD v15.



Fonte: Dados da Pesquisa, 2016.

Na Figura 4.7, tem-se a visualização do histograma gerado por meio do *Display Mesh Quality*, disponibilizado no ICEM CFD v15, indicando o parâmetro de qualidade (*quality*) obtida. O critério para uma boa razão de aspecto e para a qualidade é entre 0,35 e 1 (ANSYS, 2013). Pode-se notar que uma grande parte de elementos (em torno de 58%) apresentam qualidade acima de 70% (ou acima de 0,70), significando que a malha é de boa qualidade, e necessitou de um maior refinamento em regiões menores, mais críticas e mais próximas à parede da catenária.

Figura 4.7 – *Display Mesh Quality* - parâmetro *Quality* - disponibilizada no ICEM CFD v15.



Fonte: Dados da Pesquisa, 2016.

As características da catenária e do seu entorno estão resumidas na Tabela 4.1 a seguir:

TABELA 4.1 Características da catenária e da região de entorno.

Dados geométricos	
Projeção vertical	8,7 m (Pereira Filho, 2010)
Projeção horizontal	3,49 m (Pereira Filho, 2010)
Diâmetro da catenária	0,2 m (Arruda <i>et al.</i> , 2012)
Espessura da catenária	Desconsiderada
Dados particulares (falha estrutural)	
Diâmetro do orifício de vazamento	0,006 m (Zhu <i>et al.</i> , 2014)
Dados ambientais	
Profundidade (do leito à superfície) - H	13,7 m (Zhu <i>et al.</i> , 2014)
Largura do entorno - L	10 m
Comprimento do entorno - C	15 m
Ângulo de corrente marinha	0°

4.3 Modelo Matemático

No presente trabalho foram adotadas duas situações:

1. Considerando dois domínios de estudo: escoamento monofásico de óleo no interior da catenária e escoamento bifásico (água-óleo) no domínio externo à catenária;
2. Considerando apenas um domínio de estudo: escoamento bifásico (água-óleo) no domínio externo à catenária.

Para se definir o modelo matemático foram adotadas as seguintes considerações para as duas situações:

- Regime permanente (mesmo o problema sendo essencialmente transiente, levou-se em consideração a água escoando com vazão constante e unidirecional, promovendo o arraste de óleo, permitindo assim, assumir condições permanentes, ou seja, atingindo uma condição de equilíbrio, sendo possível avaliar o comportamento da pluma em um determinado instante de equilíbrio; há variações ponto a ponto, mas não há variações com o tempo);
- Regime turbulento e em condições isotérmicas;

- Não há reação química nem transferência de massa entre as fases;
- Fluidos incompressíveis com propriedades físico-químicas constantes;
- Foram adotadas propriedades físico-químicas de um óleo genérico;
- O efeito da gravidade é levado em consideração;
- Foi adotada a abordagem Euleriana-Euleriana empregando o modelo de transferência interfacial de Superfície Livre;
- Modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão;
- Foram desconsideradas as forças de não-arraste (forças de sustentação, força de lubrificação na parede, força de massa virtual e força de dispersão turbulenta);
- Foram desconsideradas as interações fluido-estrutura;
- O valor do coeficiente de arraste é constante e igual a 0,44 (válido para o regime turbulento);
- escoamento monofásico (óleo) interno à catenária, quando considerado;
- escoamento bifásico (óleo e água do mar) no domínio externo à catenária;
- A catenária não se deforma e está imóvel (não se movimenta com a correnteza da água no domínio MAR). Além disso, o escoamento interno, quando considerado, é ascendente.
- Considerou-se a catenária inicialmente cheia de fluido (óleo) com um escoamento que se desenvolve ao longo do tubo.

Com as condições de contorno adotadas, as Equações (2.13) e (2.14) se reduzem, neste caso, respectivamente a:

- Equação de Conservação da Massa,

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (4.2)$$

- Equação de Conservação do Momento Linear,

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_\alpha \left[\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] \right\} + \vec{S}_{M\alpha} + \vec{M}_\alpha \quad (4.3)$$

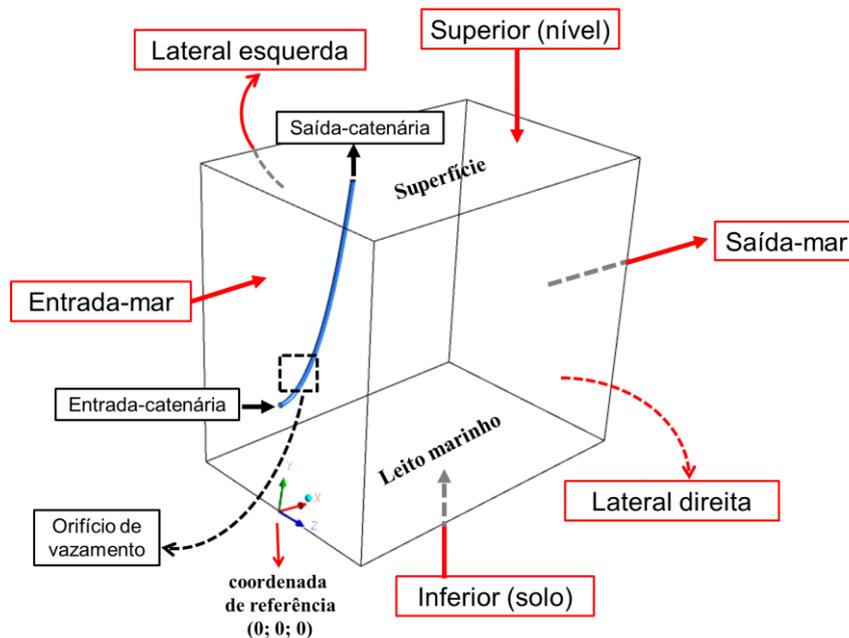
no qual o termo de transferência interfacial foi desconsiderado uma vez que não há transferência de massa interfacial na Equação (2.14). As forças interfaciais, \vec{M}_α ,

correspondem às forças de arraste (Equação 2.15), tendo em vista que foram desconsideradas as forças de não-arraste.

De acordo com o Manual do Ansys CFX[®] (2013), as equações de fechamento para as equações de conservação se aplicam de formas diferentes. Para a equação da continuidade, a soma das frações volumétricas das fases é igual a 1. Para a equação da transferência de quantidade de movimento, o fechamento é dado pela força de arraste entre as fases que é expresso pelo coeficiente de arraste e pela viscosidade turbulenta (Equação 2.40).

As condições de contorno aplicadas sobre as fronteiras do domínio para resolver as equações de conservação de massa e momento linear são mostradas abaixo (Figura 4.8) e conforme as Figuras 4.9 e 4.10:

Figura 4.8 – Condições de fronteira consideradas no domínio MAR e CATENÁRIA (vista tridimensional em perspectiva) com destaque para a coordenada de referência na origem.



- Na seção de entrada de água do mar (**fronteira entrada-mar**): perfil parabólico de velocidade (unidirecional – direção) e normal à seção transversal, dado pela Equação 4.4 (QUEIROZ, 2011; ZHU *et al.*, 2014). Esta equação foi implementada no módulo de pré-processamento do *software* no menu *Insert > Expression*.

$$v_w = v_{w\text{máx}} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{y}{H} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

onde o subíndice w representa a água do mar, $v_{wmáx}$ é o valor máximo atingido pela velocidade da água do mar, y é a variação da altura da coluna de água na direção vertical e H é a altura da coluna de água (desde o solo marinho até o limite superior).

- Na seção de saída de água do mar (**fronteira saída-mar**): foram estabelecidas duas diferentes condições, a depender do caso analisado:

(a) Pressão prescrita de 0 atm;

(b) Perfil linear de pressão estática (unidirecional e normal à seção de saída-mar), dado pela Equação 4.5 (ZHU *et al.*, 2014). Esta equação foi implementada no módulo de pré-processamento do *software* no *menu Insert > Expression*.

$$P_{saída-mar} = \rho_w \cdot g \cdot (H - y) \quad (4.5)$$

onde o subíndice w representa a água do mar, ρ_w é a densidade da água do mar, g é a aceleração da gravidade, y é a variação da altura da coluna de água na direção vertical e H é a altura da coluna de água (desde o solo marinho até o limite superior).

- **Fronteira superior (nível)**: velocidade constante e igual a $v_{wmáx}$ (unidirecional – direção x) e tangente ao plano XZ; fração volumétrica: $f_o = 0$ e $f_w = 1$.
- **Fronteira inferior (solo marinho)**: condição de parede (WALL), que trata a fronteira como uma parede lisa (hipótese de não-deslizamento), isto é, a tensão de cisalhamento é infinita e a velocidade é nula na parede.
- **Fronteiras lateral esquerda e lateral direita**: condição de derivada nula (no módulo de pré-processamento do *software* CFX, esta condição é definida como SIMMETRY). No Ansys CFX isso não significa necessariamente que as fronteiras sejam simétricas e sim que a velocidade normal à face (componente w) é nula e as velocidades no plano do escoamento (componentes u e v) são iguais aos valores resultantes no decorrer da simulação.
- No **orifício de vazamento**: adotou-se um valor constante de velocidade ($v_{óleo}$) e fração volumétrica de óleo igual a 1, com direção normal à seção circular do orifício de vazamento.

É importante ressaltar que se convencionou utilizar os dois domínios simultaneamente (MAR e CATENÁRIA) apenas para determinação da magnitude da velocidade de óleo na saída do orifício de vazamento (que foi utilizado como base para condição de contorno dos

casos propriamente estudados). Isto será detalhado mais à frente, no tópico de Resultados e Discussão.

As condições de contorno aplicadas sobre as fronteiras da catenária para resolver os casos em que foi considerado duplo domínio:

- **Seção de entrada:** velocidade prescrita de 0,5 m/s (direção normal à seção de entrada da catenária); fração volumétrica: $f_o = 1$ e $f_w = 0$;
- **Parede da catenária:** Lisa (*Smooth Wall*) e com a hipótese de não-deslizamento;
- **Seção de saída:** pressão prescrita de 1 atm.

Figura 4.9 – Condições de fronteira nos domínios MAR e CATENÁRIA (Vista Plano XY)

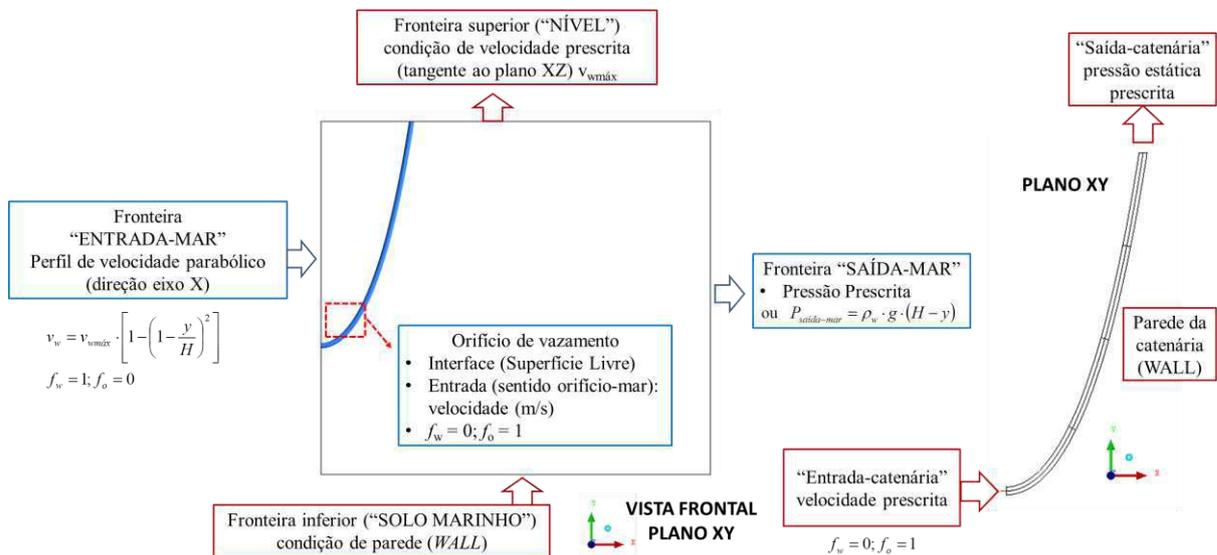
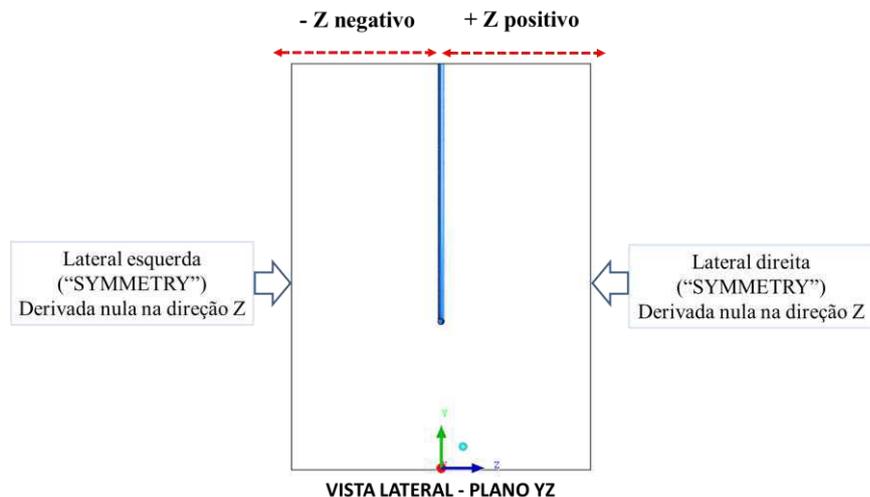


Figura 4.10 – Condições de fronteira no domínio MAR (Vista Plano YZ)



As propriedades físicas dos fluidos a 293,15 K usadas nas simulações são mostradas na Tabela 4.2. É conveniente lembrar que estas propriedades são baseadas em trabalhos da literatura não representando, necessariamente, uma situação real e sim uma adaptação, próxima a condições reais. O critério de convergência para a massa utilizado na simulação foi de 10^{-5} kg/s (Resíduo Médio Quadrático - RMS). O tempo médio de CPU (tempo de máquina) variou de 10 a 20 hs para o regime permanente (1500 interações). As condições gerais do problema e da solução numérica estão apresentadas na Tabela 4.3.

TABELA 4.2 Propriedades físicas dos fluidos utilizadas nesta pesquisa.

Propriedades	Óleo (fase contínua)	Água (fase contínua)
Densidade (kg/m ³)	870, 900 e 960 ⁽¹⁾	997 ⁽²⁾
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	0,02 ⁽³⁾	0,0008899 ⁽²⁾
	Óleo/Água	
Tensão superficial (N/m)	0,025 ⁽³⁾	

Fonte: ⁽¹⁾Zhu *et al.*, 2014; ⁽²⁾default Ansys CFX, 2013; ⁽³⁾Falcão, 2015.

TABELA 4.3 Condições gerais do problema e da solução numérica.

Condições gerais do modelo	
Tipo de escoamento	Bifásico, isotérmico
Regime de escoamento	Turbulento
Método numérico	Volumes finitos baseado em elementos finitos
Modelo multifásico	Não-homogêneo
Modelo de transferência interfacial	Modelo de Superfície Livre
Modelo de turbulência	$k-\varepsilon$ padrão com coeficiente de arraste igual a 0,44
Esquema de interpolação para a pressão	Trilinear
Esquema de interpolação para a velocidade	Trilinear
Esquema de advecção	<i>High Resolution</i>
Critério de convergência	Resíduo Médio Quadrático (RMS) normalizado igual a 10^{-5} kg/s

É importante destacar alguns detalhes da implementação do ANSYS CFX[®] no que diz respeito à pressão. Em uma situação estática e sem influência do empuxo ou em problemas monofásicos, a pressão absoluta é calculada como a soma da pressão p obtida com a solução das Equações de Navier-Stokes mais uma pressão de referência que é definida diretamente no

módulo de processamento do CFX. Geralmente, é considerada a pressão atmosférica (P_{atm}) para a pressão de referência (ANSYS, 2013). Assim,

$$P_{abs} = p + P_{ref} \quad (4.6)$$

Quando o empuxo é considerado deve ser adicionado o termo da pressão hidrostática e a Eq. 4.6 se torna:

$$P_{abs} = p + P_{ref} + (\rho \cdot g \cdot H) \quad (4.7)$$

Quando o fluido está em regime turbulento, um modelo de turbulência é utilizado e as flutuações de velocidade e energia cinética turbulenta (k) são levadas em consideração:

$$P_{abs} = p + P_{ref} + (\rho \cdot g \cdot H) + P_{hidrodinâmica} \quad (4.8)$$

onde:

$$P_{hidrodinâmica} = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{2}{3} \rho k \quad (4.9)$$

Portanto, a pressão absoluta será dada por:

$$P_{abs} = P_{hidrostática} + P_{hidrodinâmica} + P_{ref} \quad (4.10)$$

com a pressão hidrostática definida por:

$$P_{hidrostática} = p + \rho \cdot g \cdot H \quad (4.11)$$

A pressão hidrostática poderá ser positiva ou negativa, pois, para as equações de movimento o que valerá é o gradiente de pressão, e não o seu valor absoluto.

De acordo com o Manual ANSYS (2013), a pressão total é determinada por meio de:

$$P_{TOTAL} = P_{hidrostática} + P_{hidrodinâmica} \quad (4.12)$$

O Manual da ANSYS (2013) menciona, porém, que, quando o empuxo é ativado no *software* CFX[®], o termo da pressão hidrostática é excluído da expressão de pressão absoluta (Equação 4.10) devido a questões numéricas do *software*. Neste caso, o termo excluído é um termo fonte adicionado às equações de momento linear de acordo com a equação a seguir:

$$S_{M,buoy} = (\rho - \rho_{ref}) \cdot g \quad (4.13)$$

onde $(\rho - \rho_{ref})$ é configurada automaticamente no *software* quando a simulação envolve escoamentos multicomponentes, escoamentos multifásicos ou nos casos em que o fluido é função da pressão, da temperatura ou de outras variáveis.

A equação 4.7 fica relacionada com a expressão da pressão absoluta da seguinte maneira:

$$P_{abs} = p + [\rho_{ref} \cdot \vec{g} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_{ref})] + P_{ref} \quad (4.14)$$

onde $(\vec{r} - \vec{r}_{ref})$ implica na diferença de altura local em relação ao sistema de referência.

A interpretação da pressão, portanto, depende da ativação ou não do empuxo e, conseqüentemente, do local de referência adotado. Por *default* (opção *Reference Location > Automatic*), a posição de referência é automaticamente escolhida, sem levar em conta os eixos de origem determinados pelo usuário do *software*.

Por questões numéricas, para resolver o campo de pressão (*Pressure*), o peso da coluna de fluido é retirado. Porém, no cálculo da pressão absoluta (*Absolute Pressure*), o peso da coluna de fluido é adicionado de volta. Convém, portanto, que se escolha a posição de referência adequada (*Initialization > Basic Settings > Reference Location > Cartesian Coordinates*, que será ativado no momento de escolha do *Buoyancy Model*); do contrário, o *solver* escolherá automaticamente o local de referência.

Em diversas situações, a pressão real ou verdadeira é necessária para calcular propriedades de fluidos como, por exemplo, fluidos compressíveis em que a densidade é dependente da pressão. Além disso, a pressão verdadeira é muitas vezes útil para visualizar o campo de pressão. Por estas razões, o *solver* automaticamente inclui a contribuição hidrostática na pressão absoluta (ANSYS, 2013).

4.4 Casos Avaliados

A Tabela 4.4 mostra as condições utilizadas para os casos simulados nos testes de duplo domínio (MAR e CATENÁRIA) e simples domínio (somente MAR). O caso D3 (sem orifício de vazamento) foi utilizado para os testes de malha (casos monofásicos, em que se considerou o orifício de vazamento fechado).

Na Tabela 4.5 estão indicados os casos avaliados (caso D3 variando os valores de $v_{wmáx}$) para a análise do valor médio da pressão absoluta em um plano horizontal. Na Tabela 4.6 são apresentados os casos a serem avaliados para as simulações com simples domínio, com condição de pressão prescrita na fronteira “saída-mar”.

TABELA 4.4 Casos avaliados para a determinação de simples ou duplo domínio

Caso	Tipo de Domínio	Velocidade máxima da água do mar $v_{wmáx}^{(1)}$ na direção x (m/s)	Condição de contorno Entrada-CATENÁRIA	Condição de contorno no orifício de vazamento	Condição de contorno para pressão em saída-MAR
D1	DUPLO	0,1	$v_{óleo}$ (normal) = 0,5 m/s	Interface	Perfil de Pressão (Eq. 4.5)
D2	SIMPLES	0,1	—	<i>Inlet</i> ($v_{óleo} = 3,05$ m/s)	Perfil de Pressão (Eq. 4.5)
D3	SIMPLES	0,1	—	Não deslizamento, $u=v=w=0$ m/s	Perfil de Pressão (Eq. 4.5)

Fonte: ⁽¹⁾Li *et al.*, 2012.

TABELA 4.5 Casos simulados para a avaliação de pressão.

CASO	Tipo de Domínio	Fluxo	Condição de contorno de pressão Saída-MAR	P_{ref} [Pa]	Velocidade máxima da água do mar $v_{wmáx}$
1 - Sem empuxo	SIMPLES	Monofásico (água)	Prescrita = 1 atm	101.325	0,000001 m/s (estático)
2 - Com empuxo	SIMPLES	Monofásico (água)	Prescrita = 1 atm	101.325	0,000001 m/s (estático)
3 - Com empuxo	SIMPLES	Monofásico (água)	Prescrita = 1 atm	101.325	0,01 (laminar)
4 - Com empuxo	SIMPLES	Monofásico (água)	Prescrita = 1 atm	101.325	0,35 m/s (turbulento)

TABELA 4.6 Variáveis e condições utilizadas nas simulações.

Ensaio:	Velocidade do óleo através do orifício de vazamento (m/s)	Velocidade máxima da água do mar $v_{wmáx}^{(1)}$ na direção x (m/s)	Densidade do óleo ⁽²⁾ (kg/m ³)
Caso C1	0,51 [ou 0,05 kg/s]	0,04	870
Caso C2	1,02 [ou 0,10 kg/s]	0,04	870
Caso C3	3,05 [ou 0,30 kg/s]	0,04	870
Caso C4	0,51 [ou 0,05 kg/s]	0,55	870
Caso C5	1,02 [ou 0,10 kg/s]	0,55	870
Caso C6	3,05 [ou 0,30 kg/s]	0,55	870
Caso C7	0,51 [ou 0,05 kg/s]	0,1	870
Caso C8	3,05 [ou 0,30 kg/s]	0,1	870
Caso C9	2,95 [ou 0,30 kg/s]	0,04	900
Caso C10	2,76 [ou 0,30 kg/s]	0,04	960

Fonte: ⁽¹⁾baseado em Masutani e Adams, 2001; ⁽²⁾Zhu *et al.*, 2014.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação da Dependência da Malha Numérica

Realizou-se um estudo de dependência de malha no intuito de se escolher a malha mais adequada para as simulações do ponto de vista de esforço computacional. O total de elementos e pontos nodais para as malhas utilizadas neste estudo são apresentados na Tabela 5.1. Todas as malhas correspondem ao domínio de estudo sem levar em consideração a malha interna da catenária (domínio simples, conforme descrito na seção 4.3).

TABELA 5.1 Malhas numéricas avaliadas, considerando o caso D3.

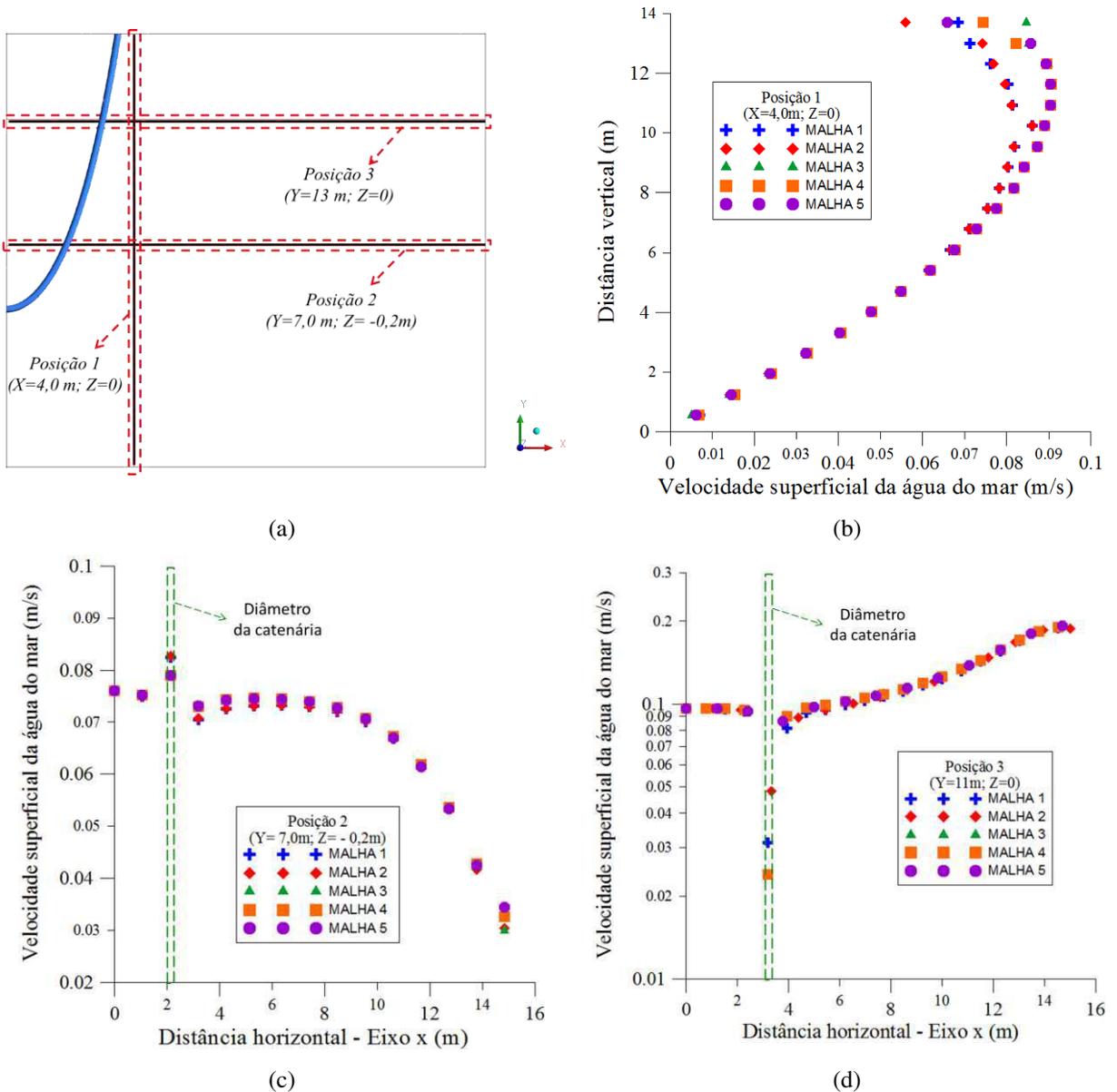
	Total de elementos tetraédricos	Total de nós	Tempo computacional*
Malha 1	587.686	112.332	05h : 42 min : 02s
Malha 2	701.845	134.133	06h : 11 min : 28s
Malha 3	775.797	150.450	06h : 55 min : 26s
Malha 4	1.056.967	204.126	08h : 15 min : 16s
Malha 5	1.753.905	337.018	10h : 44 min : 27s

*Com utilização de máquinas com configuração Core i7-3770, 64 bits, 16Gb de RAM e 3,40GHz.

