



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



**GICELIA MOREIRA**

**SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DA DISPERSÃO DE PETRÓLEO A PARTIR DO**  
**VAZAMENTO EM RISER SUBMERSO SOB EFEITOS DINÂMICOS E ESTÁTICOS**

**Campina Grande - PB**

**Dezembro de 2021**

**GICELIA MOREIRA**

**SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DA DISPERSÃO DE PETRÓLEO A PARTIR DO  
VAZAMENTO EM RISER SUBMERSO SOB EFEITOS DINÂMICOS E ESTÁTICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Química da Universidade Federal  
de Campina Grande como requisito para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia Química.

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

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos

**Campina Grande - PB**

**Dezembro de 2021**

M838s      Moreira, Gicelia.  
                Simulação fluidodinâmica da dispersão de petróleo a partir do vazamento em riser submerso sob efeitos dinâmicos e estáticos / Gicelia Moreira. – Campina Grande, 2021.  
                254 f. : il. color.

                Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.  
                "Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto".  
                Referências.

                1. Riser Lazy-Wave. 2. Malha móvel. 3. Vazamento. 4. Petróleo. 5. Offshore. I. Farias Neto, Severino Rodrigues de. II. Título.

CDU 665.6(043)

**GICELIA MOREIRA**

SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DA DISPERSÃO DE PETRÓLEO A PARTIR DO  
VAZAMENTO EM RISER SUBMERSO SOB EFEITOS DINÂMICOS E ESTÁTICOS

Tese de Doutorado aprovada em: 15/12/2021

**BANCA EXAMINADORA**



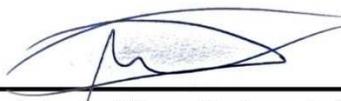
---

**Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**  
(Departamento de Engenharia Química - UFCG)  
**ORIENTADOR**



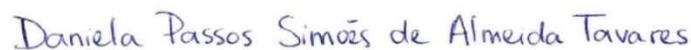
---

**Prof. Dr. José Nilton Silva**  
(Departamento de Engenharia Química - UFCG)  
**EXAMINADOR INTERNO**



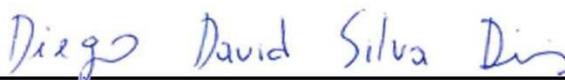
---

**Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**  
(Departamento de Engenharia Mecânica - UFCG)  
**EXAMINADOR EXTERNO**



---

**Profa. Dra. Daniela Passos Simões de Almeida Tavares**  
(Engenharia de Segurança no Trabalho - IFPB)  
**EXAMINADOR EXTERNO**



---

**Prof. Dr. Diego David Silva Diniz**  
(Departamento de Engenharias - UFERSA)  
**EXAMINADOR EXTERNO**



---

**Prof. Dr. Celso Pupo Pesce**  
(Departamento de Engenharia Mecânica - Escola Politécnica - USP)  
**EXAMINADOR EXTERNO**

*“Deus escolhe os pequenos para confundir os grandes”*

## DEDICATÓRIA

Porque todas as coisas são feitas por Deus e para Deus.

Dedico esta Tese de Doutorado a Deus, a Jesus Nazareno e aos 60 anos de matrimônio dos meus pais, *Joana da Silva Moreira* e *Edgar Moreira*.

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pelo dom da vida e sabedoria em poder concretizar este trabalho de forma digna e honrosa.

À minha mãe Joana da Silva Moreira e meu pai Edgar Moreira por todo o esforço, investimento e apoio incondicional de sempre.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**, agradeço imensamente pela oportunidade, paciência, ensinamentos e instruções no decorrer da minha pós-graduação;

Ao **Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**, pelo apoio e conhecimento transmitido e oportunidades concedidas durante todo o Doutorado, foi ímpar para meu crescimento profissional.

À **profa. Dra. Daniela Passos Simões de Almeida Tavares**, por todo conhecimento compartilhado e, principalmente, por sua valiosa amizade adquirida na pós-graduação.

Ao **prof. Dr. Celso Pupo Pesce**, pelo contato, colaboração e oportunidade de aperfeiçoamento do meu conhecimento na reta final do meu trabalho.

Aos meus irmãos Rosa, Jonas, Erivando, Djalma, Ivan, Jociene, Lúcia, Luciano e suas esposas, que sempre torceram pela minha vitória.

As minhas amigas Daniela Passos, Nataline Barbosa e Nisélia Queiroz.

Aos meus colegas do LPFI, Diego Diniz, Hortência, Antônio Gadelha, Boniek, Rosilda, Tony, Allyson e Adriana.

Aos colegas do LCTF, Bruno Lopes, Hallison Lima, Ricardo, Túlio, Balbina, Endyara, Valdeiza, Morgana e Vanderson.

Aos meus professores da graduação (UEPB), Profa. Vandeci Dias Santos e prof. Juracy Regis de Lucena Júnior, por sempre estarem à disposição em colaborar tecnicamente na medida do possível para meu crescimento profissional. Aos meus amigos que adquiri na UEPB durante a minha graduação, Nataline, Luzia, Ivanda, Aguinaldo, Eliane, Ana Cecília e Mikaely.

Ao Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem, LPFI/UAEQ/UFCG, e ao Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos, LCTF/UAEM/UFCG, pelo espaço e colaboração para o desenvolvimento e conclusão da minha pesquisa;

À CAPES por todo o suporte financeiro durante o meu doutorado, podendo assim dar continuidade e finalização do meu trabalho com bom êxito;

À Pós-Graduação de Engenharia Química – UFCG, pela oportunidade em realizar toda a minha pós graduação no programa;

À Pós-Graduação de Engenharia de Processos – UFCG, pela parceria e oportunidades concedidas durante toda a pesquisa de doutorado;

A Universidade Federal de Campina Grande, muito obrigada.

## SUMÁRIO

Capítulo 1 .....	1
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.2 Objetivo Geral .....	4
1.2.1 <i>Objetivos Específicos</i> .....	4
Capítulo 2 .....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Petróleo.....	5
2.2 Acidentes e Riscos Ambientais a Indústria do Petróleo no Brasil .....	6
2.3 Vazamento de Petróleo no Brasil em 2019 .....	7
2.4 <i>Risers</i> .....	10
2.5 Vazamentos de Óleo em Correnteza Marítima.....	21
2.5.1 <i>Simulação numérica de vazamento de óleo</i> .....	21
2.5.2 <i>Estudos experimentais de vazamento de óleo em dutos</i> .....	35
2.5.3 <i>Estudos experimentais e numéricos de vazamento de óleo</i> .....	43
Capítulo 3 .....	49
3 METODOLOGIA.....	49
3.1 Descrição do Problema Físico .....	50
3.2 Malha Numérica .....	53
3.3 Modelagem Matemática .....	63
3.3.1 Equações governantes.....	63
3.4 Modelo Multifásico .....	64
3.4.1 <i>Equação da Fração Volumétrica</i> .....	64
3.4.2 <i>Equação da quantidade de movimento</i> .....	65

3.4.3 Fluxo de Canal Aberto.....	65
3.5 Modelo de turbulência.....	71
3.6 Modelo Dinâmico.....	74
3.6.1 Método de Suavização de Camada Limite.....	74
3.6.2 Formulação Transiente.....	75
3.7 Casos estudados.....	75
Capítulo 4.....	89
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	89
4.1 Avaliação da dependência da Malha Numérica.....	89
4.2 Validação da Solução Numérica com Dados Experimentais.....	94
4.3 Comportamento da Pluma de óleo durante Vazamento em <i>Riser</i> Estático e Dinâmico (ou em movimentação).....	96
4.3.1 Campo de Velocidade Superficial da Água no plano YZ.....	96
4.3.2 Campo de fração volumétrica.....	96
4.3.3 Campo de Pressão.....	101
4.4 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes velocidades de correnteza para o riser dinâmico e estático.....	104
4.4.1 Campo de fração volumétrica da água durante vazamento de óleo sob diferentes velocidades de correnteza em riser estático e dinâmico.....	104
4.4.2 Efeito da movimentação do riser na altura da quebra do jato de óleo em função da velocidade da correnteza.....	121
4.4.3 Efeito da velocidade da correnteza na pluma de óleo para o riser estático.....	125
4.4.4 Efeito da velocidade da correnteza na pluma de óleo para o riser em movimento.....	127
4.4.5 Influência do riser estático e dinâmico sobre a pluma de óleo a velocidade constante....	129
4.4.6 Efeito da velocidade de corrente na distância percorrida.....	131

4.5 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes densidades de óleo, para o riser dinâmico e estático .....	133
4.5.1 <i>Campo de fração volumétrica da água durante vazamento de óleo para diferentes densidades de óleo considerando o posicionamento do riser estático e dinâmico</i> .....	133
4.5.2 <i>Efeito da movimentação do riser na altura da quebra do jato de óleo em função da densidade do óleo</i> .....	140
4.5.3 <i>Efeito da densidade da pluma de óleo em água a partir de vazamento em riser estático</i> .	142
4.5.4 <i>Efeito da densidade da pluma de óleo em água a partir de vazamento em riser com movimento</i> .....	144
4.5.5 <i>Efeito do riser estático e dinâmico sobre a pluma de óleo de densidade leve e pesada</i> ....	146
4.5.6 <i>Efeito da distância percorrida em função da densidade do óleo</i> .....	148
4.6 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes densidades de água, para o riser dinâmico e estático .....	150
4.6.1 <i>Campo de fração volumétrica da água durante vazamento de óleo sob diferentes valores densidades da água para o riser sob condição estático e dinâmico</i> .....	150
4.6.2 <i>Efeito da densidade da água sobre a pluma de óleo para o riser estático</i> .....	154
4.6.3 <i>Efeito da densidade da água sobre a pluma de óleo para o riser em movimento</i> .....	156
4.6.4 <i>Comportamento da pluma de óleo para diferentes densidades de água considerando o posicionamento estático e dinâmico do riser</i> .....	158
4.6.5 <i>Efeito da densidade da água em função distância percorrida</i> .....	160
4.7 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes viscosidades do óleo, para o riser dinâmico e estático .....	162
4.7.1 <i>Campo de fração volumétrica da água durante vazamento de óleo sob diferentes viscosidades do óleo considerando do riser estático e dinâmico</i> .....	162
4.7.2 <i>Análise da viscosidade do óleo considerando o riser estático</i> .....	169
4.7.3 <i>Análise da viscosidade do óleo considerando a movimentação do riser</i> .....	171

4.7.4 Efeito do deslocamento do riser estático e dinâmico sobre a pluma de óleo para diferentes viscosidades de óleo .....	173
4.7.5 Efeito da viscosidade do óleo na distância percorrida pela pluma de óleo.....	175
4.8 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes velocidades de vazamento de óleo, para o riser dinâmico e estático .....	177
4.8.1 Campo de fração volumétrica da água sob diferentes velocidades de vazamento de óleo considerando o posicionamento estático e dinâmico do riser .....	177
4.8.2 Efeito da velocidade de vazamento de óleo considerando o riser sob efeito estático.....	184
4.8.3 Efeito da velocidade de vazamento de óleo considerando o riser em movimentação .....	186
4.8.4 Efeito do riser estático e dinâmico sob a pluma de óleo para diferentes velocidades de vazamento .....	188
4.8.5 Efeito da distância percorrida em função da velocidade de vazamento do óleo .....	190
4.9 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes diâmetros de vazamento de óleo, para o riser dinâmico e estático.....	192
4.9.1 Campo de fração volumétrica da água durante vazamento de óleo sob diferentes diâmetros de vazamento de óleo a partir de riser estático e dinâmico.....	192
4.9.2 Efeito da movimentação do riser na altura da quebra do jato de óleo em função do diâmetro do furo .....	199
4.9.3 Efeito do diâmetro do vazamento considerando o riser sob efeito estático.....	201
4.9.4 Efeito do comportamento estático e dinâmico do riser sobre a pluma de óleo em diferentes diâmetros de vazamento .....	205
4.9.5 Efeito da distância percorrida da pluma de óleo em função do diâmetro de vazamento ..	207
Capítulo 5 .....	209
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	209
5.1 CONCLUSÕES.....	209
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	212

REFERÊNCIAS .....	213
APÊNDICE A .....	218

## RESUMO

MOREIRA, Gicelia. **Simulação Fluidodinâmica da Dispersão de Petróleo a Partir do Vazamento em *Riser* Submerso Sob Efeitos Dinâmicos e Estáticos**. 2021. 254f. Tese (Doutorado). Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 2021.

Grandes são as perdas econômicas e ambientais causadas por acidentes devido ao derramamento de óleo em alto mar. Quando esse tipo de situação ocorre torna-se necessário rapidez e eficiência no processo de resposta emergencial para sanar tal situação. Muitos são os trabalhos na literatura que mostram estudos de vazamentos de petróleo em águas rasas oriundos de rompimentos em oleodutos. No entanto, vários trabalhos que envolvem estudos em *riser* tratam apenas do escoamento interno e/ou a mecânica do *riser* e não estudam o escoamento externo. É constatado na literatura estudos que envolvem vazamento de óleo, a partir de oleoduto danificados sob efeito estático, porém, não foi constatado nenhum tipo de trabalho que trate de vazamento de óleo oriundo de *riser* em movimento, através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Logo, é de suma importância estudar o comportamento físico, a trajetória e o tempo de propagação que o petróleo leva pra se deslocar, desde o ponto de vazamento até a superfície livre, por meio de *riser* em movimentação via CFD, visto que vários fatores podem fazer com que ocorra a formação de um vazamento em um *riser*, por exemplo, o tipo de material de fabricação, a quantidade de camadas do *riser*, o tempo de vida, as condições ambientais, densidade dos fluidos internos e externos, pressão do fluido interno, corrosão, as cargas estáticas devido ao próprio peso do *riser*, efeitos químicos da água do mar e outros componentes químicos que acompanham o petróleo durante todo o processo de produção, fadiga do *riser* e, até mesmo, a montagem, instalação e operação dos *risers* podem gerar suas rupturas, causando grande prejuízo financeiro e ambiental. Diante disto, decidiu-se por estudar a dispersão do petróleo oriundo do vazamento em *riser* flexíveis submetidos a efeitos estático e dinâmico. Portanto, foi realizado um estudo numérico usando o Ansys Fluent 2020 para avaliar a dispersão do óleo, com base nos efeitos da velocidade de correnteza, densidade do óleo, densidade da água, viscosidade do óleo, velocidade de vazamento e diâmetro do vazamento usando o modelo multifásico Volume de Fluidos - VOF, onde foi inserido o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  padrão para descrever o fluxo multifásico. O

método de malha móvel foi empregado para implementar o efeito do movimento do *riser* utilizando uma sub-rotina para fazer a movimentação do *riser* com valores de deslocamento proporcional a cada velocidade de correnteza adotada. Logo, o objetivo geral do presente trabalho é estudar a dispersão do vazamento de petróleo a partir de *riser* submerso sujeito a efeitos dinâmicos e estáticos. Assim, por meio dos resultados de campo de pressão, velocidade superficial da água, fração volumétrica, altura e distância percorrida pela pluma de óleo vazada, foi possível avaliar a dispersão subaquática da pluma de óleo em água para o *riser* com mobilidade dinâmica e estática.

**Palavras-Chave:** *Riser Lazy-Wave*, Malha móvel, Vazamento, Petróleo, *Offshore*.

## ABSTRACT

MOREIRA, Gicelia. **Fluidodynamic Simulation of Oil Dispersion from the Submerged *Riser* Leak Under Dynamic And Static Effects**. 2021. 254f. Doctoral Thesis. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Brazil, 2021.

Great are the economic and environmental losses caused by accidents due to oil spills at sea. When this type of situation occurs, speed and efficiency in the emergency response process become necessary to remedy this situation. There are many works in the literature that present studies of petroleum spills in shallow waters arising from ruptures in pipelines. However, several works that involve studies on *risers* deal only with the internal flow and/or the mechanics of the *riser* and do not study the external flow. Studies involving oil leakage from damaged pipelines under static effect are found in the literature, however, no work was found that deals with oil leakage from a moving riser, through Computational Fluid Dynamics (CFD). Therefore, it is extremely important to study the physical behavior, trajectory, and propagation time that petroleum takes to move from the leak point to the free surface using a moving riser via CFD, since several factors can cause the formation of a leak in a *riser*, for example, the type of material, the number of layers of the *riser*, the lifetime, environmental conditions, density of internal and external fluids, pressure of the internal fluid, corrosion, static load due to the riser's own weight, chemical effects of seawater and other chemical components that accompany the petroleum throughout the production process, riser fatigue and even the assembly, installation and operation of the risers can cause their rupture, resulting in a great financial and environmental loss. Thus, it was decided to study the petroleum dispersion from the leak in flexible risers subjected to static and dynamic effects. Upon the above, a numerical study was performed using Ansys Fluent 2020 to evaluate oil dispersion based on the effects of current velocity, oil density, water density, oil viscosity, leak velocity, and leak diameter using the multiphase model Volume of Fluid – VOF, where the standard k- $\epsilon$  turbulence model was inserted to describe the multiphase flow. The dynamic mesh method was used to implement the static and movement effect of the riser using a subroutine to promote the riser movement with displacement values proportional to each current velocity adopted. Therefore, the main purpose of this work is to study the petroleum dispersion from leakage in a submerged riser under dynamic and static

effects. Thus, through the results of pressure field, water surface velocity, volumetric fraction, height, and distance covered by the leaked oil plume, it was possible to evaluate the underwater dispersion of the oil plume in water with dynamic and static mobility.

**Keywords:** *Riser Lazy-Wave*, Dynamic mesh, Leakage, Petroleum, *Offshore*.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1</b>	(a) Mancha de óleo pesado no litoral do nordeste brasileiro; (b) óleo cru ultra-pesado.	<b>09</b>
<b>FIGURA 2.2</b>	Manchas de óleo na praia da Pituba, Salvador/BA.	<b>09</b>
<b>FIGURA 2.3</b>	Exemplo de <i>riser</i> (a) flexível; (b) rígido	<b>11</b>
<b>FIGURA 2.4</b>	(a) Linhas flexíveis com milhares de metros de comprimento; (b) Lançamento do <i>riser</i> com flutuadores.	<b>12</b>
<b>FIGURA 2.5</b>	Figura 2.5: <i>Riser</i> do tipo <i>Lazy-Wave</i> .	<b>13</b>
<b>FIGURA 2.6</b>	<i>Riser</i> em <i>catenária livre</i> .	<b>14</b>
<b>FIGURA 2.7</b>	<i>Riser</i> do tipo <i>Lazy-S</i> .	<b>15</b>
<b>FIGURA 2.8</b>	<i>Riser</i> do tipo <i>Steep-Wave</i> .	<b>16</b>
<b>FIGURA 2.9</b>	<i>Riser</i> do tipo <i>Steep-S</i> .	<b>17</b>
<b>FIGURA 2.10</b>	<i>Riser</i> em <i>Catenária Hidro Amortecido</i> .	<b>17</b>
<b>FIGURA 2.11</b>	<i>Riser</i> em <i>catenária Pliant-Wave</i> .	<b>18</b>
<b>FIGURA 2.12</b>	<i>Riser</i> em configuração <i>Vertical Complacente</i> .	<b>19</b>
<b>FIGURA 2.13</b>	<i>Riser</i> do tipo Rígido.	<b>19</b>
<b>FIGURA 2.14</b>	<i>Riser</i> do tipo Híbrido.	<b>20</b>
<b>FIGURA 2.15</b>	(a) Modelo de canal de onda; (b) Perfil de onda ( $t = 10$ s, $k = 1$ ).	<b>22</b>
<b>FIGURA 2.16</b>	Distribuição de óleo-água-gás (a) $t = 80$ s, $u = 0,1$ m/s, $P = 100800$ Pa; (b) $t = 1400$ s; $u = 0,1$ m/s; $P = 100800$ Pa; (c) $t = 38$ s, $u = 0,1$ m/s, $P = 102000$ Pa; (d) $t = 56$ s, $u = 0,1$ m/s, $P = 101000$ Pa.	<b>22</b>
<b>FIGURA 2.17</b>	Distribuição de óleo-água-gás para ( $t = 10, 20, 24$ e $30$ ) s; $u = 0,1$ m/s, $k = 1$ , $P = 104000$ Pa.	<b>22</b>
<b>FIGURA 2.18</b>	(a) Modelo de canal de onda (b) perfil de onda.	<b>23</b>
<b>FIGURA 2.19</b>	a) Distribuição de óleo-água-ar no tempo de $20$ s, (b) Distribuição de óleo-água-ar no tempo de $10$ s.	<b>24</b>

<b>FIGURA 2.20</b>	(a) domínio computacional e condições de contorno e (b) malha numérica gerada no GAMBIT 2.3.	<b>25</b>
<b>FIGURA 2.21</b>	O processo de derramamento de óleo do oleoduto submarino para a superfície livre em diferentes taxas de vazamentode óleo: (a) $v_o = 1$ m/s, (b) $v_o = 3$ m/s e (c) $v_o = 5$ m/s.	<b>26</b>
<b>FIGURA 2.22</b>	O processo de derramamento de óleo do oleoduto submarino para a superfície livre a diferentes velocidadesde água: (a) $v_{wmax} = 0,04$ m/s, (b) $v_{wmax} = 0,07$ m/s e (c) $v_{wmax} = 0,1$ m/s.	<b>26</b>
<b>FIGURA 2.23</b>	O esboço do derramamento de óleo do oleoduto submarino	<b>27</b>
<b>FIGURA 2.24</b>	Malha computacional para o modelo de turbulência de derramamento de óleo.	<b>27</b>
<b>FIGURA 2.25</b>	Contornos da fração de volume de óleo derramado em tempos diferentes, após o derramamento de óleo.	<b>28</b>
<b>FIGURA 2.26</b>	No instante (50, 60, 120) s o óleo transbordado aumenta e o lado inferior do vórtice é aprimorado.	<b>29</b>
<b>FIGURA 2.27</b>	Detalhe das vistas lateral e frontal da malha numérica não-estruturada gerada.	<b>30</b>
<b>FIGURA 2.28</b>	Campo de fração volumétrica de óleo sobre o plano XY ( $Z = 0$ ) com detalhe para a região próxima de formação da pluma de óleo	<b>31</b>
<b>FIGURA 2.29</b>	Isosuperfície de fração volumétrica de óleo com destaque para a aderência de óleo na parede externa da catenária	<b>31</b>
<b>FIGURA 2.30</b>	Domínio físico de um vazamento de óleo no mar a partir de duto horizontal submerso.	<b>32</b>
<b>FIGURA 2.31</b>	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) parte da tubulação horizontal e da correnteza marítima.	<b>33</b>
<b>FIGURA 2.32</b>	Distribuição da fração volumétrica do óleo para diferentes pressões na saída do tubo.	<b>34</b>
<b>FIGURA 2.33</b>	Distribuição do tamanho das gotas de óleo.	<b>35</b>

<b>FIGURA 2.34</b>	Esquema da montagem experimental: (a) arranjo experimental no canal de água; (b) câmera de alta velocidade em um lado do canal (vista superior).	<b>36</b>
<b>FIGURA 2.35</b>	Processo de flutuação de dispersão subaquática: (a) propagação subaquática (padrão de cadeia linear); (b) padrão de transporte da pluma de óleo; (c) modelo padrão de pluma de óleo.	<b>37</b>
<b>FIGURA 2.36</b>	Diagrama esquemático do tanque de água experimental.	<b>38</b>
<b>FIGURA 2.37</b>	Imagens de óleo descarregado na água a partir de um bico de 1,95 mm com diferentes velocidades de vazamento.	<b>39</b>
<b>FIGURA 2.38</b>	Esboço do processo de derramamento de óleo subaquático.	<b>40</b>
<b>FIGURA 2.39</b>	Ilustração do arranjo de liberação usado neste estudo com opções para injeção de dispersante pela ferramenta de inserção simulada.	<b>41</b>
<b>FIGURA 2.40</b>	Trajetória do óleo na água analisada pelos autores	<b>42</b>
<b>FIGURA 2.41</b>	Esquema do domínio computacional e condições de contorno.	<b>44</b>
<b>FIGURA 2.42</b>	Comparação da altura crescente de gotículas de óleo e dispersão subaquática em diferentes pressões de vazamento entre os resultados experimentais e resultados para fração volumétrica de óleo em diferentes densidades.	<b>44</b>
<b>FIGURA 2.43</b>	A altura crescente e a dispersão subaquática de gotículas de óleo durante o processo de flutuação em diferentes vazões sob a ação combinada de onda e corrente.	<b>45</b>
<b>FIGURA 2.44</b>	A distância de migração horizontal e deriva de superfície de gotículas de óleo durante o processo de deriva em diferentes viscosidades de óleo sob a ação combinada de onda e corrente.	<b>45</b>
<b>FIGURA 2.45</b>	Geometria do domínio de simulação.	<b>46</b>
<b>FIGURA 2.46</b>	Contornos da fração volumétrica de óleo sob condições experimentais e de simulação (os contornos são apresentados na fração de volume de óleo).	<b>47</b>

<b>FIGURA 2.47</b>	Características de espalhamento subaquático do óleo derramado sob diferentes direções de vazamento ( $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ , $v_o = 5 \text{ m/s}$ , $u_{c\text{máx}} = 0,5 \text{ m/s}$ , $L = 40 \text{ m}$ , $u_{\text{wind}} = 0 \text{ m/s}$ , contornos estão presentes na fracção volumétrica da água).	<b>48</b>
<b>FIGURA 2.48</b>	Processo de deriva de óleo derramado com tempo de vazamento sob diferentes taxas de vazamento (vazamento a jusante = $850 \text{ kg/m}^3$ , $u_{c\text{ máx}} = 0,1 \text{ m / s}$ , $L = 40 \text{ m}$ , $u_{\text{wind}} = 0 \text{ m / s}$ , contornos são apresentados na fração de volume de óleo).	<b>48</b>
<b>FIGURA 3.1</b>	Mapa dos campos do Pré-sal da Bacia de Santos no Norte <i>offshore</i> do Brasil.	<b>50</b>
<b>FIGURA 3.2</b>	Estrutura de instalação <i>offshore</i> em <i>Riser Lazy-Wave</i> analisada no presente trabalho.	<b>51</b>
<b>FIGURA 3.3</b>	Domínio físico analisado nesta pesquisa.	<b>52</b>
<b>FIGURA 3.4</b>	(a) malha numérica representando o domínio mar e a seção transversal do <i>riser</i> analisado no presente trabalho; (b) detalhes da malha na região do <i>riser</i> ; (c) região de vazamento.	<b>54</b>
<b>FIGURA 3.5</b>	Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 5 s e velocidade de deslocamento de 0,1 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) <i>riser</i> em corte transversal.	<b>55</b>
<b>FIGURA 3.6</b>	Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 10.3 s e velocidade de deslocamento de 0,1 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) <i>riser</i> em corte transversal.	<b>56</b>
<b>FIGURA 3.7</b>	Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 31.3 s e velocidade de deslocamento de 0,1 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) <i>riser</i> em corte transversal.	<b>57</b>
<b>FIGURA 3.8</b>	Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 59.5 s e velocidade de deslocamento de 0,1 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) <i>riser</i> em corte transversal.	<b>58</b>
<b>FIGURA 3.9</b>	Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 5 s e velocidade de deslocamento de 0,2 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) <i>riser</i> em corte transversal.	<b>59</b>
<b>FIGURA 3.10</b>	Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 10.3 s e velocidade de deslocamento de 0,2 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) <i>riser</i> em corte transversal.	<b>60</b>