Os testes foram realizados para o Caso D3 (Tabela 4.4) considerando o orifício de vazamento fechado (ou seja, condição de contorno de não-deslizamento), o que implica em um escoamento monofásico (somente escoamento de água do mar). Na Figura 5.1a estão representadas as posições das linhas onde foram tomados os valores de velocidades superficiais da água do mar e, em seguida, representadas em um gráfico em função de X ou Y. A partir destas figuras foi, então, avaliada a dependência da malha. As Figuras 5.1b, 5.1c e 5.1d ilustram o comportamento destas curvas nas diferentes posições tomadas.

Para que haja independência de malha, os resultados devem se manter inalterados conforme maior ou menor refinamento. Caso haja variação no resultado, deve-se refiná-la até que a independência de malha seja atingida. Por outro lado, um refinamento muito grande exige maior esforço computacional, podendo até mesmo interferir na convergência dos resultados.

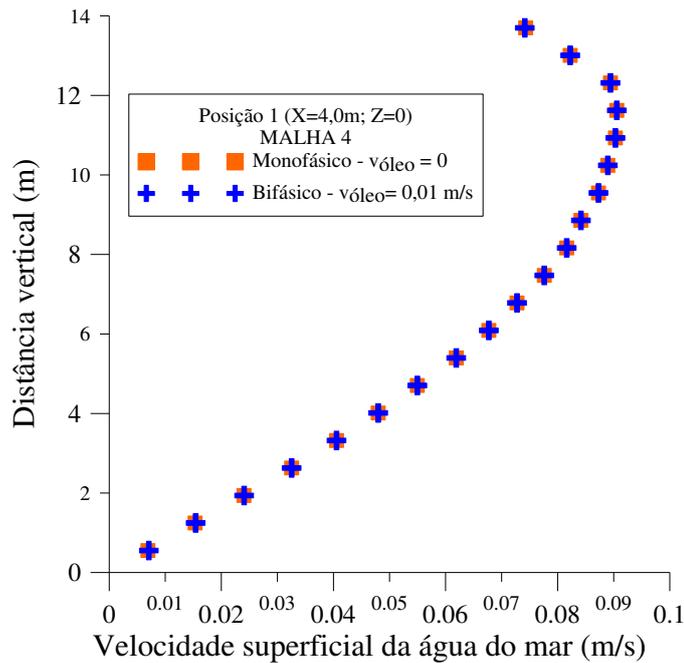
Figura 5.1 – (a) Posições das linhas tomadas para avaliação das malhas numéricas (vista plano XY); Influência do grau de refinamento da malha na curva de velocidade superficial da água do mar na posição (b) $X = 4\text{ m}$ e $Z=0$; (c) $Y = 7\text{ m}$ e $Z = -0,2\text{ m}$; (d) $Y = 11\text{ m}$ e $Z = 0$.



Observa-se que foi sutil a mudança das malhas 1 e 2 com relação à malha 3 e, nos casos das malhas 3, 4 e 5, o comportamento entre si é praticamente o mesmo. Estes resultados indicam que o grau de refinamento destas malhas praticamente não mais interferiu nos resultados das simulações. Diante da pequena variação observada entre as curvas da Figura 5.1a, optou-se por utilizar a malha 4 nas simulações uma vez que esta se apresentou dentro de um nível intermediário (entre as malhas 3 e 5). Por não apresentar o maior grau de refinamento, haverá menor esforço e tempo computacionais, em relação à malha 5.

Na Figura 5.2 é apresentado o resultado referente à dependência de malha comparando-se o caso D2 (mas considerando uma velocidade baixa para o óleo de 0,01 m/s) e o caso D3. Neste caso, os resultados mostraram o mesmo comportamento das curvas, indicando que o modelo de escoamento bifásico é adequado para a malha escolhida (malha 4).

Figura 5.2 – Curva de velocidade superficial da água, comparando-se o caso monofásico com caso bifásico (com óleo a baixa velocidade) através do orifício de vazamento, usando como referência a malha 4.

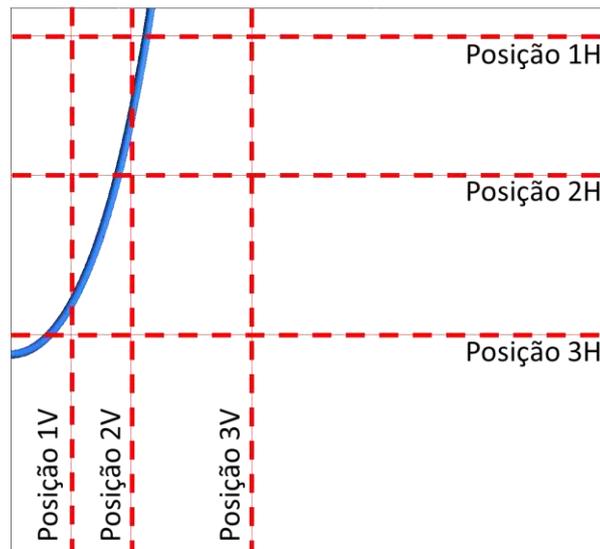


5.2 Determinação do Tipo de Domínio - Simples ou Duplo

É importante destacar que se convencionou utilizar domínio duplo (MAR e CATENÁRIA) simultaneamente apenas para determinação da magnitude da velocidade de óleo na saída do orifício de vazamento, que foi utilizado como condição de contorno para os demais casos a serem propriamente estudados. A opção de simular apenas com o domínio MAR (domínio simples, sem escoamento interno no duto) foi decorrente da dificuldade em se obter uma malha de boa qualidade mas como uma quantidade de elementos não excessiva, devido ao esforço e tempo computacionais.

Foram obtidas, por meio das simulações numéricas para as duas situações avaliadas (domínio simples de domínio duplo) as curvas dos perfis de fração volumétrica de óleo no domínio MAR (água) em função da posição horizontal ou vertical (conforme ilustra a Figura 5.3) representadas na Figura 5.4.

Figura 5.3 – Linhas horizontais e verticais tomadas no plano XY (com respectivas coordenadas de vetores) para comparação entre os perfis de fração volumétrica de óleo para as duas situações (duplo ou simples domínio).



Plano XY

Posição 1H (Y = 13 m; Z=0)

Posição 2H (Y = 9,5 m; Z=0)

Posição 3H (Y = 5,5 m; Z=0)

Posição 1V (X = 1,5 m; Z=0)

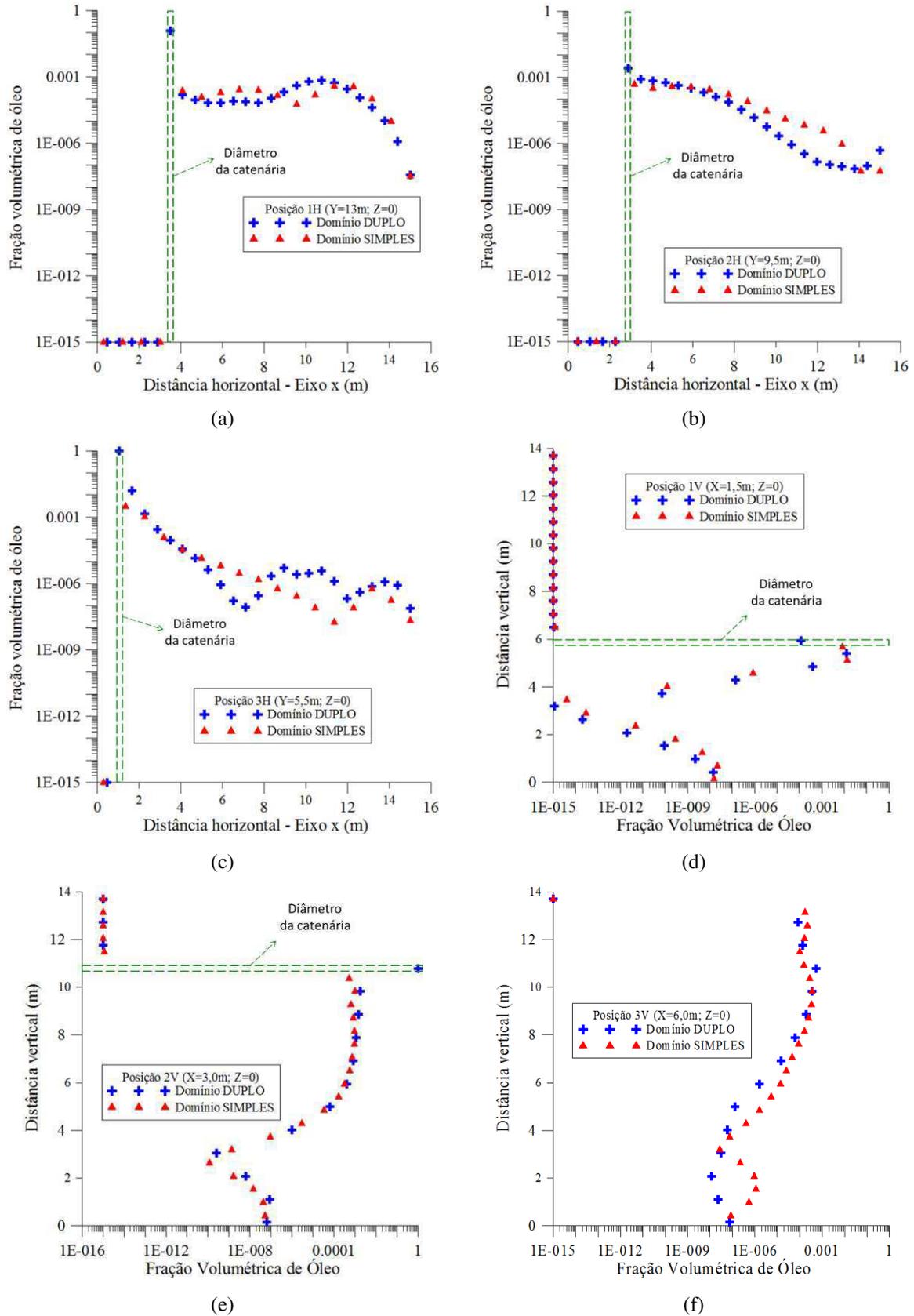
Posição 2V (X = 3,0 m; Z=0)

Posição 3V (X = 6,0 m; Z=0)

Os resultados indicam que a utilização de domínio duplo apresentou comportamento bastante semelhante quando comparado com o caso com utilização do domínio simples. Nos gráficos das Figuras 5.4a, 5.4b, e 5.4c, o eixo Y (fração volumétrica de óleo) está representado em Log de base 10 para uma melhor visualização das curvas.

O mesmo é válido para o eixo X (fração volumétrica de óleo) para os gráficos das Figuras 5.4d, 5.4e e 5.4f. Outro fator de escolha para o uso apenas do domínio simples é o fato de que o principal objetivo da pesquisa é avaliar o comportamento da dispersão do óleo no domínio MAR por meio da pluma multifásica.

Figura 5.4 – Comparação entre os perfis de fração volumétrica de óleo para as duas situações, com linhas tomadas nas posições (a) 1H, (b) 2H, (c) 3H, (d) 1V, (e) 2V e (f) 3V.

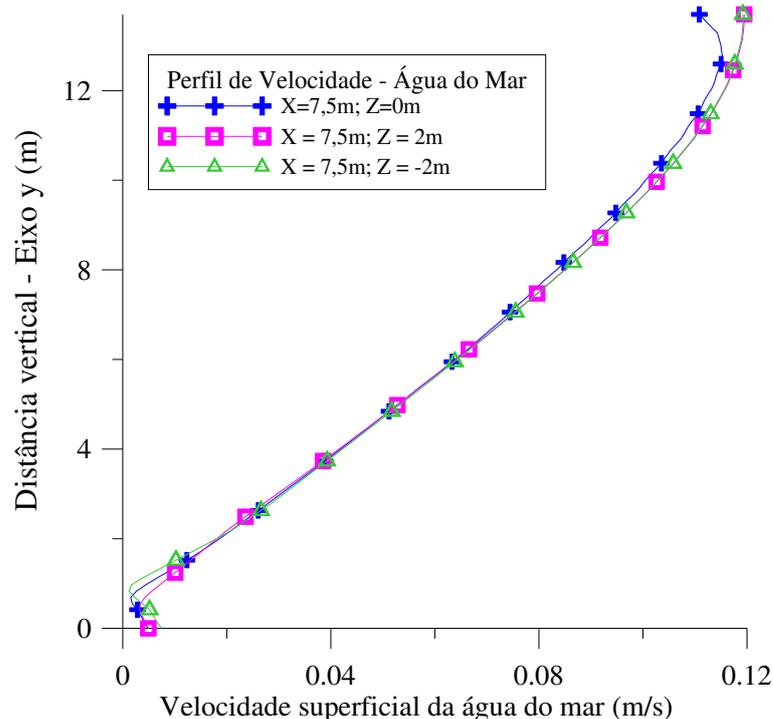


5.3 Perfil de Velocidade da Água do Mar e Análise de Pressão Absoluta

A Figura 5.5 representa o perfil de velocidade da água do mar em uma região à jusante da catenária, para o caso numérico referente ao Caso D2. Três linhas verticais foram tomadas equivalentes às posições $X = 7,5$ m (com $Z = -2$, $Z = 0$ e $Z = 2$).

Observa-se, dos resultados numéricos, um comportamento parabólico ascendente. A variação entre as curvas é observada devido à presença da catenária a montante da posição da linha tomada para avaliação, que afeta o comportamento do campo de velocidade e, conseqüentemente, o perfil de velocidade. Além disso, sabe-se que, no nível da superfície do mar, a resistência oferecida pela atmosfera e pelos ventos influencia na velocidade e, portanto, a velocidade máxima será encontrada na vertical central em um ponto um pouco abaixo da superfície livre (BIRD *et al.*, 2004; AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ, 2015), conforme é observado na Figura 5.5. A condição de velocidade prescrita nesta fronteira poderia se assemelhar a uma condição de velocidade de uma camada de ar, por exemplo, escoando a uma menor velocidade no sentido adjacente ao escoamento da água do mar e funcionando como uma espécie de “freio” do escoamento. Neste caso, as vazões dos fluidos são ajustadas, fazendo com que a velocidade da água do mar seja máxima um pouco mais abaixo do nível em que foi considerada.

Figura 5.5 – Perfil de velocidade numérico da água do mar.



A partir da Tabela 4.5, obteve-se a média da pressão absoluta em um plano XZ (tomado em $Y = 3$), conforme Figura 5.6. O valor médio foi obtido no módulo de pós-processamento do CFX, na opção *function calculator*. O campo de pressão absoluta no plano XZ, correspondente ao caso 4 (com empuxo) é mostrado na Figura 5.7.

Figura 5.6 – Plano XZ ($Y = 3\text{m}$) tomado para avaliação da pressão absoluta.

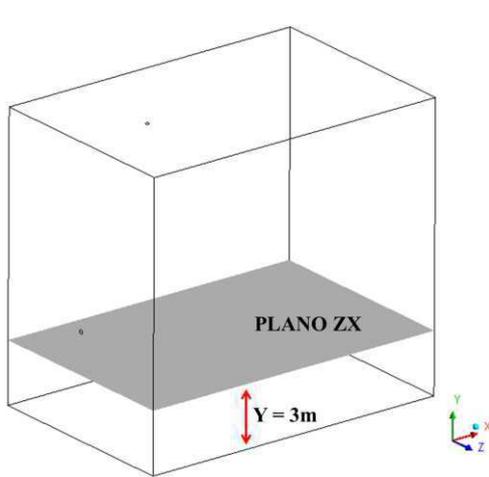
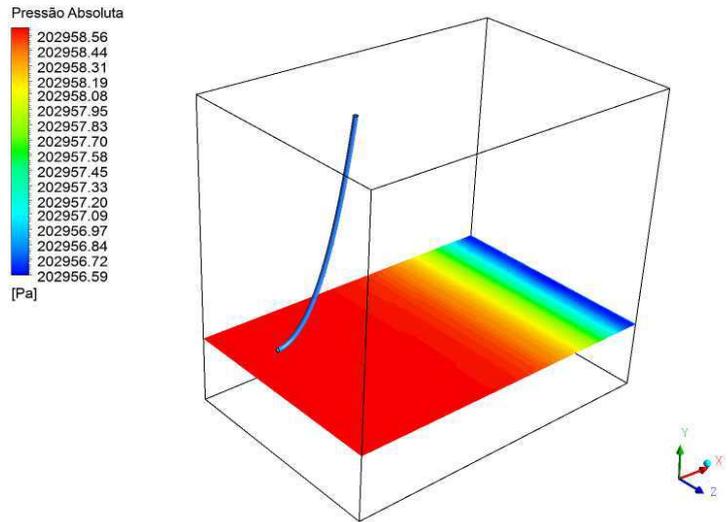


Figura 5.7 - Campo de pressão absoluta no plano XZ ($Y = 3\text{m}$) correspondente ao caso 4 – Com empuxo.



Os testes para uma situação sem empuxo e com empuxo foram realizados apenas para avaliar os valores das pressões e entender como o *software* trabalha com este parâmetro. No caso 1 (sem empuxo) desconsiderou-se e feito da gravidade e, portanto, conforme mostrado na Tabela 5.2, a pressão absoluta se iguala à pressão de referência adotada.

A Tabela 5.2 mostra todos os resultados numéricos.

TABELA 5.2 Resultados da análise de pressão absoluta.

CASO	P_{absoluta} [Pa] (valor médio no plano)	P_{ref} adotada [Pa]
1 - Sem empuxo	101.325	101.325
2 - Com empuxo	202.248	101.325
3 - Com empuxo	202.466	101.325
4 - Com empuxo	202.958	101.325

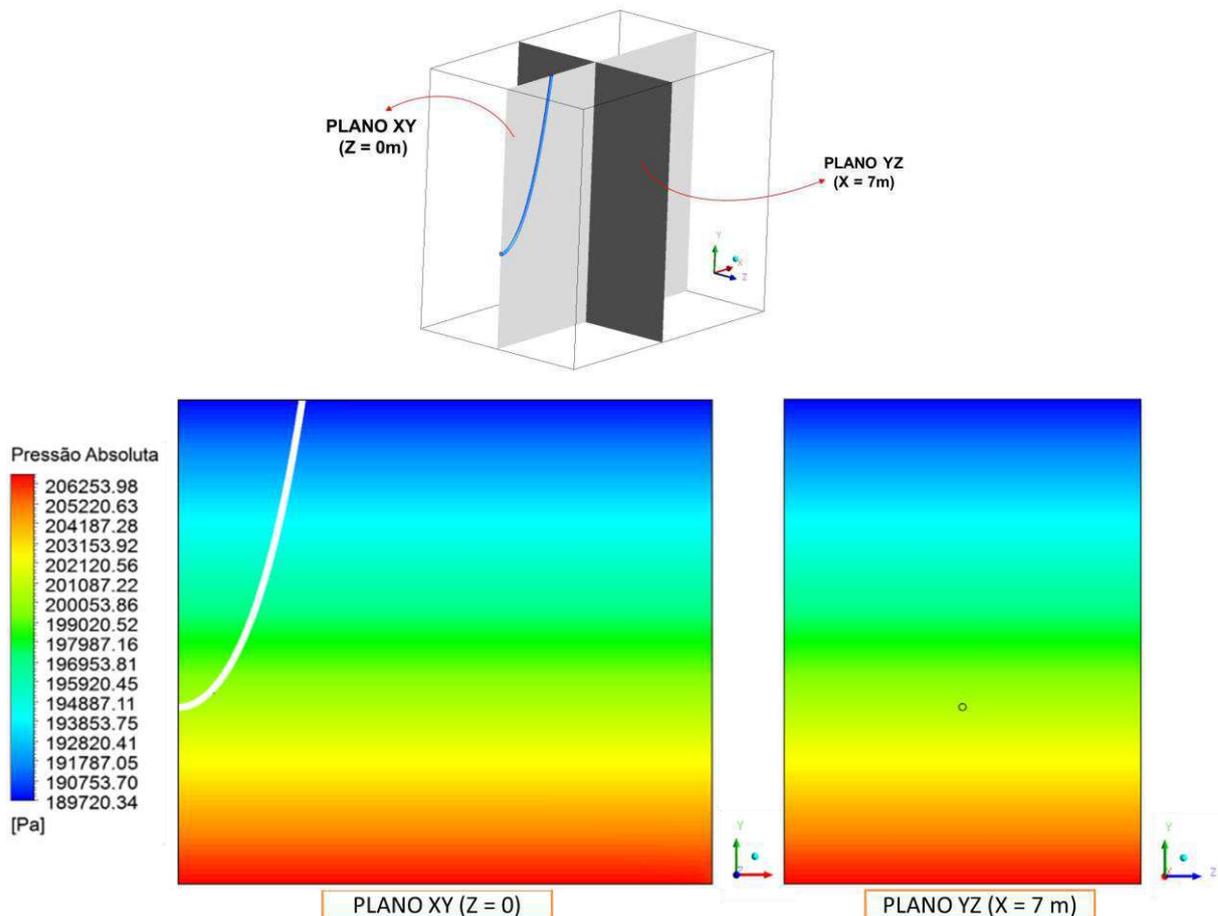
5.4 Avaliação qualitativa do comportamento dinâmico da pluma de óleo

Foram avaliados alguns parâmetros para visualização do comportamento dinâmico da dispersão do óleo através do orifício de vazamento como, por exemplo, as distribuições de pressão, fração volumétrica do óleo e vetores de velocidade dos fluidos. Para estas análises, foi avaliado o Caso C2, conforme Tabela 4.5.

5.4.1 Campos de Pressão

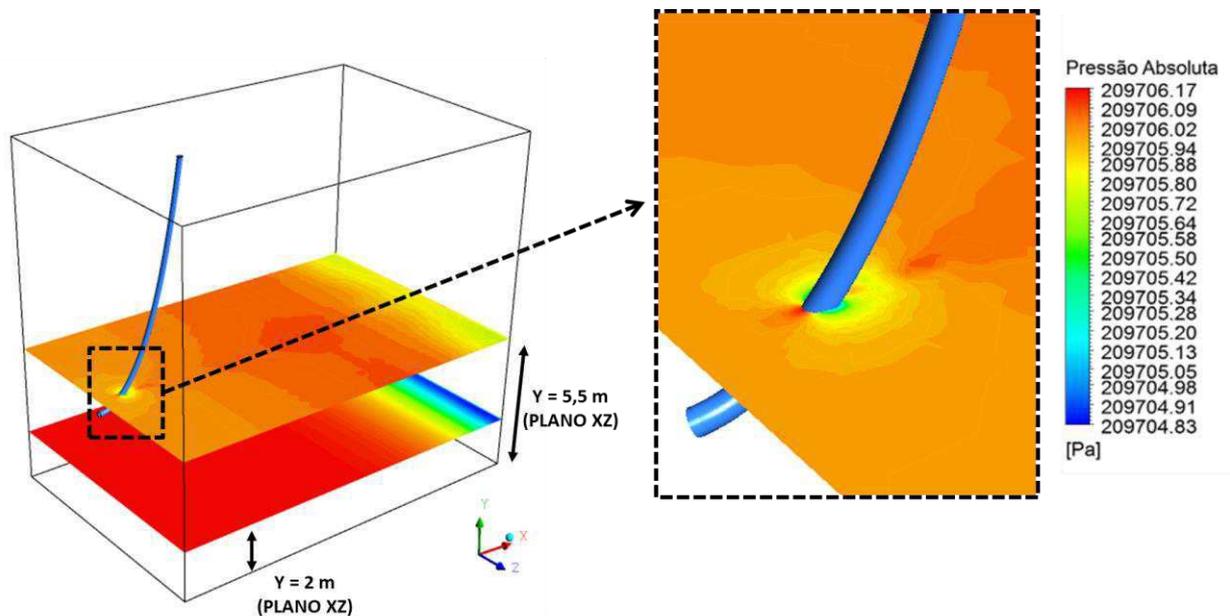
Os campos de pressão absoluta para o Caso C2 estão representadas nas Figuras 5.8 a 5.11. Na Figura 5.8 é observado o campo de pressão sobre o plano XY ($Z=0$) e no plano YZ ($X=7$ m). Os valores do campo de pressão decrescem à medida que se ascende verticalmente, o que é esperado devido à presença da coluna de água.

Figura 5.8 – Campo de pressão absoluta sobre os planos XY ($Z=0$) e YZ ($X=7$ m), para o caso C2.