<b>FIGURA 3.11</b>	Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 31.3 s e velocidade de deslocamento de 0,2 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) <i>riser</i> em corte transversal.	<b>61</b>
<b>FIGURA 3.12</b>	Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 59.5 s e velocidade de deslocamento de 0,1 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) <i>riser</i> em corte transversal.	<b>62</b>
<b>FIGURA 3.13</b>	Condições de contorno para o domínio físico analisado na pesquisa.	<b>68</b>
<b>FIGURA 4.1</b>	Linhas de posição das alturas analisadas para cada variável adotada no presente trabalho, ( <i>h</i> ) altura e ( <i>t</i> ) tempo.	<b>91</b>
<b>FIGURA 4.2</b>	Linhas de posição de comprimentos analisados para cada variável adotada no presente trabalho, ( <i>L</i> ) Distância percorrida e ( <i>t</i> ) tempo.	<b>92</b>
<b>FIGURA 4.3</b>	Análise de dependência de malha.	<b>93</b>
<b>FIGURA 4.4</b>	Validação do modelo matemático para pressão de 9900 Pa.	<b>94</b>
<b>FIGURA 4.5</b>	Validação do modelo matemático para pressão de 8800 Pa.	<b>95</b>
<b>FIGURA 4.6</b>	Validação do modelo matemático para pressão de 7500 Pa.	<b>95</b>
<b>FIGURA 4.7</b>	Velocidade Superficial da água para velocidade de correnteza de 0,05 m/s em um tempo de 30 s, $Fr_0 = 0,0021$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>97</b>
<b>FIGURA 4.8</b>	Velocidade Superficial da água para velocidade de correnteza de 0,35 m/s em um tempo de 30 s, $Fr_0 = 0,014$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>98</b>
<b>FIGURA 4.9</b>	Velocidade Superficial da água para velocidade de correnteza de 0,5 m/s, para um tempo de 30 s, $Fr_0 = 0,021$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>99</b>
<b>FIGURA 4.10</b>	Campo de fração volumétrica para as condições padrão (0,1 m/s de velocidade de correnteza, $Fr_0 = 0,0041$ ) em diferentes tempos de simulação: (a) estático (b) dinâmico.	<b>100</b>
<b>FIGURA 4.11</b>	Campo de pressão sobre o plano YZ sob condições padrão (0,1 m/s de velocidade de correnteza, $Fr_0 = 0,0041$ ) <i>riser</i> estático: (a) seção transversal do <i>riser</i> (b) região próxima ao orifício de vazamento.	<b>102</b>
<b>FIGURA 4.12</b>	Campo de pressão sobre o plano YZ sob condições padrão (0,1 m/s de velocidade de correnteza, $Fr_0 = 0,0041$ ) <i>riser</i>	<b>103</b>

	em movimento: (a) seção transversal do <i>riser</i> (b) região próxima ao orifício de vazamento.	
<b>FIGURA 4.13</b>	Velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ : (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>108</b>
<b>FIGURA 4.14</b>	Campo vetorial da fração volumétrica da água sob condições padrão de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ , com detalhe próximo a parede do <i>riser</i> e do orifício de vazamento; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>109</b>
<b>FIGURA 4.15</b>	Campo de fração volumétrica da água no plano YZ sob condições padrão de velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ : (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>110</b>
<b>FIGURA 4.16</b>	Velocidade de correnteza de 0,2 m/s, $Fr_0 = 0,0082$ : (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>111</b>
<b>FIGURA 4.17</b>	Velocidade de correnteza de 0,3 m/s, $Fr_0 = 0,012$ : (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>112</b>
<b>FIGURA 4.18</b>	Campo vetorial da fração volumétrica da água sob velocidade de correnteza de 0,3 m/s, $Fr_0 = 0,012$ , <i>riser</i> estático; (a) detalhe próximo a parede do <i>riser</i> (b) orifício de vazamento.	<b>113</b>
<b>FIGURA 4.19</b>	Campo vetorial da fração volumétrica da água sob velocidade de correnteza de 0,3 m/s, $Fr_0 = 0,012$ , para o <i>riser</i> em movimento; (a) detalhe próximo a parede do <i>riser</i> (b) orifício de vazamento.	<b>114</b>
<b>FIGURA 4.20</b>	Campo de fração volumétrica da água no plano YZ sob condições de velocidade de correnteza de 0,3 m/s, $Fr_0 = 0,012$ : (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>115</b>
<b>FIGURA 4.21</b>	Velocidade de correnteza de 0,4 m/s, $Fr_0 = 0,016$ : (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>116</b>
<b>FIGURA 4.22</b>	Velocidade de correnteza de 0,5 m/s, $Fr_0 = 0,021$ : (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>117</b>
<b>FIGURA 4.23</b>	Campo vetorial da fração volumétrica da água para velocidade de correnteza de 0,5 m/s, $Fr_0 = 0,021$ , <i>riser</i> estático; (a) detalhe próximo a parede do <i>riser</i> (b) orifício de vazamento.	<b>118</b>
<b>FIGURA 4.24</b>	Campo vetorial da fração volumétrica da água sob velocidade de correnteza de 0,5 m/s, $Fr_0 = 0,021$ , <i>riser</i> movimento; (a) detalhe próximo a parede do <i>riser</i> (b) orifício de vazamento.	<b>119</b>
<b>FIGURA 4.25</b>	Campo de fração volumétrica da água no plano YZ sob velocidade de correnteza de 0,5 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ (a) <i>riser</i>	<b>120</b>

	estático (b) <i>riser</i> em movimento.	
<b>FIGURA 4.26</b>	Efeito da movimentação do <i>riser</i> na altura da quebra do jato de óleo para uma velocidade de vazamento de óleo de 3 m/s e velocidade de correnteza e deslocamento do <i>riser</i> sendo: (a) 0,1 m/s (b) 0,3 m/s (c) 0,5 m/s.	<b>122</b>
<b>FIGURA 4.27</b>	Comportamento do óleo vazado na parede do <i>riser</i> de acordo com a movimentação do <i>riser</i> de 0,2 m/s ( $Fr_0 = 0,0082$ ) no sentido a jusante do escoamento.	<b>123</b>
<b>FIGURA 4.28</b>	Comportamento do óleo vazado na parede do <i>riser</i> de acordo com a movimentação do <i>riser</i> de 0,2 m/s ( $Fr_0 = 0,0082$ ) no sentido a montante do escoamento.	<b>124</b>
<b>FIGURA 4.29</b>	Efeito da velocidade da correnteza na altura da pluma de óleo - <i>riser</i> estático.	<b>126</b>
<b>FIGURA 4.30</b>	Efeito da velocidade da correnteza na distância percorrida da pluma de óleo - <i>riser</i> estático.	<b>126</b>
<b>FIGURA 4.31</b>	Efeito da velocidade da correnteza na altura da pluma de óleo - <i>riser</i> em movimento.	<b>127</b>
<b>FIGURA 4.32</b>	Efeito da velocidade da correnteza na distância percorrida da pluma de óleo - <i>riser</i> em movimento.	<b>128</b>
<b>FIGURA 4.33</b>	Efeito da velocidade da correnteza para o <i>riser</i> estático e dinâmico - altura.	<b>129</b>
<b>FIGURA 4.34</b>	Efeito da velocidade da correnteza para o <i>riser</i> estático e dinâmico distância percorrida.	<b>130</b>
<b>FIGURA 4.35</b>	Distância percorrida em função da velocidade de correnteza - Estático.	<b>131</b>
<b>FIGURA 4.36</b>	Efeito da densidade do óleo de 900 kg/m <sup>3</sup> para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático, (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>136</b>
<b>FIGURA 4.37</b>	Efeito da densidade do óleo de 870 kg/m <sup>3</sup> para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático, (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>135</b>
<b>FIGURA 4.38</b>	Efeito da densidade do óleo para o <i>Riser</i> Dinâmico e Estático, Distância percorrida.	<b>135</b>
<b>FIGURA 4.39</b>	Efeito da densidade do óleo de 930 kg/m <sup>3</sup> para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático, (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>137</b>
<b>FIGURA 4.40</b>	Efeito da densidade do óleo de 960 kg/m <sup>3</sup> para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i>	<b>138</b>

	estático, (b) <i>riser</i> em movimento.	
<b>FIGURA 4.41</b>	Efeito da densidade do óleo de $990 \text{ kg/m}^3$ para uma velocidade de correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ , $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático, (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>139</b>
<b>FIGURA 4.42</b>	Efeito da movimentação do <i>riser</i> na altura da quebra do jato de óleo para uma velocidade de vazamento de $3 \text{ m/s}$ e velocidade de correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ : (a) $870 \text{ kg/m}^3$ (b) $930 \text{ kg/m}^3$ (c) $990 \text{ kg/m}^3$ .	<b>141</b>
<b>FIGURA 4.43</b>	Efeito da densidade do óleo para o <i>riser</i> estático - altura da pluma de óleo (velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ ).	<b>142</b>
<b>FIGURA 4.44</b>	Efeito da densidade do óleo para o <i>riser</i> estático - distância percorrida pela pluma de óleo; (velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ ).	<b>143</b>
<b>FIGURA 4.45</b>	Efeito da densidade do óleo para o <i>riser</i> dinâmico - altura da pluma de óleo; (velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ ).	<b>144</b>
<b>FIGURA 4.46</b>	Efeito da densidade do óleo para o <i>riser</i> dinâmico - distância percorrida pela pluma de óleo (velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ ).	<b>145</b>
<b>FIGURA 4.47</b>	Efeito da densidade do óleo para o <i>Riser</i> Dinâmico e Estático altura; (velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ ).	<b>146</b>
<b>FIGURA 4.48</b>	Efeito da densidade do óleo para o <i>Riser</i> Dinâmico e Estático, Distância percorrida; (velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ ).	<b>147</b>
<b>FIGURA 4.49</b>	Efeito da distância percorrida em função da densidade do óleo - estático; (velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ ).	<b>148</b>
<b>FIGURA 4.50</b>	Distância percorrida em função da densidade do óleo - dinâmico; (velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ ).	<b>149</b>
<b>FIGURA 4.51</b>	Efeito da densidade água de $1000 \text{ kg/m}^3$ , para uma velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ , $Fr_0 = 0,0041$ : (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>151</b>
<b>FIGURA 4.52</b>	Efeito da densidade água de $1025 \text{ kg/m}^3$ , para uma velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ , $Fr_0 = 0,0041$ : (a) <i>riser</i> estático, (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>152</b>
<b>FIGURA 4.53</b>	Efeito da densidade água de $1030 \text{ kg/m}^3$ , para uma velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ , $Fr_0 = 0,0041$ : (a) <i>riser</i> estático, (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>153</b>
<b>FIGURA 4.54</b>	Efeito da densidade da água do mar para o <i>Riser</i> Estático - para uma velocidade da correnteza de $0,1 \text{ m/s}$ ; altura da pluma de óleo.	<b>154</b>

<b>FIGURA 4.55</b>	Efeito da Densidade da água do mar para o <i>riser</i> estático e distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>155</b>
<b>FIGURA 4.56</b>	Efeito da densidade da água do mar para o <i>riser</i> dinâmico - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>156</b>
<b>FIGURA 4.57</b>	Efeito da densidade da água do mar para o <i>riser</i> dinâmico - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>157</b>
<b>FIGURA 4.58</b>	Efeito da densidade da água para o <i>Riser</i> Dinâmico e Estático - Altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>159</b>
<b>FIGURA 4.59</b>	Efeito da densidade da água para o <i>Riser</i> Dinâmico e Estático na distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>159</b>
<b>FIGURA 4.60</b>	Efeito da distância percorrida em função da densidade da água para os casos estáticos; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>160</b>
<b>FIGURA 4.61</b>	Distância percorrida em função da densidade da água para os casos dinâmicos; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>161</b>
<b>FIGURA 4.62</b>	Efeito da viscosidade do óleo de 0,1 Pa.s para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>164</b>
<b>FIGURA 4.63</b>	Efeito da viscosidade do óleo de 0,5 Pa.s para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>165</b>
<b>FIGURA 4.64</b>	Efeito da viscosidade do óleo de 1,0 Pa.s para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>166</b>
<b>FIGURA 4.65</b>	Efeito da viscosidade do óleo de 1,5 Pa.s para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s; $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>167</b>
<b>FIGURA 4.66</b>	Efeito da viscosidade do óleo de 2,0 Pa.s para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s; $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>168</b>
<b>FIGURA 4.67</b>	Efeito da viscosidade do óleo para o <i>riser</i> estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>169</b>

<b>FIGURA 4.68</b>	Efeito da viscosidade do óleo para o <i>riser</i> estático - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>170</b>
<b>FIGURA 4.69</b>	Efeito da viscosidade do óleo para o <i>riser</i> dinâmico - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>171</b>
<b>FIGURA 4.70</b>	Efeito da viscosidade do óleo para o <i>Riser</i> Dinâmico - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>172</b>
<b>FIGURA 4.71</b>	Efeito da viscosidade do óleo para o <i>riser</i> dinâmico e estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>173</b>
<b>FIGURA 4.72</b>	Efeito da densidade da água para o <i>riser</i> dinâmico e estático - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>174</b>
<b>FIGURA 4.73</b>	Efeito da distância percorrida em função da viscosidade do óleo, para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>175</b>
<b>FIGURA 4.74</b>	Distância percorrida em função da viscosidade do óleo - dinâmico; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>176</b>
<b>FIGURA 4.75</b>	Efeito da velocidade de vazamento de óleo de 1 m/s em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>179</b>
<b>FIGURA 4.76</b>	Efeito da velocidade de vazamento de óleo de 2 m/s em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>180</b>
<b>FIGURA 4.77</b>	Efeito da velocidade de vazamento de óleo de 3 m/s em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>181</b>
<b>FIGURA 4.78</b>	Efeito da velocidade de vazamento de óleo de 4 m/s em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>182</b>
<b>FIGURA 4.79</b>	Efeito da velocidade de vazamento de óleo de 5 m/s em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>183</b>
<b>FIGURA 4.80</b>	Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o <i>riser</i> estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>184</b>

<b>FIGURA 4.81</b>	Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o <i>riser</i> estático - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>185</b>
<b>FIGURA 4.82</b>	Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o <i>riser</i> dinâmico - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>186</b>
<b>FIGURA 4.83</b>	Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o <i>riser</i> dinâmico - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>187</b>
<b>FIGURA 4.84</b>	Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o <i>riser</i> dinâmico e estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>188</b>
<b>FIGURA 4.85</b>	Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o <i>riser</i> dinâmico e estático - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>189</b>
<b>FIGURA 4.86</b>	Efeito da distância percorrida em função da velocidade de vazamento casos estáticos; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>190</b>
<b>FIGURA 4.87</b>	Efeito da distância percorrida em função da velocidade de vazamento - casos dinâmicos; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>191</b>
<b>FIGURA 4.88</b>	Efeito do diâmetro de vazamento de óleo de 4 mm para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>194</b>
<b>FIGURA 4.89</b>	Efeito do diâmetro de vazamento de óleo de 8 mm para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>195</b>
<b>FIGURA 4.90</b>	Efeito do diâmetro de vazamento de óleo de 12 mm para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>196</b>
<b>FIGURA 4.91</b>	Efeito do diâmetro de vazamento de óleo de 16 mm para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>197</b>
<b>FIGURA 4.92</b>	Efeito do diâmetro de vazamento de óleo de 20 mm para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s, $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) <i>riser</i> estático (b) <i>riser</i> em movimento.	<b>198</b>
<b>FIGURA 4.93</b>	Efeito da movimentação do <i>riser</i> na altura da quebra do jato de óleo para uma velocidade de vazamento de 3 m/s e velocidade de correnteza de 0,1 m/s: (a) 4 mm (b) 12 mm (c) 20 mm	<b>200</b>

<b>FIGURA 4.94</b>	Efeito do diâmetro do vazamento para o <i>riser</i> estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>201</b>
<b>FIGURA 4.95</b>	Efeito do diâmetro do vazamento para o <i>riser</i> estático - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>202</b>
<b>FIGURA 4.96</b>	Efeito do diâmetro do vazamento para o <i>riser</i> dinâmico - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>203</b>
<b>FIGURA 4.97</b>	Efeito do diâmetro do vazamento para o <i>riser</i> dinâmico - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>204</b>
<b>FIGURA 4.98</b>	Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o <i>riser</i> dinâmico e estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>205</b>
<b>FIGURA 4.99</b>	Efeito da taxa de vazamento do óleo para o <i>riser</i> dinâmico e estático distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>206</b>
<b>FIGURA 4.100</b>	Efeito da distância percorrida em função do diâmetro do furo - casos estáticos, para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>207</b>
<b>FIGURA 4.101</b>	Efeito da distância percorrida em função do diâmetro do furo - casos dinâmicos; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s.	<b>208</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 3.1</b>	Fração de volumes das células	<b>64</b>
<b>TABELA 3.2</b>	Condições de Contorno para o Domínio Físico analisado.	<b>69</b>
<b>TABELA 3.3</b>	Critérios e modelos numéricos.	<b>70</b>
<b>TABELA 3.4</b>	Fatores Sub-Relaxamento.	<b>71</b>
<b>TABELA 3.5</b>	Valores iniciais da solução.	<b>71</b>
<b>TABELA 3.6</b>	Constantes do modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão (2 equações).	<b>70</b>
<b>TABELA 3.7</b>	Parâmetros de relaxamento do nó Laplace.	<b>74</b>
<b>TABELA 3.8</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se a velocidade da correnteza para a condição de <i>riser</i> estático.	<b>76</b>
<b>TABELA 3.9</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se a velocidade da correnteza para a condição de <i>riser</i> em movimento.	<b>77</b>
<b>TABELA 3.10</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se a densidade do óleo para a condição de <i>riser</i> estático.	<b>78</b>
<b>TABELA 3.11</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se a densidade do óleo para a condição de <i>riser</i> em movimento.	<b>79</b>
<b>TABELA 3.12</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se a densidade da água para a condição de <i>riser</i> estático.	<b>80</b>
<b>TABELA 3.13</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se a densidade da água para a condição de <i>riser</i> em movimento.	<b>81</b>
<b>TABELA 3.14</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se a viscosidade do óleo para a condição de <i>riser</i> estático.	<b>82</b>
<b>TABELA 3.15</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se a viscosidade do óleo para a condição de <i>riser</i> em movimento.	<b>83</b>
<b>TABELA 3.16</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se a velocidade de vazamento do óleo para a condição de <i>riser</i> estático.	<b>84</b>
<b>TABELA 3.17</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se a velocidade de vazamento do óleo para a condição de <i>riser</i> em movimento.	<b>85</b>
<b>TABELA 3.18</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se o diâmetro do furo para a condição de <i>riser</i> estático.	<b>86</b>

<b>TABELA 3.19</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se o diâmetro do furo para a condição de <i>riser</i> em movimento.	<b>87</b>
<b>TABELA 3.20</b>	Validação do Modelo Matemático.	<b>88</b>
<b>TABELA 3.21</b>	Efeito do comportamento da pluma variando-se o diâmetro do furo para a condição de <i>riser</i> em movimento.	<b>88</b>
<b>TABELA 3.22</b>	Validação do Modelo Matemático.	<b>89</b>
<b>TABELA 4.1</b>	Parâmetros e propriedades dos fluidos para o estudo de dependência de malha.	<b>90</b>
<b>TABELA 4.2</b>	Dependência de Malha considerando o <i>riser</i> sob efeito estático.	<b>90</b>

## NOMENCLATURA

$A_{\alpha\beta}$	Área superficial por unidade de volume	[m <sup>-1</sup> ]
$C^{(d)}_{ab}$	Coefficiente de arraste interfacial	[-]
$C_D$	Coefficiente de arraste	[-]
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	[-]
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	[-]
$C_{\mu}$	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	[-]
$C_{TD}$	Coefficiente de dispersão turbulenta	[-]
$D$	Diâmetro da região de vazamento	[m]
$d_{\beta}$	Diâmetro médio da fase dispersa	[m]
$E$	Erro relativo	[-]
$F$	Fator de atrito de Moody	[-]
$f_{\beta}$	Fração volumétrica da fase $\beta$ na mistura	[-]
$f_{\beta,max}$	Fração volumétrica máxima de empacotamento	[-]
$l_e$	Comprimento de escala	[m]
$l_m$	Comprimento de mistura	[m]
$M_{\alpha}$	Soma das forças interfaciais	[N.m <sup>-2</sup> ]
$n_w$	Vetor normal à parede	[-]
$Re$	Número de Reynolds	[-]
$Re_m$	Número de Reynolds modificado	[-]
$S_{M\alpha}$	Termo fonte de momento	[N]
$U$	Velocidade de escoamento do fluido	[m.s <sup>-1</sup> ]
$U_{\alpha}$	Velocidade da corrente de fluido da fase contínua <i>alfa</i>	[m.s <sup>-1</sup> ]
$U_{\alpha}$	Vetor velocidade da fase contínua <i>alfa</i>	[m.s <sup>-1</sup> ]
$U_{\beta}$	Velocidade da corrente de fluido da fase dispersa <i>beta</i>	[m.s <sup>-1</sup> ]
$U_r = (U_{\alpha} - U_{\beta})$	Velocidade relativa entre as fases $\alpha$ e $\beta$	[m.s <sup>-1</sup> ]
$ U_{\alpha} - U_{\beta} $	Velocidade de deslizamento entre as fases $\beta$ (dispersa) e $\alpha$ (contínua) na direção da fase $\alpha$ .	[m.s <sup>-1</sup> ]

$V_{ana}$	Valor analítico	[-] <b>Letras</b>
$V_{num}$	Valor numérico	[-] <b>Latina</b>
$y_w$	Distância próxima à parede	[m] <b>s</b>

### **Letras Gregas**

$E$	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa	[m <sup>3</sup> .s <sup>-3</sup> ]
$\kappa$	Energia cinética turbulenta	[m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ]
$\kappa_\alpha$	Energia cinética da fase contínua	[m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ]
$\mu_\alpha$	Viscosidade da fase $\alpha$	[Pa.s]
$\mu_m$	Viscosidade da mistura	[Pa.s]
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta	[Pa.s]
$\mu_{t,c}$	Viscosidade turbulenta da fase contínua	[Pa.s]
$\mu_{t,d}$	Viscosidade turbulenta da fase dispersa	[Pa.s]
$\rho$	Massa específica do fluido	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_\alpha$	Massa específica da fase $\alpha$	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\Sigma$	Número de Prandtl turbulento	[-]
$\sigma_\varepsilon$	Constante do modelo de turbulência k- $\varepsilon$	[-]
$\sigma_k$	Constante do modelo de turbulência k- $\varepsilon$	[-]

### **Letras Especiais**

$\nabla$	Operador nabla	[-]
$\frac{\partial}{\partial t}$	Derivada parcial com relação ao tempo	[s <sup>-1</sup> ]

## LISTA DE SIGLAS

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

API - American Petroleum Institute

CCT - Centro de Ciências e Tecnologias

DWH - Deepwater Horizon

CFD - Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

LCTF - Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos

LPFI - Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem

PETROBRAS S.A. - Petróleo Brasileiro S.A.

MD - Ministério da Defesa

REMO - Rede De Modelagem e Observação Oceanográfica

UAEM - Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica

UAEQ - Unidade Acadêmica de Engenharia Química

UFMG - Universidade Federal de Campina Grande

UDF - User Defined Function

TDP - Ponto de Contato com o Solo (Touch Dow Point)

TLP - Tension Leg Platform

VOF - Volume Of Fluid

# Capítulo 1

## 1 INTRODUÇÃO

---

Inúmeros estudos têm se aperfeiçoado cada vez mais para entender e quantificar a magnitude de derramamento de óleo na superfície do mar. Diante disto, modelos de fuga de óleo e técnicas de simulação numérica foram desenvolvidos para prever as trajetórias de petróleo vazado, considerando que, atividades relacionadas à perfuração e produção de petróleo em alto mar e o transporte de óleo através de *risers* e oleodutos submersos aumentam o potencial de vazamento de óleo no oceano (ZHU et al., 2017a; ZHU et al., 2017b; SUN et al., 2019; MOREIRA et al., 2020).

No entanto, informações são empregadas de maneira que as agências de segurança marítima sejam capacitadas para lidar com situações de acidentes de derramamento de óleo, por exemplo, a instalação de barreiras de contenção/superfície de óleo. Porém, diante do vazamento de óleo a partir de *risers* e oleodutos submersos, uma estimativa precisa e eficaz da dispersão subaquática do óleo derramado é fundamental para que operadores possam identificar pontos de instalação de equipamentos de retenção de petróleo no mar de uma maneira rápida e eficaz, já que essas barreiras são de superfície e, dependendo da profundidade em que o vazamento ocorra, a dispersão do óleo pode se dá em uma área enorme da superfície.

Segundo Bouças (2017), diversos tipos de falhas podem causar à perda de material. Porém, para garantir a integridade do equipamento, por exemplo, *risers* submersos, torna-se necessário realizar intervenções de manutenção que conservem as tubulações em situações seguras durante todo o tempo de vida útil dos *risers* e a implementação de elementos de barreiras de contenção/superfície. Para garantir uma margem de segurança maior é exigido que haja sempre, ao menos, dois conjuntos de barreiras (primária e secundária) que funcionem de forma independente.