A Figura 5.9 ilustra o campo de pressão sobre dois planos XZ ($Y = 2 \text{ m}$ e $5,5 \text{ m}$) e um detalhe no plano em XZ em $Y = 5,5 \text{ m}$ no entorno da tubulação. Na região de entorno da catenária há pontos de baixa pressão devido à presença de fluido em movimento ao redor do objeto, semelhante ao observado em escoamentos em torno de cilindros (BIRD *et al.*, 2004), sendo este mesmo fenômeno observado tomando-se qualquer plano que corte transversalmente a catenária.

Figura 5.9 – Campo de pressão sobre os planos XZ ($Y = 2 \text{ m}$ e $5,5 \text{ m}$) para o caso C2 com destaque para a região no entorno da catenária.



Na Figura 5.10 está representado o campo de pressão sobre cortes no plano XZ para o caso C2 em $Y = 2 \text{ m}$ e $5,5 \text{ m}$. Observa-se o campo de pressão sobre o plano XZ (para $Y = 5,5 \text{ m}$) para o caso C2, com destaque para a região no entorno do duto e bem próximo ao orifício de vazamento. Devido à saída de fluido (óleo) pelo orifício de vazamento, há um leve aumento na pressão devido à perturbação provocada pela saída deste.

Na Figura 5.11a e 5.11b está representada a distribuição de pressão absoluta no plano e no entorno do duto, sobre o plano XZ na altura bem próxima ao orifício de vazamento ($Y = 5,391 \text{ m}$). Observa-se uma distribuição de pressão diferente do que é apresentada na Figura 5.9. A representação deste comportamento é decorrente de uma escala de cores que o Ansys CFX usa para representar sobre o plano. Nota-se que, no detalhe próximo ao orifício de vazamento, os maiores valores de pressão se concentram na região onde o “jato” de óleo escoou na água, como pode ser observado na Figura 5.11.

Figura 5.10 – Campo de pressão sobre cortes no plano XZ para o caso C2 em (a) $Y = 2$ m e (b) $Y = 5,5$ m.

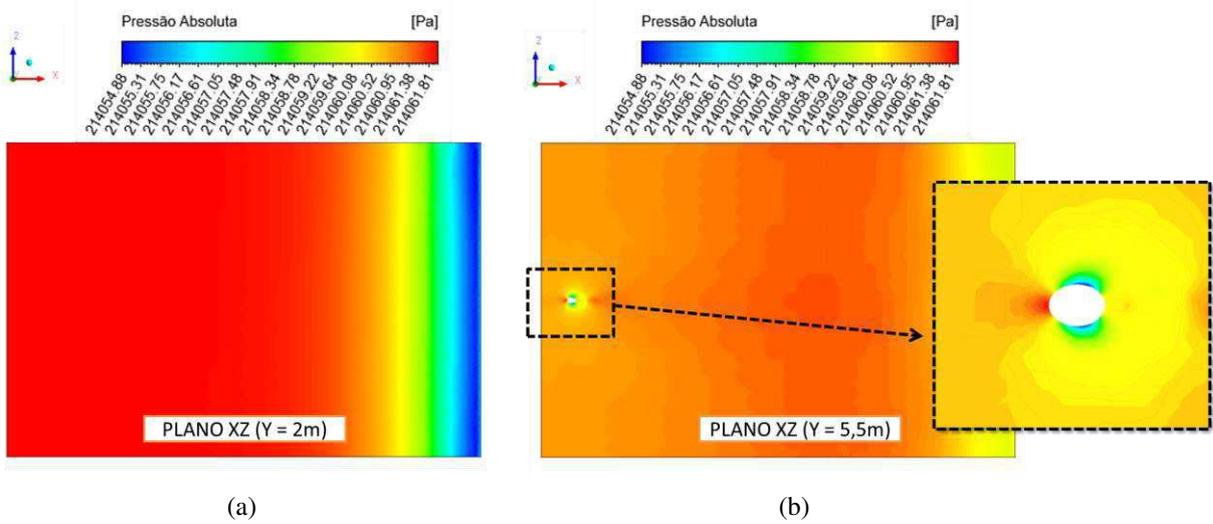
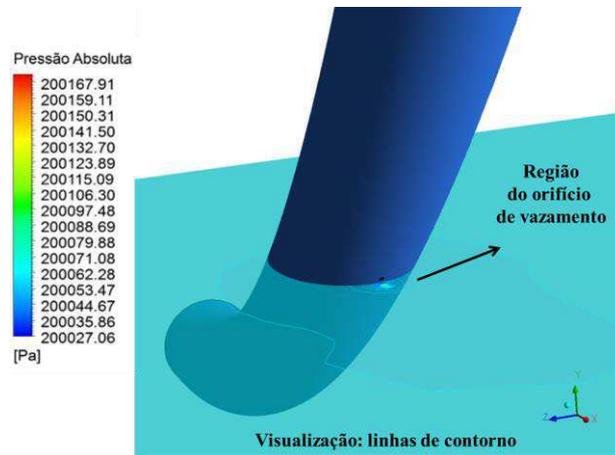
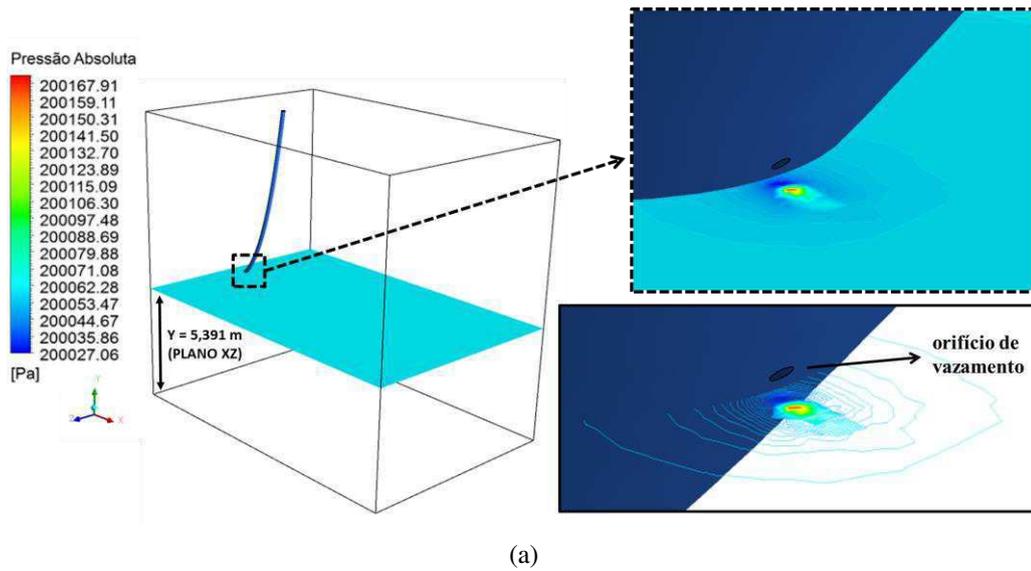


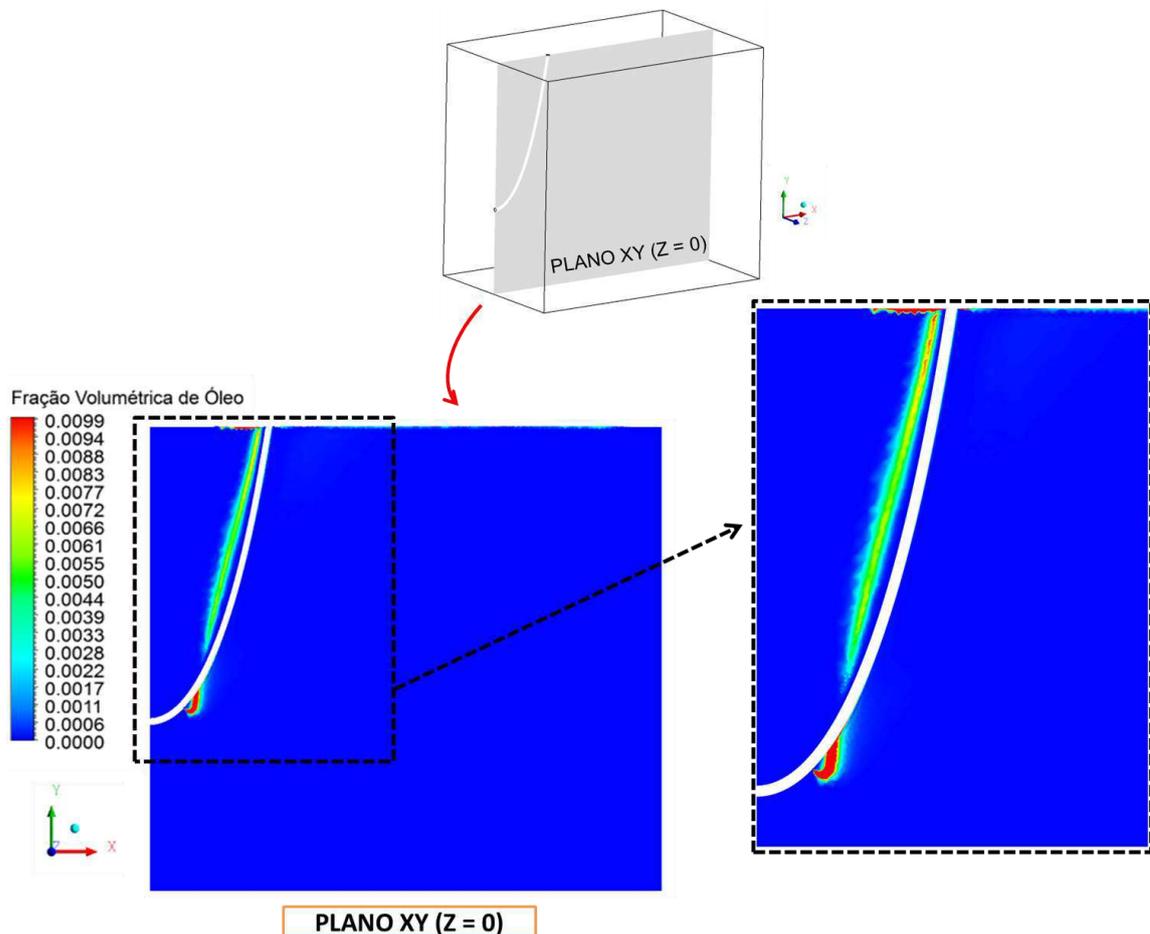
Figura 5.11 – Campo de pressão sobre o plano XZ ($Y = 5,391$ m) para o caso C2, com destaque para (a) região bem próxima ao orifício de vazamento, (b) com visualização sob a forma de linhas de contorno.



5.4.2 Campos de Fração Volumétrica de Óleo

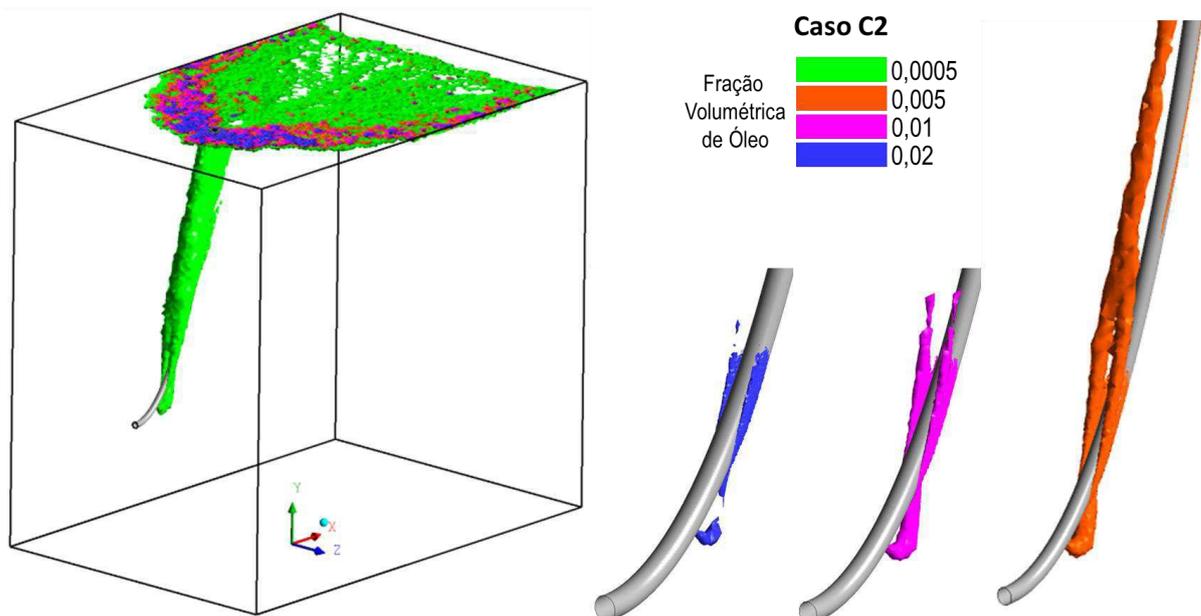
Os campos de fração volumétrica de óleo para o caso C2 são representados nas Figuras 5.12 a 5.14 no plano XY, em $Z = 0$. Na Figura 5.12 é observado que o comportamento da pluma de óleo é ascendente, o que é explicado pela diferença de densidade das fases (água e óleo). Neste caso, foi assumida uma velocidade de vazamento de óleo igual a 1,02 m/s, na direção normal à seção do orifício de vazamento e a velocidade da corrente marítima foi considerada igual a 0,04 m/s ($v_{wmáx}$). A tendência de subida ligeiramente inclinada da pluma de óleo para a direita, observada na figura, pode ser explicada pelo arraste da pluma de óleo pela corrente de água e pela diferença de densidade entre as fases (água e óleo). Observa-se igualmente que a pluma de óleo, nestas condições, é capaz de chegar até à superfície, apresentando espalhamento a montante e a jusante do sentido de escoamento da água do mar.

Figura 5.12 – Campo de fração volumétrica de óleo sobre o plano XY ($Z=0$) com detalhe para a região próxima de formação da pluma de óleo, para o caso C2.



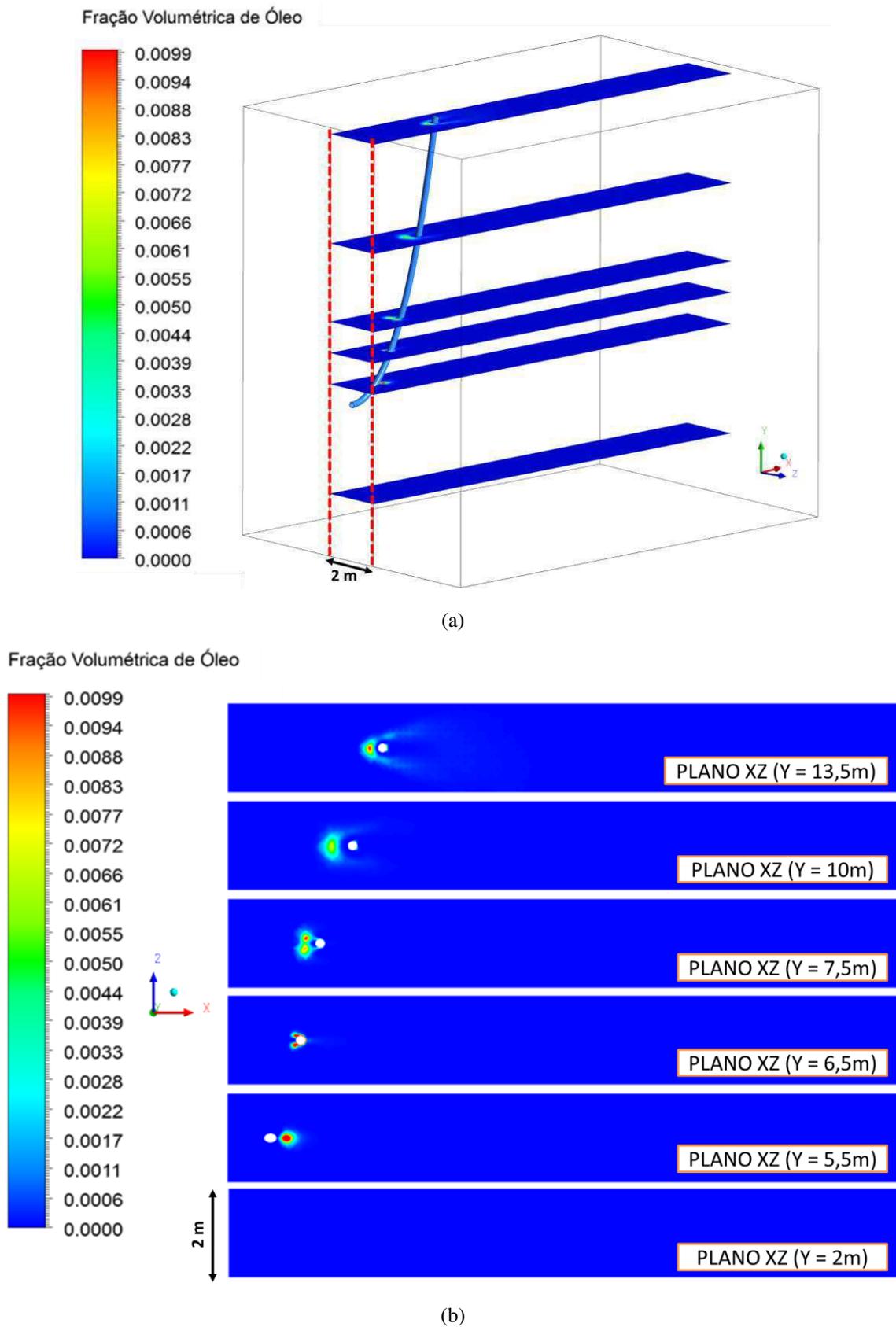
Apesar do valor mais alto da velocidade do óleo adotado no orifício de vazamento (1,02 m/s) em relação à velocidade da água do mar, o “jato” de óleo perde energia cinética ao sair pelo orifício e adentrar no mar, devido à transferência de sua quantidade de movimento e devido às tensões de cisalhamento. O comportamento ascendente do óleo até atingir a superfície é o mais comum e esperado para este tipo de sistema, pois a força de gravidade frente às diferenças de densidade das substâncias (água e óleo) atua na promoção do deslocamento de óleo através da água. As partículas de óleo formadoras da pluma tendem a aderir nas paredes da catenária, conforme ilustrado na Figura 5.13. É importante lembrar que forças de arraste, que dependem da velocidade, agem por conta do movimento do fluido ao redor do objeto, neste caso a catenária. As forças de atrito agem paralelamente à superfície da catenária juntamente com o sentido do escoamento e forças de pressão agem perpendicularmente à superfície da tubulação.

Figura 5.13 – Isosuperfície de fração volumétrica de óleo com destaque para a aderência de óleo na parede externa da catenária, para o caso C2.



Na Figura 5.14 está representado o campo de fração volumétrica de óleo sobre diferentes planos XZ de 2m de largura (no trecho $-1m \leq Z \leq 1m$) em diferentes posições de Y, para o caso C2. Observa-se o percurso que o óleo toma no entorno da catenária, em direção à superfície.

Figura 5.14 – Campo de fração volumétrica de óleo (a) sobre diferentes planos XZ de 2 m de largura (no trecho $-1m \leq Z \leq 1m$) em (b) diferentes posições de Y (caso C2).



Nas Figuras 5.15 a 5.19 estão representadas as isosuperfícies de fração volumétrica do óleo, para todos os casos estudados (C1 a C10). Em todos os casos pode-se observar a formação da pluma de óleo que se desloca na água do mar e que, de acordo com o movimento da corrente marítima, modifica seu comportamento.

O comportamento da pluma de óleo referente aos casos C4 (Figura 5.16b) e C5 (Figura 5.17a) ilustra que o óleo não atinge a superfície. Este fato pode ser explicado pela menor velocidade de óleo no orifício de vazamento (0,51 m/s e 1,02 m/s, para os casos C4 e C5, respectivamente) em relação aos outros casos, possibilitando maior arraste de óleo pela correnteza de água (0,55 m/s), em consequência da transferência de energia cinética entre as fases. Como resultado tem-se a dispersão do óleo na água, mas não se observa a presença de óleo na superfície da água do mar, dentro do domínio de estudo avaliado. Este fato, desta forma, “mascara” um dano ambiental que não é visível a “olho nu”. Neste caso, ressalva-se que o óleo poderia aderir a partículas de sedimentos ou matéria orgânica, sendo suficiente para afundar e se acumular no solo marinho, o que causaria danos ambientais consideráveis. Além disso, sabe-se que alguns óleos crus são suficientemente densos para afundar (SZEWCZYK, 2006; MARTINS, 2011).

O que se pode comentar a respeito disto é que, nestas situações em que o óleo não sobe até a superfície, dentro das condições consideradas, seria relativamente mais fácil o uso de instrumentos, equipamentos ou reservatórios submersos para captura de óleo antes da sua ascensão e espalhamento na superfície do mar, conforme destaca Biehl *et al.* (2014), minimizando os impactos, já que estando o óleo na superfície, seu espalhamento é mais acentuado devido à influência das ondas e dos ventos. Muito embora o modelo matemático proposto não perceba o movimento das ondas e dos ventos, foi considerada uma correnteza constante e contínua na direção X. Comportamento este que é afetado quando o óleo atinge a superfície modificando as velocidades superficiais da água e do óleo.

Figura 5.15 – Isosuperfícies de fração volumétrica do óleo com densidade de 870 kg/m^3 , referente aos casos (a) C1 e (b) C2.

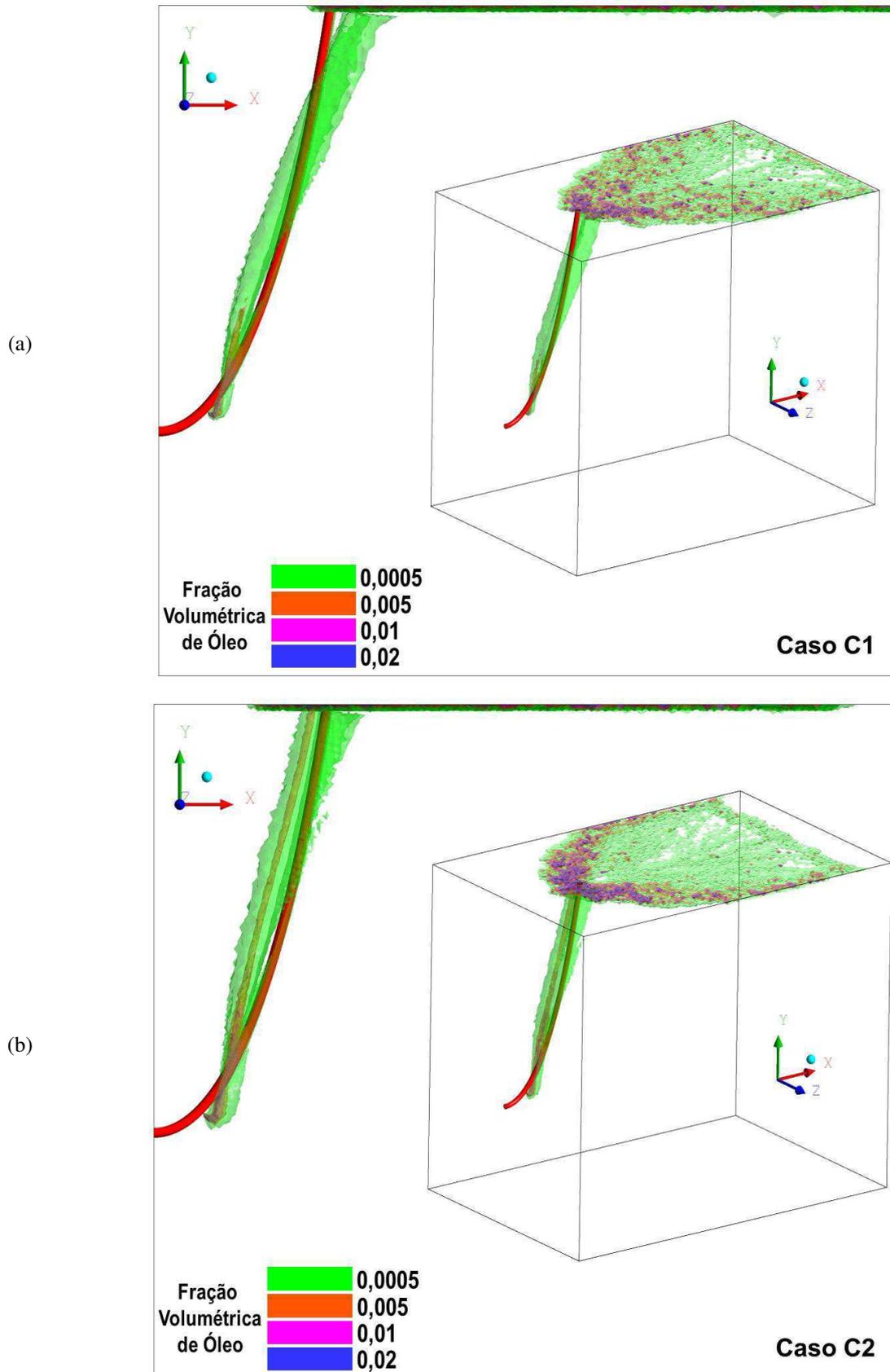


Figura 5.16 – Isosuperfícies de fração volumétrica do óleo com densidade de 870 kg/m^3 , referente aos casos (a) C3 e (b) C4.

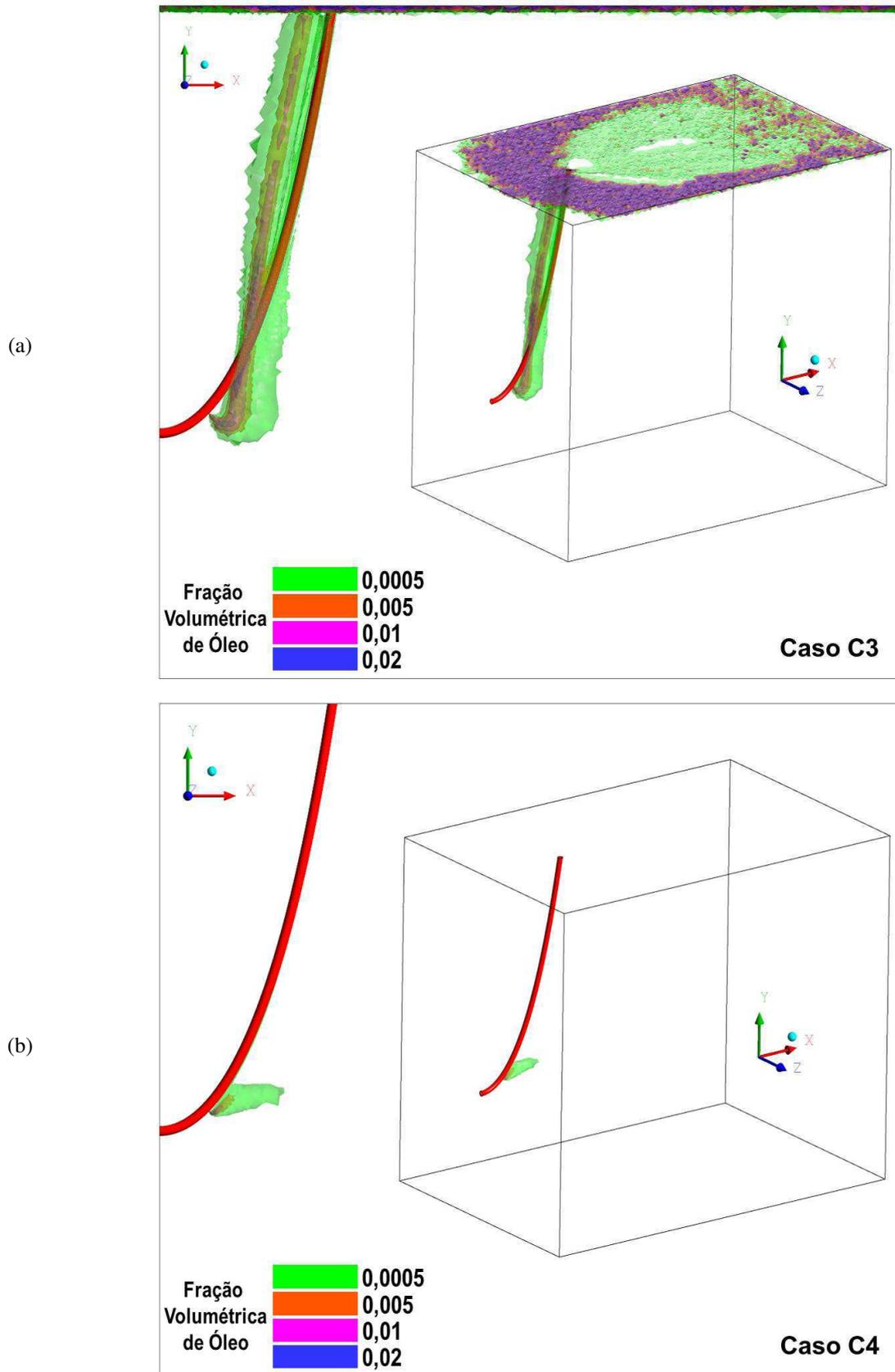


Figura 5.17 – Isosuperfícies de fração volumétrica do óleo com densidade de 870 kg/m^3 , referente aos casos (a) C5 e (b) C6.

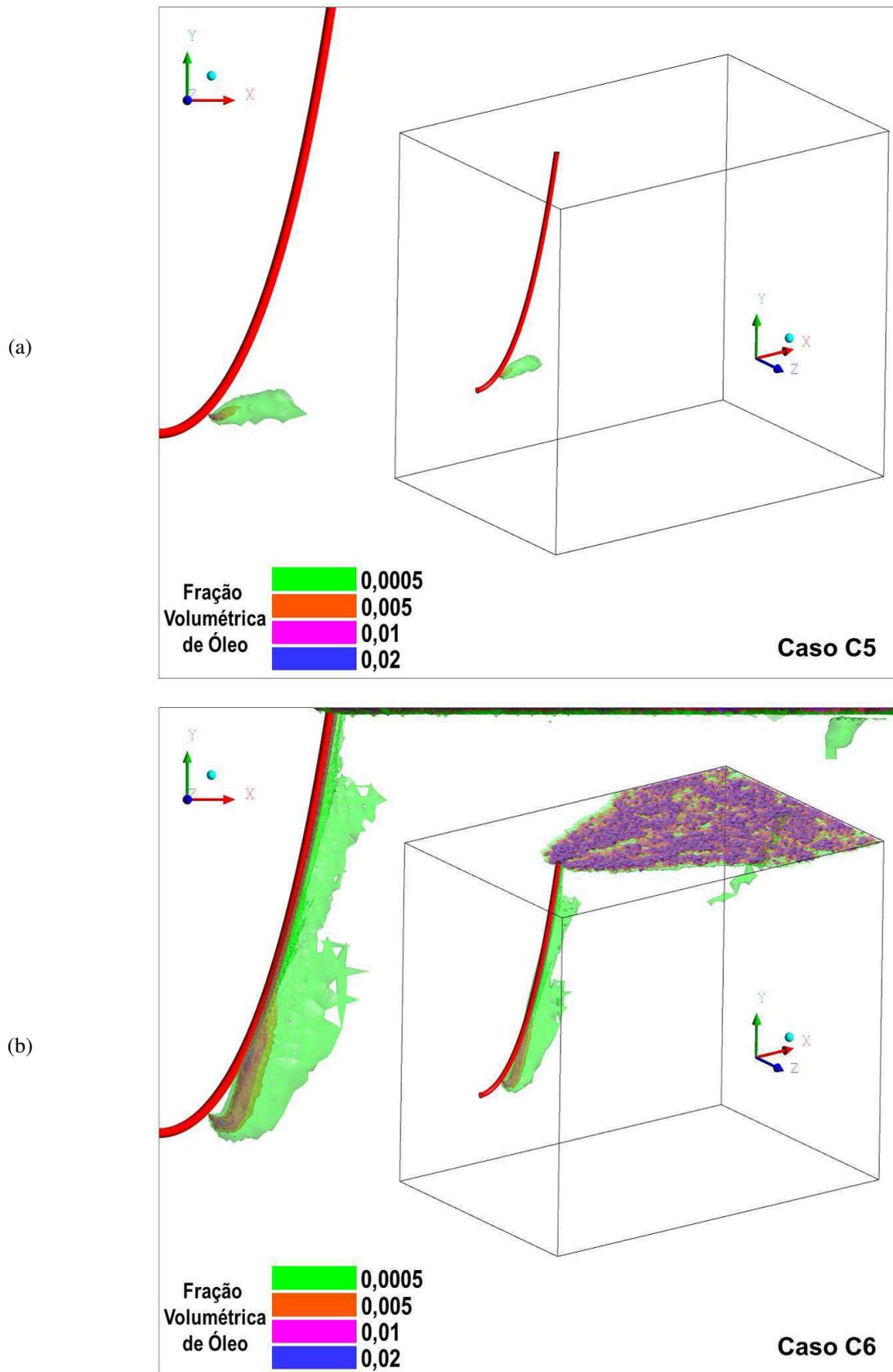


Figura 5.18 – Isosuperfícies de fração volumétrica do óleo com densidade de 870 kg/m^3 , referente aos casos (a) C7 e (b) C8.

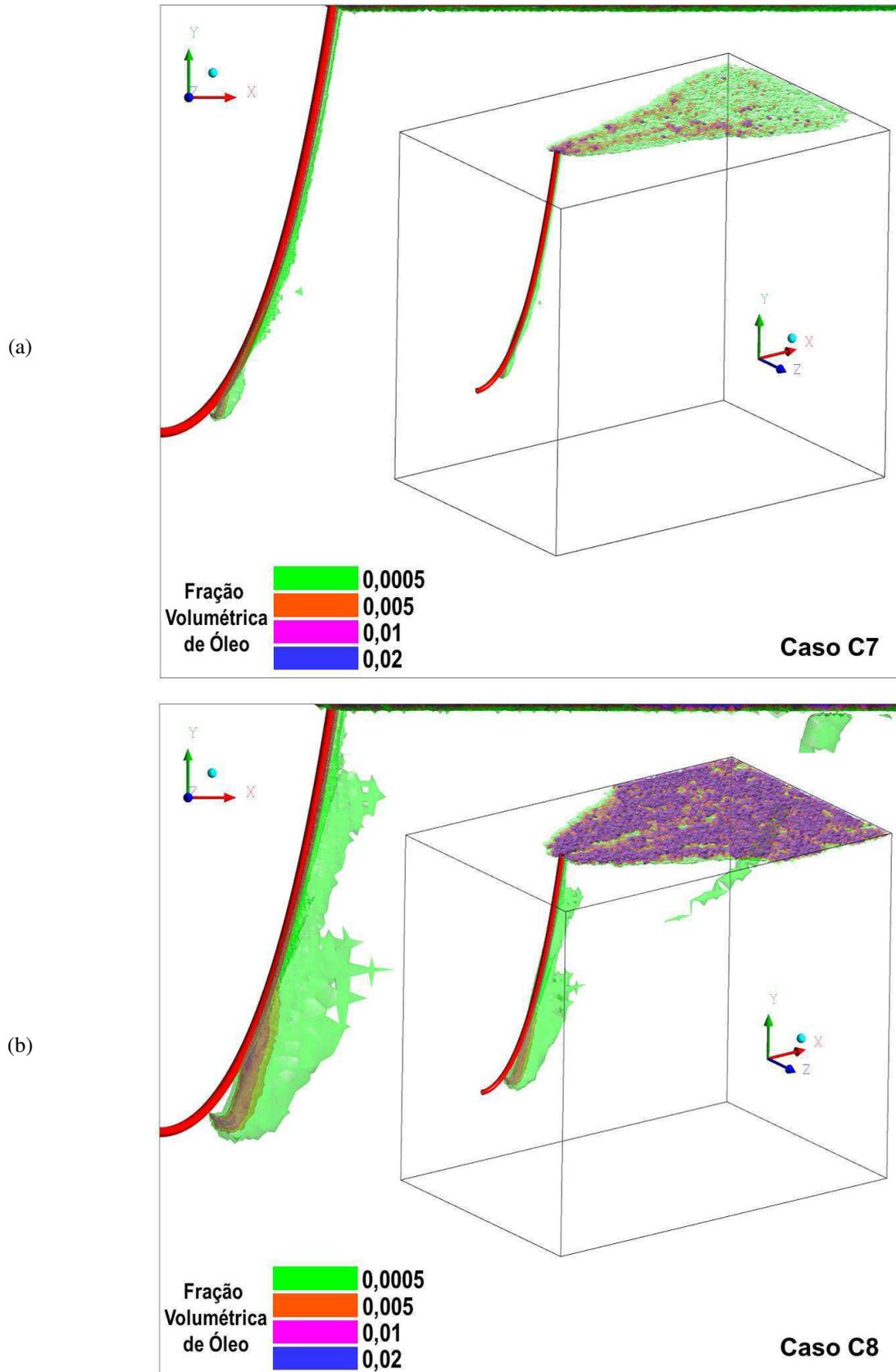
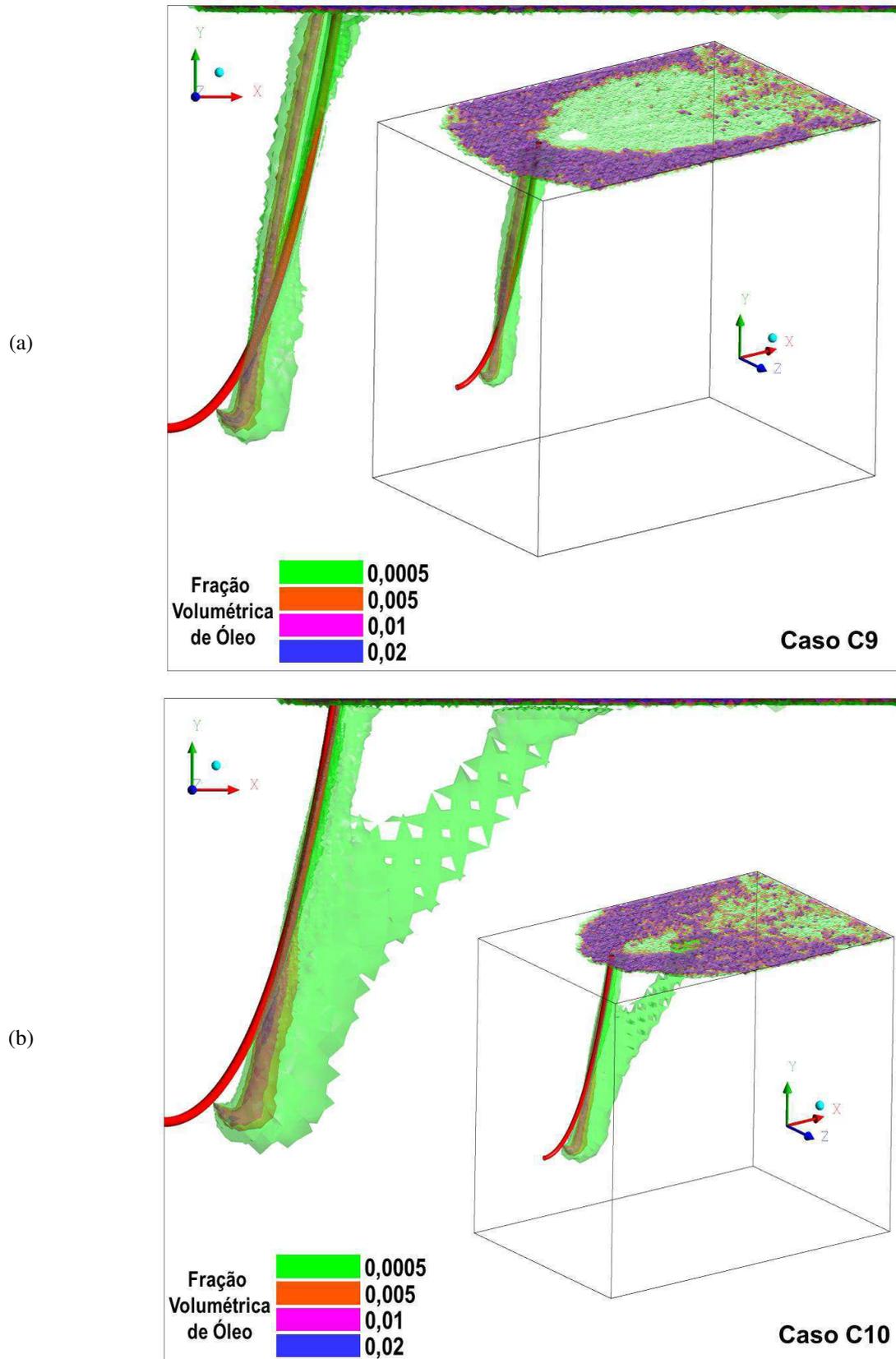


Figura 5.19 – Isosuperfícies de fração volumétrica do óleo com densidade de 900 kg/m^3 e 960 kg/m^3 , referente aos casos (a) C9 e (b) C10, respectivamente.



A partir da avaliação da dispersão de óleo e do comportamento da pluma de óleo formada após o vazamento no meio que envolve a catenária foi possível observar que para $\rho_{\text{óleo}}$ igual a 870 kg/m^3 (casos C1 a C8):

- (a) a pluma atinge a superfície: para menores valores de $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} (casos C1, C2 e C7), para maiores valores de $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} (caso C6) e para maiores valores de $v_{\text{óleo}}$ e menores valores de v_{mar} (casos C3 e C8);
- (b) a pluma não atinge a superfície: para maiores valores de $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} (caso C4) e para menores valores de $v_{\text{óleo}}$ e maiores valores de v_{mar} (caso C5).

O fator que apresentou maior influência para a ascensão da pluma de óleo, neste caso, foi a velocidade do mar mais baixa. Se a velocidade do mar for mais alta, seria preciso maior valor da velocidade de saída do óleo. Um valor mais baixo de velocidade da água do mar na direção da correnteza permite que o arraste lateral não seja tão acentuado e a pluma se desloca mais verticalmente.

A partir da avaliação da dispersão de óleo e do comportamento da pluma de óleo formada após o vazamento no meio que envolve a catenária foi possível observar que para maior valor de $\rho_{\text{óleo}}$ (igual a 900 e 960 kg/m^3 - casos C9 e C10 e considerando a mesma velocidade máxima da água do mar para ambos), a pluma de óleo tem discreta dificuldade de ascensão vertical, tendo um comportamento levemente inclinado para a direita (Caso C10), desprendendo-se em determinado ponto, porém ambos atingindo a superfície da água. Este fato se deve ao maior valor de densidade que reduz o empuxo e conduz a pluma de óleo na direção lateral.

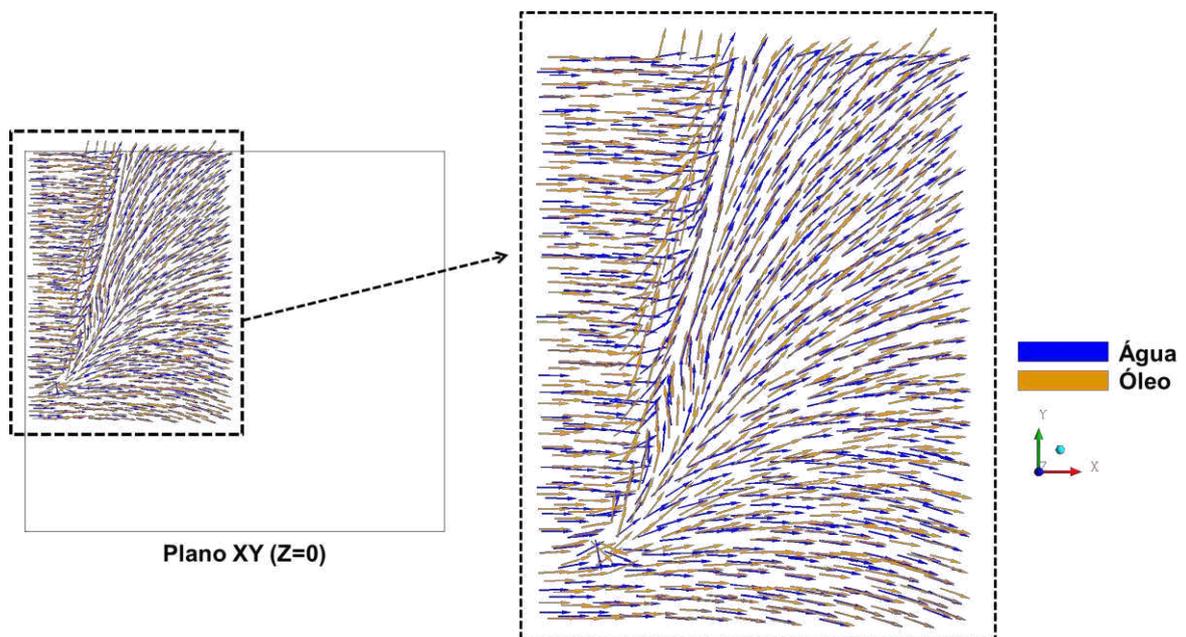
Convém ainda ressaltar que não foi possível observar desprendimento nítido de gotas de óleo. Acredita-se que este fato ocorra devido à abordagem Euleriana utilizada, que não é capaz de rastrear as partículas e nem representar a dispersão em gotas. No entanto, pode ser capaz de prever o comportamento da fase de pluma, antes de atingir a superfície, quando as gotas de óleo sobem juntas formando uma pluma única.

5.4.3 Campos Vetoriais de Velocidade

Na Figura 5.20 está ilustrado um campo vetorial (normalizado), no plano XY, com detalhe na região próxima à catenária ($4\text{m} \leq Y \leq 13,7\text{m}$ e $0\text{m} \leq X \leq 7\text{m}$), para o Caso C2. Convém ressaltar que estes vetores não representam grandeza, apenas a direção de

escoamento das fases. É observada a tendência do direcionamento ascendente do fluido óleo em direção à superfície e a direção de escoamento da água do mar ao encontrar a catenária como obstáculo. Os vetores de água estão ilustrados na cor azul e os vetores do óleo na cor mostarda.

Figura 5.20 – Campo vetorial normalizado do escoamento de água e óleo sobre o plano XY (trecho $4\text{m} \leq Y \leq 13,7\text{m}$ e $0 \leq X \leq 7\text{m}$), para o Caso C2.



Na Figura 5.21 é apresentado o campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre um trecho do plano XZ delimitado por $-1,5\text{m} \leq Z \leq 1,5\text{m}$ e $0\text{m} \leq X \leq 15\text{m}$ em diferentes posições de Y, para o Caso C2. Na posição $Y = 5,391\text{m}$, região bem próxima à saída de óleo pelo orifício de vazamento, observa-se vetores de velocidade do óleo, a jusante do duto, indicando a região de saída de óleo, onde apresenta maiores velocidades.

A partir de $Y = 8\text{m}$, identifica-se que o óleo contorna o duto até o lado a montante deste, devido à aderência do fluido ao duto que forçou o deslocamento para esta região. O óleo continua ascendendo e chega até a superfície. Observa-se que, na posição $Y = 13,7\text{m}$, a pluma de óleo submersa colide com a superfície da água do mar e, provavelmente o impulso provocado pela pluma dá origem a um gradiente de pressão na direção Z e, conseqüentemente, a dispersão horizontal do óleo, que se intensifica a jusante da região de chegada à superfície da água. Comportamento igualmente observado por Lee e Jirka (*apud* YAPA *et al.*, 1999). Em $X = 15\text{m}$, aproximadamente, em toda a distância vertical observa-se

fluxo reverso por meio dos vetores, comportamento este explicado pela condição de contorno de velocidade constante utilizada na superfície/nível da água .

Na Figura 5.22 estão representados os campos vetoriais de velocidade superficial do óleo sobre o trecho do plano YZ delimitado por $-1,5\text{m} \leq Z \leq 1,5\text{m}$ e com X em diferentes posições, para o Caso C2. Na direção de X positivo foram definidas as posições 0; 1,1; 1,3; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 10,0; 13,0 e 15,0 m para representar os campos vetoriais de velocidade do óleo. É observado nas diferentes posições, regiões com comportamentos desordenados próximos ou no entorno da catenária devido ao movimento turbulento e arraste de óleo pela corrente de água.

Nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 é apresentado o campo vetorial de velocidade superficial do óleo com vista perpendicular ao plano XZ (nas posições Y iguais a 5,5m e 13,7m), para todos os casos avaliados (de C1 a C10). Nos casos C4 e C5, os vetores ratificam que a pluma de óleo não chega até a superfície da água do mar. Nos Casos C2, C3, C9 e C10 há evidente espalhamento de óleo a montante e a jusante da região do vazamento de óleo. Em contrapartida, nos Casos C1, C6, C7 e C8, o espalhamento na superfície se apresenta apenas a jusante do duto, no sentido do escoamento da água do mar. Estes comportamentos são justificados pela presença da pluma ou não nas regiões avaliadas. Comportamento semelhante foi observado por Yapa *et al.* (1999) ao estudar o comportamento de plumas e jatos submarinos de óleo e gás: após chegar na superfície, o poluente pode se espalhar a alguma distância a montante (anterior) em relação à direção do escoamento e depois se desviar em direção a jusante (posterior). A região afetada pelo espalhamento a montante estende-se a uma certa distância a jusante do choque com a superfície. Quando o poluente é desviado mais a jusante, ocorre também espalhamento lateral. Em uma região distante suficientemente a jusante, a turbulência ambiente domina o efeito de flutuação. Outro ponto importante relatado por Yapa *et al.* (1999) é a classificação do choque (ou chegada do óleo na superfície) como “quase-horizontal” e “quase-vertical”, dependendo do ângulo da trajetória da pluma submersa e a superfície da água. Quando este ângulo é menor ou igual a 45° , o choque é considerado “quase-horizontal” e, neste caso, não há espalhamento a montante após chegar na superfície porque a pluma é fortemente desviada. Quando o ângulo é maior que 45° , o choque é considerado “quase-vertical” e, neste caso, pode haver espalhamento de poluente a montante, após chegar na superfície. Ao se observar os resultados apresentados nas Figuras 5.26 e 5.27, onde este ângulo é superior a 45° , ratificam as observações de Yapa *et al.* (1999) indicando que o modelo matemático proposto se mostra capaz de prever o comportamento da pluma de

óleo na correnteza marítima avaliada. Assim, pode-se considerar um choque “quase-vertical” que atinge a superfície marítima, nos casos avaliados.

Para os casos em que o óleo chega à superfície marítima, características de espalhamento a montante da região de chegada à superfície, conforme observado para os casos C2, C3, C9 e C10 (Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 na posição de $Y = 13,7$ m), respectivamente.

Figura 5.21 – Campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre um trecho do plano XZ delimitado por $-1,5\text{m} \leq Z \leq 1,5\text{m}$ e $0\text{m} \leq X \leq 15\text{m}$ e em diferentes posições de Y, para o Caso C2.