Um entendimento aprofundado do processo de flutuação de óleo através da coluna de água pode ajudar os operadores a determinar como rastrear o óleo lançado na correnteza e como extraí-lo assim que atinja a superfície do mar (YAPA et al., 2010; ZHU, et al., 2017a). Grandes são os processos de produção e exploração de petróleo *offshore*, aumentando o risco de grandes liberações de óleo no oceano (ELIJAH et al., 2014). É possível que alguns derramamentos de petróleo ocorram de forma intencional, já outros acidentes ocorrem devido a colisões de navios de petróleo bruto, poço de petróleo submerso fora do controle ou por falhas nas tubulações submarinas ou em *risers*. Segundo Zhu et al. (2017a) nos últimos anos, grandes vazamentos de óleo no mar ocorrem de maneira irregular.

O vazamento de óleo da sonda semissubmersível Deepwater Horizon, pertencente à Transocean e operada pela British Petroleum (BP), no Golfo do México em 2010 (Costa da Louisiana, EUA), é tido como o maior acidente marinho registrado, pois durou três meses, quando cerca de 205,8 milhões de galões de petróleo foram liberados. Esse vazamento de óleo causou grandes danos ao ecossistema marinho e aos habitantes, bem como ao abastecimento de água, resultando num grande acidente ecológico de magnitude semelhante ao ocorrido na plataforma de petróleo no Mar de Bohai (China), em 2011. No entanto, as principais dificuldades enfrentadas pela equipe marítima de resgate de emergência é a localização do óleo e quando o fluido derramado atinge a superfície do mar (CHEN et al., 2015; TAVARES, 2016; ZHU et al., 2017a).

Esses fatos conduzem, geralmente, a elevadas multas e indenizações impostas pelos órgãos ambientais de vários países além da contaminação ao meio ambiente e a saúde do ser vivo com a exposição de resíduos sólidos perigosos expostos ao ar livre (TAVARES, 2016; MOREIRA, et al., 2020). Tavares (2016) relata que, quando ocorre um vazamento, torna-se necessário uma resposta rápida e adequada para reduzir os danos ambientais. A implantação de barreiras de contenção é um dos exemplos de retenção de óleo que depende do crescimento da dispersão das partículas de óleo, da velocidade e da tendência de propagação. A autora relata que a compreensão do comportamento do óleo no ambiente marinho é um fator muito importante para prever a magnitude de um possível vazamento em águas profundas.

O petróleo produzido é escoado do poço produtor no oceano até a plataforma de produção através de *risers*. De acordo com o tipo de material de fabricação do *riser*, da quantidade de camadas, do tempo de vida útil, as condições ambientais, da densidade dos fluidos internos e

externos, da pressão do fluido interno, da corrosão, das cargas estáticas devido ao próprio peso dele, dos efeitos químicos da água do mar e outros componentes químicos que acompanham o petróleo durante todo o processo de produção, da fadiga e, até mesmo da montagem, instalação e operação dos *risers* podem gerar suas rupturas, causando vazamentos de óleo e gerando grandes prejuízos financeiros e ambientais no oceano. Com base nas informações expostas, nota-se o quanto é fundamental o estudo de vazamento de petróleo em *risers* submersos. Por meio de estudos e pesquisas pode-se obter soluções que venham agregar e multiplicar muitas conclusões que podem impedir grandes prejuízos financeiros e ambientais.

O vazamento de petróleo em alto mar é muito desafiador, tanto em termos financeiros como em termos ambientais, bem como na formação da deposição de parafinas durante o escoamento do fluido através do seu transporte. Constata-se que poucos são os trabalhos disponíveis na literatura que envolvem vazamentos de petróleo em alto mar, principalmente quando esse tipo de fuga de óleo surge a partir de *risers*. Geralmente, os estudos envolvendo *risers* tratam do escoamento multifásico interno e/ou da sua estrutura mecânica do *riser* ou dos tipos de configurações de *risers*. Quando se trata de simulação numérica via CFD, verificou-se apenas trabalhos abordando escoamento multifásico na presença de vazamento em dutos estáticos, não sendo constado nenhum trabalho via CFD com dutos em movimento, o que configura o estudo como de suma importância, em se tratando de vazamento de óleo no mar a partir de *risers*, por meio do efeito dinâmico e estático. Em estudos através de CFD pode-se analisar tanto o comportamento físico da dispersão de petróleo quanto à trajetória e o tempo de propagação que leva para se dispersar desde o ponto de vazão até a superfície, tornando-se um estudo muito importante para a comunidade científica e, principalmente, para as empresas de produção e exploração de petróleo *offshore* e para todos os setores e órgãos envolvidos na preservação do meio ambiente marinho.

De acordo com Lemos (2020), atualmente, a Petrobras tem utilizado *riser* do tipo *Lazy-Wave* ou em catenária livre (quando possível) no processo de produção e exploração *offshore*. Segundo o autor, a *Lazy-Wave* é uma das configurações de *risers* mais utilizadas pela Petrobras atualmente, mesmo sendo uma configuração de alto custo financeiro e de complexo processo de instalação. Diante disto, decidiu-se analisar a seção transversal de uma corcova alta de um *riser* de configuração *Lazy-Wave* para avaliar a dispersão do vazamento de óleo no mar.

## 1.2 Objetivo Geral

Estudar a dispersão do petróleo no mar, a partir do vazamento em *riser* submerso, sujeito a efeitos dinâmicos e estáticos.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo matemático baseado nas equações de conservação de massa e de quantidade de movimento linear capaz de prever o comportamento da dispersão do óleo no oceano decorrente de vazamento em *risers*;
- Estudar o efeito da movimentação horizontal de forma oscilatória do *riser* em diferentes condições de correnteza marítima e velocidade de vazamento de óleo no comportamento da pluma oriunda de vazamentos em *risers* submersos. A correnteza é modelada por ondas que apresentam perfil vertical, e, como não foi considerado o efeito de onda, não foi analisado o efeito da movimentação vertical da parede do *riser*;
- Avaliar a influência dos parâmetros como velocidade de correnteza marítima, da velocidade de vazamento, no comportamento da pluma de óleo oriunda de vazamentos em *risers* submersos;
- Analisar o efeito da pressão no orifício de vazamento bem como o diâmetro do vazamento;
- Avaliar o efeito da densidade do óleo e da água, bem como da viscosidade sob o comportamento físico do óleo lançado na correnteza marítima;
- Comparar os resultados numéricos de condição de pressão no vazamento em diferentes tempos de simulação com dados experimentais e/ou analíticos;
- A originalidade da Tese dar-se pela necessidade do estudo da dinâmica/movimentação em *risers* submersos na presença de vazamento, uma vez que, atualmente, é constatado apenas pesquisas que estudaram/estudam a dispersão do óleo a partir de vazamento em *risers* ou oleodutos sob efeitos estáticos, o que, torna cada vez mais distante do que é constatado na realidade pelas empresas de produção e exploração *offshore* no Brasil.

# Capítulo 2

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 Petróleo

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (2019), a formação do petróleo se dá pela caracterização do acúmulo de material orgânico em condições específicas de pressão e isolamento em camadas do subsolo de bacias sedimentares, ocorrendo diversas transformações. Nessas condições, para haver extração do petróleo, se faz necessário o manuseio de equipamentos adequados em camadas rochosas até a plataforma de produção. O petróleo pode apresentar composições químicas diferentes, o que pode ocasionar, através do seu refinamento, uma produção de diversos produtos químicos como gasolina, óleo, querosene, solventes, polímeros entre outros. A composição química do petróleo é formada por uma grande combinação de hidrocarbonetos, podendo conter também nitrogênio, oxigênio, compostos de enxofre e íons metálicos em pequena quantidade.

Segundo informações de comunicação da ANP, todo petróleo com densidade relativa superior a 0,92 dentro do intervalo de 1,00 (ou grau °API igual ou superior a 10 e inferior a 22) pode ser classificado como óleo pesado ou ultra pesado. Este tipo de petróleo contém uma grande combinação de hidrocarbonetos de alto peso molecular sendo na maioria das vezes compostos de mais de 15 átomos de carbono por molécula, possuindo grandes quantidades de resíduo de carbono como: asfaltenos, enxofre, nitrogênio, metais pesados, aromáticos e parafinas (THOMAS, 2001).

Na natureza, existem diversos tipos de óleos de diferentes valores de densidade e viscosidade. Esses parâmetros são de grande importância para o processo de produção e refino de petróleo e, com o uso de ferramentas (experimentais ou numéricas), pode-se determinar qual será o comportamento do fluido durante o processo de produção de óleo e no decorrer do escoamento dentro do reservatório, oleodutos ou *risers*.

A indústria do petróleo utiliza a expressão °API (*American Petroleum Institute*) para referenciar a densidade do óleo em relação à densidade da água, com objetivo de identificar de maneira mais prática e rápida seu peso (leve, médio, pesado ou ultra pesado), em que, quanto maior o grau °API, mais leve será o petróleo e maior será seu valor comercial. Tratando-se de exploração petrolífera, especificamente o Brasil, que é o maior explorador de petróleo em águas profundas, tem apresentado um grande avanço, principalmente em relação ao seu transporte considerando que mais de 70% do petróleo explorado e produzido no país é oriundo de poços localizados em plataformas *offshore* (MOTHÉ e SILVA, 2007; THOMAS, 2001).

## **2.2 Acidentes e Riscos Ambientais a Indústria do Petróleo no Brasil**

No Brasil, a indústria de petróleo e gás natural tem sofrido uma série de incidentes em que estão inclusos aspectos e impactos socioambientais, como o vazamento do oleoduto na Baía de Guanabara no ano de 2000 e o afundamento da plataforma P-36 em 2001, ambas pertencentes a Petrobras, mencionando também os incidentes no Campo de Frade em 2011 e 2012, sendo operadas pela Chevron (NASPOLINI, 2018).

Em 18 de janeiro de 2000, na Baía de Guanabara, ocorreu um vazamento de cerca de 1,3 milhões de litros de óleo combustível em decorrência de uma fratura no duto PE-II. Em 10 de março de 1997 já tinha ocorrido um acidente no mesmo duto provocando um derramamento de 3 milhões de litros de óleo combustível. O acidente ocorreu na parte subterrânea do duto que fica localizado na saída da área da Refinaria Duque de Caxias (REDUC) na orla da Baía de Guanabara. O impacto ambiental em decorrência do acidente gerou uma repercussão muito grande junto às autoridades ambientais do Brasil, sendo ampliadas pela mídia nacional devido às falhas na detecção e resposta ao acidente que levou muito tempo para ser realizada, sendo este o maior desastre ecológico na Baía de Guanabara (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, 2001).

A plataforma P-36 na Bacia de Campos (litoral do Rio de Janeiro) em 15 de março de 2001, sofreu um acidente decorrente de uma série de falhas em cascata, falhas de projeto, operacionais e de procedimentos de emergência quando a mesma se encontrava em operação no Campo de Roncador o que levou à morte de onze funcionários da Petrobras. As análises realizadas permitiram que fossem identificadas várias irregularidades de operação, manutenção e

projeto. Com o acidente da P-36, cerca de 1.200 m<sup>3</sup> de óleo diesel e 350 m<sup>3</sup> de petróleo bruto foram lançados ao mar a uma distância de aproximadamente 150 quilômetros da costa. O derramamento foi controlado pelo recolhimento de parte do petróleo, através da dispersão química e mecânica (ANP, 2001).

Em novembro de 2011, ocorreu um *blowout* no Campo de Frade na Bacia de Campos, no qual duas situações de vazamento de óleo estiveram relacionadas. Durante a investigação foram obtidas informações baseadas em fatos constatados e registros apreendidos na sede da Chevron Brasil. O acidente causou uma contaminação ao meio ambiente de cerca de 3.700 barris de petróleo cru lançados ao mar chegando a atingir uma distância de aproximadamente 1.200 quilômetros da costa do Rio de Janeiro (ANP, 2012).

### **2.3 Vazamento de Petróleo no Brasil em 2019**

No final do mês de agosto, de 2019, ocorreram os primeiros registros do maior desastre ambiental já registrado no litoral brasileiro nas regiões Nordeste e Sudeste, segundo o Ministério Público Federal. O vazamento de óleo cru em questão atingiu mais de 2 mil quilômetros do litoral das regiões Nordeste e Sudeste do Brasil. Segundo os noticiários, até o dia 23 de outubro de 2019 a contaminação havia atingido mais de 200 regiões de vários municípios dos nove estados da Região Nordeste (BBC Brasil, 2019).

Segundo a Marinha do Brasil, foi estimado que mais de mil toneladas de óleo haviam sido removidas das praias nordestinas até 2 de outubro de 2019. A Marinha brasileira notificou 30 navios-tanque de dez países diferentes que passaram pelo litoral brasileiro, solicitando-os a prestarem esclarecimentos, sendo sujeitos a Lei de Crimes Ambientais.

Segundo o Ministério da Defesa - MD, até 22 de outubro 2019, cerca de 5.500 militares da Marinha, do Exército e da Força Aérea atuavam na limpeza das praias do Nordeste brasileiro, além da ANP, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) e da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, sendo mencionados também vários voluntários.

Segundo um estudo da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a origem do vazamento poderia estar em um ponto a 700 km do litoral de Alagoas, Sergipe e da Paraíba. Para os pesquisadores, o óleo que atingiu o Nordeste é do tipo extrapesado, o mais prejudicial ao meio

ambiente. Esse tipo de contaminante tem mais frações tóxicas do que um óleo do tipo leve, cujos componentes poderiam ser vaporizados facilmente.

O governo brasileiro mencionou na investigação para o vazamento de petróleo como decorrente de naufrágio de navio petroleiro, falha na transferência de petróleo entre embarcações ou despejo criminoso. Caso o vazamento tenha ocorrido por ação criminosa, mesmo sendo estrangeiro, a multa chegaria até 50 milhões de reais, sem prejuízo de responder pelo crime ambiental com base na Lei 9.605/1988, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.

Em 8 de outubro de 2019, a Petrobras apresentou um relatório que apontou que a substância vazada era uma mistura de óleos da Venezuela, não ficando caracterizado que o país seria o responsável pelo desastre ambiental brasileiro. De acordo com dados apontados pela empresa, o óleo vazado se tratava de um tipo de óleo mais residual com densidade elevada, o que é característico de óleo venezuelano.

De acordo com um laudo do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia (UFBA), dois dias depois do ocorrido, também apontou que o material contaminante teve origem venezuelana, após a comparação do óleo coletado nas praias com uma amostra de um tipo de petróleo da Venezuela existente na instituição. De acordo com a Petrobras, em 25 de outubro 2019, ficou comprovado que o óleo encontrado em praias do Nordeste brasileiro, desde o final de agosto de 2019, era proveniente de três campos da Venezuela.

O Ibama realizou o monitoramento de imagens de satélite e não encontrou indícios da substância na superfície marinha, o que fez com que o órgão trabalhasse com a teoria de que o óleo que atingiu as praias brasileiras não teria vindo boiando pelo oceano, mas de maneira submersa. Então, de acordo com os especialistas, esse fenômeno ocorre porque se trata de um óleo denso que não se concentra na superfície do mar, o que faz com que se desloque à alta profundidade por meio do movimento da correnteza, sendo esse tipo de óleo mais prejudicial ao meio ambiente devido à sua decomposição lenta. A Figura 2.1a apresenta uma mancha de petróleo do tipo pesado que surgiu na superfície do mar, no litoral pernambucano, próximo da costa do município de São José da Coroa Grande/PE, em 17 de outubro de 2019. De acordo com análises de laboratório da Petrobrás e da Universidade Federal da Bahia, o óleo cru localizado nas praias brasileiras era do tipo ultra pesado, vide Figura 2.1b.

**Figura 2.1:** (a) mancha de óleo pesado no litoral do nordeste brasileiro;  
(b) óleo cru ultra-pesado



(a)



(b)

**Fonte:** Salve Maracáípe (2019).

Os restos dispersos e viscosos do petróleo na praia de Pituba, Salvador/BA, chegaram à região do Farol da Barra, um dos principais pontos turísticos da capital baiana, alcançando também as regiões de Ondina sendo atingidas no total 11 regiões do litoral, como pode ser observado na Figura 2.2 (EL PAIS, 2019).

**Figura 2.2:** Restos dispersos e viscosos de óleo na praia da Pituba, Salvador/BA



**Fonte:** <https://brasil.elpais.com/brasil/2019/10/17>, acesso em 11/12/2019.

De acordo com pesquisadores, as manchas grandes e sólidas de petróleo que apareceram em mais de 160 praias do nordeste brasileiro do Maranhão até a Bahia, demoraram várias semanas para se tornarem notícia nacional. Em Sergipe, o Estado mais afetado, a instalação de barreiras de contenção não deu resultado sendo suas estruturas levadas pela correnteza. Tanto o Ministério Público Federal do Brasil quanto o do Estado da Bahia entraram com uma ação pública contra a União e o Ibama devido os riscos ambientais causados.

#### **2.4 Risers**

Os *risers* são elementos de exploração de petróleo e podem ser definidos como tubulações submersas que ligam o poço, no solo marinho, com a unidade de produção, na superfície. Os tubos rígidos e flexíveis são tubulações que fazem o transporte de fluido. Cabos umbilicais e de potência também são tratados como *risers*, quando ligam equipamentos de controle de escoamento, junto ao poço, com a unidade de produção, na superfície. Os *risers* rígidos são constituídos por tubos de aço convencionais, já os tubos flexíveis são formados por camadas. Cada uma apresenta função operacional e estrutural diferente, o que possibilita o projeto e o desenvolvimento de estruturas que se adequem a cada situação (TAKAFUJI, 2010).

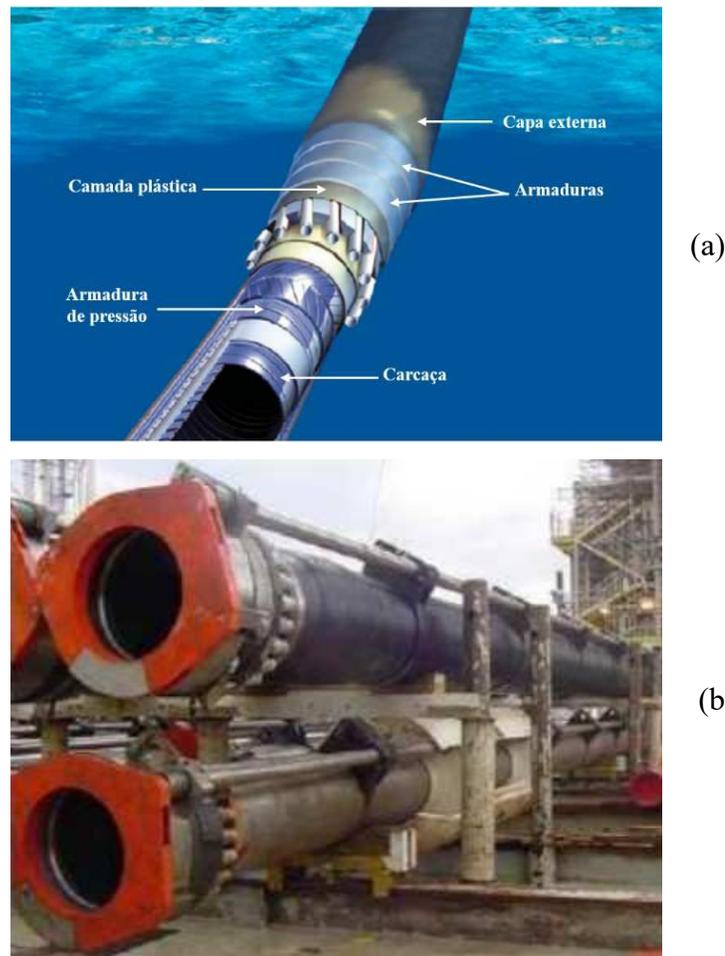
Segundo Technip (2008), um tubo do tipo flexível simples é formado de apenas quatro camadas, podendo chegar até 19 camadas ao se tratar de uma geometria mais complexa. A camada mais interna, no interior da qual o fluido escoar, é chamada de carcaça. Essas camadas são constituídas por fitas intertravadas de aço inoxidável, enrolados helicoidalmente em um passo de avanço pequeno, possuindo resistência a pressão externa, porém, exibindo baixa resistência aos esforços de tração e flexão. A camada que a recobre é de material polimérico, cuja função é prover estanqueidade, evitando que o fluido que escoar no interior da carcaça penetre no interior das camadas subjacentes. De acordo com o autor, em volta da camada plástica existe uma armadura de pressão, constituída de uma camada metálica intertravada, que tem a função de suportar pressões das camadas mais internas e, ao mesmo tempo, resistência a cargas radiais externas, também enroladas com pequeno passo de avanço. Envolvendo a armadura de pressão, existem duas camadas de tendões de aço definidas como armaduras tendo como função a resistência a tração.

Geralmente, existem duas camadas de armadura enroladas em sentidos contrário, que têm por finalidade equilibrar os esforços e evitar que o tubo gire ao ser tracionado. As armaduras em

formatos helicoidais têm como função prever flexibilidade à estrutura. Por fim, há uma capa externa feita de polietileno de alta densidade com objetivo de evitar que agentes externos entrem nas camadas internas além de manter a sua estrutura estabilizada, vide a Figura 2.3a. As outras camadas servem para prever o desgaste entre as camadas de aço prevenindo maior isolamento térmico, podendo ser utilizadas na estrutura de tubos flexíveis (TAKAFUJI, 2010).

Um tubo flexível típico de 8 polegadas pode ser dobrado com raio de até 2 m, o que não poderia ser feito com um tubo rígido. Tal característica permite uma maior facilidade no transporte e instalação desses tubos flexíveis, vide Figura 2.3a. A complexidade construtiva que caracteriza esse tipo de estrutura faz com que o tubo flexível tenha um custo financeiro mais elevado, quando comparado ao do duto rígido, apesar de ser o mais usado. O duto rígido (Figura 2.3b) é visto como uma forma alternativa mais econômica (TECHNIP, 2008).

**Figura 2.3:** Exemplo de *risers*: (a) flexível (b) rígido



**Fonte:** (a) Oliveira (2017); (b) Salama et al. (2002).

De acordo com Oliveira (2017), para os *risers* do tipo flexível, a função dos flutuadores é gerar empuxo, com objetivo de reduzir o peso líquido da linha fazendo com que diminua a tração da linha aplicada à plataforma. A quantidade de flutuadores dependerá da estrutura do *riser*, da lâmina d'água, da conexão *riser/flowline*, e outros fatores que compõe o projeto do *riser*, (Figura 2.4a, b).

**Figura 2.4:** (a) linhas flexíveis com milhares de metros de comprimento;  
(b) lançamento do *riser* com flutuadores



(a)

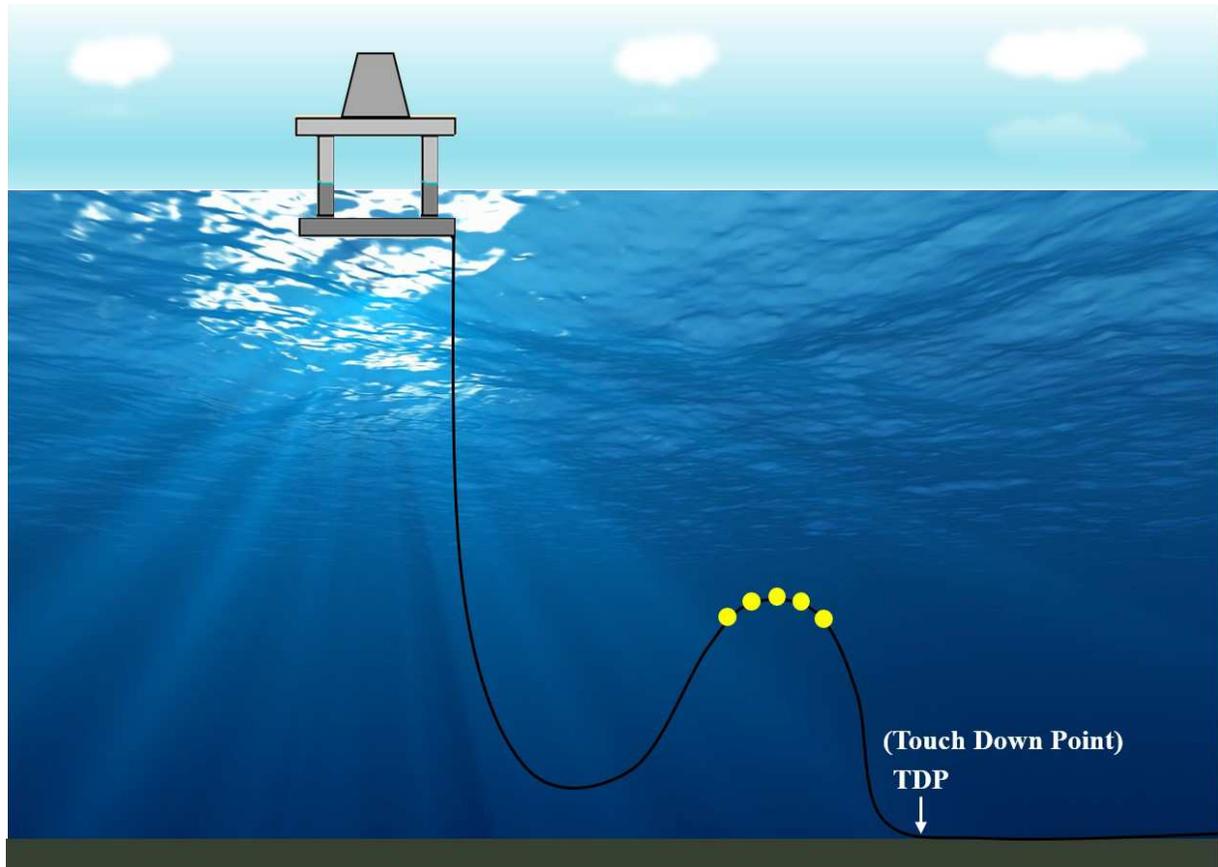


(b)

**Fonte:** (a) Technip (2016); (b) Oliveira (2017).

No decorrer do presente trabalho, o termo vazamento de óleo em *risers*, será utilizado para mostrar o comportamento da dispersão de óleo em águas profundas a partir de ruptura em *riser* com configuração do tipo *Lazy-Wave* (Figura 2.5). A configuração em catenária *Lazy-Wave* é uma forma obtida através de elementos de flutuação, que são os flutuadores distribuídos em uma região central do *riser*, fazendo com que, após o equilíbrio estático e inicial do sistema assuma uma forma ondulada (corcova) e a seção inferior do *riser* permaneça apoiada na forma de catenária no fundo do mar. Porém, os flutuadores têm como função aliviar a tração no topo do *riser* devido a seu peso, diminuindo seu movimento e, portanto, a movimentação no ponto de toque - TDP (*Touch Down Point*), fazendo com que a vida útil do *riser* seja aumentada e evitando a compressão dinâmica (TAKAFUJI, 2010). A configuração *Lazy-Wave* permite o acompanhamento da plataforma devido a sua característica sendo aplicada em lâmina d'água profunda e em ambientes severos, entretanto, a sua complexa instalação e alto custo são suas maiores desvantagens.