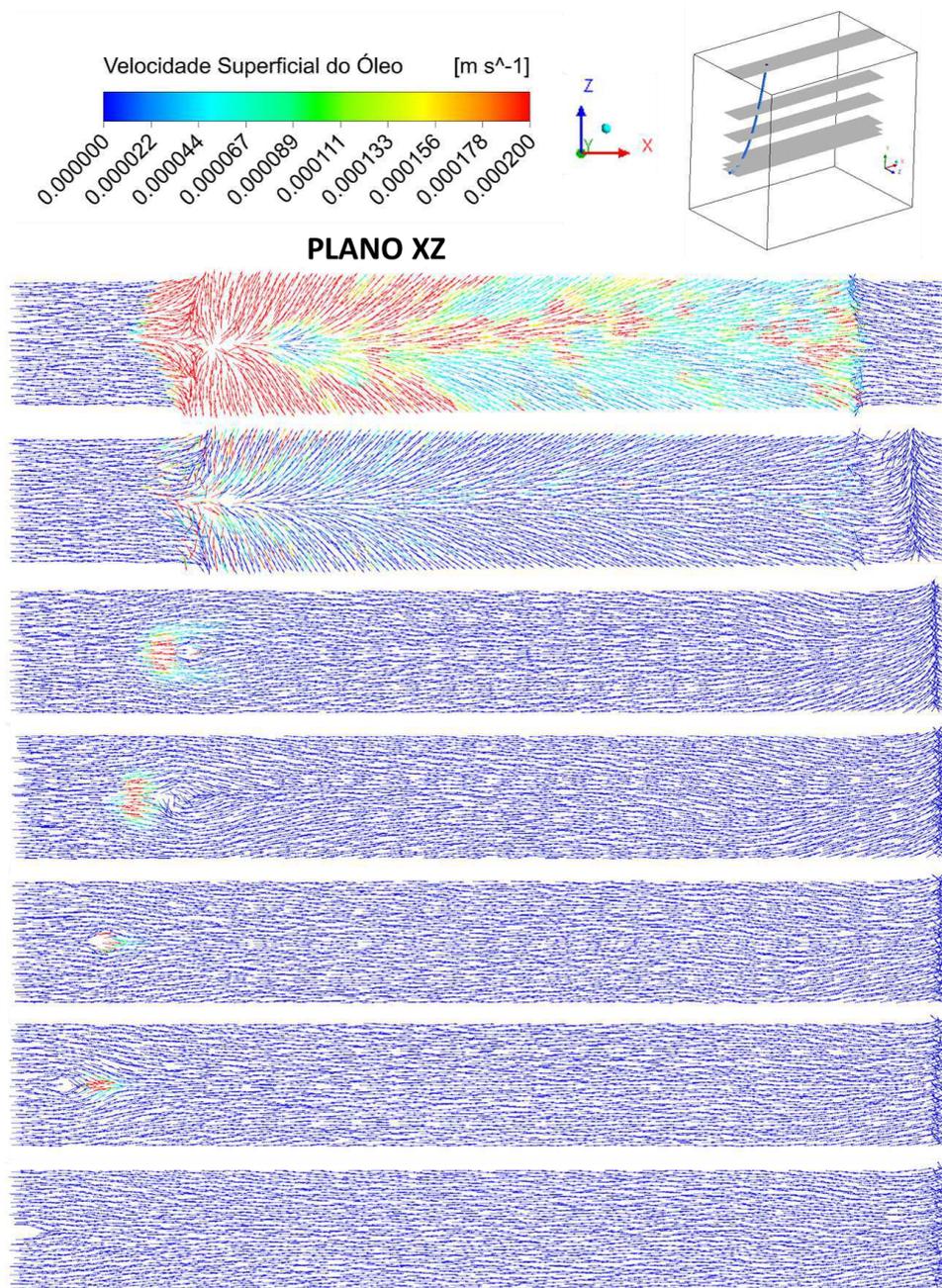


Figura 5.22 – Campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre um trecho do plano YZ delimitado por $-1,5\text{m} \leq Z \leq 1,5\text{m}$ e em diferentes posições de X, para o Caso C2.

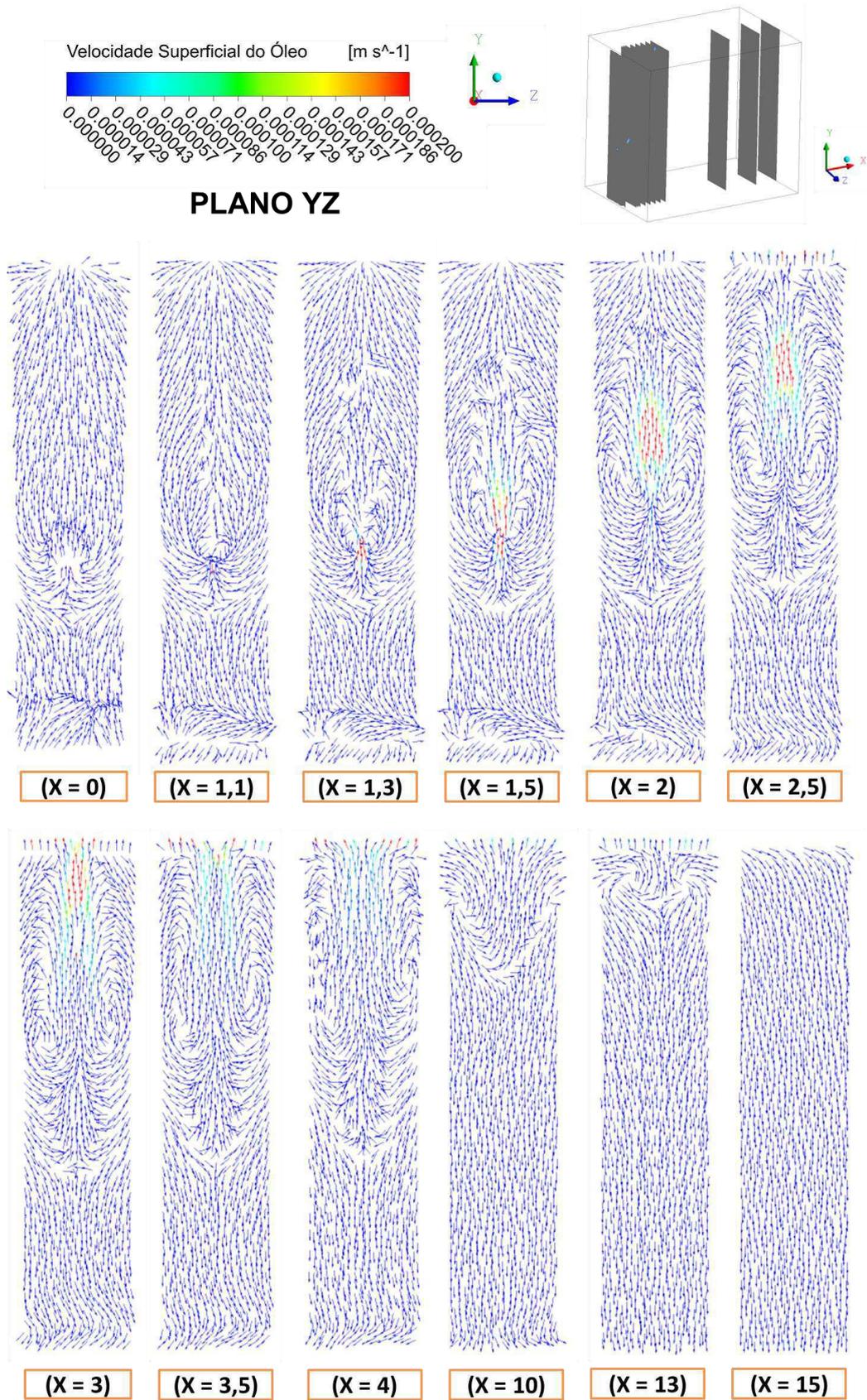


Figura 5.23 – Campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre o plano XZ nas posições Y = 5,5m e 13,7m, para os Casos C1, C2, C3 e C4.

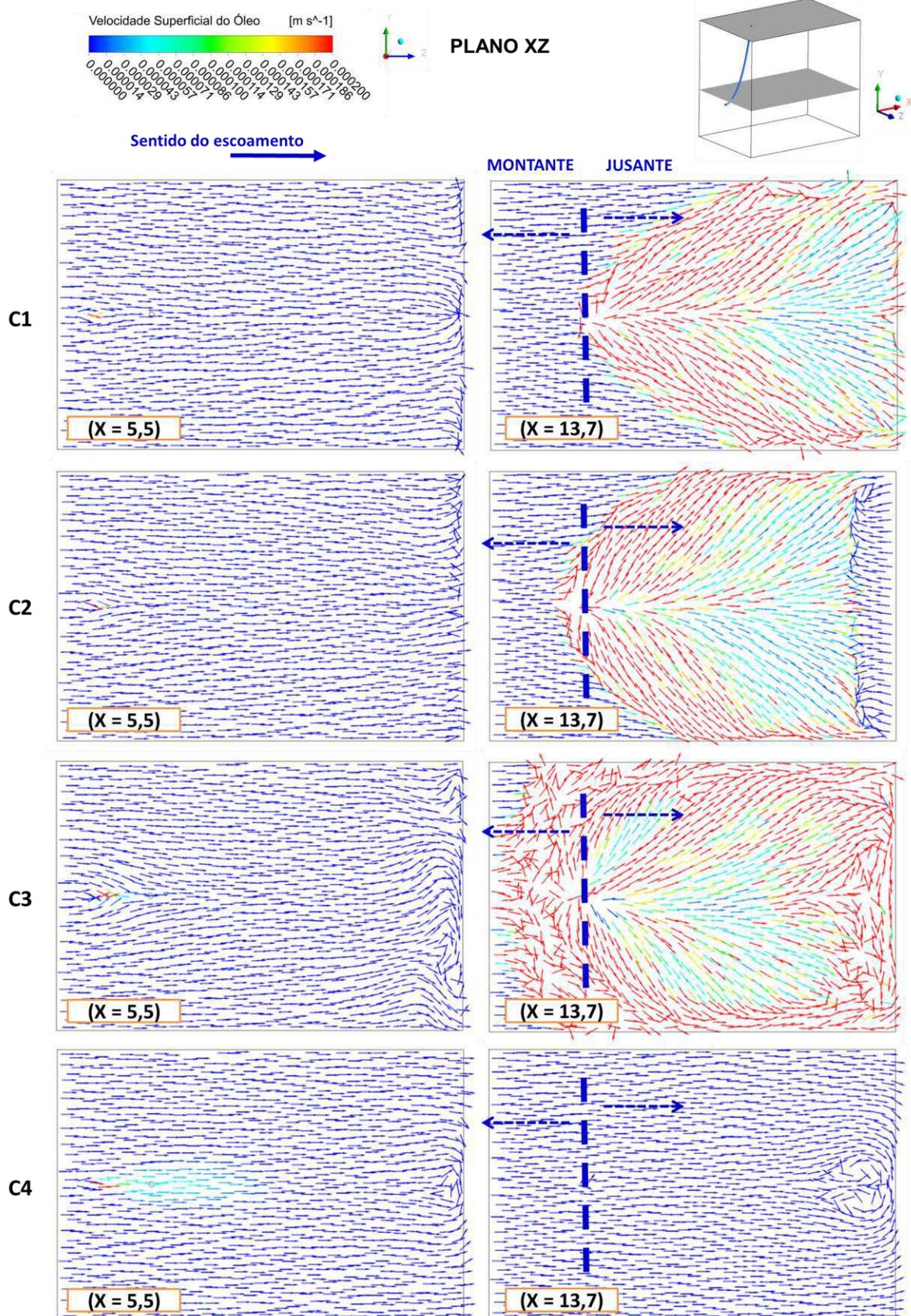


Figura 5.24 – Campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre o plano XZ nas posições Y = 5,5m e 13,7m, para os Casos C5, C6, C7 e C8.

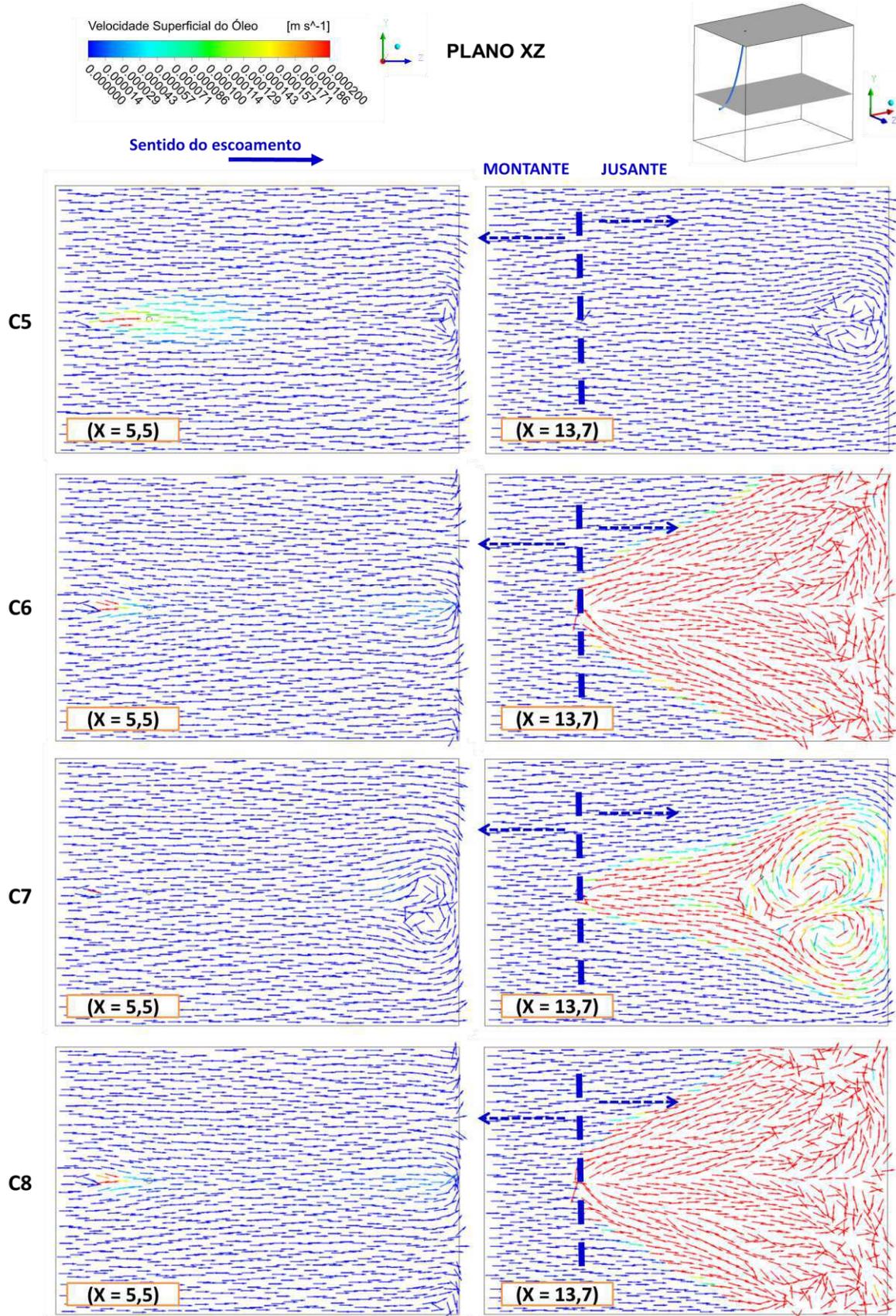


Figura 5.25 – Campo vetorial de velocidade superficial do óleo sobre o plano XZ nas posições Y = 5,5m e 13,7m, para os Casos C9 e C10.

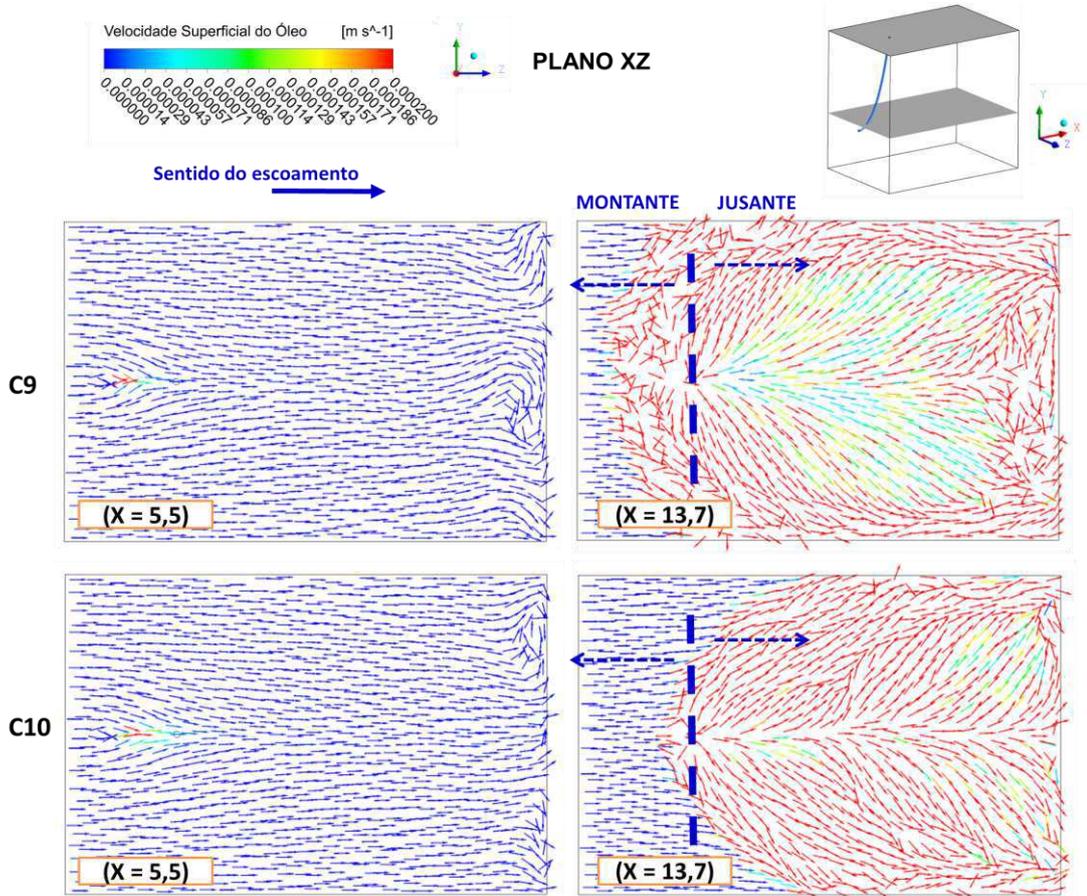


Figura 5.26 – Destaque para o campo vetorial de velocidade superficial do óleo, no plano XY (delimitado por $13\text{m} \leq Y \leq 13,7\text{m}$ e $0 \leq X \leq 7,5\text{m}$), para os casos C2, C3, C9 e C10.

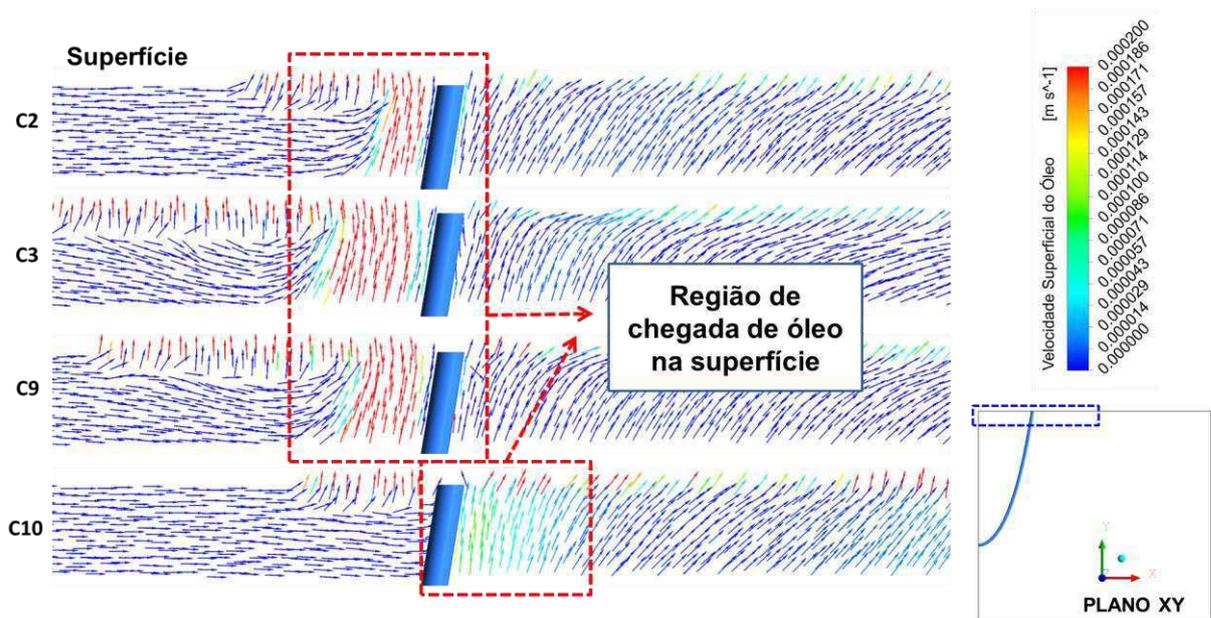
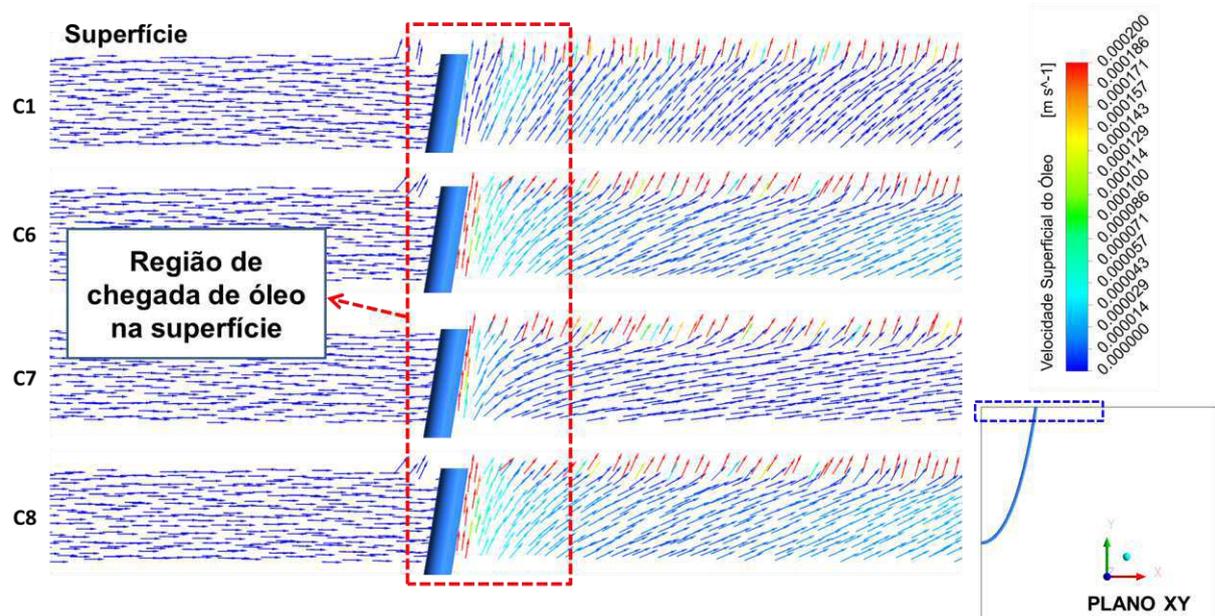


Figura 5.27 – Destaque para o campo vetorial de velocidade superficial do óleo, no plano XY (delimitado por $13\text{m} \leq Y \leq 13,7\text{m}$ e $0 \leq X \leq 7,5\text{m}$), para os casos C1, C6, C7 e C8.



5.5 Análise dos efeitos da velocidade da água do mar, velocidade do óleo e densidade do óleo

Uma vez que a dispersão do óleo está sujeita à ação conjunta da gravidade, forças inerciais, de empuxo, tensão de cisalhamento e propriedades da água e do óleo, pode haver mudanças de comportamento das plumas de óleo decorrente da magnitude do vazamento de óleo, da correnteza marítima e da densidade do óleo. Esses parâmetros, especificamente, foram analisados para se avaliar seus efeitos no comportamento da pluma.

Outros fatores como efeito do vento na superfície da água do mar, variação de ondas e movimento do duto não foram considerados e, portanto, não serão aqui discutidos.

5.5.1 Efeito da velocidade do óleo através do orifício de vazamento mantendo-se a velocidade máxima da água do mar constante

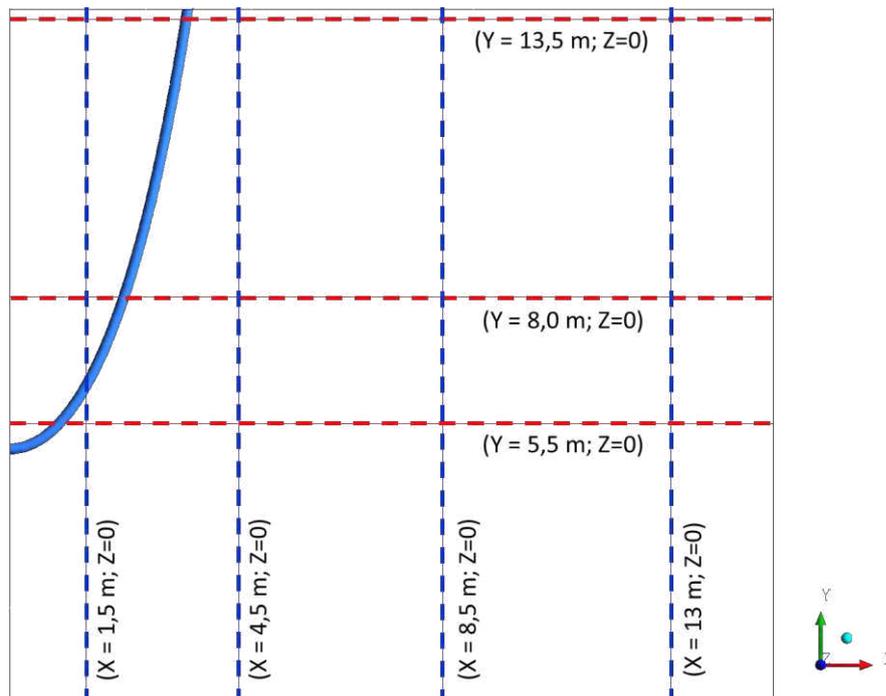
Mantendo-se a velocidade máxima da água do mar constante, analisou-se o efeito da velocidade do óleo que sai através do orifício de vazamento, conforme Tabela 5.3. A análise

foi feita com base nos resultados da fração volumétrica de óleo representada sobre diferentes linhas horizontais e verticais tomadas em diferentes posições do domínio (Figura 5.28).