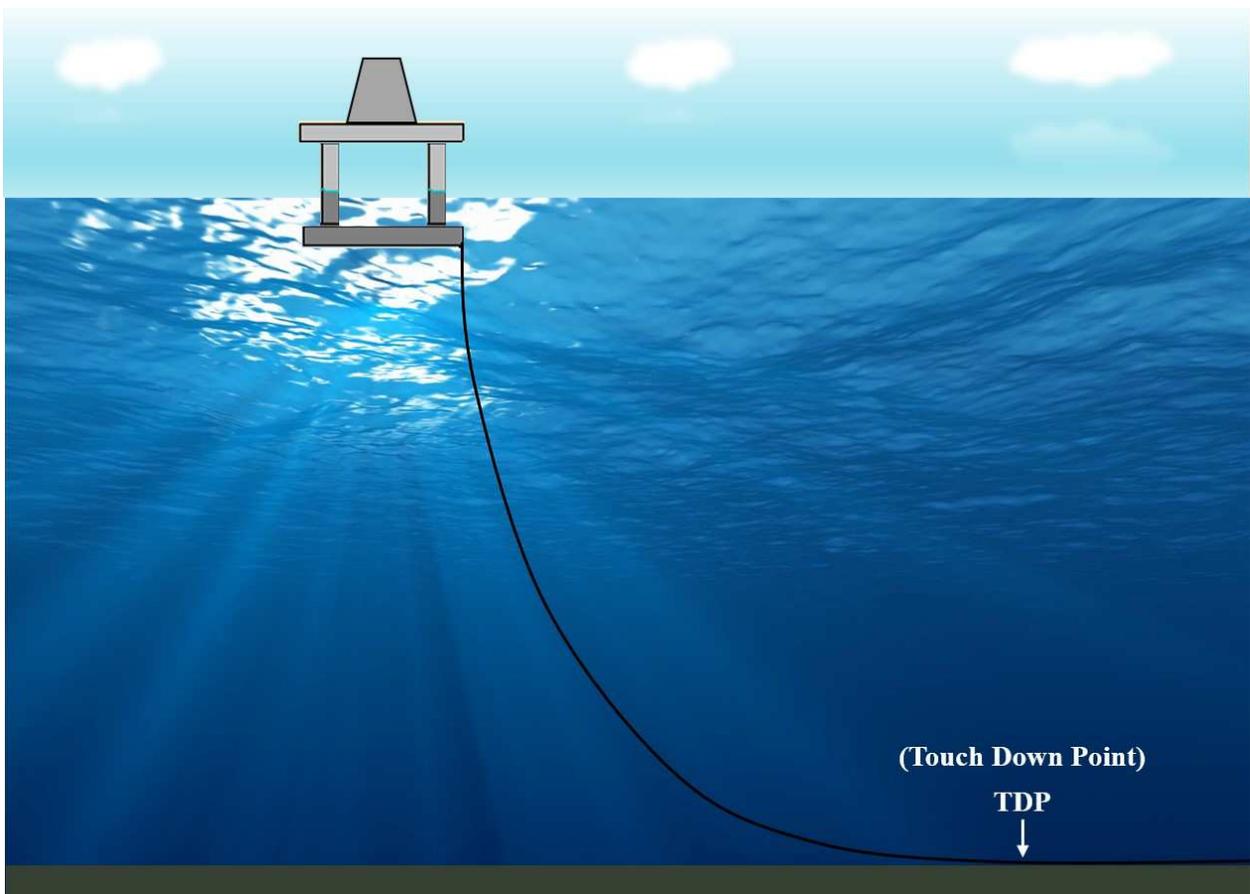
**Figura 2.5:** *Riser* do tipo *Lazy-Wave*



**Fonte:** Próprio do autor (2021).

Outros tipos de configurações de *risers* também podem ser destacados, como por exemplo, o tipo catenária livre que é mostrado na Figura 2.6. As configurações de catenária simples ou *free hanging* é basicamente uma catenária livre. Neste tipo de configuração o *riser* fica preso à plataforma e vai se estendendo livremente até o solo. Este tipo de *riser* é tido como o mais simples e interessante devido a sua geometria simples. Essa simplicidade ocorre devido à baixa utilização de componentes redutores de esforços que possibilitam que o *riser* tenha baixo custo financeiro e o processo de instalação seja mais simples.

**Figura 2.6:** *Riser em catenária livre*



**Fonte:** Próprio do autor (2021).

Com o aumento da lâmina d'água dos poços explorados, surgem três problemas que podem inviabilizar uma catenária simples (TAKAFUJI, 2010):

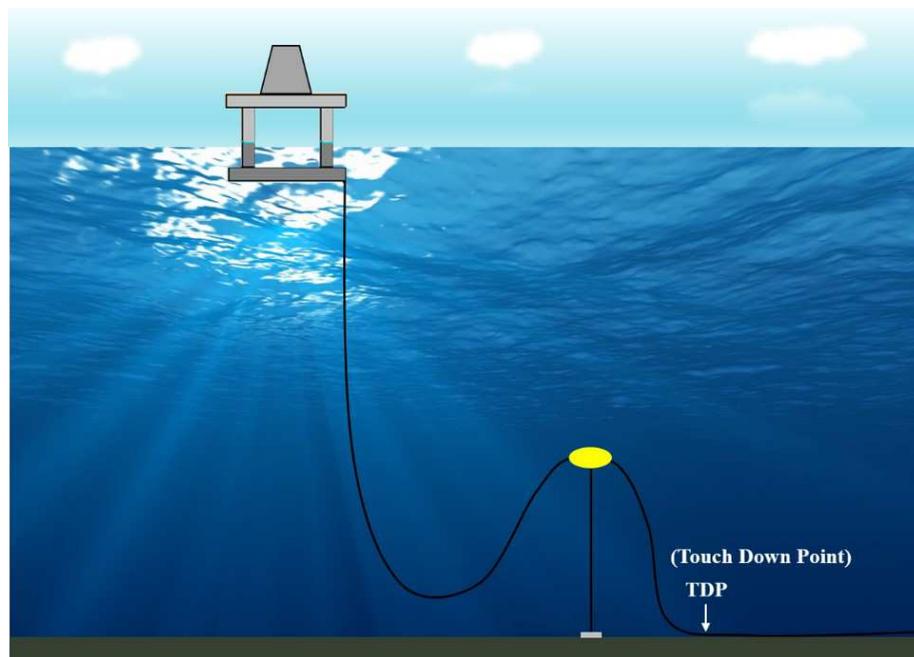
- Excesso de tração no topo suspenso, visto que é sustentado pelo ponto de conexão com a plataforma;

- Compressão dinâmica, relacionada à ocorrência de flambagem na região do ponto de contato com o solo (TDP) que é transmitido ao *riser* quando ondas muito grandes atingem a plataforma;
- Baixa vida útil devido a fadiga, principalmente nas regiões do TDP e no topo.

De acordo com Takafuji (2010) e PUC - RIO (s.d.), esse tipo de configuração é uma solução aplicável em águas com condições de ondas não muito severas.

A configuração de *riser Lazy-S* tem como característica um elemento de flutuação concentrado (boia) que fica em uma posição intermediária da linha, de onde parte uma catenária suspensa que se conecta à plataforma e uma catenária que se estende até o fundo do mar. A boia tem como função impedir a transferência direta de esforços dinâmicos no TDP e também suportar parte do peso no *riser*, diminuindo a tração estática no ponto de conexão com a plataforma, sendo que o movimento no TDP é controlado pelo movimento lateral da boia. Uma boia de tamanho maior é capaz de sofrer modificações durante o equilíbrio estático e inicial do *riser* com o aumento no carregamento hidrodinâmico, o que é uma consideração importante deste tipo de configuração de *riser*. Esse tipo de *riser lazy-S* é menos adaptável ao movimento da plataforma o que leva a maiores esforços (PUC - RIO, s.d.) como é possível ver na Figura 2.7.

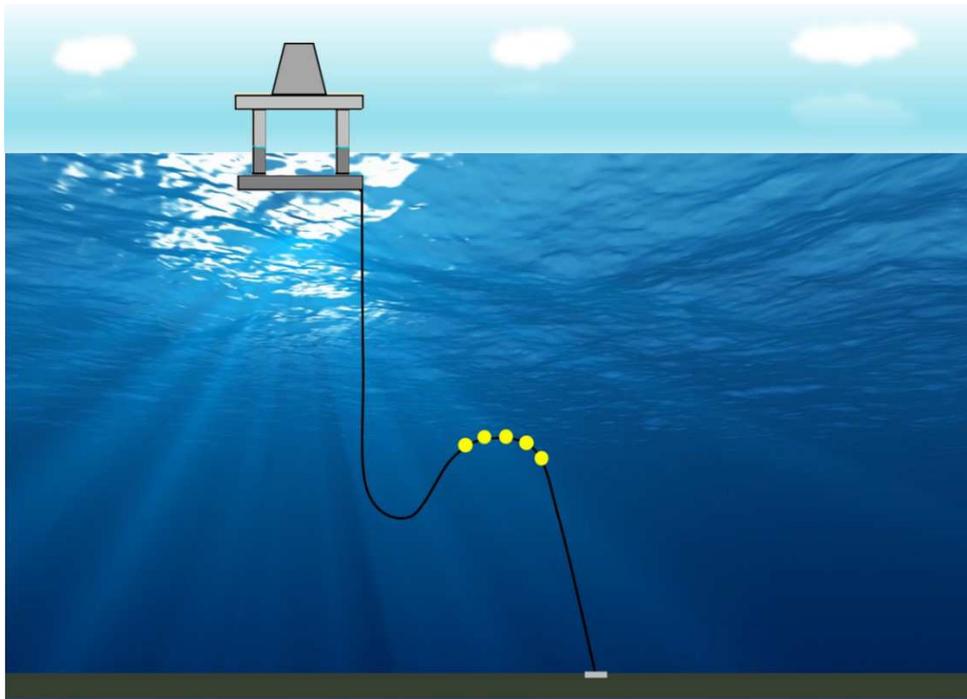
**Figura 2.7:** *Riser* do tipo *Lazy-S*



**Fonte:** Próprio do autor (2021).

A configuração de catenária do tipo *Steep-Wave* se assemelha à geometria da *Lazy-Wave*. No entanto, o trecho de flutuação do *riser* é prolongado até próximo a extremidade inferior da linha de ancoragem. Para este tipo de configuração, a extremidade inferior da linha não repousa em catenária no fundo do mar e a ancoragem do *riser* se dá sob tração em base que é fixa no fundo do oceano (PUC-RIO, s.d.). Essa configuração em comparação com a *Lazy-Wave* não apresenta problemas no TDP sendo recomendada para situações em que existem espaços pequenos para segmento de apoio, conforme apresentada na Figura 2.8.

**Figura 2.8:** *Riser* do tipo *Steep-Wave*

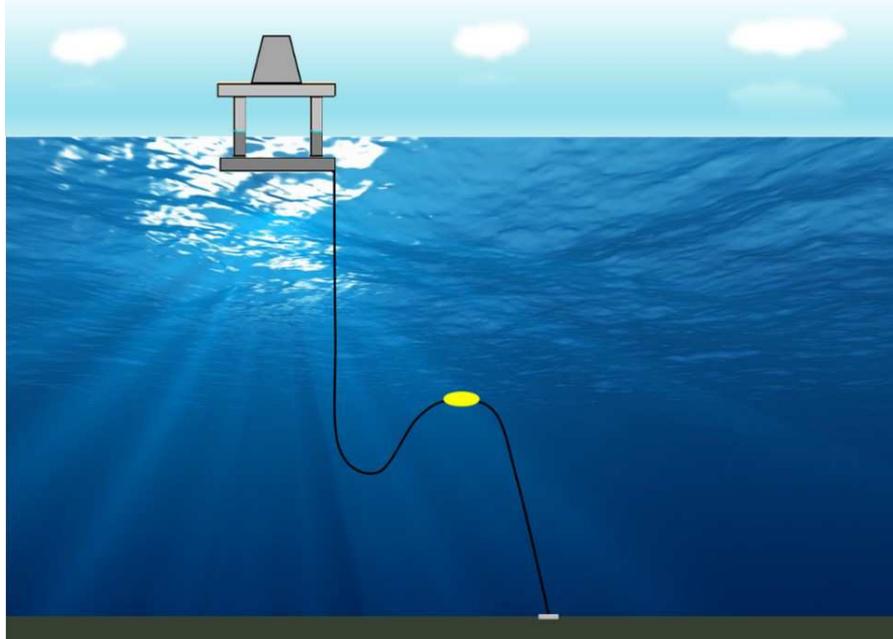


**Fonte:** Próprio do autor (2021).

A configuração *Steep-S* é semelhante a *Steep-Wave*, no qual, o trecho de flutuação é feito por meio de uma boia. Essa configuração tem uma maior capacidade de sofrer modificações do que a configuração *Lazy-S* (Figura 2.9), sendo recomendada em situações em que o fluido interno apresenta grandes variações de densidade e para situações em que existam um espaço muito pequeno para o segmento de apoio. De acordo com Mourelle et al. (2010), os *risers* em catenária *Hidro Amortecidos* adotam praticamente a mesma configuração de um *riser* em catenária livre, a diferença é que, ao longo dele, há segmentos com revestimento de densidade baixa que são definidos como amortecedores hidrodinâmicos, que tem por função principal interromper a

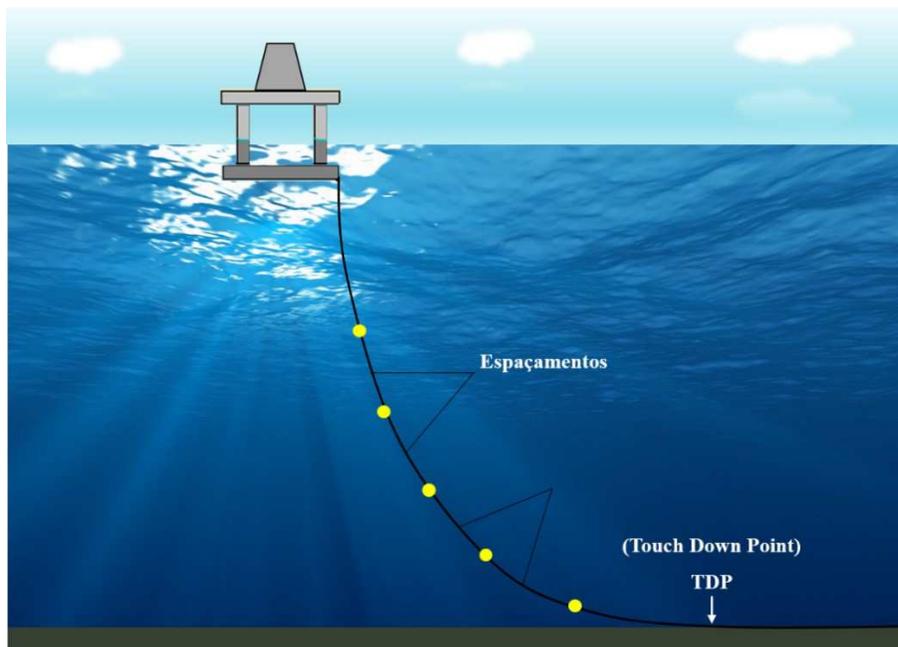
propagação de uma onda compressiva induzida ao longo do *riser* e transmitida pelos movimentos da unidade flutuante onde o *riser* está conectado, conforme ilustrado na Figura 2.10.

**Figura 2.9:** *Riser* do tipo *Steep-S*.



**Fonte:** Próprio do autor (2021).

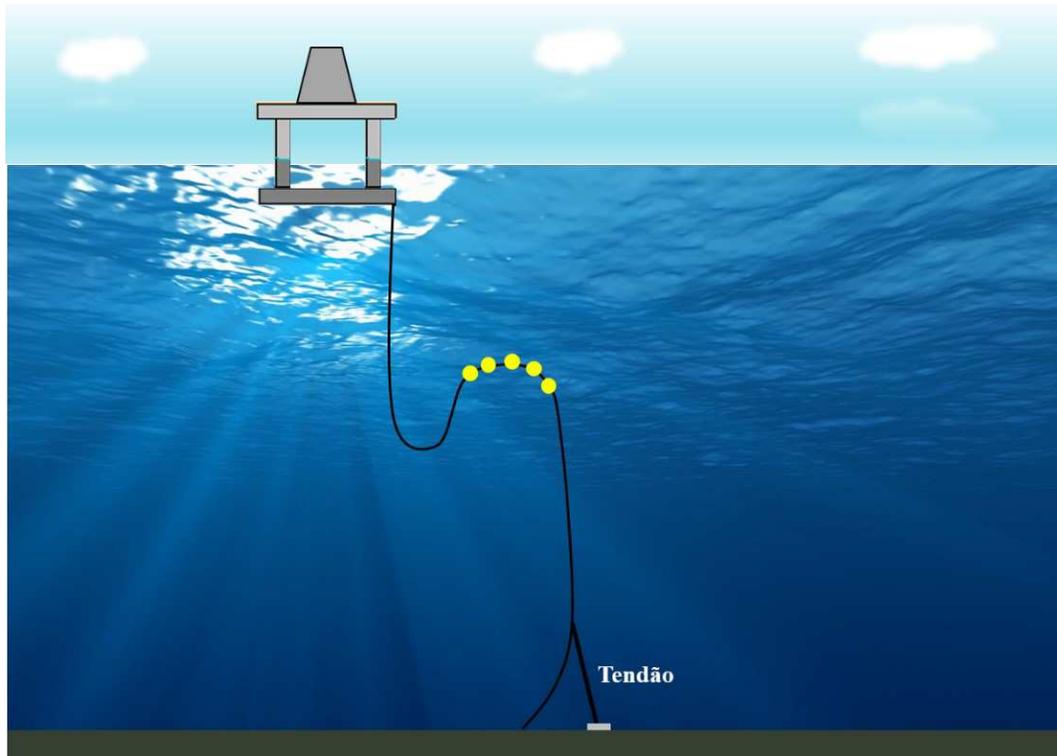
**Figura 2.10:** *Riser* em Catenária Hidro Amortecido.



**Fonte:** Próprio do autor (2021).

A configuração *Pliant-Wave* é composta por um tendão fixo ao tubo próximo ao solo, tendo como função diminuir o movimento lateral e evitar que esforços sejam transmitidos à extremidade. Esta configuração, normalmente, é utilizada para espaços pequenos ou em que exista o perigo de ocorrência de choque entre *risers* (Figura 2.11).

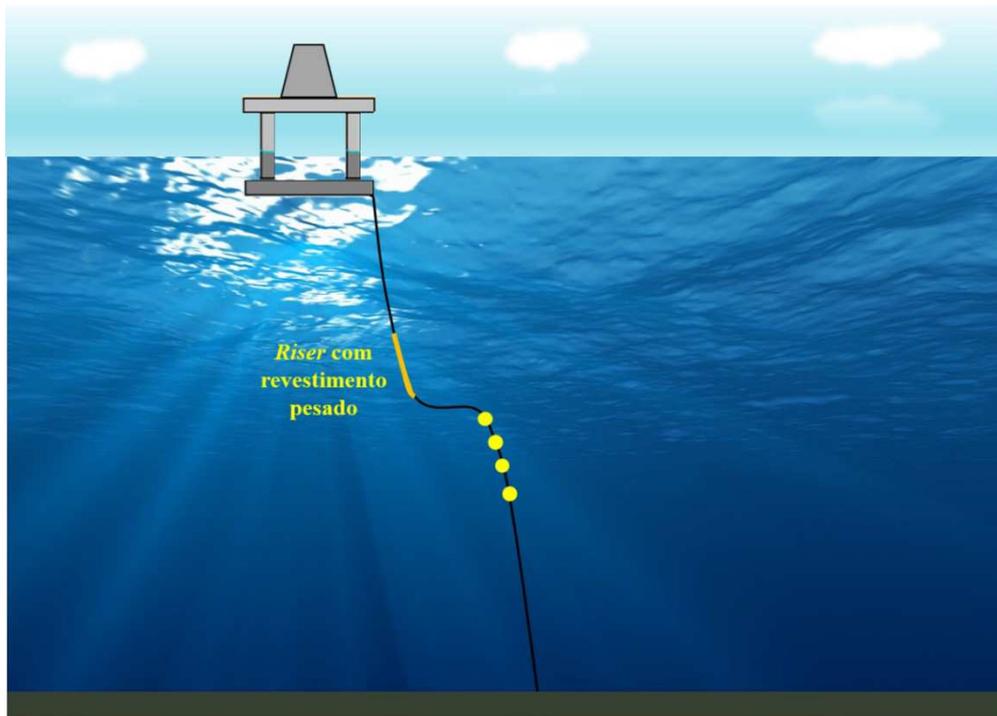
**Figura 2.11:** *Riser* em catenária *Pliant-Wave*.



**Fonte:** Próprio do autor (2021).

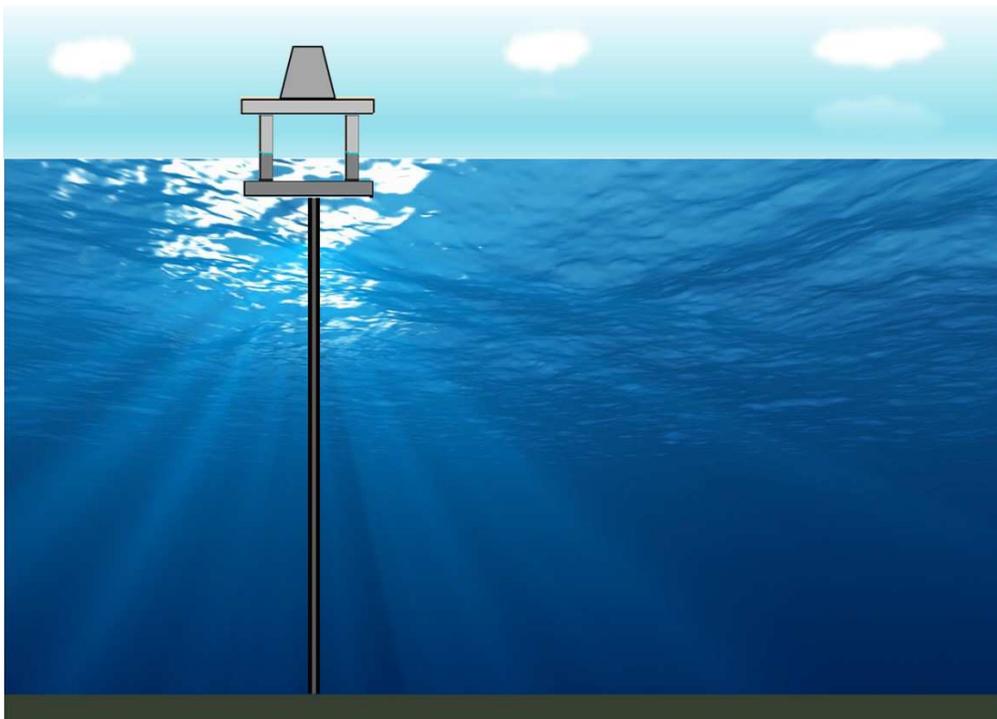
A Figura 2.12 mostra a configuração de um *riser* vertical complacente, uma configuração na qual os pontos extremos do *riser* estão a uma distância horizontal (*offset horizontal*). Esse tipo de *riser* apresenta um trecho de revestimento pesado que quando instalado em alta profundidade, o que evita a solidificação do petróleo, ou seja, a formação de parafina na região interna do *riser*, garantindo assim escoamento do petróleo até a plataforma de produção (Figura 2.12). A disposição desses trechos tende a proporcionar mais tração nos extremos do *riser*, tornando desnecessário a instalação de tensionadores ou mecanismos que compensem o movimento, diminuindo o seu custo quando comparado ao de *risers* verticais e tendo uma forma estrutural mais simples (TAKAFUJI, 2010; MARTINS, 2011).

**Figura 2.12:** *Riser* em configuração *Vertical Complacente*



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 2.13:** *Riser* do tipo Rígido

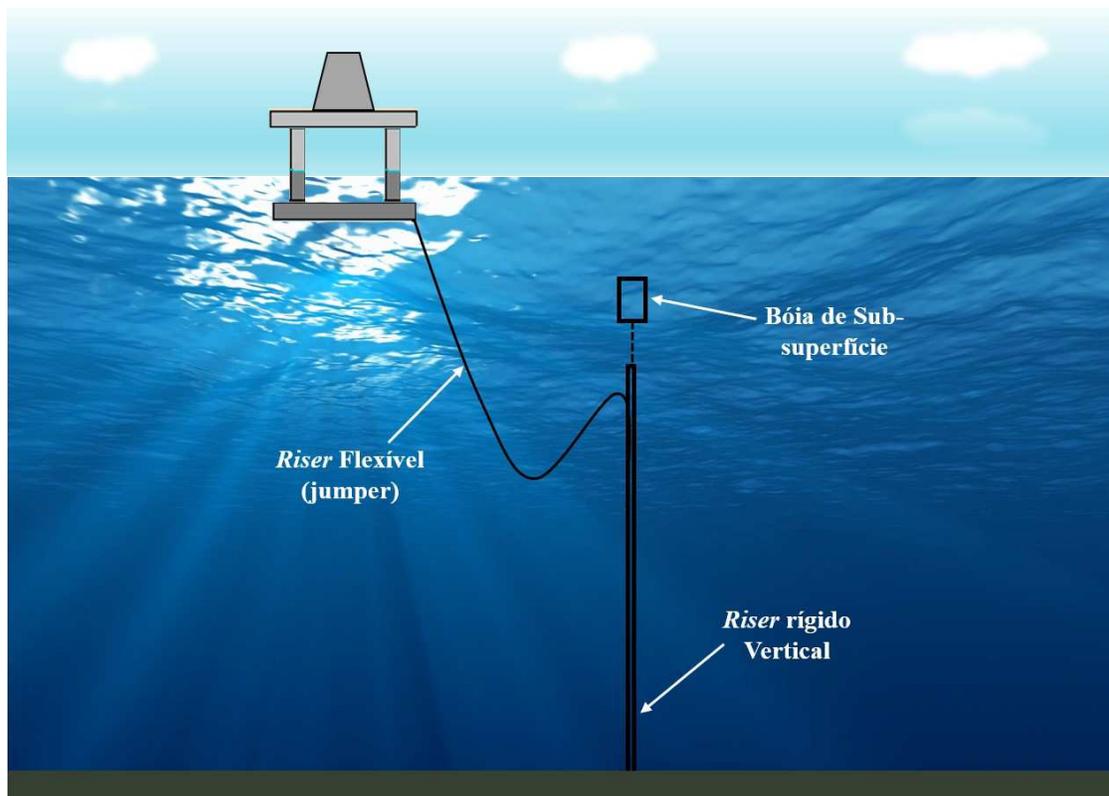


Fonte: Próprio do autor (2021).

Pode-se observar na Figura 2.13, uma outra configuração de *riser*, os rígidos verticais (ou quase verticais). As TLPs (*tension leg platforms*) exibem baixo movimento na vertical, pois são ancoradas ao fundo por tendões tracionados. As SPARS, por sua vez, são plataformas cilíndricas flutuantes de grande calado e que exibem grandes movimentos horizontais e movimentos verticais, causados pelas ondas, maiores do que as TLPs. O *riser* tem alta rigidez axial e sofre os movimentos da plataforma, que devem ser compensados por um sistema de controle, que mantém a tração em níveis toleráveis. São os sistemas de compensação de heave (*heave compensators*).

Outra configuração de *riser* que pode ser mencionada são os *risers Híbridos* (Figura 2.14). A configuração de um *riser Híbrido* é caracterizada pelo uso em conjunto de *risers* rígidos e flexíveis. Sua primeira aplicação foi no Golfo do México, no Campo Green Canyon, em 1988, em uma lâmina d'água de 467 metros de profundidade, mostrando ser uma alternativa para águas rasas (FISHER E BERNER, 1988). Essa configuração suporta uma boia de sub-superfície que é conectada até a unidade flutuante por uma linha flexível. À profundidade da boia os efeitos dinâmicos da superfície são quase nulos (SERTA et al., 2001).

**Figura 2.14:** *Riser* do tipo Híbrido



**Fonte:** Próprio do autor (2021).

## 2.5 Vazamentos de Óleo em Correnteza Marítima

Diferentes formas de vazamentos podem ocorrer em tubulações. Rompimento é tido como o de menor ocorrência mas, no caso de ocorrer, é considerado perigoso quando se trata de meio ambiente, principalmente em tubulações submersas. Os vazamentos podem ocorrer devido à corrosão, erosão, fadiga e defeitos na solda ou junções, onde quedas de pressão e volume se dão em menor proporção o que dificulta sua detecção ocasionando grandes perdas e prejuízo do produto (MACIAS, 2004).

Zhu et al. (2014) afirmam que vazamentos de óleo no mar tornam-se uma das causas de maior preocupação no âmbito marítimo devido à grandes danos, não só à saúde humana, como danos à vida marinha e a todos os recursos naturais.

Tratando-se de vazamento em *risers*, quando ocorre um vazamento deste tipo, o óleo tende a escoar pelo orifício em direção à superfície do mar devido à diferença de densidade dos fluidos presentes no escoamento.

Muitos pesquisadores realizaram tentativas efetivas de simular o processo de derramamento de óleo na correnteza com o uso da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), como é o caso de: Wang et al. (2005); Brandvik et al. (2013); Li et al. (2013a); Li et al. (2013b); Zhu et al. (2014); Sayol et al. (2014); Zhao et al. (2016); Jiang et al. (2016); Tavares (2016); Zhu et al. (2017a); Zhu et al. (2017b); Li et al. (2018); Sun, et al. (2019) e Moreira, et al. (2020).

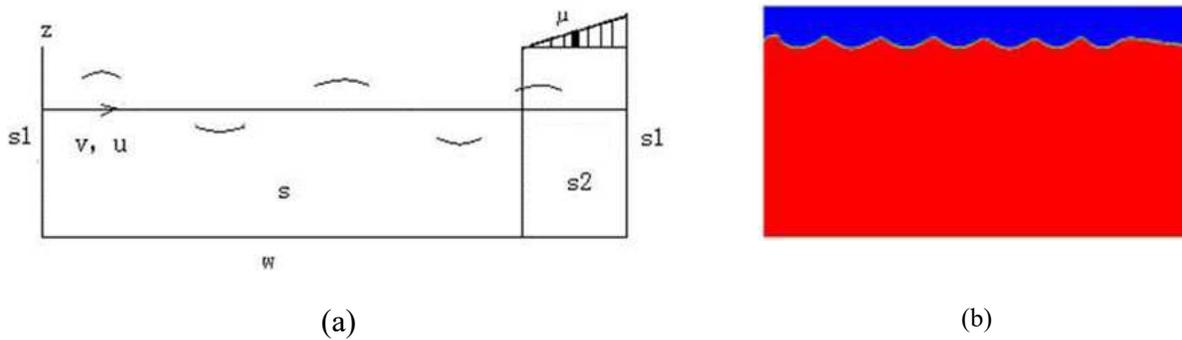
### 2.5.1 Simulação numérica de vazamento de óleo

Li et al. (2013a) propuseram-se a estudar a simulação de vazamento de óleo em oleoduto submarino utilizando o *software* Fluent para prever a trajetória do petróleo vazado em tubulações marítimas em um modelo de canal de onda, sendo o ponto de onda de distribuição vertical definido como sendo à esquerda do canal, enquanto a seção de absorção de onda de amortecimento é definida à direita (Figura 2.15). O acoplamento de pressão e velocidade em condições de estado instável é resolvido pelo algoritmo Pressão Implícita com Separação de Operadores (PISO), e as condições de contorno da superfície livre não-linear são modeladas pelo método de Volume of Fluid (VOF).

O modelo matemático simulou todo o percurso que gerou partículas de óleo no duto até a superfície do mar pela ação de fluabilidade, onde,  $k$  representa o número de onda. O comprimento de onda é  $2\pi/k$ , ou seja, quando  $k = 1$  (1/m) o comprimento da onda é de  $2\pi$  (m).

Pôde-se observar também que o óleo derramado forma rapidamente um jato ou pluma com baixa pressão operacional ( $P$ ) quando atinge um determinado plano horizontal, sendo derramado e disperso pelo fluxo de água formando partículas de óleo, (Figuras 2.16 e 2.17).

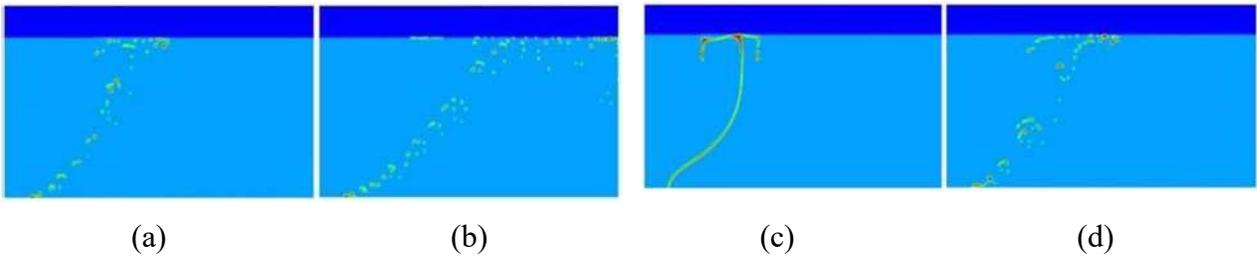
**Figura 2.15:** (a) modelo de canal de onda; (b) perfil de onda ( $t = 10$  s,  $k = 1$ ).



**Fonte:** Li et al. (2013a).

**Figura 2.16:** Distribuição de óleo-água-gás

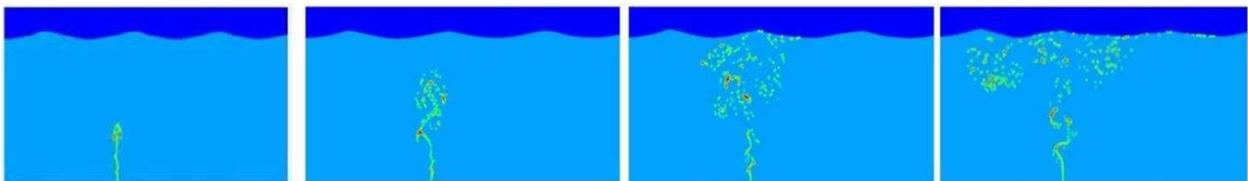
(a)  $t = 80$  s,  $u = 0,1$  m/s,  $P = 100800$  Pa; (b)  $t = 1400$  s;  $u = 0,1$  m/s;  $P = 100800$  Pa; (c)  $t = 38$  s,  $u = 0,1$  m/s,  $P = 102000$  Pa; (d)  $t = 56$  s,  $u = 0,1$  m/s,  $P = 101000$  Pa



**Fonte:** Li et al. (2013a).

**Figura 2.17:** Distribuição de óleo-água-gás

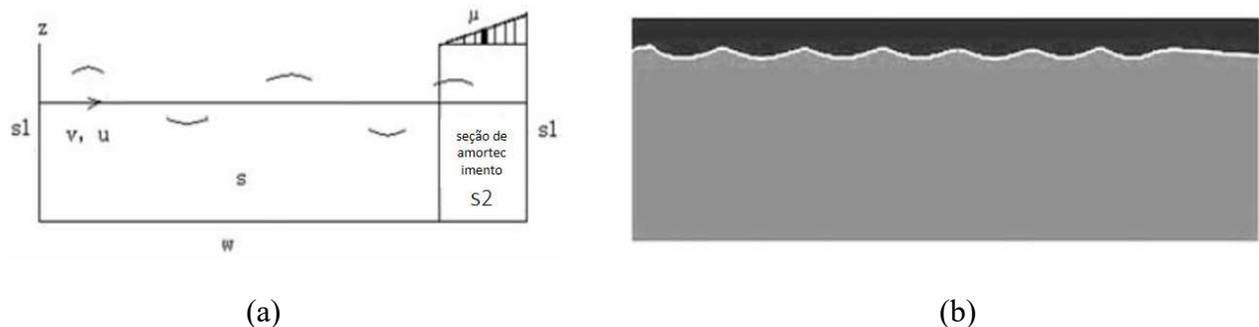
( $t = 10, 20, 24$  e  $30$ ) s;  $u = 0,1$  m/s,  $k = 1$ ,  $P = 104000$  Pa



**Fonte:** Li et al. (2013a).

Li et al. (2013b) avaliaram o derramamento de óleo em águas geladas através do *software* Fluent, onde o acoplamento de pressão e velocidade em estado instável foi resolvido por pressão implícita com divisão de algoritmo do operador (PISO). As condições de contorno não lineares de superfície livre foram resolvidas pelo método de volume de fluido. A onda numérica foi estabelecida pelo usuário como função definida (UDFs), com a ajuda da linguagem de programação C e todo o processo de dispersão e difusão do derramamento de óleo em águas geladas foi mostrado visualmente bem como a distribuição de velocidade. Os resultados mostram que, com a formação do manto de gelo, o óleo aderiu facilmente à superfície inferior do gelo, enquanto sua área de difusão era menor do que a da superfície livre do mar na mesma temperatura. Para obter a conservação de energia, condições de contorno de fluxo de saída, de entrada e ondas foram adotadas. O modelo de canal como fonte e perfil de onda é ilustrado na Figura 2.18.

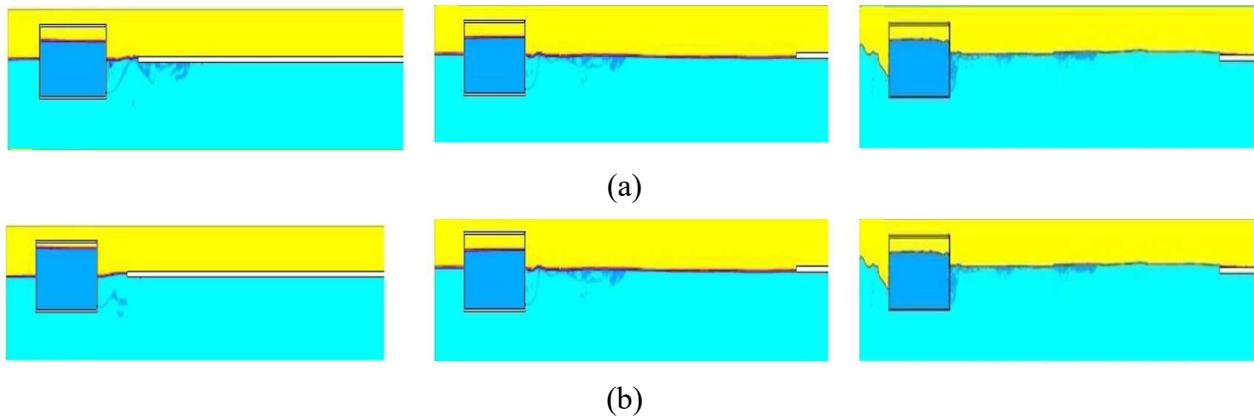
**Figura 2.18:** (a) modelo de canal de onda (b) perfil de onda



**Fonte:** Li et al. (2013b).

Na condição de derramamento de óleo próximo ao manto de gelo, o espalhamento e difusão do filme de óleo foi influenciado pela superfície do gelo. A velocidade de difusão foi menor por causa da ação da força de atrito. Logo, a difusão do filme de óleo foi significativamente menor do que na superfície livre do mar à mesma temperatura (Figura 2.19a). A trajetória do óleo derramado no tanque pode ser avaliada em mais de uma situação, onde, o amarelo, azul claro e áreas azuis-escuros representavam o ar, a água e o óleo respectivamente. Em cada figura foi representada a condição de derramamento de óleo mais perto da camada de gelo e a condição de derramamento de óleo mais próximo da camada de gelo com onda nula, (Figura 2.19b).

**Figura 2.19:** (a) distribuição de óleo-água-ar no tempo de 20 s; (b) distribuição de óleo-água-ar no tempo de 10 s



**Fonte:** Li et al. (2013b).

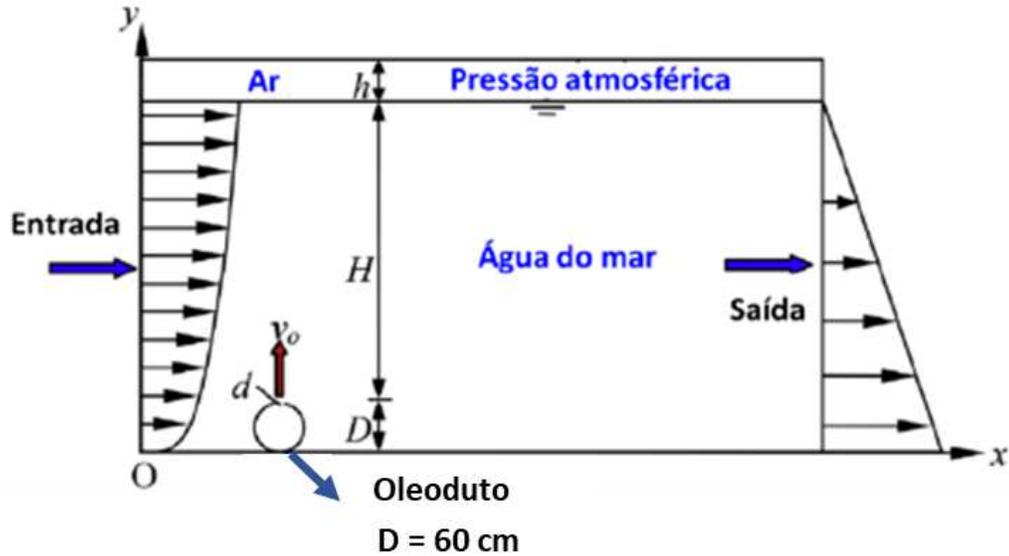
Zhu et al. (2014) se propôs a estudar os fluxos de petróleo a partir de dutos submarinos danificados com diferentes tamanhos de vazamentos. Os autores utilizaram como ferramenta de estudo a Dinâmica dos Fluidos Computacional e o *software* Fluent da Ansys com objetivo investigar o processo de derramamento de óleo de oleoduto submarino até a superfície livre. A malha numérica com 9011 células foi gerada no GAMBIT 2.3 (Figura 2.20b) a partir de um domínio 2D retangular com uma altura de 15 m e 20 m de comprimento (Figura 2.20a).

Os autores tomaram como base o Campo de Kenli localizado no Mar de Bohai na China que tem uma profundidade de 14,5 metros. No domínio computacional foi inserido um tubo submerso com diâmetro de 60 cm posicionado na correnteza. Os efeitos da densidade, velocidade de vazamento do óleo, tamanho do vazamento e velocidade da correnteza no processo de derramamento de óleo foram estudados. No entanto, as características da variação de detalhe das gotículas de óleo, tais como a quebra e coalescência não foram consideradas nos estudos numéricos.

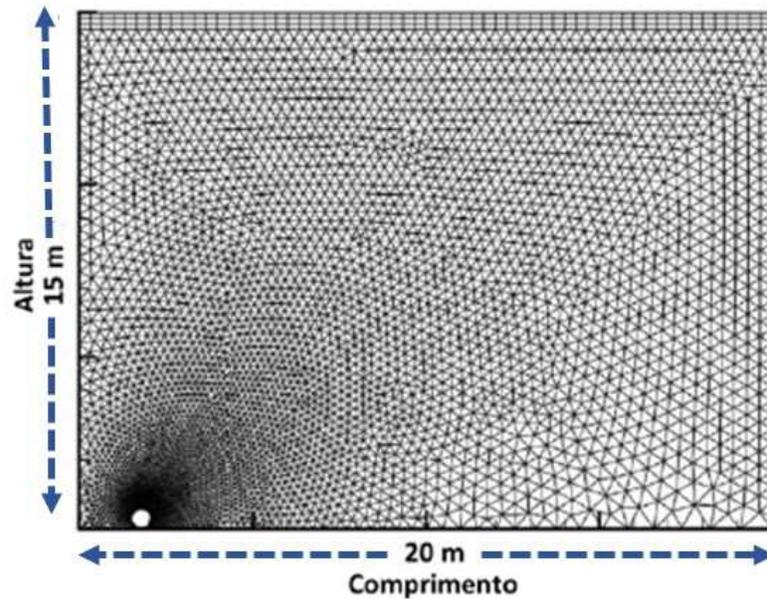
Observou-se que para maiores velocidade de vazamento de óleo (3 m/s) o tempo necessário para que o fluxo alcance a distância máxima (16,4 m) de migração horizontal até a superfície livre é de 15 s. Os autores observaram também que devido a alta taxas de velocidade de vazamento de óleo (5 m/s) apenas 15 s é necessário para o óleo atingir a distância máxima (16,4 m), Figura 2.21. Em relação ao efeito da velocidade da água, foi possível observar que quanto maior for a velocidade da água mais evidente a trajetória do fluxo de óleo a jusante. A razão para isto é que a água a alta velocidade provoca mais cisalhamento em gotículas de óleo

transferindo mais energia cinética para a mesma, apresentando um comportamento significativo do trajeto de óleo em relação ao tamanho do orifício de vazamento (Figura 2.22).

**Figura 2.20:** (a) domínio computacional e condições de contorno e (b) malha numérica gerada no GAMBIT 2.3



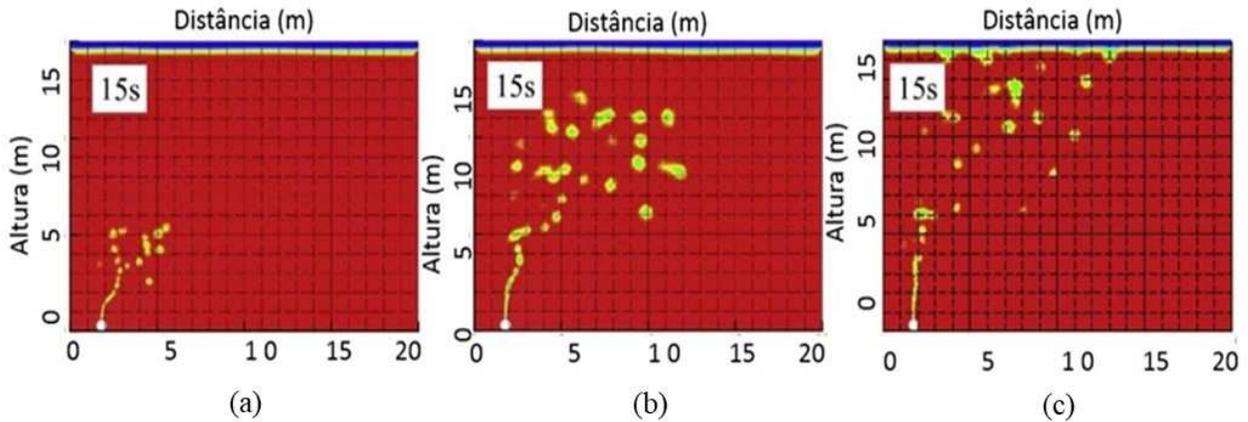
(a)



(b)

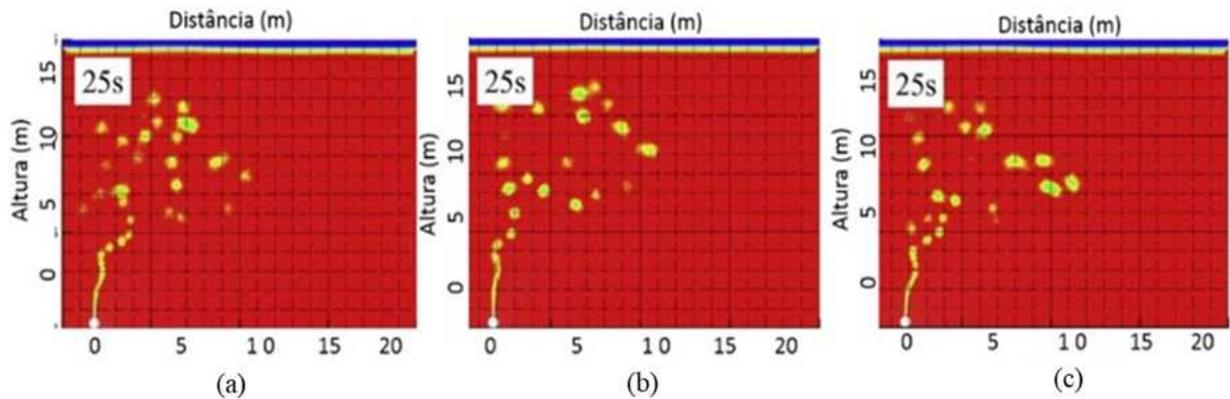
Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2014).

**Figura 2.21:** O processo de derramamento de óleo do oleoduto submarino para a superfície livre em diferentes taxas de vazamento de óleo para velocidade da água de 0,1 m/s:  
 (a)  $v_o = 1$  m/s, (b)  $v_o = 3$  m/s e (c)  $v_o = 5$  m/s



**Fonte:** Zhu et al. (2014).

**Figura 2.22:** O processo de derramamento de óleo do oleoduto submarino para a superfície livre a diferentes velocidades de água para taxa de vazamento de óleo de 2 m/s:  
 (a)  $v_{wmax} = 0,04$  m/s, (b)  $v_{wmax} = 0,07$  m/s e (c)  $v_{wmax} = 0,1$  m/s



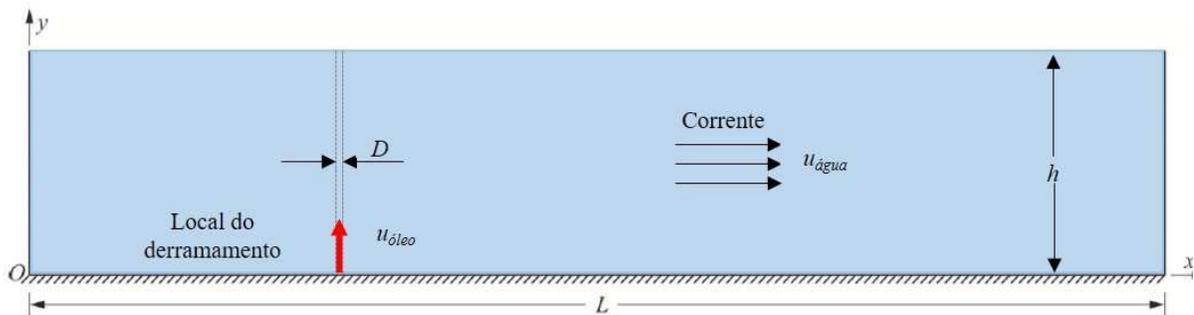
**Fonte:** Zhu et al. (2014).

Jiang et al. (2016) propôs estabelecer um modelo de turbulência razoável para o comportamento de campo próximo ao derramamento de óleo do oleoduto submarino. A difusão de óleo no cenário do vazamento foi estudando considerando-se diversos aspectos. Com base no método de Volumes Finitos, a turbulência  $k-\varepsilon$  é introduzida para estabelecer um modelo de

turbulência bidimensional sob corrente de forma que se possa rastrear a interface do fluxo multifásico.

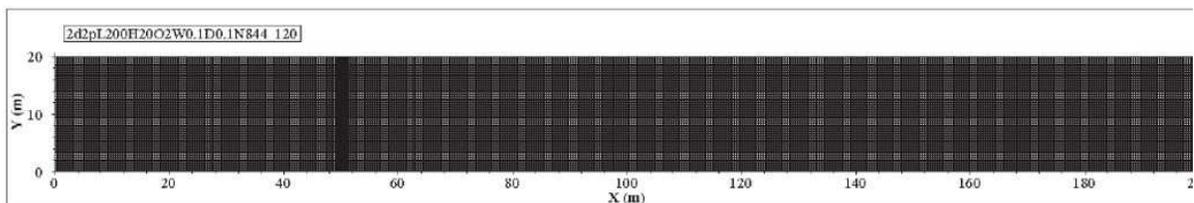
O modelo de turbulência de difusão de derramamento de óleo para o oleoduto submarino é mostrado na Figura 2.23. As dimensões da área de cálculo são de 200 m de comprimento (direção X), 20 m de altura (direção Y) e a profundidade de lâmina d'água 20 m. O petróleo bruto é derramado do orifício danificado a uma velocidade de 6 m/s e flui verticalmente na água do mar com velocidade inicial de 0,2 m/s de correnteza. A velocidade do fluxo de água  $u_{water}$  é paralela ao fundo do mar. A malha computacional para o modelo de turbulência de derramamento de óleo na correnteza marítima é mostrada na Figura 2.24.