TABELA 5.3 Casos para estudo do efeito da velocidade de óleo através do orifício de vazamento mantendo-se $v_{wmáx}$ constante, para $\rho_{óleo} = 870 \text{ kg/m}^3$.

Ensaio:	$v_{óleo}$ (m/s)	v_{mar} ($v_{wmáx}$) na direção x (m/s)	Casos
Densidade do óleo = 870 (kg/m ³)	0,51 [ou 0,05 kg/s]	0,04	C1
	1,02 [ou 0,10 kg/s]	0,04	C2
	3,05 [ou 0,30 kg/s]	0,04	C3
	0,51 [ou 0,05 kg/s]	0,55	C4
	1,02 [ou 0,10 kg/s]	0,55	C5
	3,05 [ou 0,30 kg/s]	0,55	C6

Figura 5.28 – Posição das linhas tomadas para estudo do efeito da velocidade do óleo.



Na Figura 5.29 está representado o perfil da fração volumétrica de óleo na água do mar para diferentes velocidades de óleo (casos C1, C2 e C3) em função da posição no eixo X. Nestes casos foram mantidas constantes a velocidade máxima da água do mar e a densidade do óleo (0,04 m/s e 870 kg/m³, respectivamente). Os resultados ilustram, de maneira geral, uma tendência de aumento na fração volumétrica de óleo nas proximidades da catenária e de

se manter praticamente constante, tendendo a baixíssimos valores (próximo de zero) à medida que se afasta da catenária. Os resultados ilustram ainda que, a partir da região de vazamento do óleo, o valor de fração volumétrica tende a ser maior para o caso C3 ($v_{\text{óleo}}$ maior) em relação aos casos C1 e C2, o que se explica pelo aumento da quantidade de óleo que vaza da catenária para o mar. Nas Figuras 5.29a, 5.29b e 5.29c, em posições horizontais (X) menores que 4m, é observado maior perturbação nas curvas, devido à maior variação de fração volumétrica de óleo na região próxima ao duto, mais nitidamente observado para o caso C3 (no qual $v_{\text{óleo}}$ foi maior).

Na Figura 5.30 está representado o perfil da fração volumétrica de óleo na água do mar para diferentes velocidades de óleo (casos C4, C5 e C6) em função da posição no eixo X. Nestes casos foram mantidas constantes a velocidade máxima da água do mar e a densidade do óleo (0,55 m/s e 870 kg/m³, respectivamente). Nas Figuras 5.30a e 5.30b, observa-se um comportamento da pluma de óleo horizontal indicando que não há choque da pluma com a superfície nas dimensões do domínio avaliado. Este fato é explicado pelas velocidades do óleo mais baixas (0,51 e 1,02 m/s), transferindo menos energia cinética e menos quantidade de movimento quando adentra no mar durante a saída na forma de “jato”, além de um valor para a velocidade da água do mar não suficiente para elevar a pluma de óleo até a superfície, nos casos C4 e C5. Isso evidencia que vazamentos muito pequenos na catenária, se identificados rapidamente podem ser contidos antes mesmo de chegar até à superfície por meio de coletores submersos, conforme relatam Feller (2012) e Biehl *et al.* (2014).

Figura 5.29 – Fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x) para $v_{\text{mar}} = 0,04$ m/s nas posições (a) $Y = 5,5$ m e $Z=0$; (b) $Y = 8,0$ m e $Z=0$; (c) $Y = 13,5$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C1, C2 e C3.

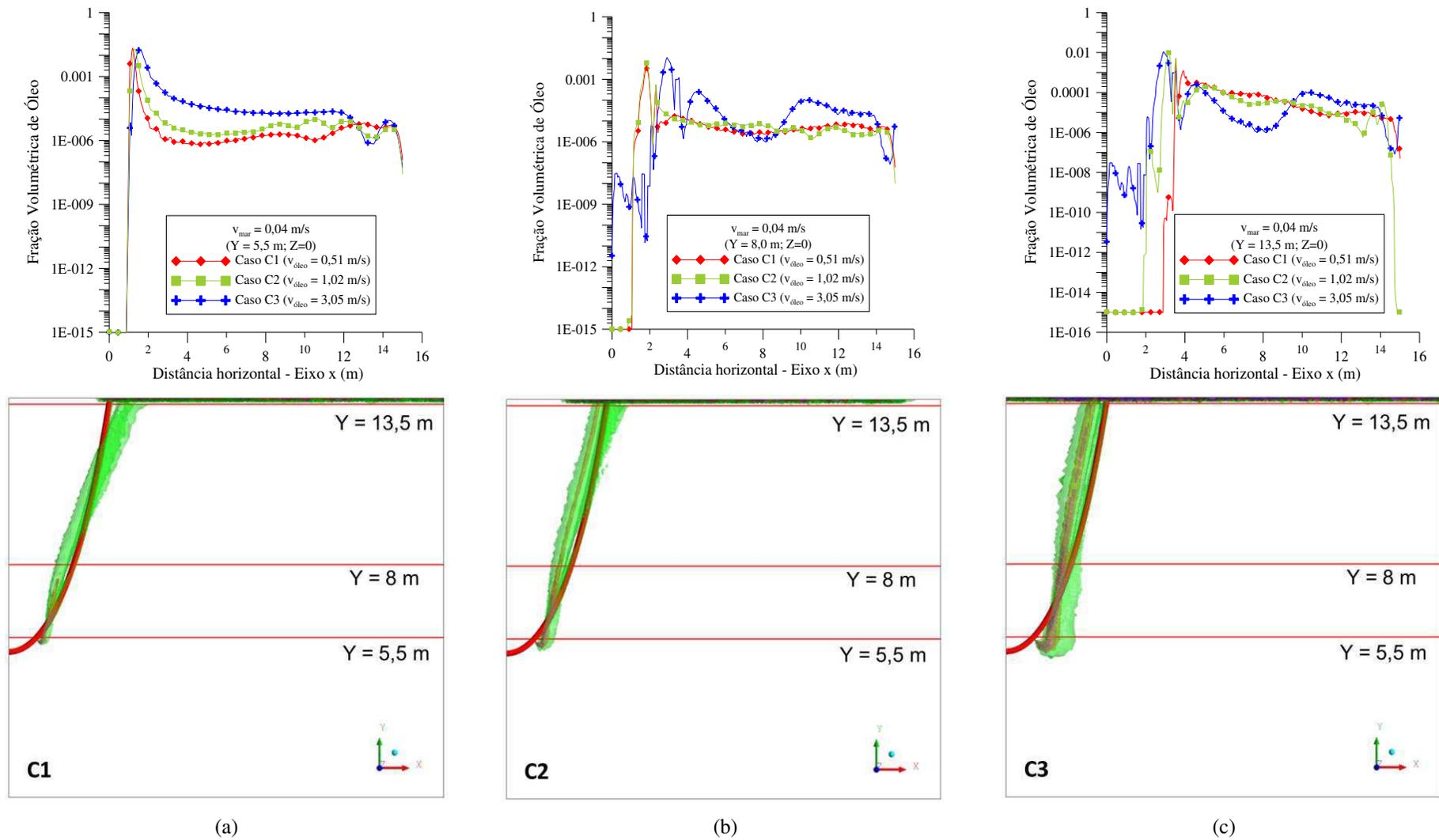
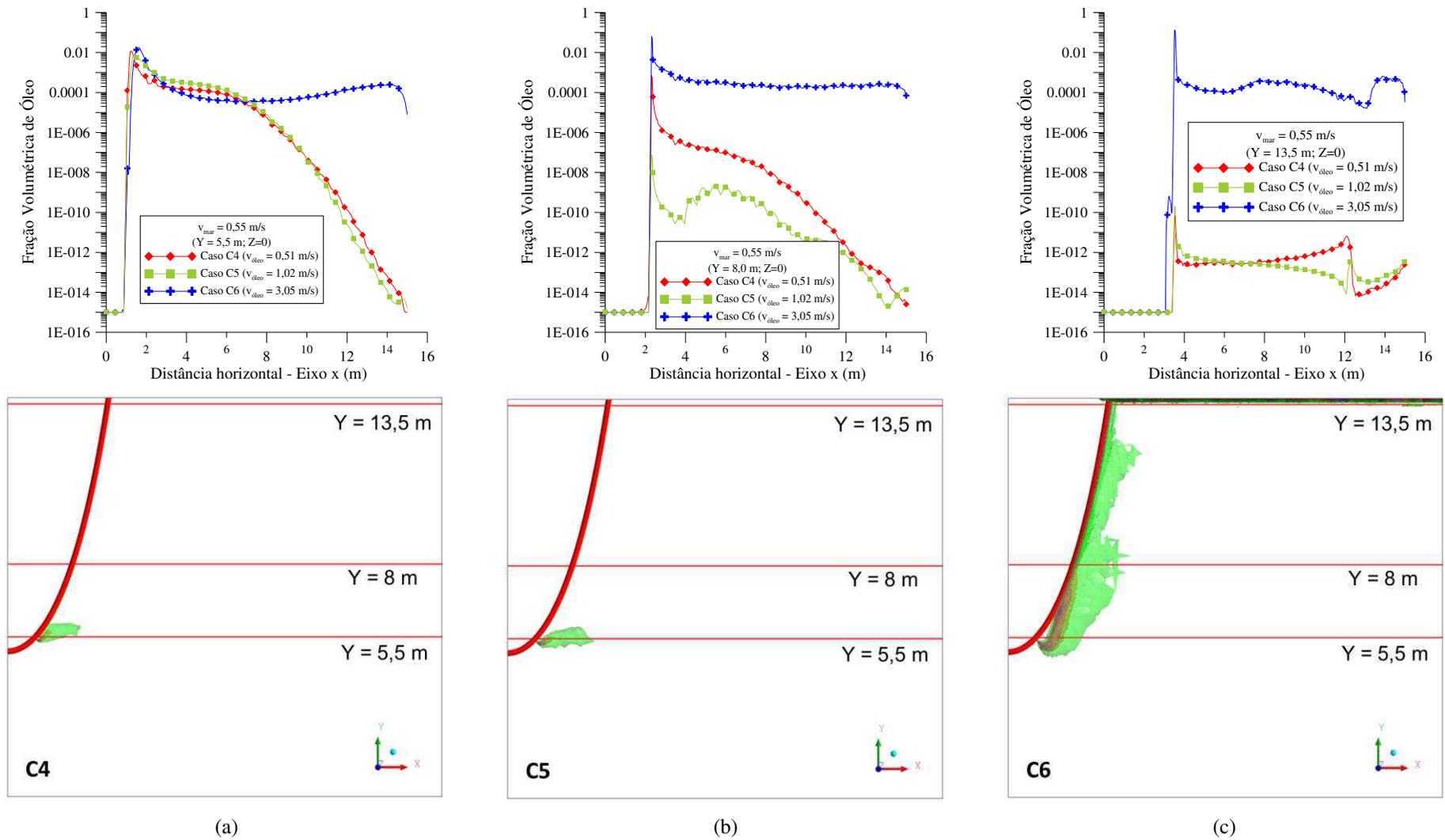
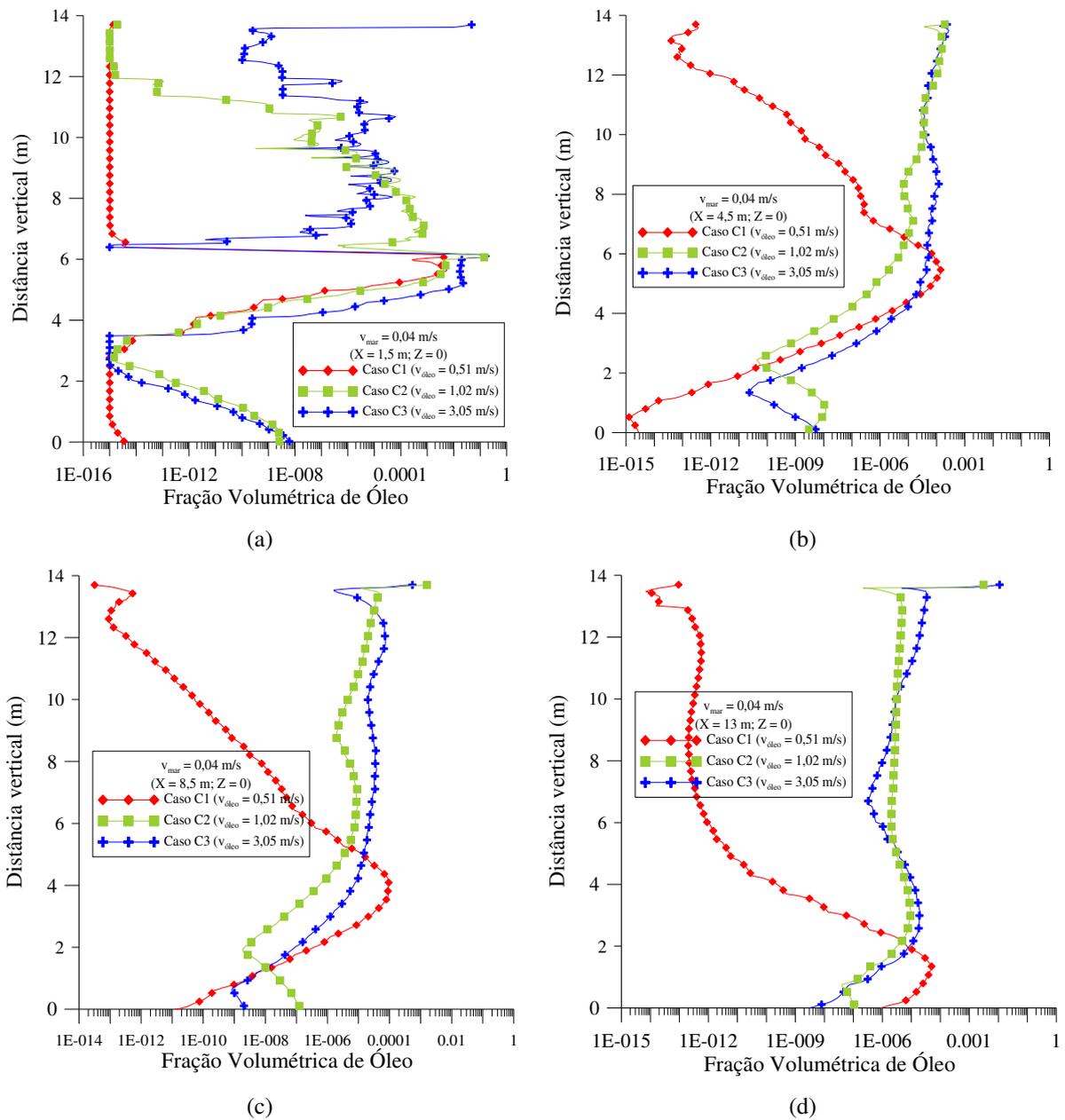


Figura 5.30 – Fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x) para $v_{mar} = 0,55$ m/s nas posições (a) $Y = 5,5$ m e $Z=0$; (b) $Y = 8,0$ m e $Z=0$; (c) $Y = 13,5$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C4, C5 e C6.



Nas Figuras 5.31 e 5.32 estão representadas as frações volumétricas de óleo em função da posição Y (Figura 5.28) para diferentes posições no eixo X, comparando-se os casos C1, C2 e C3, considerando as velocidades máximas da água do mar iguais a 0,04 m/s e 0,55 m/s, respectivamente.

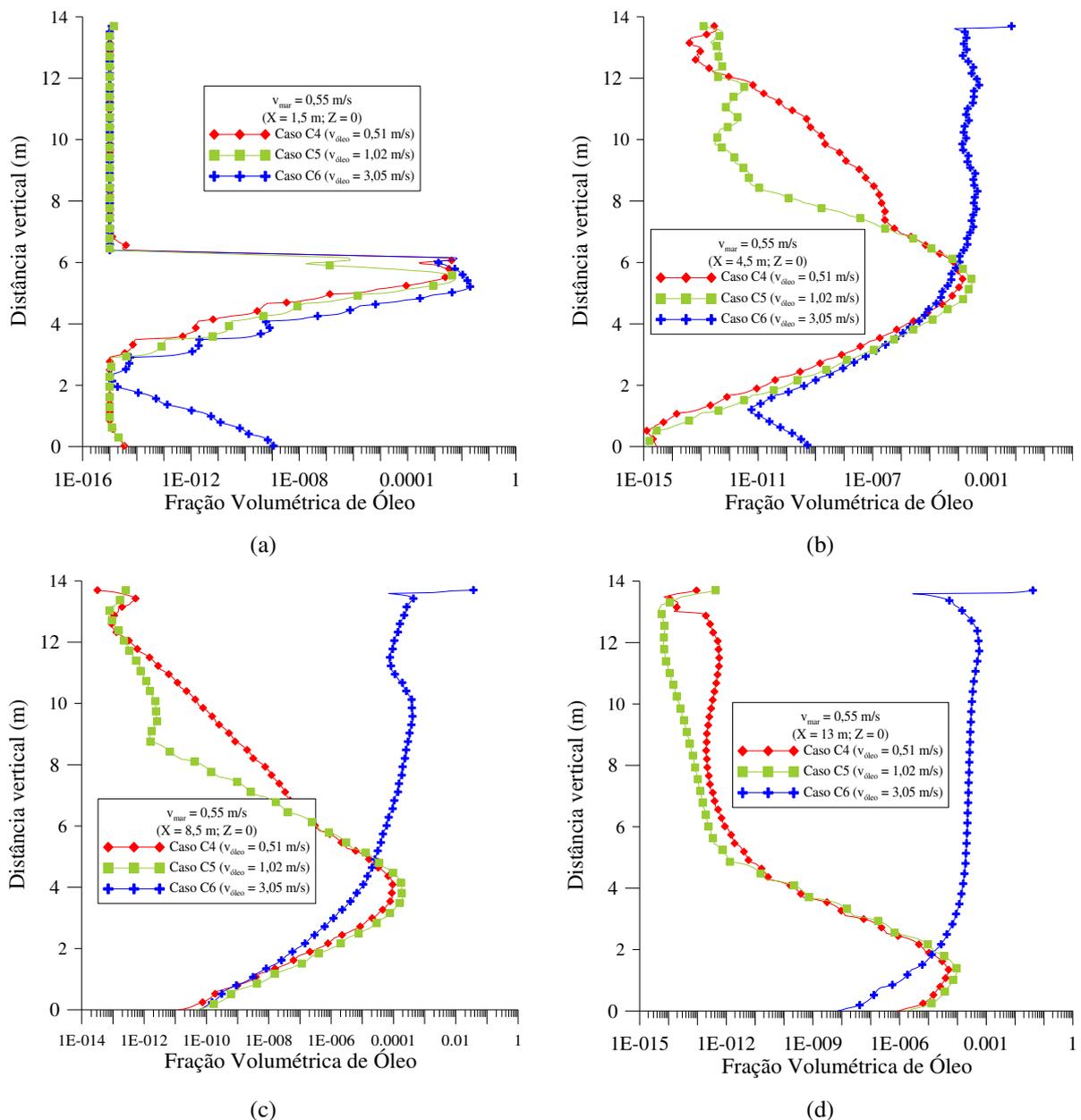
Figura 5.31 – Fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) para $v_{\text{mar}} = 0,04$ m/s nas posições (a) $X = 1,5$ m e $Z=0$; (b) $X = 4,5$ m e $Z=0$; (c) $X = 8,5$ m e $Z=0$; (d) $X = 13$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C1, C2 e C3.



Na Figura 5.31a, a forte perturbação observada nas curvas são caracterizadas pela saída do jato de óleo na região bem próxima ao orifício de vazamento do duto, sendo mais

intensificado no caso C3, em que a velocidade do óleo é maior. Nas Figuras 5.31b, 5.31c e 5.31d, as curvas para os casos C2 e C3 se localizam mais à direita, indicando que, nestes casos, a pluma de óleo é desviada de forma mais inclinada para esta direção, ao contrário do caso C1 em que a pluma ascende mais verticalmente. Portanto, para maiores velocidades do óleo, mantendo-se constante a velocidade máxima da água do mar, a pluma tende a se desviar verticalmente de forma mais inclinada. Isto também é observado na Figura 5.32, para os casos C4, C5 e C6, em que a velocidade máxima da água do mar é constante e igual a 0,55 m/s.

Figura 5.32 – Fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) para $v_{\text{mar}} = 0,55$ m/s nas posições (a) $X = 1,5$ m e $Z=0$; (b) $X = 4,5$ m e $Z=0$; (c) $X = 8,5$ m e $Z=0$; (d) $X = 13$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C4, C5 e C6.



No caso C6, em que a velocidade do óleo é maior, a tendência também foi a ascensão vertical da pluma de óleo. Para os casos C4 e C5, a pluma de óleo não chegou a subir até a superfície, mesmo a velocidade máxima da água sendo maior, em relação aos casos C1, C2 e C3.

5.5.2 Efeito da velocidade máxima da água do mar mantendo-se constante a velocidade de óleo através do orifício de vazamento

A velocidade da água do mar atua como transportadora do fluxo de óleo que sai através do orifício de vazamento. Realizou-se uma variação desta velocidade para analisar o efeito sobre a dispersão de óleo, conforme detalhes na Tabela 5.4. Linhas horizontais e verticais foram tomadas em diferentes posições do domínio para avaliação da fração volumétrica de óleo no processo de dispersão, como mostrado na Figura 5.28.

TABELA 5.4 Casos para estudo do efeito de velocidade máxima da água do mar mantendo-se a velocidade de óleo constante através do orifício de vazamento, para $\rho_{\text{óleo}} = 870 \text{ kg/m}^3$.

Ensaio:	$v_{\text{óleo}} \text{ (m/s)}$	$v_{\text{mar}} (v_{\text{wmáx}}) \text{ na direção x (m/s)}$	Casos
Densidade do óleo = 870 (kg/m³)	0,51 [ou 0,05 kg/s]	0,04	C1
	0,51 [ou 0,05 kg/s]	0,1	C7
	0,51 [ou 0,05 kg/s]	0,55	C4
	3,05 [ou 0,30 kg/s]	0,04	C3
	3,05 [ou 0,30 kg/s]	0,1	C8
	3,05 [ou 0,30 kg/s]	0,55	C6

Na Figura 5.33 está representado o processo de dispersão de óleo na água do mar para diferentes velocidades máximas da água do mar (casos C1, C4 e C7), mantendo-se a velocidade de óleo e a densidade constantes ($v_{\text{óleo}}$ constante e igual a 0,05 m/s; densidade do óleo constante e igual a 870 kg/m³). Observa-se que para um menor valor de velocidade de óleo (0,51 m/s), a pluma tende a ascender verticalmente e atingir a superfície somente nos casos em que a velocidade máxima da água foi menor (C1 e C7, com v_{mar} igual a 0,04 e 1,02

m/s, respectivamente). No Caso C4, a velocidade máxima maior da água do mar desloca a pluma de óleo no sentido de escoamento da água.

Na Figura 5.34 este mesmo fenômeno foi observado para os casos C3, C6 e C8, aqueles em que a velocidade de óleo foi definida maior ($v_{\text{óleo}}$ constante e igual a 3,05 m/s; densidade do óleo constante e igual a 870 kg/m³). Observa-se que, embora exista tendência da pluma de óleo atingir a superfície para todos os casos, nos casos em que a velocidade foi maior, as regiões a jusante do vazamento apresentou maiores valores de fração volumétrica de óleo (mesmo que em baixíssimas quantidades), mostrando que há tendência de um maior alcance horizontal na superfície, se o óleo estivesse vazando continuamente, para o valor de densidade considerado. Resultados semelhantes foram observados no trabalho de Zhu *et al.* (2014) em que, para velocidades da água do mar mais altas, o alcance horizontal até a superfície foi maior, além do tempo para este alcance também ser maior. Além disso, o autor evidencia que para estas velocidades mais altas a trajetória do óleo é mais enviesada a jusante ou, em outras palavras, mais inclinada para a direita. Isso é explicado pelo fato de que a água exercerá mais tensão de cisalhamento e irá transferir mais energia cinética para as gotas ou pluma de óleo.

Pode-se prever das comparações aqui feitas que, em velocidades máximas da água do mar maiores que aquelas aqui testadas, a pluma teria maior espalhamento a jusante do vazamento e do duto, cobrindo maiores distâncias horizontais.

Nas Figuras 5.35 e 5.36, apresenta-se a fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) para $v_{\text{óleo}} = 3,05$ m/s para diferentes posições em X (1,5m, X = 4,5m, X = 8,5m e X = 13m, para Z=0) comparando-se, respectivamente os casos C1, C4 e C7 e os casos C3, C6 e C8. Na Figura 5.35a, um pico acentuado à direita indica maior valor da fração volumétrica, pois é a região próxima à saída de óleo através do orifício de vazamento. Nas Figuras 5.35b, 5.35c e 5.35d, à medida que sobe verticalmente à pluma vai perdendo concentração de óleo mais à direita, indicando desvio para regiões mais a jusante devido à própria corrente do mar.

Comportamento semelhante foi observado na Figura 5.36, porém a curva para o caso C3 permaneceu mais à esquerda indicando que a pluma de óleo se direcionou de forma menos inclinada, em relação aos casos C6 e C8, em que a pluma de óleo se direcionou mais a jusante, até chegar à superfície.

Figura 5.33 – Fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x) para $v_{\text{óleo}} = 0,51$ m/s nas posições (a) $Y = 5,5$ m e $Z=0$; (b) $Y = 8,0$ m e $Z=0$; (c) $Y = 13,5$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C1, C4 e C7.