**Figura 2.23:** O esboço do derramamento de óleo do oleoduto submarino

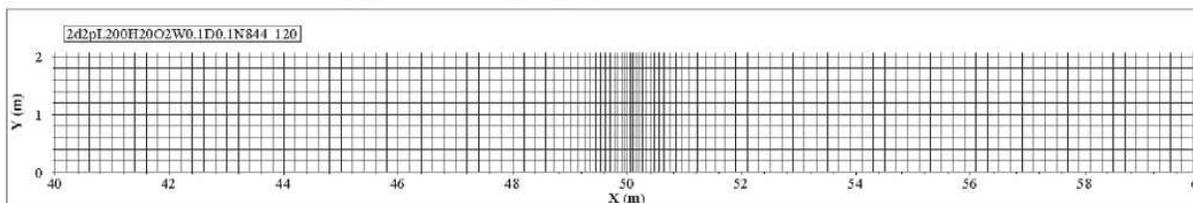


Fonte: Jiang et al. (2016).

**Figura 2.24:** Malha computacional para o modelo de turbulência de derramamento de óleo (a) gráfico geral do modelo de turbulência (b) área não uniforme em torno do orifício de vazamento



(a)



(b)

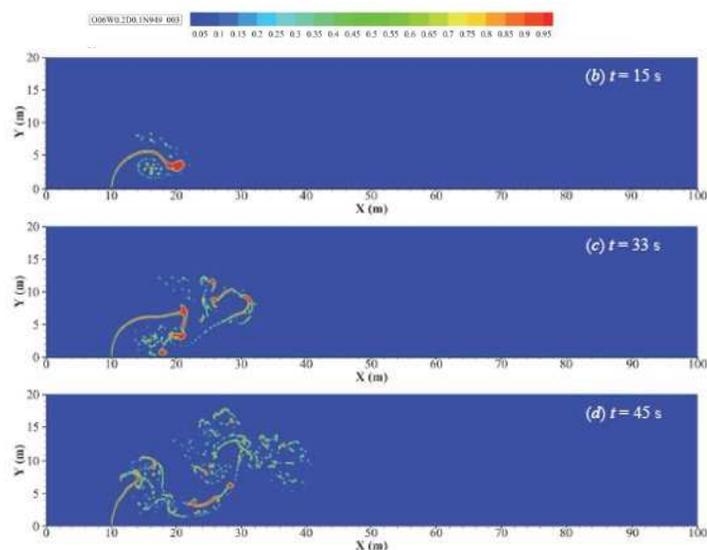
Fonte: Jiang et al. (2016).

As equações governantes são resolvidas pelo Método de Volumes Finitos usando o *software* Fluent. O esquema QUICK é empregado para discretizar as equações e o algoritmo PISO é adotado para resolver o acoplamento de pressão-velocidade. Os resultados da simulação são verificados com os testes experimentais e resultados numéricos. Em seguida, a evolução da trajetória de derramamento é realizada para uma análise preliminar. Finalmente, diferentes tempos de derramamentos de óleo foram considerados em que as velocidades influenciam no tempo de chegada na superfície, distância à deriva horizontal e faixa de difusão da superfície. De acordo com os autores, quando o petróleo bruto é derramado do orifício danificado o rastreamento da trajetória de derramamento é um ponto chave de toda a pesquisa.

Para um tempo de 3 s, após o derramamento de óleo (Figura 2.25) devido à correnteza, o óleo se espalha a jusante após alcançar uma certa altura com a formação de um pequeno vórtice. No instante de 50 s, 60 s e 120 s (Figura 2.26) o óleo vazado aumenta e a parte inferior do vórtice é acabado.

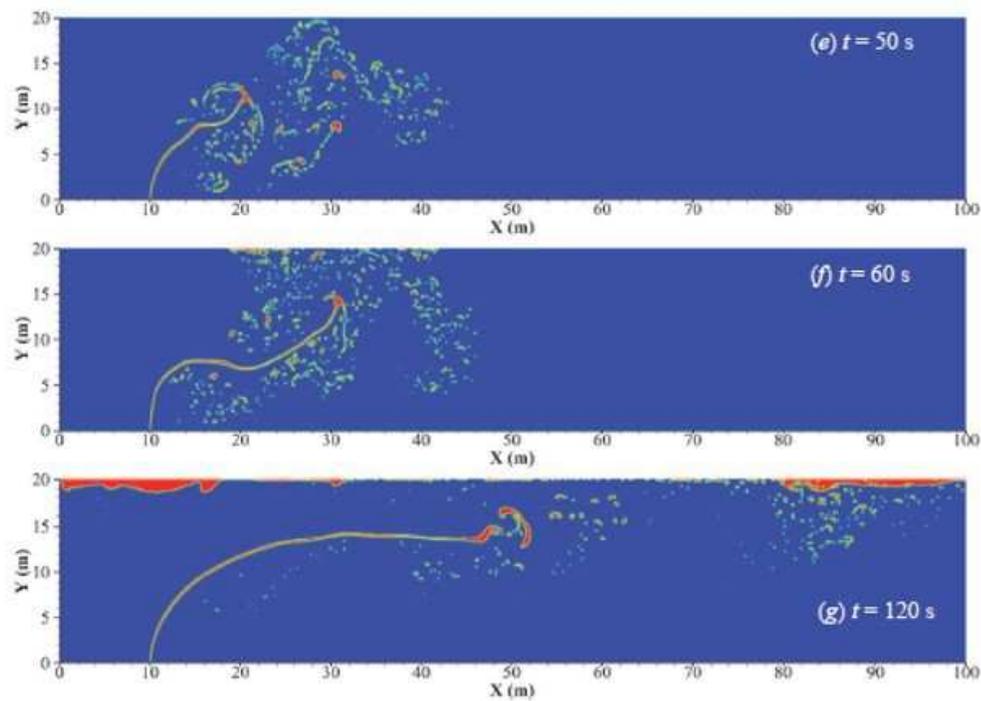
Os resultados mostram que os dados das simulações concordam muito bem com os valores experimentais e numéricos. Durante a propagação submarina do óleo derramado certos vórtices são formados. Com o aumento da velocidade de óleo vazado, o tempo de chegada à superfície do mar diminui, mas a deriva horizontal, a distância e o alcance da difusão da superfície aumentam gradualmente.

**Figura 2.25:** Contornos da fração de volume de óleo derramado em tempos diferentes, após o derramamento de óleo



**Fonte:** Jiang et al. (2016).

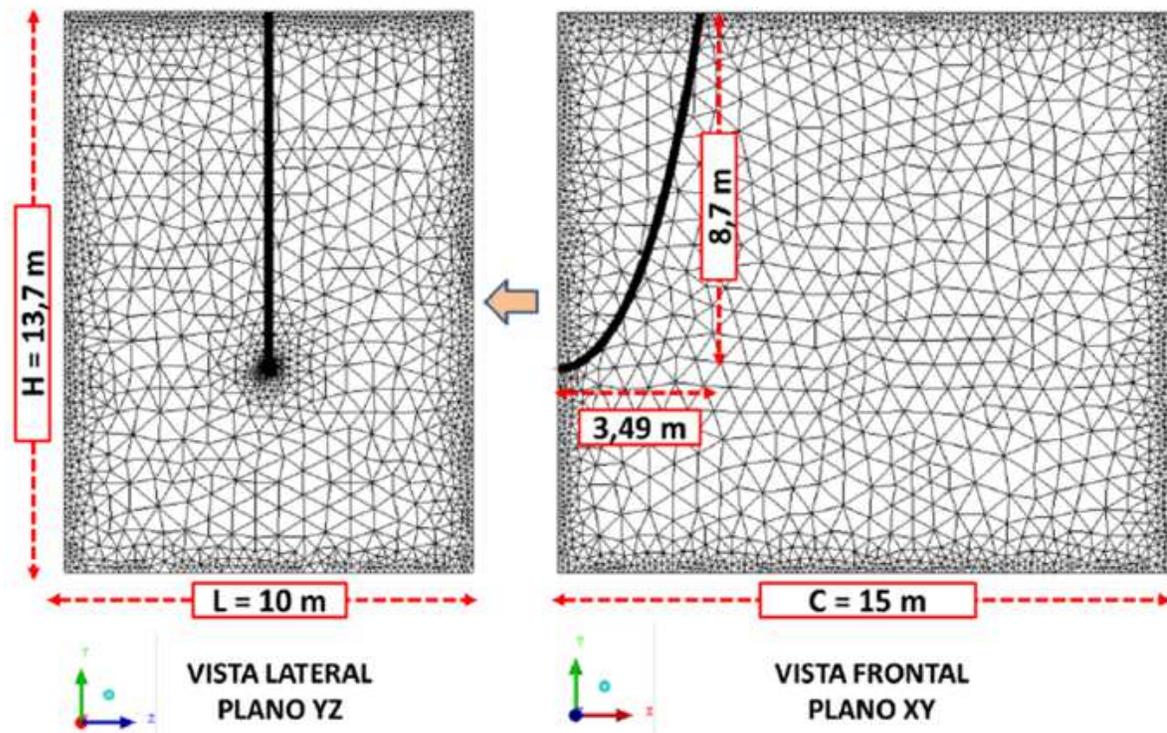
**Figura 2.26:** No instante (50, 60, 120) s o óleo transbordado aumenta e o lado inferior do vórtice é aprimorado



Fonte: Jiang et al. (2016).

Tavares (2016) propôs 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. 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. Os resultados foram obtidos com o *software* Ansys CFX 15. O modelo matemático que representa o domínio físico de estudo consiste na dispersão de óleo através de um orifício de vazamento em um duto submarino (domínio interno) para uma região do oceano que foi tomada como domínio externo. O domínio de estudo é tridimensional e tem o formato de paralelepípedo com dimensões (15 x 13,7 x 10) m, apresentando uma profundidade de 13,7 m baseada no trabalho de Zhu et al. (2014) que tomou como base o campo de Kenli localizado no Mar de Bohai (China), o qual tem uma profundidade média de 14,5 m. O orifício de fuga de óleo é tratado como circular e está situado na parede do duto em forma de catenária. Pode-se observar o detalhe da vista frontal e lateral da malha numérica não-estruturada e da região junto à seção de entrada da catenária e região de vazamento. A malha numérica é composta de 1.465.650 elementos tetraédricos e 244.221 nós (Figura 2.27).

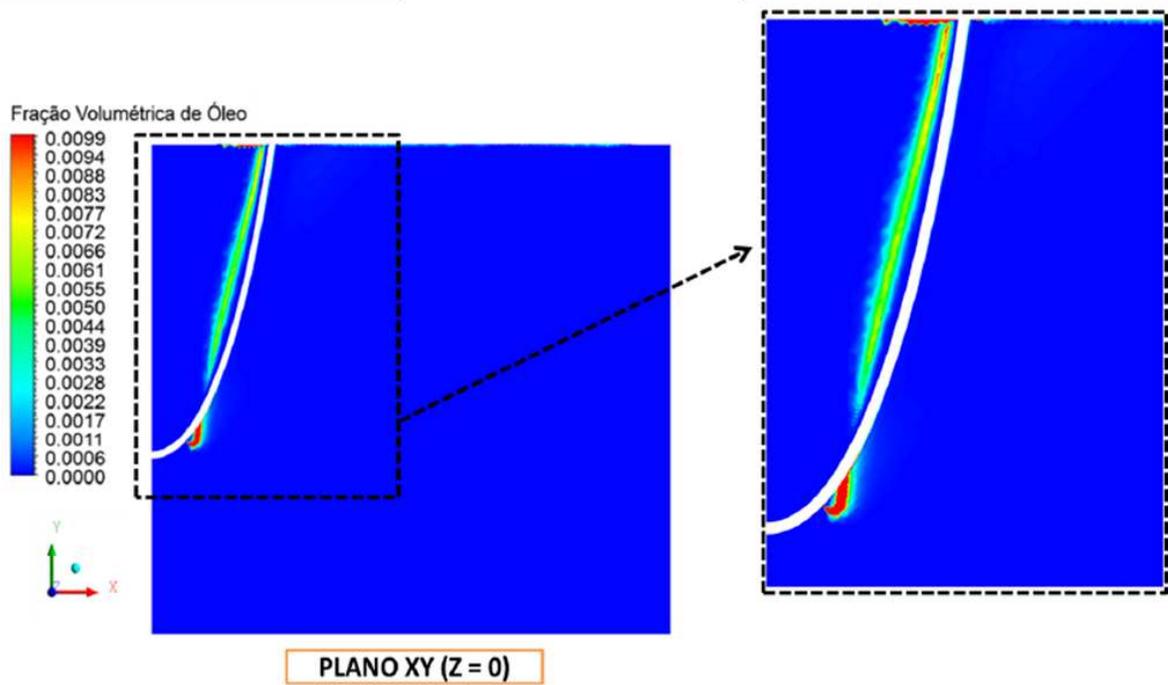
**Figura 2.27:** Detalhe das vistas lateral e frontal da malha numérica não-estruturada gerada



**Fonte:** Tavares (2016).

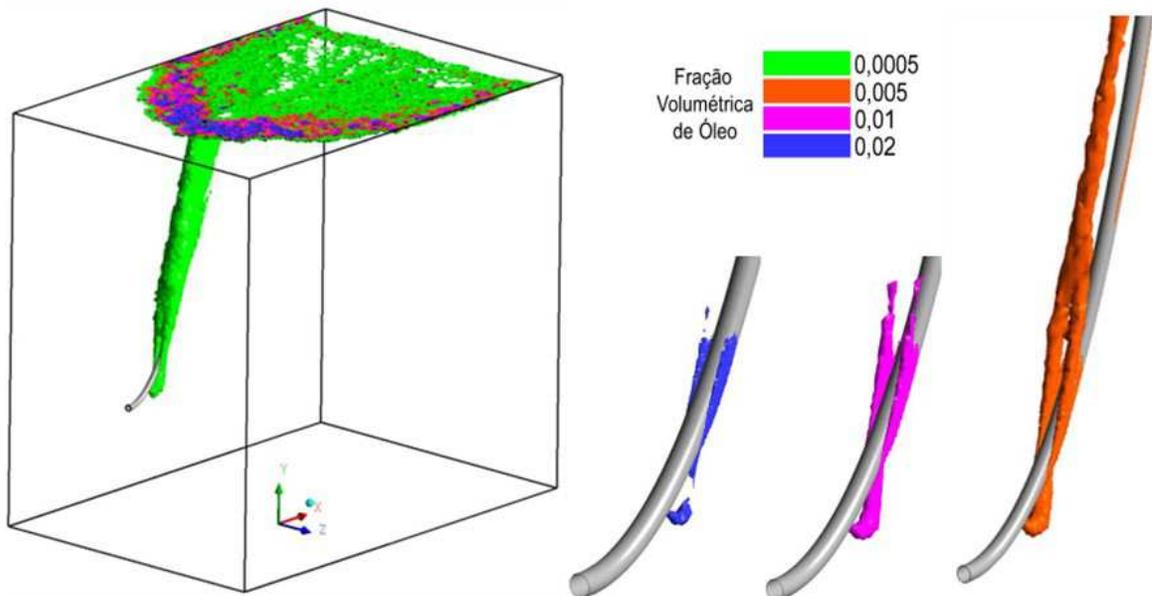
Observando os campos de fração volumétrica de óleo, percebe-se que o comportamento da pluma de óleo é ascendente, ou seja, está se elevando. A justificativa para este fenômeno é dada pela diferença de densidade das fases (água/óleo) sendo que, para este caso, foi adotado uma velocidade de vazamento de óleo igual a 1,02 m/s na direção do orifício de vazamento e a velocidade da correnteza foi considerada como sendo igual a 0,04 m/s. O perfil inclinado da pluma de óleo se comporta para a direita (direção da correnteza) e isto se dá pelo arraste da correnteza até a superfície no sentido do escoamento do oceano. Mesmo com valor mais alto de velocidade de óleo no orifício de vazamento (1,02 m/s) em relação a velocidade da água do mar, a pluma de óleo perde velocidade ao sair pelo orifício de vazamento e é lançada no oceano, o que pode ser explicado pela transferência da quantidade de movimento e as tensões de cisalhamento, vide Figura 2.28. Pode-se observar também que as partículas de óleo que formam a pluma ou jato tendem a aderir nas paredes da catenária (Figura 2.29).

**Figura 2.28:** Campo de fração volumétrica de óleo sobre o plano XY ( $Z = 0$ ) com detalhe para a região próxima de formação da pluma de óleo



Fonte: Tavares (2016).

**Figura 2.29:** Isosuperfície de fração volumétrica de óleo com destaque para a aderência de óleo na parede externa da catenária

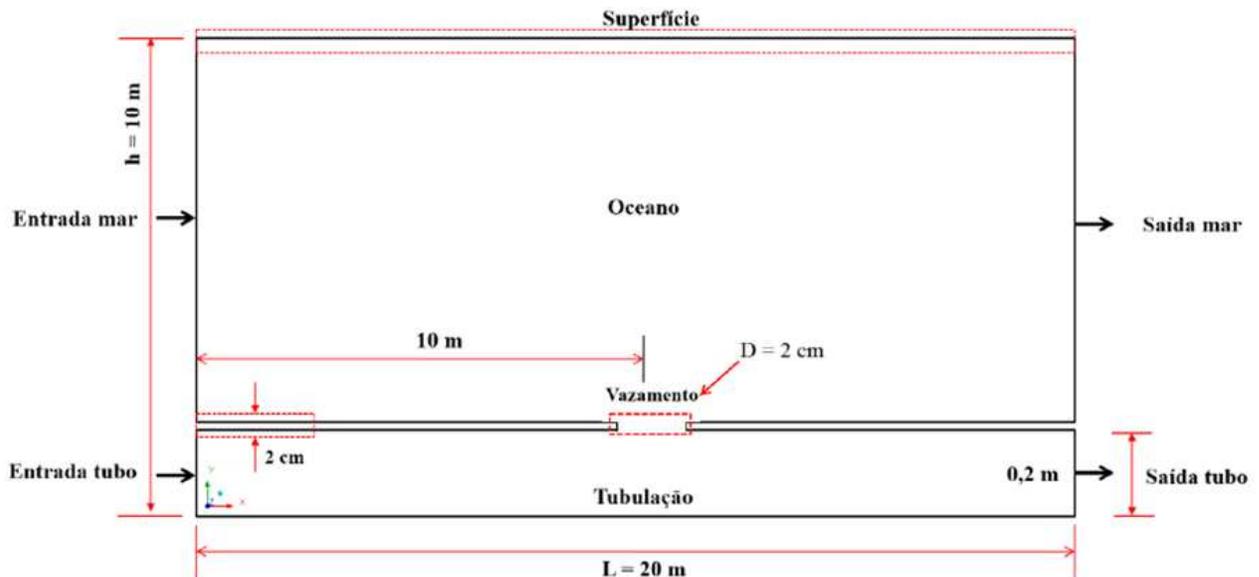


Fonte: Tavares (2016).

Moreira et al. (2020) propôs estudar numericamente, através do *software* Ansys CFX<sup>®</sup> 15.0, 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 a entrada de água para dentro da tubulação de óleo. Foi adotado o regime transiente e modelo bidimensional, com base nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento além do modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  padrão.

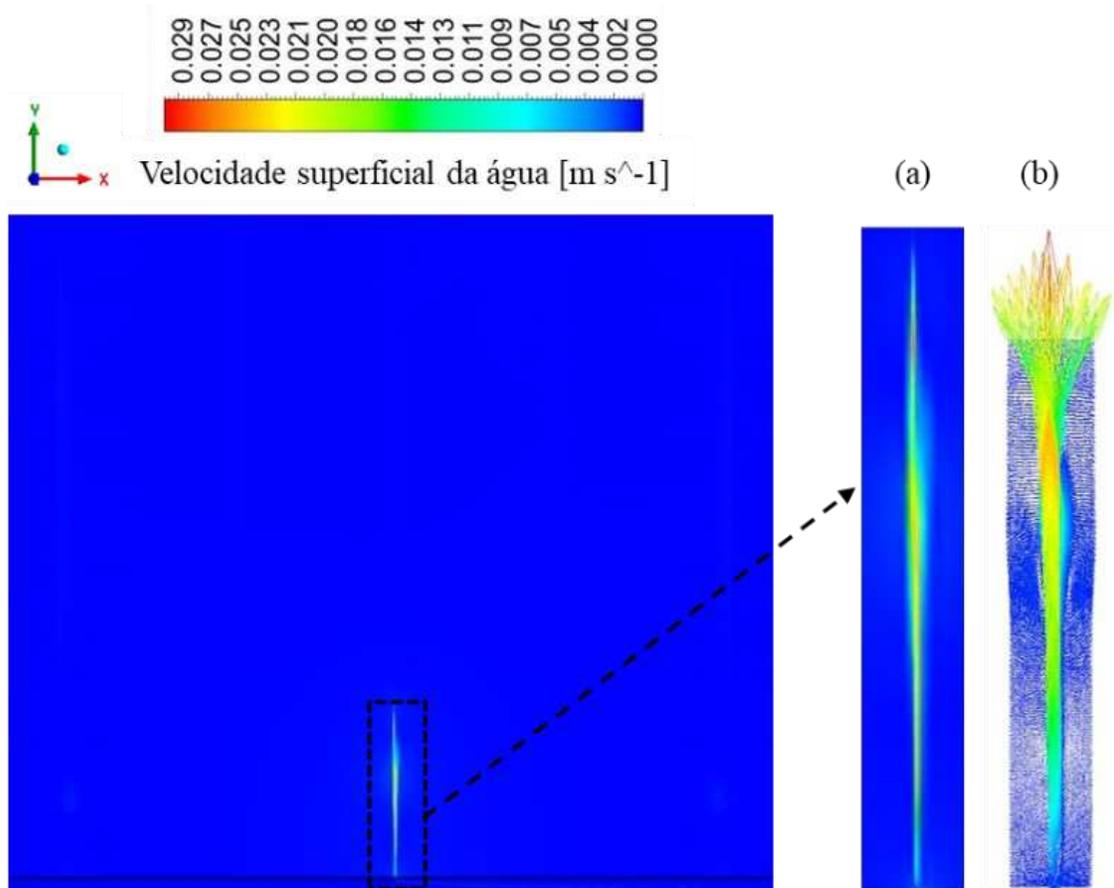
O domínio físico analisado pode ser visualizado na Figura 2.30. Uma malha numérica foi gerada com 139.488 elementos hexaédricos e 93.666 pontos nodais. O comportamento dinâmico do óleo e da água foi representado com auxílio de campos de pressão, velocidade superficial e fração volumétrica de óleo e da água, bem como vetores de velocidade. Para observação desses resultados, foi variado a velocidade de entrada mar, velocidade de entrada tubo e pressão de saída do tubo. Os resultados indicaram a presença de vazamento de óleo na correnteza marítima através do orifício de vazamento (Figura 2.31).

**Figura 2.30:** Domínio físico de um vazamento de óleo no mar a partir de duto horizontal submerso.



**Fonte:** Moreira et al. (2020).

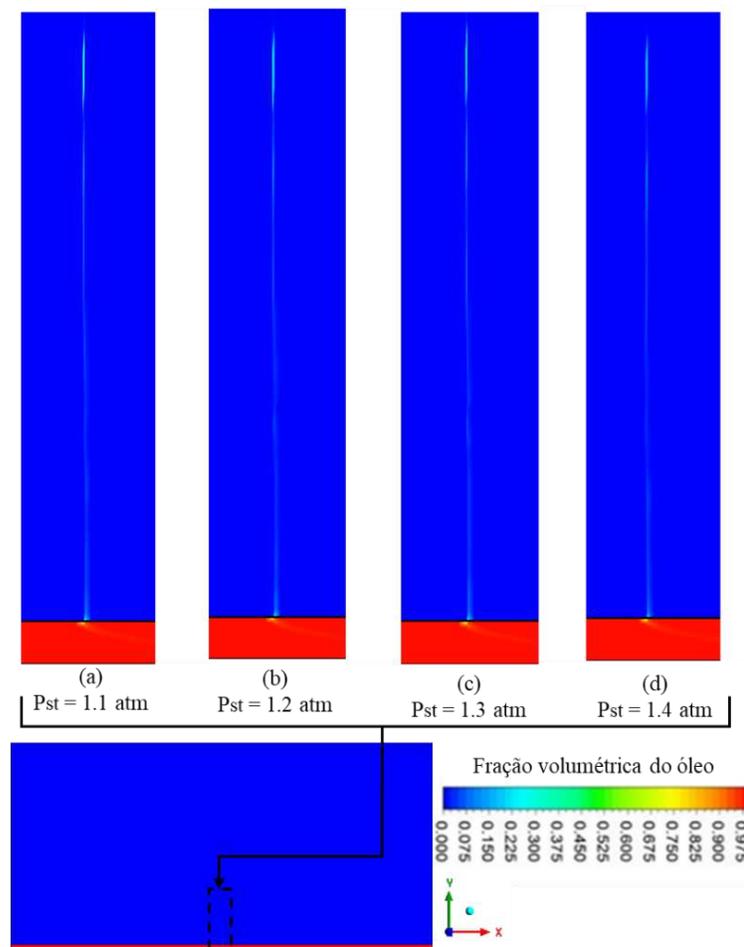
**Figura 2.31:** Campo de velocidade superficial da água em todo o domínio (tubo e mar) e detalhe do jato de óleo na região mar: (a) campo de velocidade, (b) campo vetorial de velocidade



**Fonte:** Moreira et al. (2020).

A Figura 2.32 representa um trecho do campo de fração volumétrica do óleo localizado a 9 m da seção de entrada, 4 m da saída e 3,5 m de altura do domínio físico analisado para diferentes pressões prescritas na saída da tubulação (1,1; 1,2; 1,3 e 1,4) atm com velocidade de entrada do óleo igual a 1,08 m/s. Para a correnteza marítima, considerou-se água parada, em um tempo de 10 s na presença de vazamento. Dessa maneira, pode ser observado que a fração volumétrica de óleo se mantém praticamente igual para as diferentes pressões adotadas na saída da tubulação, ou seja, não há muita discrepância na fração de óleo para este trecho analisado em uma velocidade de entrada do óleo de 1,08 m/s. A tendência de subida ligeiramente inclinada da pluma de óleo para a direita observada na Figura 2.32, pode ser explicada pelo arraste da pluma de óleo devido a diferença de densidade entre as fases (água e óleo).

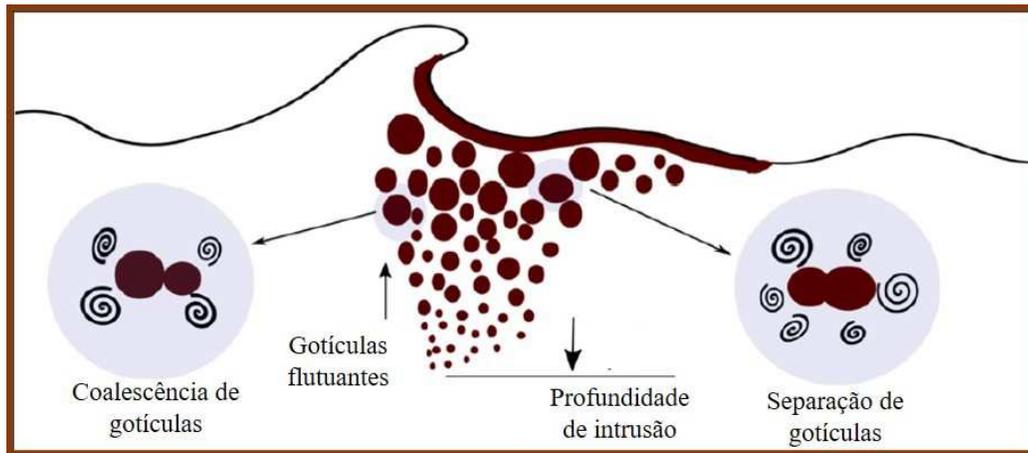
**Figura 2.32:** Distribuição da fração volumétrica do óleo para diferentes pressões na saída do tubo



**Fonte:** Moreira et al. (2020).

A condição para calcular a distribuição do tamanho das gotas de óleo e seu comportamento dinâmico na coluna de água, torna-se um fator de grande importância no derramamento de óleo. Com a deformação das ondas, o óleo irá dispersar de uma superfície lisa na coluna de água em formatos variados, onde as gotas de óleo passam por mais rupturas e coalescência na coluna de água devido à turbulência, conforme ilustra a Figura 2.33. No trabalho desenvolvido por Nissanka e Yapa (2017), foi proposto um modelo fenomenológico para calcular o vazamento de óleo em condições de onda e turbulência oceânica baseado na quebra de gotículas e na coalescência. Seus resultados foram comparados com dados a partir de experimentos de laboratório que incluem diferentes tipos de óleo, de tempos e também de alturas de onda, o modelo proposto se mostrou coerente com os dados experimentais.

**Figura 2.33:** Distribuição do tamanho das gotas de óleo



**Fonte:** Nissanka e Yapa (2017).

O arrastamento inicial de óleo é uma característica do processo de dispersão, onde será determinada a quantidade de óleo disponível para outros processos como a dissolução de compostos mais hidrofílicos, do contrário, nenhuma dispersão pode ocorrer. A taxa de quebra e coalescência da gota líquida determina a distribuição do tamanho da gota de óleo dispersa, que irá influenciar no seu transporte (flutuante). O colapso e a coalescência de gotas acaba sendo um equilíbrio entre forças hidrodinâmicas, causando uma deformação nas gotas e as forças internas dentro das gotas (NISSANKA e YAPA, 2017).

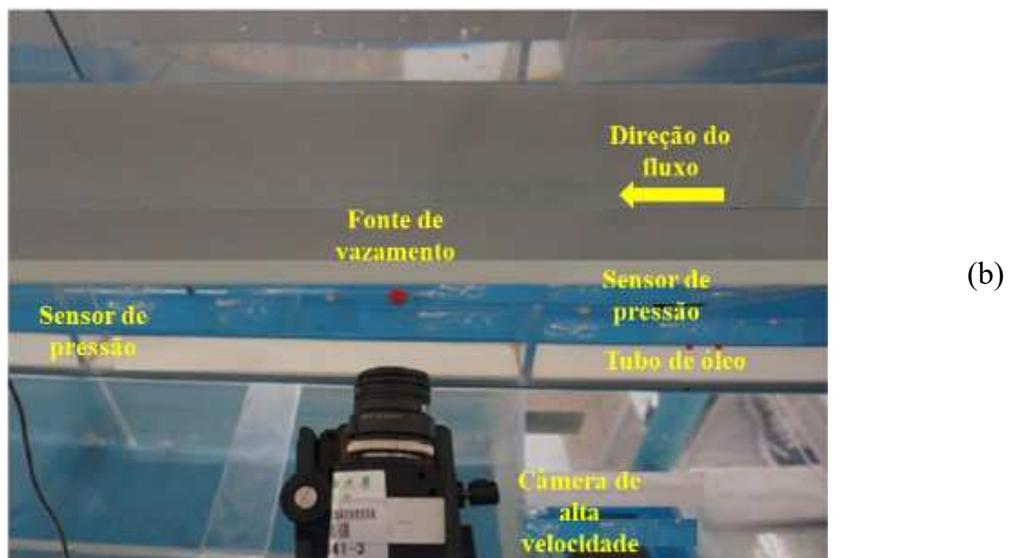
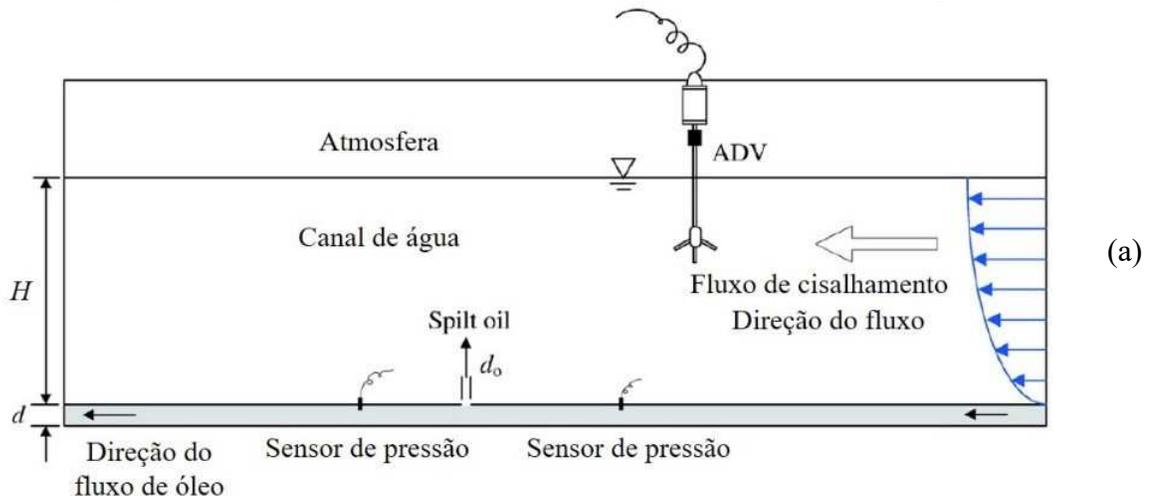
### ***2.5.2 Estudos experimentais de vazamento de óleo em dutos***

Zhu et al. (2017a) propôs examinar melhor a disseminação subaquática do derramamento de óleo em um aparato experimental, avaliando os efeitos do fluxo de cisalhamento e a pressão onde está localizado o vazamento. As características do detalhamento das gotículas de óleo são discutidas (Figura 2.34a). Um fluxo de cisalhamento constante com a velocidade média variando de 8,6 cm/s a 22,0 cm/s foram gerados na região de vazamento. Detalhe das gotículas de óleo tais como a quebra e coalescência não foram consideradas nos estudos numéricos pelos autores.

Os experimentos foram conduzidos em um canal de água de recirculação que tem 1,5 m de comprimento, 0,1 m de largura e 0,3 m de altura. Um furo circular com diâmetro de 2 mm foi aberto na parte superior do tubo localizado a 2 m a jusante da entrada do canal, conforme a (Figura 2.34b). As gotículas de óleo se alinham sucessivamente formando aproximadamente uma

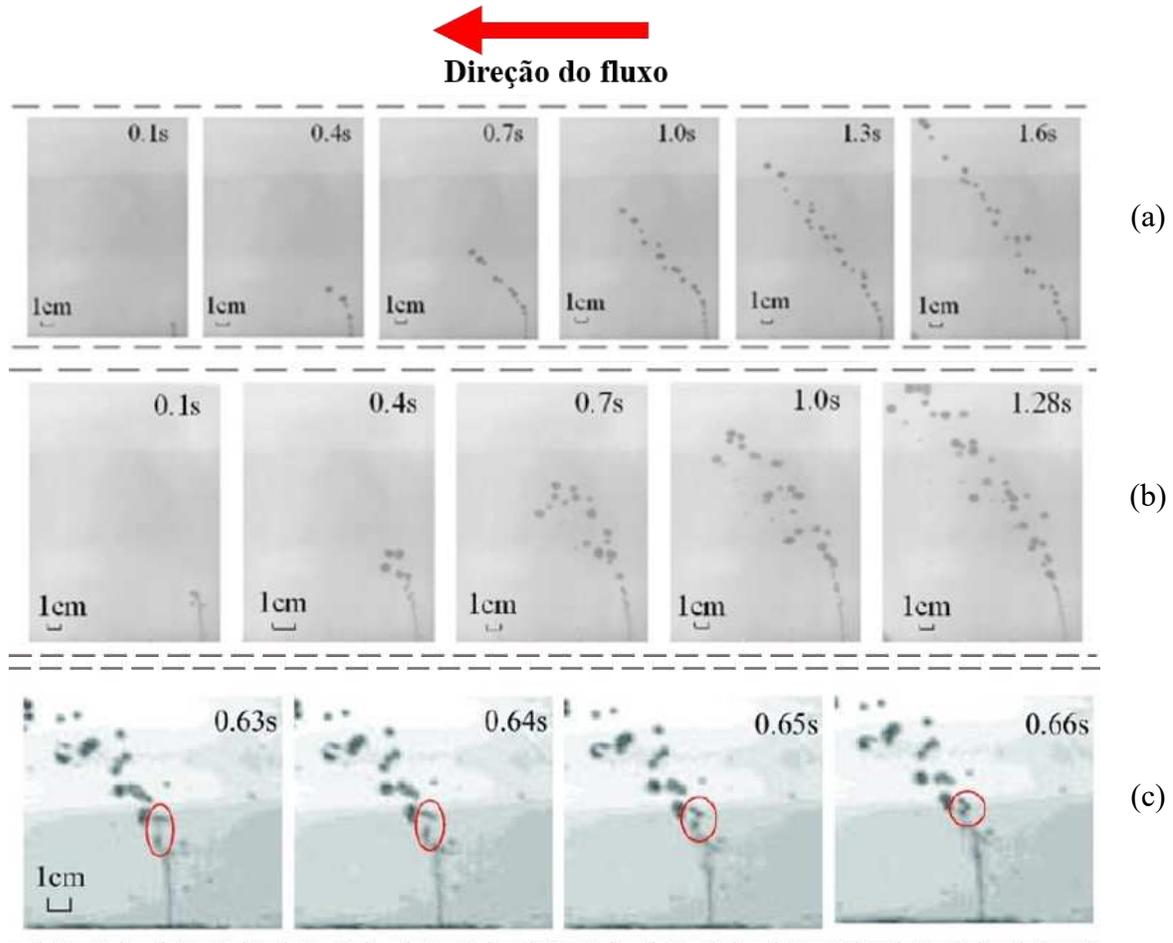
linha reta e a diferença de pressão varia de 800 Pa a 1600 Pa. Este padrão de propagação é considerado como o segundo tipo (modelo B). Então, a fluutuabilidade das gotas e a corrente de cisalhamento determinam o transporte das gotículas de óleo individuais enquanto a partida inicial torna-se insignificante (Figura 2.35a). Através das observações experimentais, verifica-se que tanto a ruptura quanto a coalescência de gotículas de óleo têm duas formas, como é possível ver na Figura 2.35b. A primeira forma de quebra é que uma gota de óleo é deformada inicialmente e alongada devido à turbulência da corrente ambiente em seguida é cisalhada em duas partes pela força de corte do fluxo de água, vide a Figura 2.35c.

**Figura 2.34:** Esquema da montagem experimental: (a) arranjo experimental no canal de água; (b) câmera de alta velocidade em um lado do canal (vista superior)



Fonte: Zhu et al. (2017a).

**Figura 2.35:** Processo de flutuação de dispersão subaquática: (a) propagação subaquática (padrão de cadeia linear); (b) padrão de transporte da pluma de óleo; (c) modelo padrão de pluma de óleo



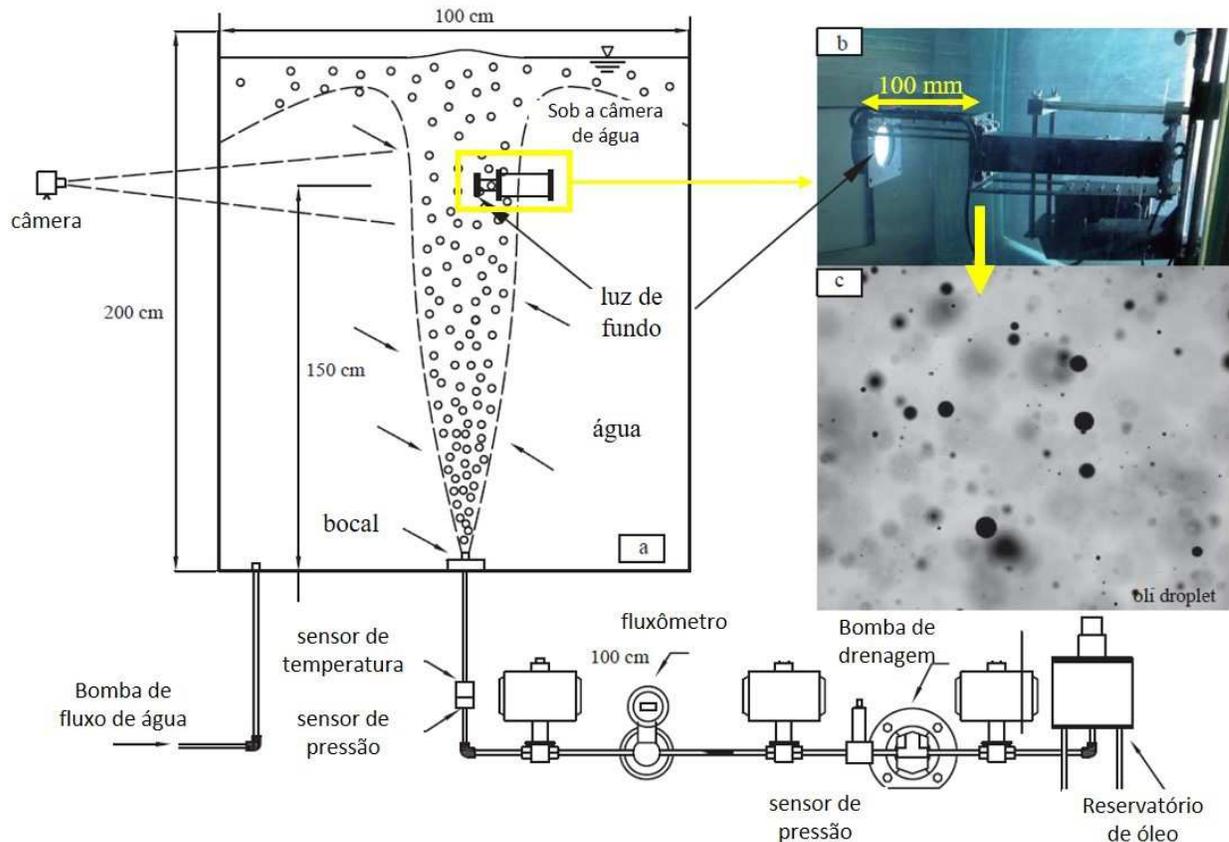
**Fonte:** Adaptado de Zhu et al. (2017a).

Li et al. (2018) propôs estudos em experimentos em tanque de água com aplicação de análise de imagem para estimar o tamanho da dispersão da gotícula de óleo. De acordo com Tang e Masutani (2003), a análise de imagens usada para medições de tamanho de gotas foi o método de escolha que pode fornecer uma visão qualitativa dos dados quantitativos.

Nos experimentos, o tamanho das gotículas de óleo disperso foi medido por duas câmeras industriais que foram calibradas usando uma escala de micrômetro. As câmeras foram usadas para monitorar o processo de formação de gotas de óleo e padrão de fluxo em tempo real, sendo colocados a uma altura de 150 cm acima do bocal. Foi possível capturar o movimento das gotas a 17 frames por segundo (fps). A análise de imagem permitiu discernir as gotículas densas

individuais em relação as outras. A observação da distribuição do tamanho de gotículas de óleo durou pelo menos 2 min para que se pudesse obter um número suficiente de imagens, (Figura 2.36).

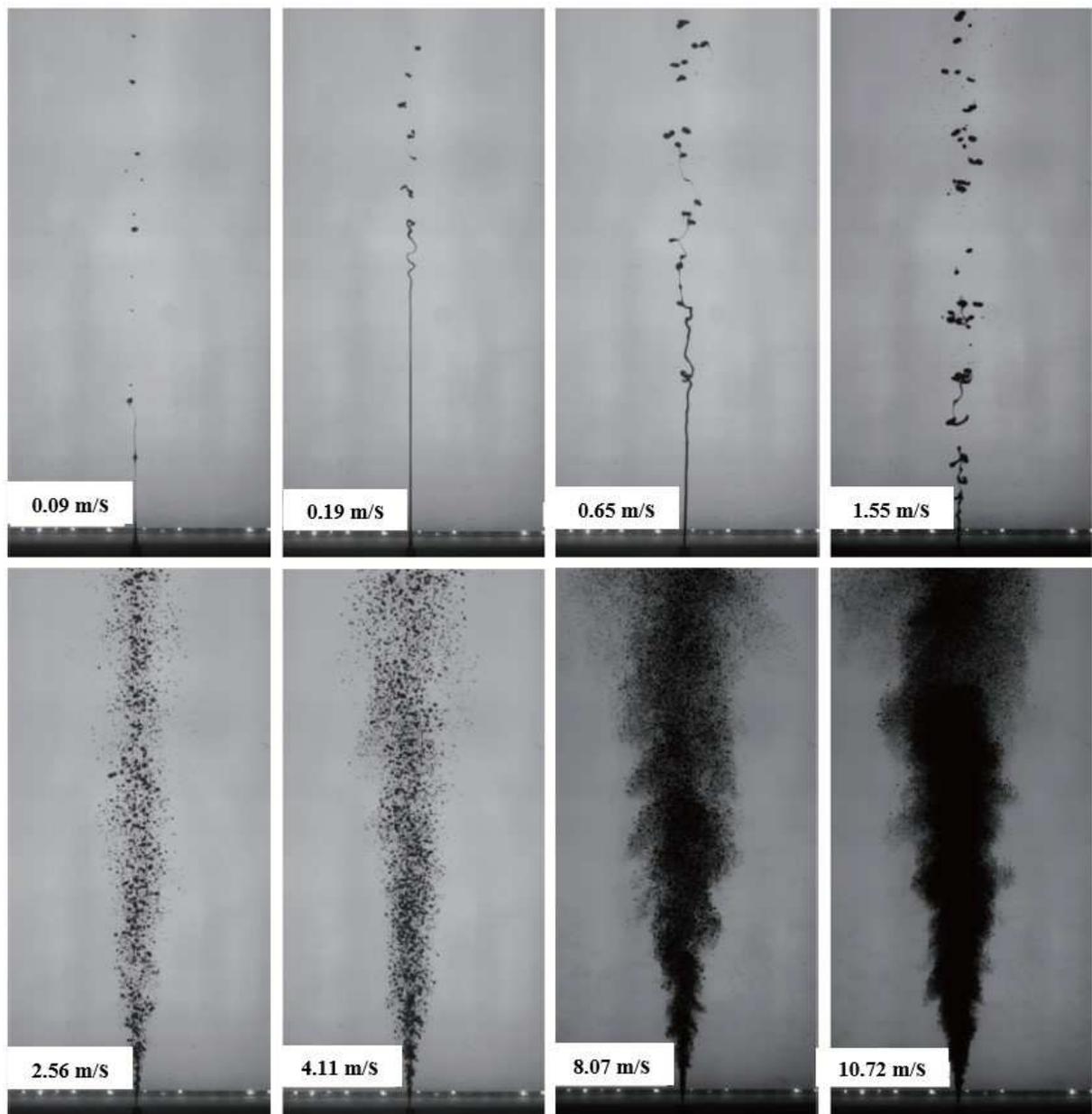
**Figura 2.36:** Diagrama esquemático do tanque de água experimental



**Fonte:** Li et al. (2018).

No regime de ruptura laminar, um jato estável foi formado sendo elevado a uma certa altura e depois se desfez em gotas individuais. O jato estava totalmente turbulento e acabou sendo mostrado em um grande número de gotículas menores para cima com uma certa dispersão. O regime de ruptura foi localizado no domínio de transição onde a formação das gotículas de óleo ocorreu por três regimes de desenvolvimento totalmente diferente (Figura 2.37).

**Figura 2.37:** Imagens de óleo descarregado na água a partir de um bico de 1,95 mm com diferentes velocidades de vazamento

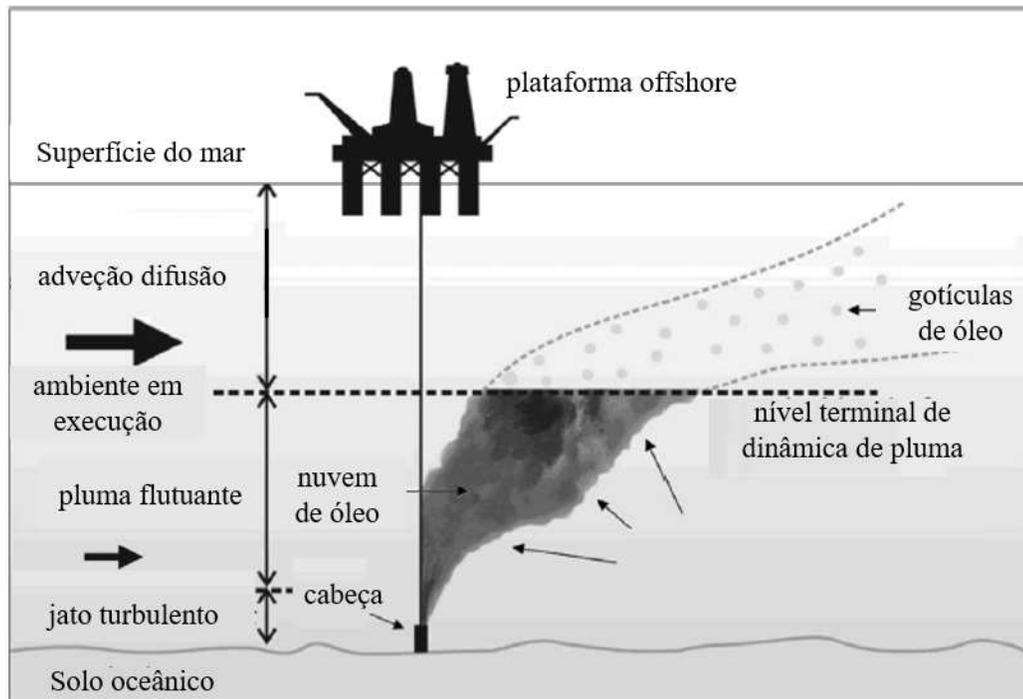


**Fonte:** Li et al. (2018).

Chen et al. (2015) propôs um estudo de transporte de petróleo sendo as três fases com dois submodelos (modelo de dinâmica em pluma e o modelo de difusão). As duas etapas foram analisadas com o modelo de dinâmica em pluma sendo tratado como uma intensidade jato/pluma e o terceiro estágio foi modelado com um modelo de advecção-difusão. De acordo com as

simulações, pode-se prever como o óleo é distribuído em uma coluna de água e onde o óleo surgiu primeiro na superfície uma vez que as informações de vazamento e as condições hidrodinâmicas são conhecidas. Os resultados das simulações são úteis no planejamento de contingência para resposta de emergência a derramamentos de óleo, vide Figura 2.38.

**Figura 2.38:** Esboço do processo de derramamento de óleo subaquático



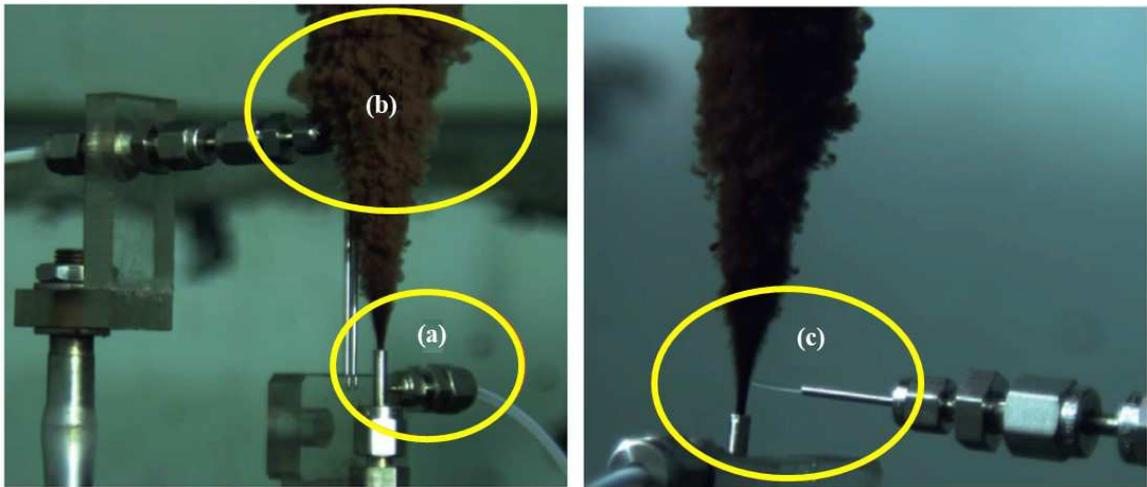
**Fonte:** Chen et al. (2015).

Brandvik et al. (2018) estudaram as técnicas de injeção de dispersantes submarinos recomendando técnicas relevantes para estudos de laboratório e equipamentos de resposta operacional. O fator significativo foi o ponto de injeção do dispersante em relação à liberação do óleo. Todas as técnicas de injeção testadas apresentaram reduções significativas no tamanho das gotículas de óleo. No entanto, a mistura de dispersantes não foi usada para estudos experimentais de injeção submarina de dispersantes, o que poderia subestimar a eficácia do dispersante e produzir resultados que podem não ser representativos de condições de campo de escala aumentada.