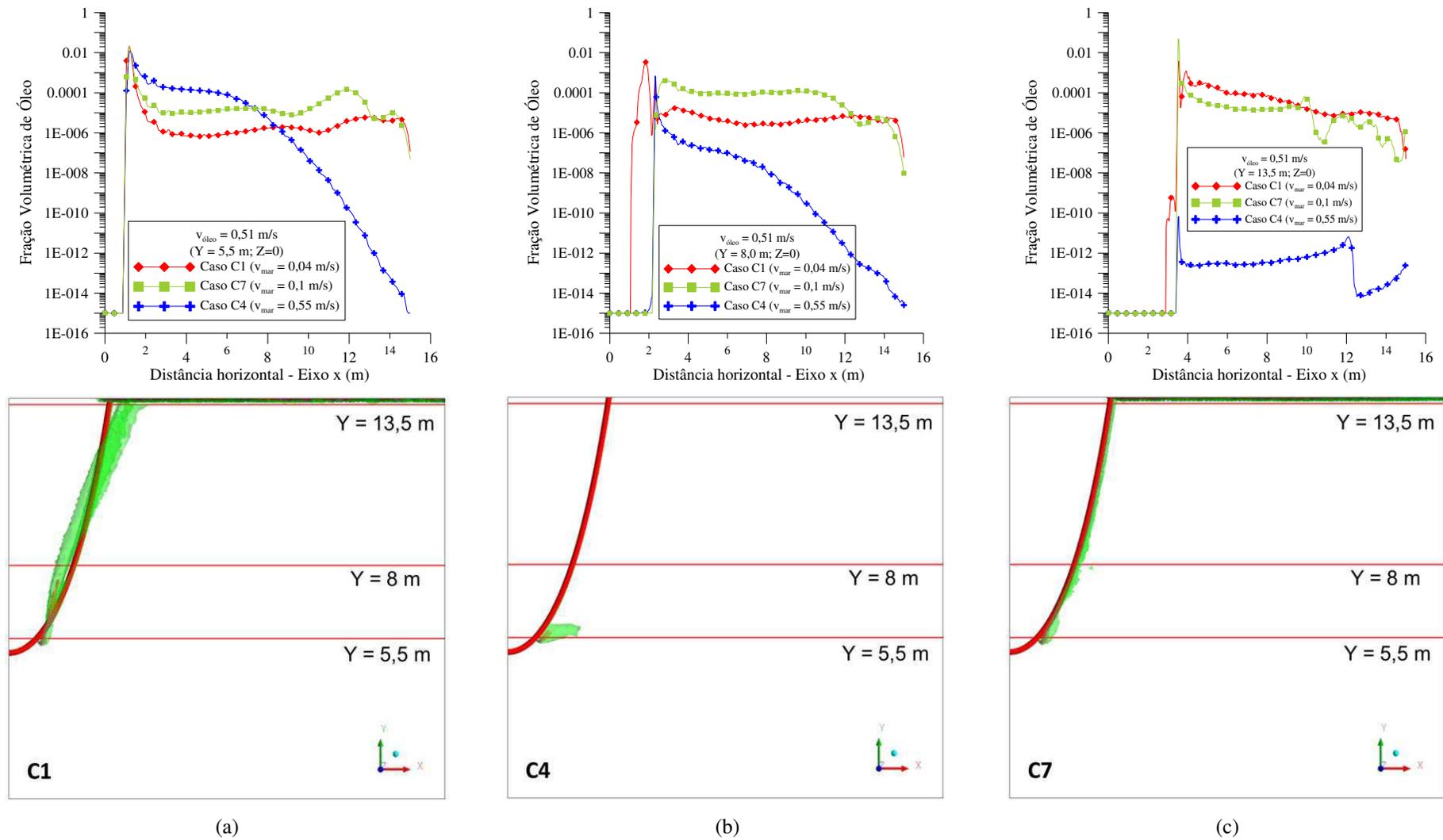


Figura 5.34 – Fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x) para $v_{\text{óleo}} = 3,05$ m/s nas posições (a) $Y = 5,5$ m e $Z=0$; (b) $Y = 8,0$ m e $Z=0$; (c) $Y = 13,5$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C3, C6 e C8.

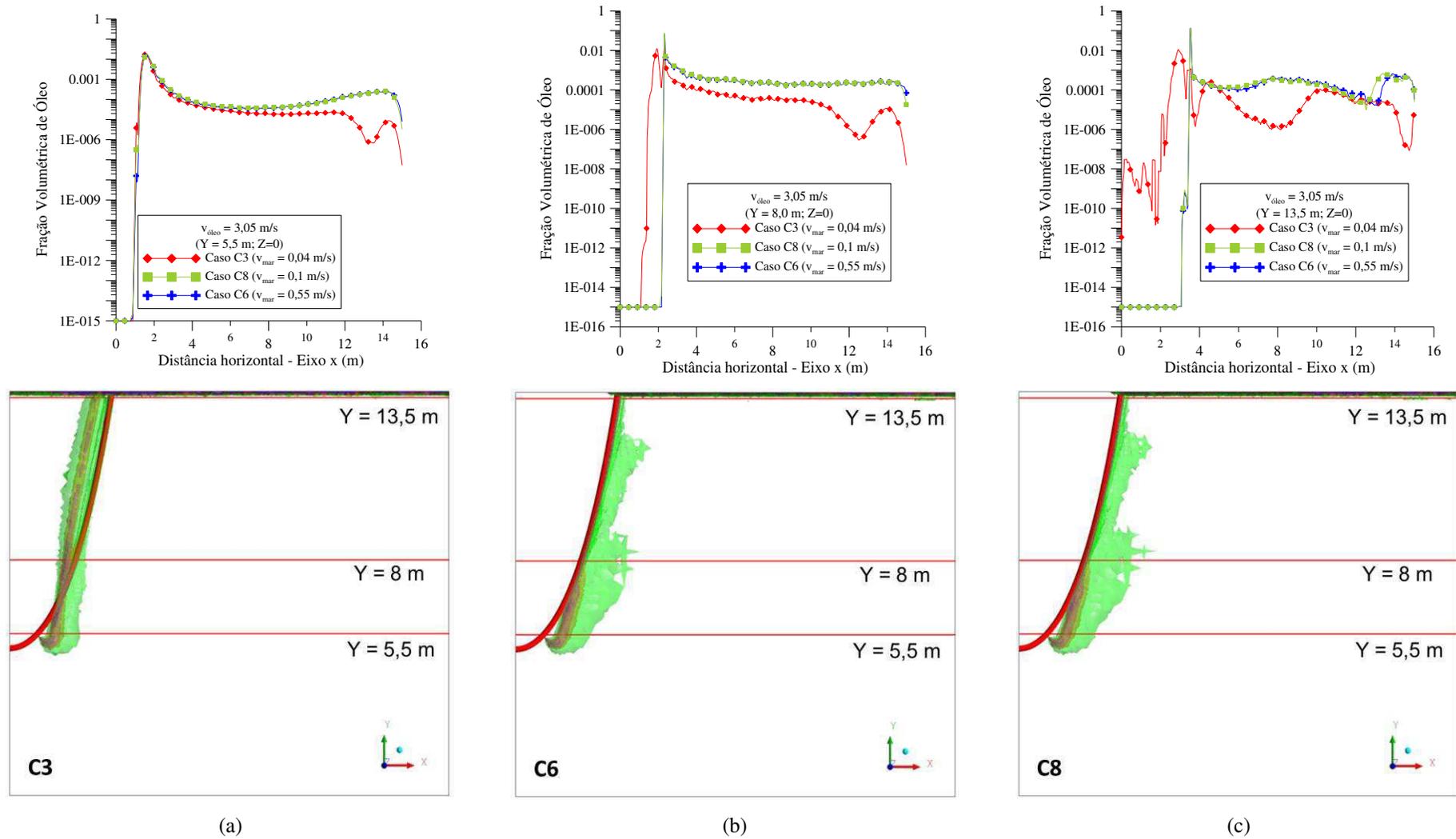
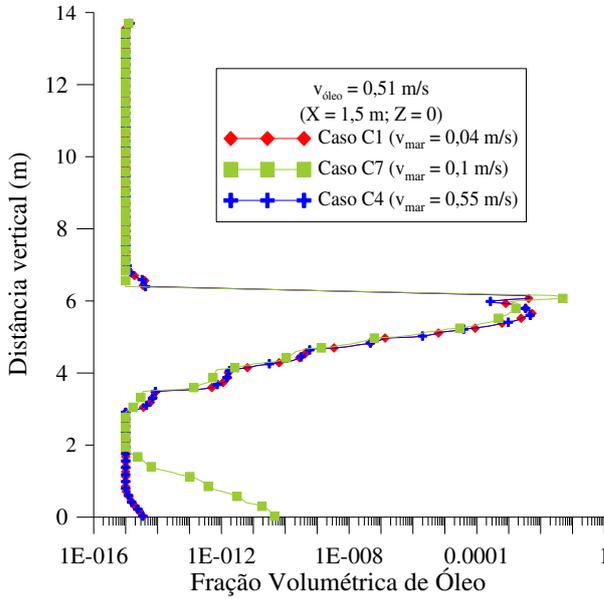
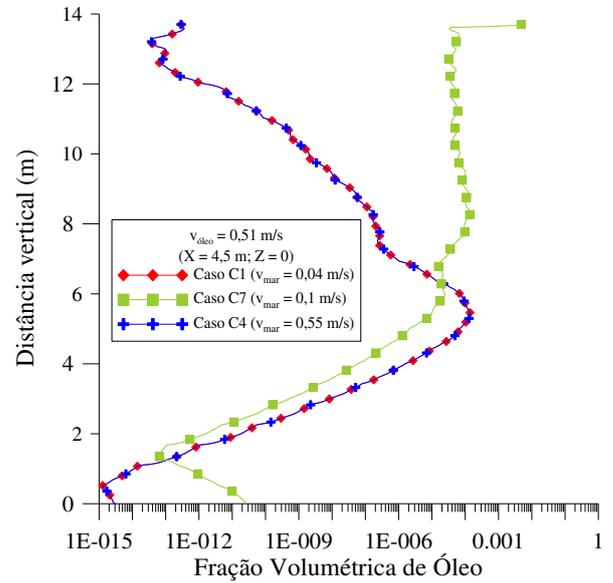


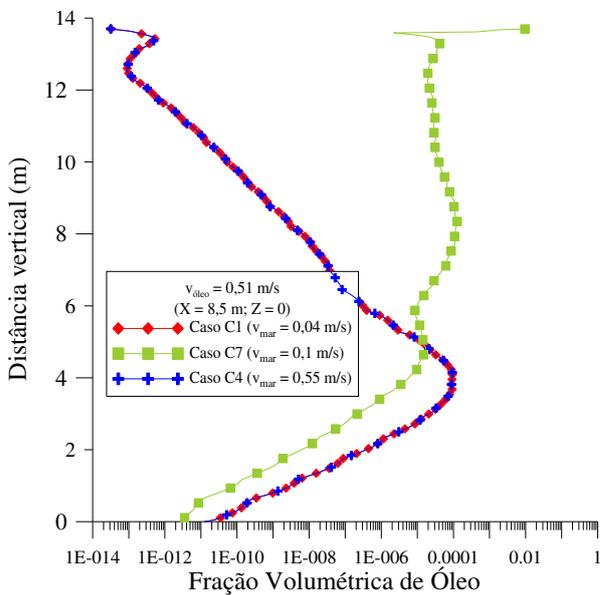
Figura 5.35 – Fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) para $v_{\text{óleo}} = 0,51$ m/s nas posições (a) $X = 1,5$ m e $Z=0$; (b) $X = 4,5$ m e $Z=0$; (c) $X = 8,5$ m e $Z=0$; (d) $X = 13$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C1, C4 e C7.



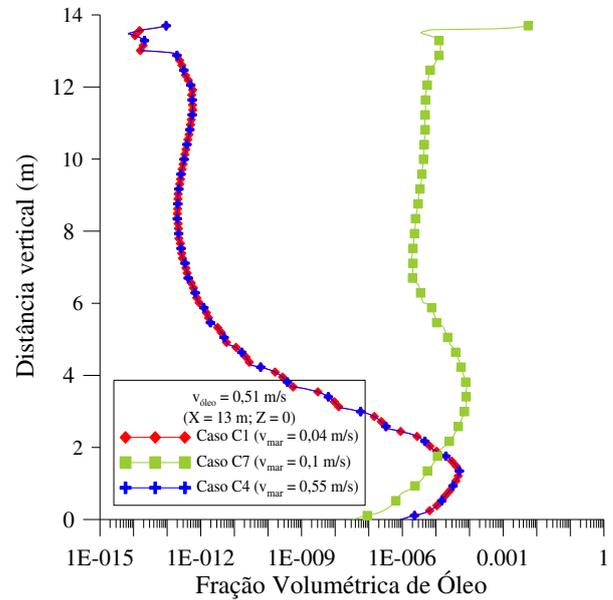
(a)



(b)

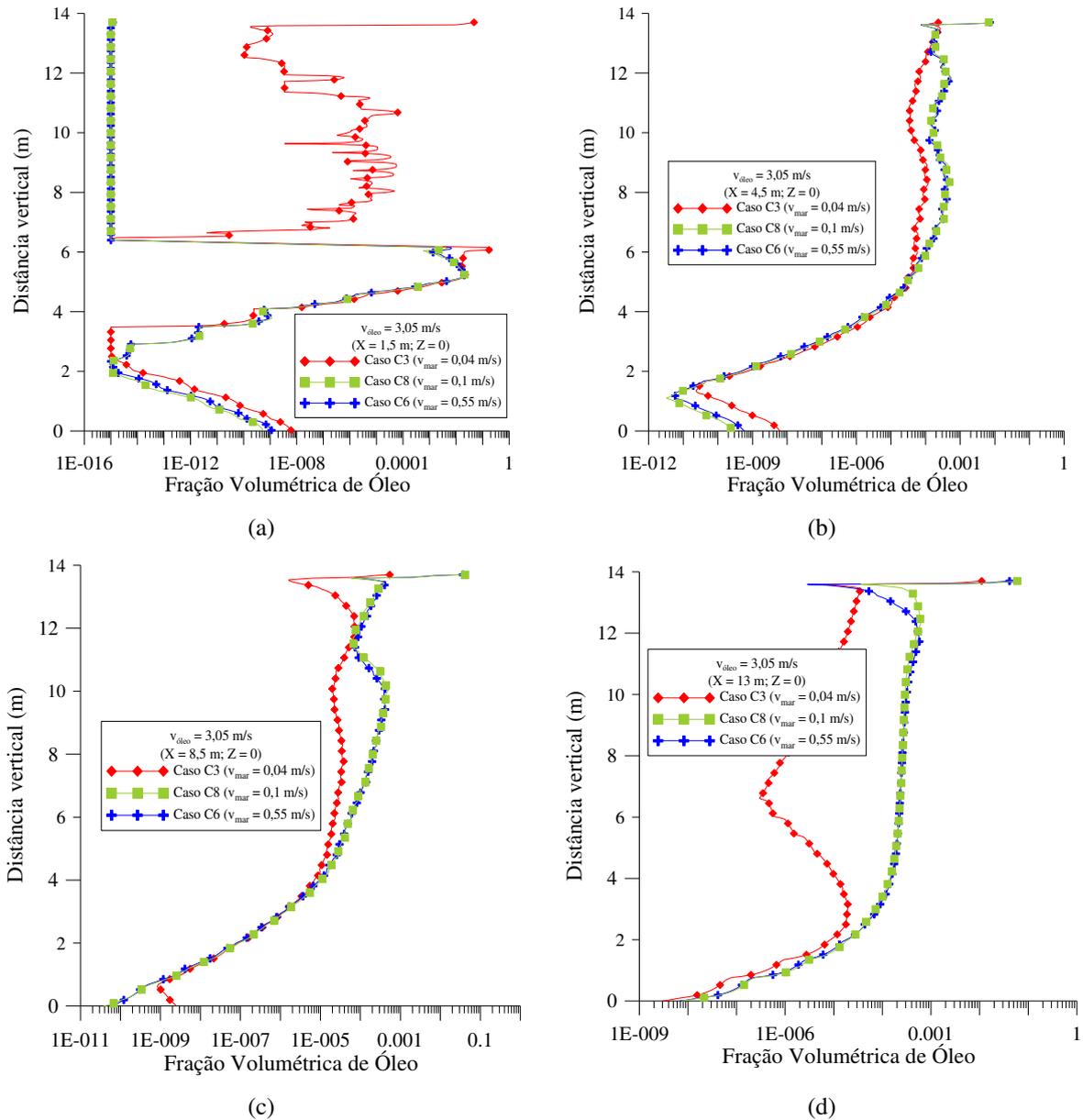


(c)



(d)

Figura 5.36 – Fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) para $v_{\text{óleo}} = 3,05$ m/s nas posições (a) $X = 1,5$ m e $Z=0$; (b) $X = 4,5$ m e $Z=0$; (c) $X = 8,5$ m e $Z=0$; (d) $X = 13$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C3, C6 e C8.



5.5.3 Efeito da densidade do óleo mantendo-se constante a velocidade máxima da água do mar e velocidade de óleo através do orifício de vazamento

Realizou-se uma variação da densidade do óleo para analisar seu efeito sobre a dispersão de óleo, conforme detalhes na Tabela 5.5. Linhas horizontais e verticais foram

tomadas em diferentes posições do domínio para avaliação da fração volumétrica de óleo no processo de dispersão, como mostrado na Figura 5.28.

TABELA 5.5 Casos para estudo do efeito da densidade do óleo na dispersão mantendo-se constante a velocidade máxima da água do mar e a velocidade de óleo através do orifício de vazamento.

Ensaio:	$v_{\text{óleo}}$ (m/s)	v_{mar} ($v_{\text{wmáx}}$) na direção x (m/s)	$\rho_{\text{óleo}}$ (kg/m^3)	Casos
Densidade do óleo = variável	3,05 [ou 0,30 kg/s]	0,04	870	C3
	2,95 [ou 0,30 kg/s]	0,04	900	C9
	2,76 [ou 0,30 kg/s]	0,04	960	C10

Na Figura 5.37 está representada a fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x) variando-se a densidade do óleo e mantendo-se constante $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} para diferentes posições de Y (5,5m, 8,0m e 13,5m) com Z=0, comparando-se os casos C3, C9 e C10. Nestas figuras pode ser observado que, para o valor menor de densidade (caso C3), há maior tendência da ascensão vertical (menos enviesada) da pluma, devido à maior diferença entre a densidade do óleo e a da água. Para um maior valor de densidade, a pluma de óleo está mais sujeita à ação da gravidade e mais próxima à densidade da água do mar e, portanto, tem maior espalhamento lateral, embora isso tenha sido mais fortemente observado no caso C10 (Figura 5.37c). Nas Figuras 5.37a, 5.37b e 5.37c, observa-se que as curvas são semelhantes, dentro de um mesmo patamar de magnitude de valores, pois nas posições tomadas o comportamento da pluma foi semelhante, embora, no caso C10, a dispersão subsuperfície tenha sido mais acentuada, para baixíssimos valores de fração volumétrica. Isso pode ser explicado devido ao valor de densidade do óleo ser mais elevado.

A Figura 5.38 mostra os resultados da fração volumétrica avaliados sobre uma linha vertical (Y) para diferentes posições no eixo X, comparando-se os casos C3, C9 e C10 considerando a velocidade máxima da água do mar constante de 0,04 m/s e valor de $v_{\text{óleo}}$ constante e igual a 3,05 m/s. Nas curvas da Figura 5.38a, a perturbação indicada se deve ao fato da região ser próxima ao orifício de saída de óleo, gerando maior turbulência.

Figura 5.37 – Fração volumétrica de óleo em função da distância horizontal (eixo x) variando-se a densidade do óleo e mantendo-se $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} constantes nas posições (a) $Y = 5,5$ m e $Z=0$; (b) $Y = 8,0$ m e $Z=0$; (c) $Y = 13,5$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os casos C3, C9 e C10.

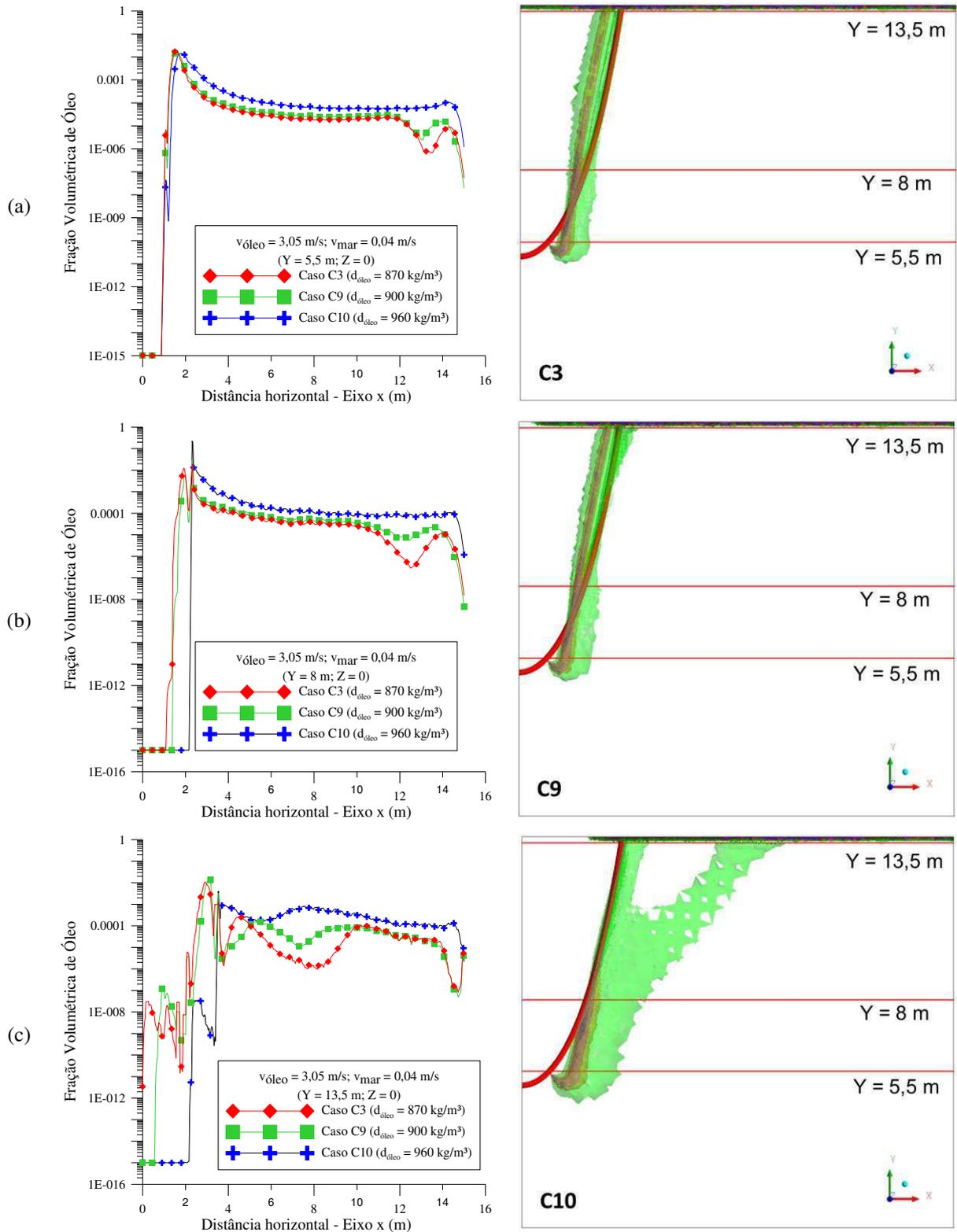
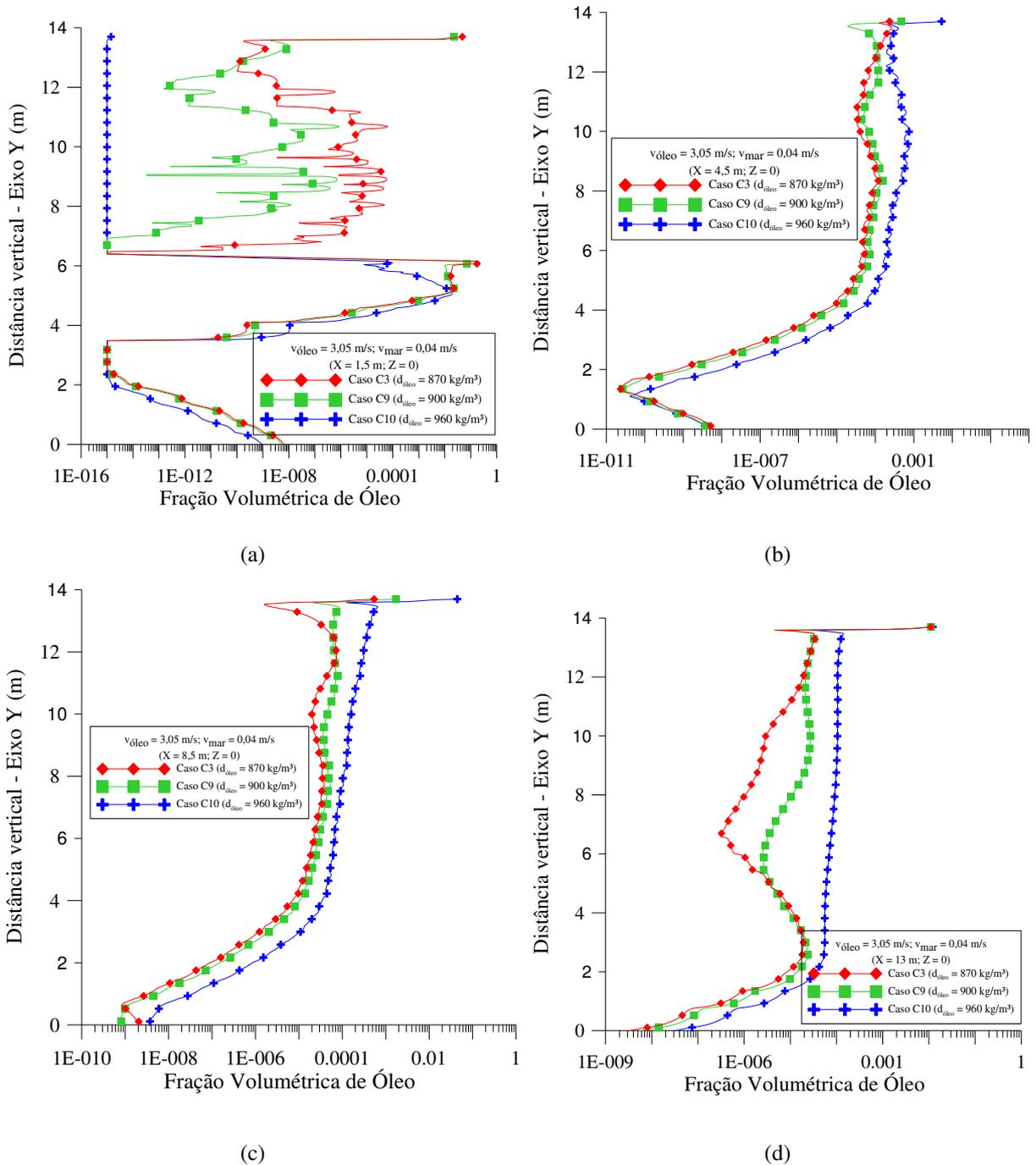


Figura 5.38 – Fração volumétrica de óleo analisada sobre uma linha vertical (distância vertical Y) variando-se a densidade do óleo e mantendo-se $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} constantes nas posições (a) $X = 1,5$ m e $Z=0$; (b) $X = 4,5$ m e $Z=0$; (c) $X = 8,5$ m e $Z=0$; (d) $X = 13$ m e $Z=0$, respectivamente, comparando-se os Casos C3, C9 e C10.



6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e discussões feitas nesta pesquisa, pode-se concluir que:

- A modelagem matemática apresentada permitiu uma avaliação do problema de dispersão de óleo no mar a partir de um vazamento em *riser* tipo catenária;
- Foi possível avaliar o comportamento da distribuição de pressão, fração volumétrica de óleo e velocidade superficial do óleo na água do mar, bem como as plumas de óleo formadas;
- A partir da avaliação da dispersão de óleo e do comportamento da pluma de óleo formada após o vazamento no meio que envolve a catenária foi possível observar que para o valor densidade do óleo mais baixo: a pluma atinge a superfície para menores valores de $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} , para maiores valores de $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} e para maiores valores de $v_{\text{óleo}}$ e menores valores de v_{mar} ; a pluma não atinge a superfície para maiores valores de $v_{\text{óleo}}$ e v_{mar} e para menores valores de $v_{\text{óleo}}$ e maiores valores de v_{mar} ; o fator que apresentou maior influência, neste caso, para a ascensão da pluma de óleo foi a velocidade do mar mais baixa. Se a velocidade do mar for mais alta, seria preciso maior valor da velocidade de saída do óleo. Um valor mais baixo de velocidade da água do mar na direção da correnteza permite que o arraste lateral não seja tão acentuado e a pluma se desloca mais verticalmente;
- A partir da avaliação da dispersão de óleo e do comportamento da pluma de óleo formada após o vazamento no meio que envolve a catenária foi possível observar que, para maiores valores de densidade do óleo, a pluma de óleo tem discreta dificuldade de ascensão vertical, tendo um comportamento levemente inclinado para a direita, despreendendo-se em determinado ponto, porém ambos atingindo a superfície da água. Este fato se deve ao maior valor de densidade que reduz o empuxo e conduz a pluma de óleo na direção lateral;
- Para maiores velocidades da água do mar nos casos em que a pluma de óleo atinge a superfície, a pluma tem maior espalhamento à jusante do vazamento, cobrindo maiores distâncias horizontais; a pluma de óleo, para estes casos, tende a se desviar para a direita de forma mais inclinada, devido à maior tensão de cisalhamento influenciada pela velocidade da água que transfere energia cinética para as partículas de óleo;

- Nos casos em que a velocidade da água do mar foi mais baixa nos casos em que a pluma de óleo atinge a superfície, foi possível observar espalhamento horizontal a montante após o choque com a superfície marinha, não apresentando resistência mesmo em sentido contra-corrente;
- Nos casos em que a pluma não atinge a superfície, é possível explicar que as forças de empuxo são superadas pela força de gravidade e pelo fato da velocidade da água do mar, em conjunto, terem influenciado para o desvio da pluma;
- Observou-se que, em alguns casos, houve aderência do óleo ao duto, fato este que influenciou no espalhamento do óleo, a montante da região de vazamento.

7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

- Analisar o comportamento da pluma de óleo a partir de vazamento em *risers* em regime transiente e considerando mistura multicomponente;
- Analisar o comportamento da pluma de óleo a partir de vazamento em trechos de tubulações verticais ou horizontais, em geometria tridimensional;
- Testar modelos com abordagem Lagrangeana e modelos de quebra de gotas para o óleo;
- Implementar um modelo de determinação do alcance da pluma na superfície;
- Analisar efeitos na dispersão da pluma de óleo com a implementação de um modelo de mudança de direcionamento da corrente marinha;
- Analisar efeitos de temperatura e de viscosidade sobre a dispersão do óleo;
- Investigar o efeito da presença de gás no comportamento de plumas multifásicas;
- Estudar e analisar o efeito de diferentes diâmetros do orifício de vazamento de óleo, bem como avaliar orifícios com outras formas geométricas, como, por exemplo, fissuras e rachaduras;
- Estudar o efeito da posição do orifício de vazamento ou inclinação do duto sobre a dispersão, bem como dutos com múltiplos vazamentos;
- Realizar comparações de resultados numéricos com dados experimentais para a dispersão de óleo em águas submarinas;
- Utilizar outros *softwares* de fluidodinâmica computacional, a exemplo do *Fluent* da Ansys®.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, F.G. **Utilização de Redes Neurais Artificiais para Detecção de Padrões de Vazamentos em Oleodutos**. 2010. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2010.
- AKAR, P.J.; JIRKA, G.H. Buoyant Spreading Processes in Pollutant Transport and Mixing, Part 2: Upstream Spreading in Weak Ambient Current. **Journal Hydraulic Research**, v.33, n.1, p.87-100, 1995.
- ALVES, F.N.A. **Estudo do Transporte de Manchas de Óleo por um Modelo Lagrangeano de Partículas na Bacia de Pelotas**. 2006. 161 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) – Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, 2006.
- AMARANTE, R.M.; FUJARRA, A.L.C. **Estudo de Estática de Linhas em Catenária Através de Análise de Imagens**. In: Congresso Panamericano de Ingenieria Naval - Copinaval, Montevideo, Uruguai, 2009.
- ANDERSEN, M.; BERG, A.; SAEVIK, S. **Development of an Optical Monitoring System for Flexible Risers**. In: Offshore Technology Conference, Houston, 2001.
- ANDRADE, E.Q. **Optimization Procedure for Alternative Configurations of Risers**. PETROBRAS R&D CENTER, ESSS. In: modeFRONTIER International Users' Meeting, Italy, 2012. Disponível em: <http://library.esss.com.br/otimizacao_risers>. Acesso em: 25 nov. 2015.
- ANDRADE, T.H.F. **Transporte de Óleos Pesados e Ultraviscosos Via Core-Flow: Aspectos Geométricos e Termofluidodinâmicos**. 2013. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, PB, 2013.

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em <www.anp.gov.br>.

ANSYS *Inc.*, CFX-Theory Manual Guide, 2013.

ARAÚJO, M.V. **Avaliação do Escoamento Bifásico na Presença de Vazamento em Oleodutos Horizontais: Modelagem e Simulação**. 2012. 78 f. Monografia (Ênfase em Petróleo e Gás – PRH-25/ANP) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, PB, 2012.

ARRUDA, M.D.S.V.; MARTINS, M.A.L.; LAGES, E.N. **Optimization of Complex Configuration of Catenary Risers Buoyancy Modules**. In: Seminar Exact and Technological Sciences, v. 33, n. 2, p. 149-164, Londrina, PR, 2012.

AZEVEDO, F.M. **Proposta de Algoritmo para Detecção de Vazamentos em Oleodutos Utilizando Análise Freqüencial de Sinais de Pressão**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal, RN, 2009.

AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNÁNDEZ, M.F. **Manual de Hidráulica**. 9 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015. 632 p.

BAGHDADI, A.H.A.; MANSY, H.A. A Mathematical Model for Leak Location in Pipelines. **Applied Mathematical Modelling**, v. 12, n. 1, p. 25-30, 1988.

BAPTISTA, R.M.; CAMPOS, W.; RACHID, F.B.F.; ARAÚJO, J.H.C. **Uma Nota Sobre a Incerteza Associada à Localização de Vazamentos**. In: 3rd Seminar on Pipeline, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

BAPTISTA, R.M; MOURA, C.H.W. **Leak Detection Systems for Multiphase Flow – Moving Forward**. In: Proceedings of IPC 2002, International Pipeline Conference 2002 Calgary, Alberta, Canadá, 2002.

- BAPTISTELLI, S.C. **Análise Crítica da Utilização de Modelagem Matemática na Avaliação da Dispersão de Efluentes Leves no Litoral da Baixada Santista (Estado de São Paulo)**. 2008. 314 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, SP, 2010.
- BARBOSA, L.M.C. **Escoamento Não-Isotérmico de Óleo Pesado, Água e Gás em Duto Vertical com Vazamento**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, PB, 2012.
- BRAGA, C.F. **Detecção de Vazamentos por Computador *On-Line* em Tubulações Transportando Misturas Gás-Líquido**. 2001. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2001.
- BEZERRA, B.A.F. **Detecção de Vazamentos em Tubulações de Gás pelo Método de Transitório de Pressão Utilizando CLP e Sensores**. 2008. 77 f. Monografia. (Especialização em Engenharia de Instrumentação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2008.
- BIEHL, J.B.; QUADRI, M.B.; SANTOS, M.C.; ULIANA, N.R. **Simulação do Escoamento Imiscível de um Jato de Óleo em Meio Subaquático para o Interior de um Reservatório de Coleta**. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, SC, 2014.
- BIGARELLA, E.D.V. **Verificação e Validação em CFD**. Rede Nacional de Combustão - Mesa Redonda em Modelagem, Embraer, 2007. Disponível em: <http://redenacionaldecombustao.org/arquivos/mesa_modelagem/EndaBigarella.pdf> Acesso em: 21 jul. 2016.
- BILLMANN, L.; ISERMANN, R. Leak Detection Methods for Pipelines. **Automatica**, v. 23, n. 5, p. 381-385, 1987.

- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Fenômenos de Transporte**. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2004.
- BLENINGER, T. **Coupled 3D Hydrodynamic Models for Submarine Outfalls: Environmental Hydraulic Design and Control of Multiport Diffusers**. 2006. Doctoral Thesis. Institute for Hydromechanics, University Karlsruhe, Germany, 2006.
- BUIATTI, C.M. **Monitoramento de Tubulações por Técnicas Computacionais On-Line**. 1995. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, 1995.
- CAMERINI, D. **Desenvolvimento de Pigs Instrumentados para Detecção e Localização de Pequenos Vazamentos em Dutos**. 2004. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- CAMERINI, M.G. **Monitoramento de Risers Flexíveis Através de Técnica Baseada em Vibrações**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- CARNEVAL, R.O.; COSTA, L.C.S.; LONTRA FILHO, L.L.; SANTOS, J.M.; ALMEIDA, M.C.; SOUZA, L.A.L. **Flexible Line Inspection**. In: IX International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology Conference, Houston, USA, 2005.
- CLOETE, S.; OLSEN, J.E.; SKJETNE, P. CFD Modeling of Plume and Free Surface Behavior Resulting From a Sub-Sea Gas Release. **Applied Ocean Research**, v. 31, p. 220-225, 2009.
- CHAKRABARTI, S.K. **Handbook of Offshore Engineering**. v. 2. Amsterdã: Elsevier, 2005.
- CHAN, G. **Effects of Droplets Size on Intrusion of Sub-Surface Oil Spills**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Meio Ambiente), Instituto de Tecnologia de Massachussets, Massachusetts, EUA, 2013.

- COLOMBAROLI, P.L.S. **Sistema de Detecção de Vazamento em Dutos de Petróleo**. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2008. Disponível em: <www.anp.gov.br/site/extras/prh/docs/ANP_10anos/PRH_16.pdf> Acesso em: 24 fev. 2010.
- COLOMBO, A.F., KARNEY, B.W. Energy and Costs of Leaks: Toward a Comprehensive Picture. **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 128, n. 6, p. 441-450, 2002.
- COLOMBO, A.F.; LEE, P.; KARNEY, B.W. A Selective Literature Review of Transient-Based Leak Detection Methods. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 2, n. 4, p. 212-227, 2009.
- CORREIA, J. **Estudo da Interface Água/Óleo no Âmbito da Indústria do Petróleo com Ênfase em Software de Simulação Fluidodinâmica (CFD)**. 2009. 27 f. Monografia (Especialização em Tecnologia de Petróleo e Gás PRH-34/ANP). Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- CUNHA, A.C.; BRASIL JÚNIOR, A.C.P.; COELHO, J.G.; CUNHA, H.F.A.; BRITO, D.G.. **Estudo Experimental e Numérico da Dispersão de Poluentes Sob Efeito de Marés na Foz do Rio Matapi – Distrito Industrial de Santana – AP**. In: ECOLAB 2007. Macapá, 2007, p. 40-44.
- DUTRA E DUQUE, G.W.; RIBEIRO, S.Y.R; DA SILVA, J.A.; SILVEIRA, M.E. **Simulação de enchimento de um Tanque de Combustível Automotivo Utilizando Técnicas de CFD**. In: 9º Simpósio de Mecânica Computacional. Associação Brasileira de Métodos Computacionais em Engenharia. Universidade Federal de São João Del Rei, Departamento de Engenharia Mecânica. São João Del Rei, MG, 2010.
- FALCÃO, M.V.S. **Análise de Vazamento de Óleo em Águas a Grandes Profundidades: Um Estudo com Fluidodinâmica Computacional**. 2015. 101 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

- FELLER, R. **Estudo do Vazamento e Captura de Óleo em Ambiente Subaquático**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, SC, 2012.
- FORTUNA, A.O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. São Paulo: Editora USP, 2000.
- GOBIRA, A.B. **Modelagem do Espalhamento de Óleo em Águas Rasas**. 2008. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2008.
- HENDERSON, K.; WATSON, G. **Recent Developments in Defect Characterization Techniques for Flexible Pipes**. In: *Advances in Subsea Pipeline Engineering and Technology*, Aberdeen, 1996.
- JACQUES, R.C.; FLORES, J.V.; STROHAECKER, T.R.; REGULY, A. Acoustic Emission Testing in Wires from the Tensile Armor of Flexible *Risers* Under Load. **Insight - Wingston Then Northampton**, v. 51, n. 9, p. 504-507, Northampton, England, 2009.
- JÖNSSON, L. **Leak Detection in Pipelines Using Hydraulic Transients**. In: *Proceedings 5th International Conference on Hydraulic Engineering Software, Computational Mechanics Publications*, 343-352. Southampton, England, 1994.
- JÖNSSON, L. **Interaction of a Hydraulic Transient with a Leak in a Pipe Flow**. In: *14th Australian Fluid Mechanics Conference*, Adelaide University, Adelaide, Australia, 2001.
- KORKISCHKO, I. **Investigação Experimental e Simulação Numérica do Escoamento ao Redor de um Modelo Automobilístico: Corpo de Ahmed**. 2006. 100 p. Monografia (Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.
- LI, K. **Freestanding Risers for Deepwater FPSO**. **2H Offshore Engineering Limited**. 2012. Disponível em: <<http://www.2hoffshore.com/documents/papers/FPSO%202012%20->

[%20Freestanding%20Risers%20for%20Deepwater%20FPSOs.pdf](#)> Acesso em: 22 jan. 2012.

LINDERSEN, P.J.B. **Modelling of Subsurface Releases of Oil and Gas**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade de Ciência e Tecnologia da Noruega, Noruega, 2013.

LOMAX, H.; PULLIAM, T.H.; ZINGG, D.W. **Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**. NASA Ames Research Center and University of Toronto Institute for Aerospace Studies, 1999. Disponível em: <http://maji.utsi.edu/courses/07_681_advanced_viscous_flow/ref_af6_Fundamentals_of_CFD.pdf> Acesso em: 9 jan. 2008.

LOTH, E. **Particles, Drops and Bubbles: Fluid Dynamics and Numerical Methods**. University of Illinois at Urbana, Champaign, USA, 2009.

MACIAS, I.B.; CRUZ, S.L.; PEREIRA, J.A.F.R. **Leak Detection in Pipelines**. In: 2th Mercosur Congress on Chemical Engineering/ 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering, Costa Verde, RJ, 2005.

MACHADO, M.B. **Modelagem Tridimensional da Dispersão de Poluentes em Rios**. 2006. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas – SP, 2006.

MALISKA, C.M. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, ed. 2, 2004.

MARINHO, M.G.; CAMERINI, C.S.; SANTOS, J.M.; PIRES, G.P. **Surface Monitoring Techniques for a Continuous Riser Integrity Assessment**. In: Offshore Technology Conference, Houston, USA, 2007a.

- MARINHO, M.G.; SANTOS, J.M.; CARNEVAL, R.O. **Integrity Assessment and Repair Techniques of Flexible Risers**. In: 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany, 2007b.
- MARTINS, C.O.D. **Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção e Monitoramento de Risers Flexíveis Através de Técnicas Micromagnéticas de Análise de Tensões**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 2008.
- MARTINS, T.R. **A Interação Óleo-Sedimento no Fundo Oceânico após um Derramamento Hipotético na Área do Pré-Sal do Espírito Santo (Campo de Jubarte)**. 2011. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Oceanografia e Ecologia, Vitória, ES, 2011.
- MASUTANI, S.M.; ADAMS, E.E. **Experimental Study of Multi-Phase Plumes with Application to Deep Ocean Oil Spills**. 88 p. Department of the Interior Minerals Management Service, Hawaii, USA, 2001.
- MODENESI, K.; FURLAN, L.T.; TOMAZ, E.; GUIRARDELLO, R.; NÚÑEZ, J.R. A CFD Model For Pollutant Dispersion in Rivers. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 21, n. 4, p. 557-568, Campinas, SP, 2004.
- MOREIRA, G. **Simulação Numérica do escoamento de Óleo em um Duto Submerso com Orifício de Vazamento**. 2016. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016.
- MORIKAWA, S.R.K.; CAMERINI, C.S.; BRAGA, A.M.B.; LERENA, R.W.A. **Real Time Continuous Structural Integrity Monitoring of Flexible Risers With Optical Fiber Sensors**. In: Offshore Technology Conference, Houston, USA, 2010.
- MOTA, C.A.A. **Hidrodinâmica do Escoamento Turbulento de Gás Natural em Duto Cilíndrico Elíptico com Vazamento**. 2014. 143 f. Monografia (Graduação em

Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2014.

MUNIZ, A.R.; ARGIMIRO, R.S.; NILO, S.M.C. **Uma Nova Metodologia para a Simulação de Escoamentos de Fluidos Viscoelásticos**. 2005. Relatório Técnico, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, RS, 2005.

NAVES, G.J. **Técnicas de Computação em Tempo Real em Controle e Supervisão de Tubulações**. 1991. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1991.

NETO, B.B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como Fazer Experimentos – Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Porto Alegre: Bookman, ed. 4, 2010.

OLIVEIRA, B.Y.; MARIANO, G.C.; QUADRI, M.B. **Um Estudo CFD de Vazamento de Óleo a Partir de Dutos Submersos**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Uberlândia, MG, 2009.

OUT, J.M.M.; KRONEMEIJER, D.A.; VAN DE LOO, P.J.; STERKE, A. The Integrity of Flexible Pipe: Search for an Inspection Strategy. **Engineering Structures**, v. 14, n. 4, p. 305-314, 1995.

PALADINO, E.E. **Modelagem Matemática e Simulação Numérica de Trajetórias de Derrames de Petróleo no Mar**. 2000. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

PALADINO, E.E. **Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do Tipo Pressão Diferencial**. 2005. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005.

PEREIRA FILHO, G.H.S. **Transporte Não-Isotérmico de Óleos Pesados em Risers Submersos**. 2010. Monografia (Especialização em Tecnologia de Petróleo e Gás PRH-25/ANP/UFCG) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.

PETROBRAS. Disponível em <www.petrobras.com.br>, 2015.

PHMSA – U. S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. **Significant Pipeline Incidents**, 2010.

QUEIROZ, J.O. **Análise de Estabilidade de Dutos Rígidos Submarinos Sujeitos à Ação de Ondas e Correntes Marinhas**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

RAHIMI, M.R.; MOSLEH, S. A Coupled Computational Fluid Dynamics and Population Balance Model for Two-Phase Flow in Pipes. **Journal of Basic and Applied Scientific Research**, v. 2, n. 9, p. 9594-9602, 2012.

RANADE, V.V. **Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering**. USA: Academic Press, 2002.

ROBERTS, P.J.W. Line Plume and Ocean Outfall Dispersion. **Journal of Hydraulics Division**, ASCE, v. 105, p. 313-330, 1979.

ROMA, W.N.L. **Fenômenos de Transporte para Engenharia**. São Carlos: RIMA, 2 ed., 2006.

SANDBERG, C.; HOLMES, J.; McCOY, K.; KOPPITSCH, H. The Application of a Continuous Leak Detection System to Pipelines and Associated Equipment. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 25, n. 5, p. 241-244, 1989.

SANTOS, J.S.T. **Estudo Experimental e Numérico da Parafinação em Escoamentos de Hidrocarbonetos em Dutos Produtores**. 2009. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

- SANTOS, M.M. **Simulação Numérica do Escoamento Bifásico Óleo-Água em Tubos**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, MG, 2010.
- SANTOS, W.R.G. **Escoamento Multifásico em Duto Vertical com Vazamento: Avaliação Físico/Geométrica do Duto na Hidrodinâmica do Escoamento**. 2014. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Campina Grande, PB, 2014.
- SILVA, E.S. **Estudo do Escoamento Bifásico em Risers em Movimento na Produção Marítima de Petróleo em Águas Profundas**. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Geociências, Campinas, SP, 2006.
- SIMÕES, T.B. **Monitoramento de Risers Flexíveis com Sensores a Fibra Óptica**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- SOARES, S.D.; CAMERINI, C.S.; SANTOS, J.M.C. **Development of Flexible Risers Monitoring Methodology Using Acoustic Emission Technology**. In: Offshore Technology Conference, Houston, USA, 2009.
- SOTO, Y.J.M. **A Modelagem Hidrodinâmica Como Apoio a Tomada de Decisão em Caso de Derrame de Óleo na Parte Interna do Complexo Estuarino Antonina-Paranaguá-PR**. 2004. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2004.
- SOUSA, E.O. **Detecção de Vazamento em Tubulações Através do Método Acústico e da Análise de Transiente de Pressão**. 2007. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, 2007.

- SOUSA, E.O.; CRUZ, S.L.; PEREIRA, J.A.F.R. **Leak Detection in Pipelines: Pressure Transient and Sound Analyses**. In: 4º PDPETRO, Campinas, SP, 2007.
- SOUSA, J.V.N. **Escoamento Isotérmico de Óleo Pesado e Água em Dutos Verticais com Vazamento**. 2012. 121 f. Monografia (Ênfase em Petróleo e Gás – PRH-25/ANP) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, PB, 2012.
- SOUZA, M.P.G. **Simulação da Dispersão de Óleo na Baía do Espírito Santo Usando o Modelo Numérico MOHID-2D**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2010.
- SZEWCZYK, S.B.O. **Processos Envolvidos em um Derramamento de Óleo no Mar**. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, 2006.
- TANAKA, R.L.; MARTINS, C.A. Parallel Dynamic Optimization of Steel Risers. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 133, n. 1, 2010.
- TAVARES, D.P.S.A. **Escoamento Multifásico Não Isotérmico em Oleodutos Horizontais com Vazamento: Modelagem e Simulação**. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2012.
- TESTA, S.M.; JACOBS, J.A. **Oil Spills and Gas Leaks – Environmental Response, Prevention and Coast Recovery**. USA: McGraw Hill Education, 2014.
- VALDIVIA, P.G. **Estudo Experimental e Numérico da Dinâmica de Movimento de Riser em Catenária com Escoamento Interno**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Campinas, SP, 2008.
- VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. Longman Scientific & Technical, 1995.

- WANG, C.; CHEN, B.; ZHANG, B.; HE, S.; ZHAO, M. Fingerprint and Weathering Characteristics of Crude Oils after Dalian Oil Spill, China. **Marine Pollution Bulletin**, v. 71, p. 64-68, 2013.
- WATANABE, K.; KOYAMA, H.; TANOGUCHI, H.; OHMA, T.; HIMMELBLAU, D. M. Location of Pinholes in a Pipeline. **Computers in Chemical Engineering**, v. 17, n. 1, p. 61-70, 1993.
- WEPPENAAR, N.; KRISTIENSEN, M. **Present and Future Possibilities of Optical Condition Monitoring of Flexible Pipes**. In: Offshore Technology Conference, Houston, United States, 2009.
- WIKE, A. Liquid Pipelines Can Use Many Varieties of SCADA-based Leak Detection Systems. **Pipeline & Gas Journal**, v. 213, n. 6, p. 16-20, 1986.
- WÖRNER, M. A Compact Introduction to the Numerical Modeling of Multiphase Flows. Institut für Reaktorsicherheit, Programm Nukleare Sicherheitsforschung, Forschungszentrum Karlsruhe, v. 6932, 2003.
- YAPA, P.D.; ZHENG, L. Simulation of Oil Spills from Underwater Accidents I: Model Development. **Journal of Hydraulic Research**, v. 35, n. 5, p. 673-688, 1997.
- YAPA, P.D.; ZHENG, L.; NAKATA, K. Modeling Underwater Oil/Gas Jets and Plumes. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 5, p. 481-491, 1999.
- ZHANG, J. **Designing a Cost Effective and Reliable Pipeline Leak Detection System**. In: Pipeline Reliability Conference, Houston, United States, 1996.
- ZHU, H; LIN, P; PAN, Q.A. CFD (Computational Fluid Dynamic) Simulation for Oil Leakage from Damaged Submarine Pipeline. **Energy**, v. 64, p. 887-899, 2014.