Para a primeira situação de inserção simulada: Dispersante foi injetado no óleo antes da saída do bico. Esse procedimento foi desenvolvido para analisar a ferramenta de inserção de dispersantes usada em Macondo, no Golfo do México, em 2010.

Na situação (a), o dispersante foi injetado no fluxo de óleo por uma linha separada, antes do ponto de liberação. Já na situação (b), na segunda situação, acima do bico, o dispersante foi injetado no centro do jato de óleo ou pluma a diferentes distâncias acima do bocal. Para a situação (c), o dispersante foi injetado horizontalmente no jato de óleo acima do bico. Na distância mínima do feixe, o dispersante tinha uma velocidade suficiente para atingir o centro do jato de óleo. Quando o dispersante foi injetado a distâncias maiores o feixe foi dobrado para cima pela água arrastada e misturado na pluma de óleo mais acima do ponto de liberação, vide a situação (c), como mostrado na Figura 2.39.

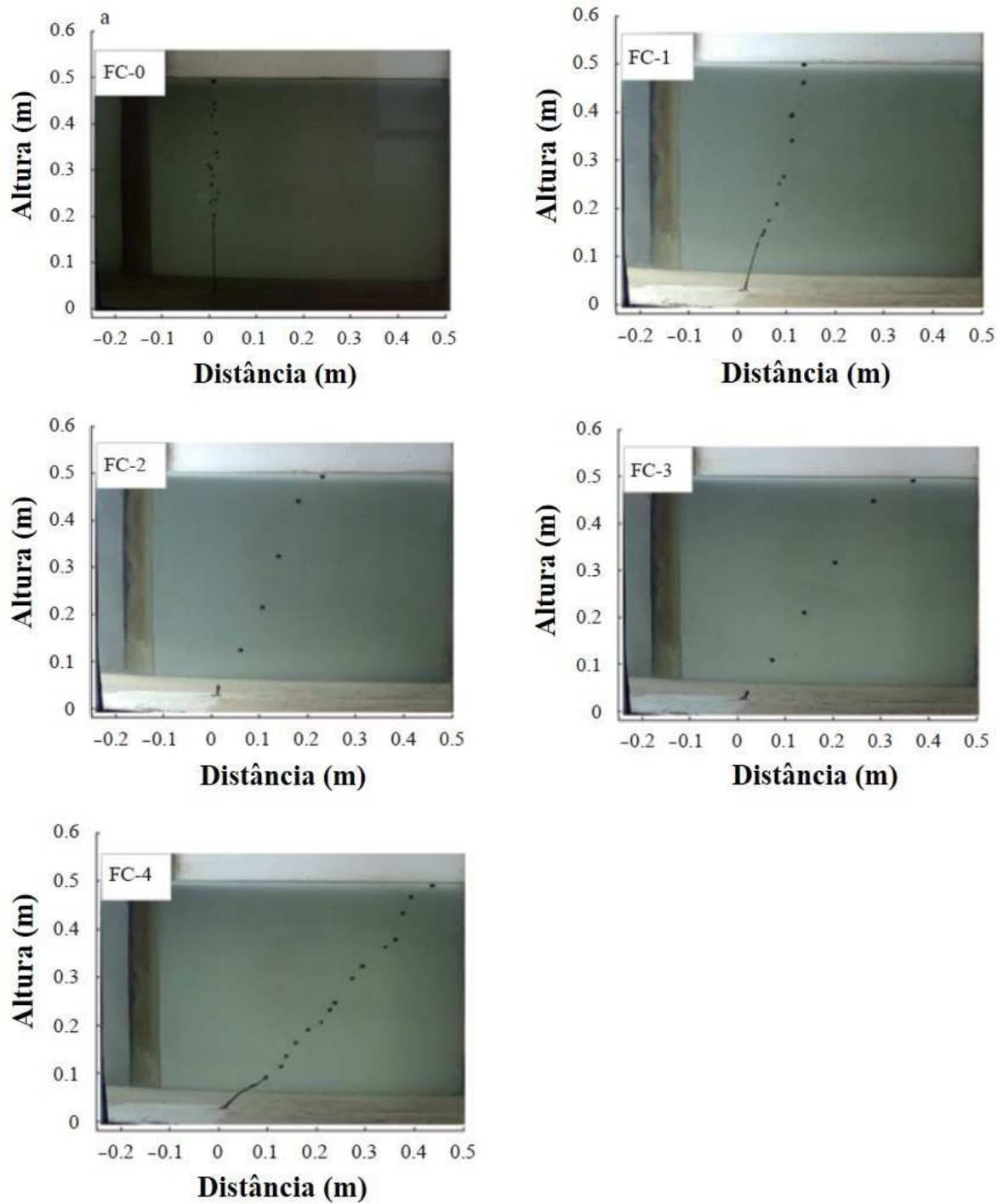
**Figura 2.39:** Ilustração do arranjo de liberação usado neste estudo com opções para injeção de dispersante pela ferramenta de inserção simulada



Fonte: Brandvik et al. (2018).

Yang et al. (2018) realizaram estudos experimentais variando fluxos e condições ambientais. As condições experimentais utilizadas pelos autores foram descargas lentas em ambiente não estratificado de estagnação/fluxo e jatos flutuantes em ambiente de fluxo não estratificado em ambiente estagnado estratificado. A validação do modelo envolve comparações detalhadas que incluem a trajetória do óleo derramado, o tempo de vazamento e o máximo distância de migração quando o óleo atinge a superfície do mar. A Figura 2.40 mostra a trajetória do óleo na água. A faixa de difusão da superfície aumentou com o aumento da densidade do óleo, velocidade da corrente, velocidade de vazamento e diâmetro do vazamento. Em particular, o efeito da corrente na distância de migração lateral e os da velocidade de vazamento na faixa de difusão de superfície foram mais evidentes.

**Figura 2.40:** Trajetória do óleo na água analisada pelos autores



Fonte: Yang et al. (2018).

### 2.5.3 Estudos experimentais e numéricos de vazamento de óleo

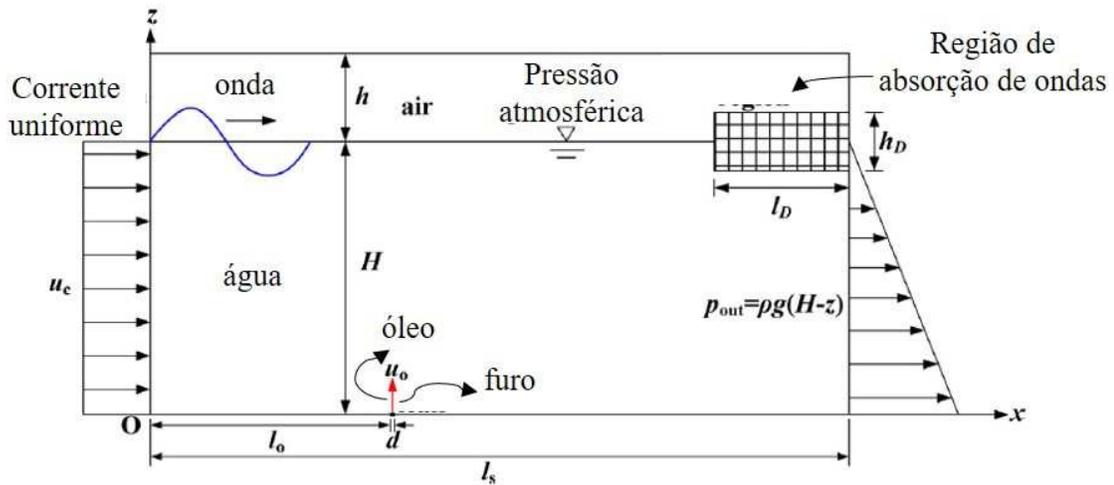
Zhu et al. (2017b) propuseram examinar vazamentos de óleo sob efeitos de onda e corrente. A profundidade da água foi tomada como base no Mar da Tailândia que tem uma profundidade de lâmina d'água aproximadamente de 18 m e uma altura de onda significativa de 1 m com comprimento médio de 54 m. Os efeitos do ambiente marinho, tamanho do ponto de vazamento, velocidade de vazamento, densidade do óleo e viscosidade no processo de flutuação e deriva do óleo foram discutidos. A validação do modelo foi dada pelo esquema da montagem experimental no canal de água (Figura 2.41), em que foram dispostos, uma câmera de alta velocidade em um lado do canal (vista superior), ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter* - Velocímetro Acústico Doppler) e um aparato experimental como foi colocado em Zhu et al. 2017a, (Figura 2.34b).

Para capturar a onda de superfície e à deriva do óleo, três fluidos (óleo, água) foram considerados e são tratados como incompressíveis. Na interface de fluidos nenhuma mudança de fase é assumida. Foram realizadas simulações bidimensionais (2D) com eixo X representando a orientação horizontal e o eixo Y representando a direção vertical. O modelo multifásico foi implementado no Fluent versão 15.0 e para discretizar as equações diferenciais parciais relevantes, foi adotado o Modelo de Volume de Fluido e o acoplamento entre os campos de pressão e velocidade é resolvido pelo SIMPLE para satisfazer a lei de conservação da massa. O domínio computacional é uma região retangular de 300 m na direção do fluxo (X) e 25 m na direção vertical (Y). A água ocupa a região inferior com altura de 18 m e a fase ar ocupa a região superior. A região de absorção de onda é uma região retangular relativamente pequena adjacente à saída direita e é simétrica em relação à superfície da água parada.

O vazamento está localizado no leito do mar a 100 m a jusante da entrada esquerda, Figura 2.41. Foi observado que tanto o padrão de dispersão quanto a distância de migração do óleo derramado coincidem com os resultados experimentais. A altura crescente da gotícula de óleo em diferentes pressões de vazamento também está de acordo com os testes avaliados, Figura 2.42. O processo de óleo flutuante derramado em diferentes velocidades de vazamento foi plotado, onde se pode observar que, quanto maior a velocidade de vazamento, menor é o tempo necessário para que o óleo atinja o nível da água. Uma grande velocidade de vazamento significa uma grande quantidade de óleo lançada na correnteza levando a uma alta concentração de

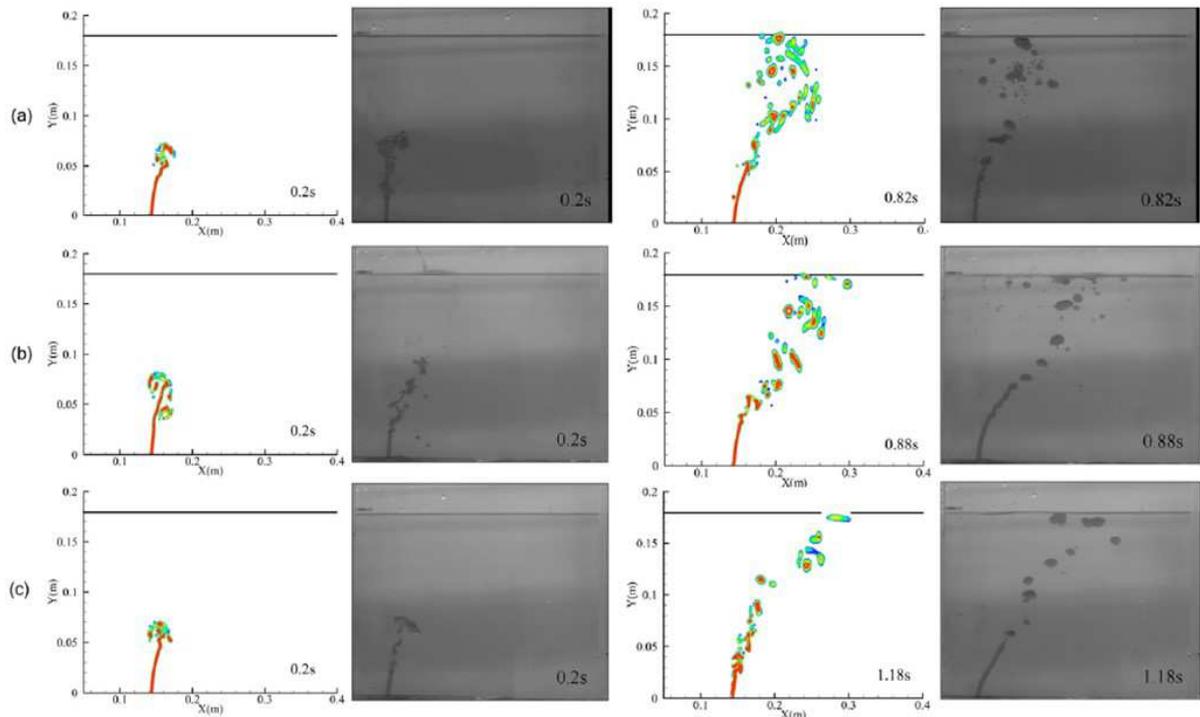
dispersão na superfície da água. A ação da onda é destacada perto da superfície da água reduzindo a taxa crescente de óleo derramado (Figura 2.43).

**Figura 2.41:** Esquema do domínio computacional e condições de contorno



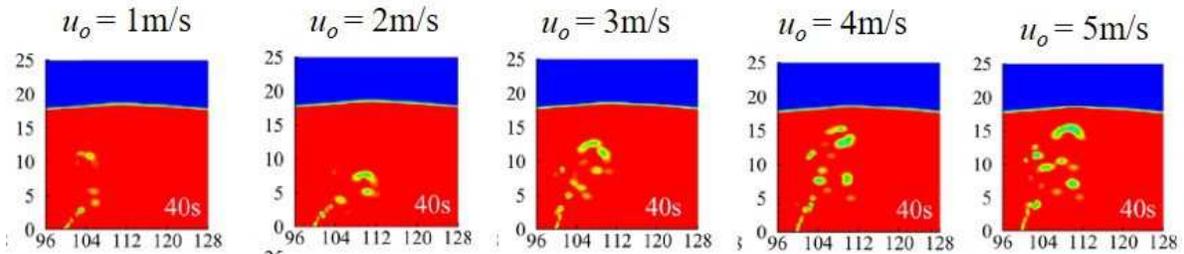
Fonte: Zhu et al. (2017b).

**Figura 2.42:** Comparação da altura crescente de gotículas de óleo e dispersão subaquática em diferentes pressões de vazamento entre os resultados experimentais e resultados para fração volumétrica de óleo em diferentes densidades



Fonte: Zhu et al. (2017b).

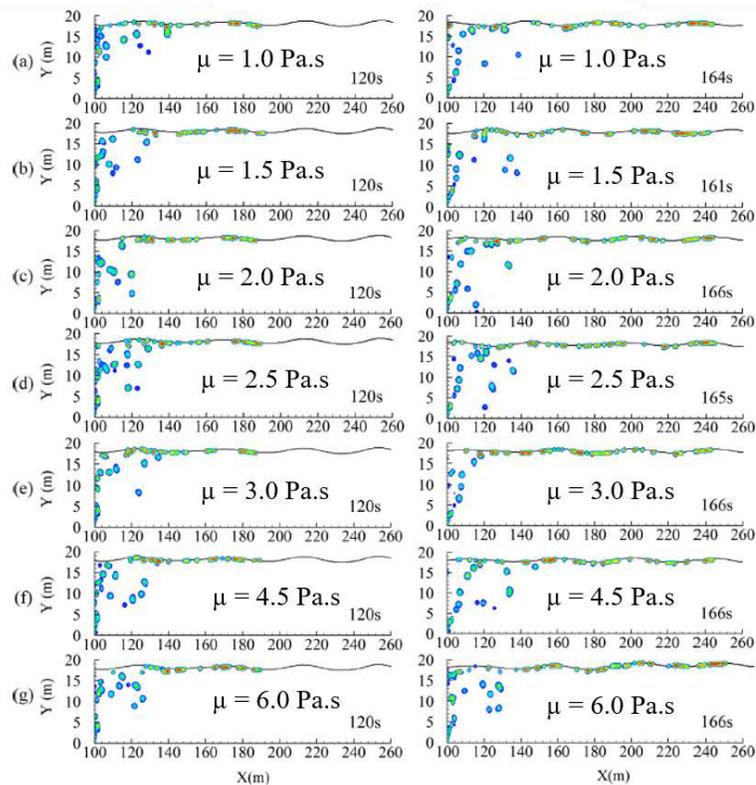
**Figura 2.43:** A altura crescente e a dispersão subaquática de gotículas de óleo durante o processo de flutuação em diferentes vazões sob a ação combinada de onda e corrente



Fonte: Zhu et al. (2017b).

Pode-se observar também a altura crescente das gotículas de óleo em função da viscosidade de óleo em comparação ao processo flutuante. À deriva da superfície há pouca diferença em ambas as situações com tempo de variação no processo de drenagem, vide (Figura 2.44).

**Figura 2.44:** A distância de migração horizontal e deriva de superfície de gotículas de óleo durante o processo de deriva em diferentes viscosidades de óleo sob a ação combinada de onda e corrente

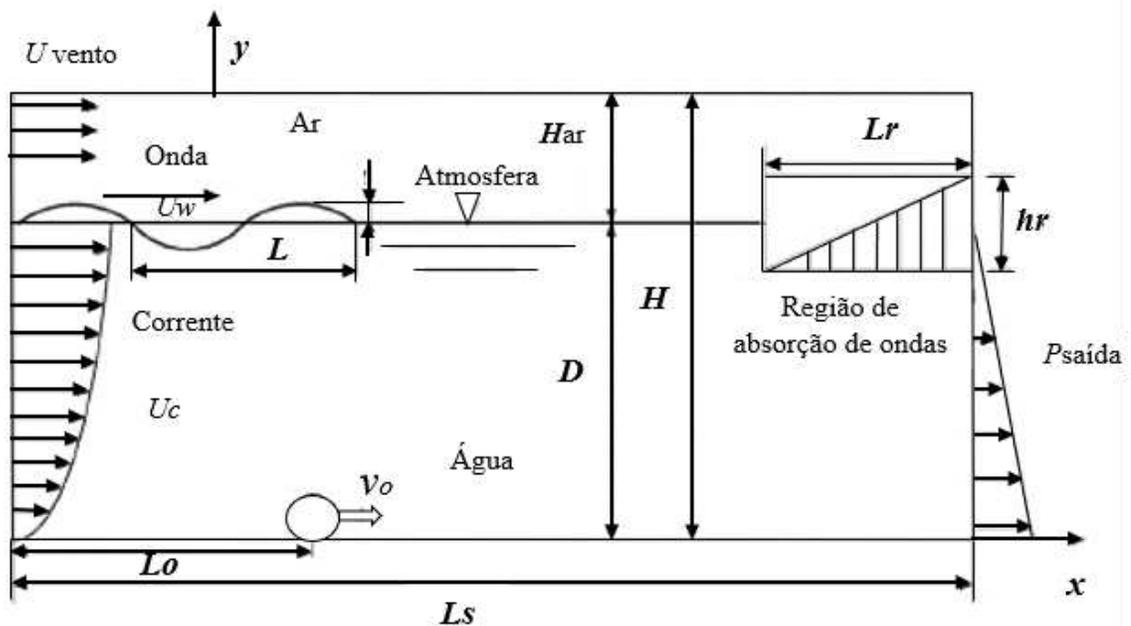


Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2017b).

Sun et al. (2019) propuseram analisar os efeitos de comprimento de onda, direção de vazamento, velocidade da correnteza, velocidade do vento e outros parâmetros utilizando o método de volume de fluido e o modelo de turbulência Realizable. O tempo adimensional necessário e a maior distância de migração horizontal para o óleo atingir a superfície livre foram analisados. A pesquisa tem como objetivo o estudo das características de migração das partículas de óleo em diferentes fatores e propõe uma fórmula para a predição da distância de difusão de óleo.

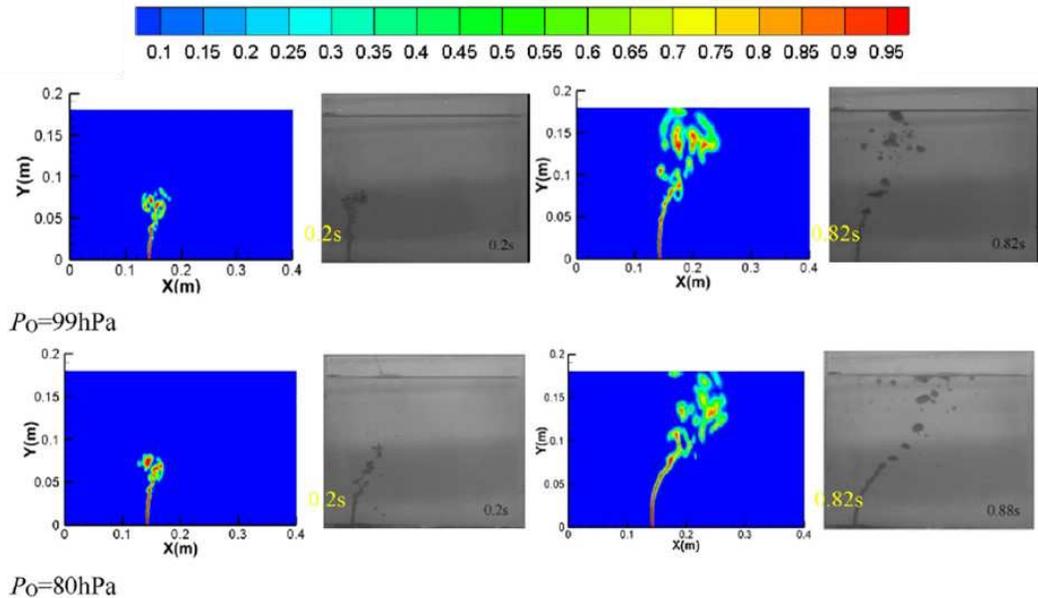
Os autores deram enfoque ao processo de deriva vertical e horizontal de deslocamento do óleo vazado. Adotou-se um modelo 2D de 265 m de comprimento ( $L_s$ ) e 14 m de altura ( $H$ ) como mostrado na Figura 2.45. O domínio consiste em partes superiores e inferiores. A área inferior é ocupada pela água do mar e tem uma altura da coluna d'água de 10 m, já a área superior é ocupada por ar com a altura de 4 m ( $H_{ar}$ ). O lado esquerdo da área é a entrada de corrente e onda, e a distância entre a entrada e o vazamento ( $L_o$ ) é de 60 m. Um duto submarino no mar de Bohai, durante seu período de serviço, é tomado como objeto de pesquisa. O diâmetro interno do duto é de 0,5 m e o diâmetro do vazamento é selecionado como sendo de 30 mm. Para validar a confiabilidade do modelo via CFD, os resultados da simulação são comparados com dados experimentais conduzidos por Zhu et al. (2017a, 2017b), visto na Figura 2.46.

**Figura 2.45:** Geometria do domínio de simulação



Fonte: Sun et al. (2019).

**Figura 2.46:** Contornos da fração volumétrica de óleo sob condições experimentais e de simulação (os contornos são apresentados na fração de volume de óleo)



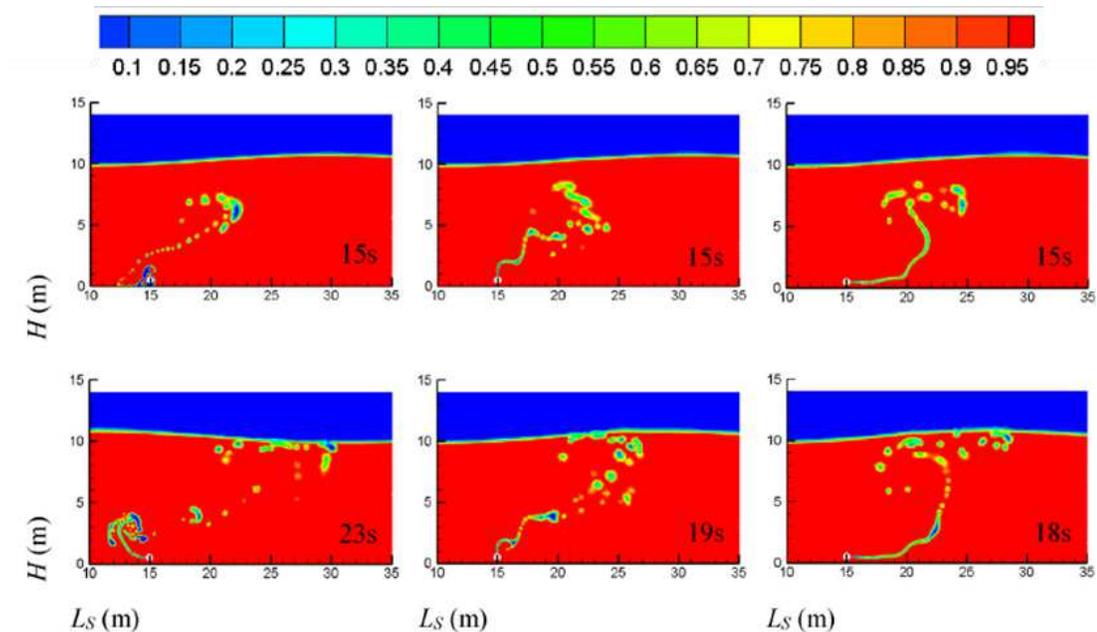
**Fonte:** Sun et al. (2019).

Como pode ser observado na Figura 2.47, para o vazamento situado no topo do tubo, o momento inicial de deslocamento do óleo é em direção a superfície e a altura vertical de subida é maior do que as outras duas condições de vazamento em diferentes localizações. Em seguida, o óleo derramado flui a jusante e move-se para cima sob a ação de corrente e flutuabilidade, enquanto a velocidade ascendente vertical se torna lenta. Em comparação com as outras duas condições (a esquerda e a direita do vazamento do topo do duto) a fuga de óleo a jusante tem o menor tempo de subida vertical e a segunda à maior distância de migração horizontal.

No início do vazamento de óleo apontando para montante, o óleo se move sob a ação do momento inicial, devido à resistência da corrente, além de se mover para cima a uma certa distância e depois migra para jusante, como se pode perceber na Figura 2.48. Pode ser visto a partir da distribuição da fase de óleo na Figura 2.48a, com o aumento da velocidade de vazamento, a concentração de óleo derramado em torno da posição de vazamento também é maior, isso ocorre porque quando o vazamento aponta para baixo, ocorre a formação de vórtice no sentido anti-horário no lado esquerdo da pluma perto da superfície. A Figura 2.48b mostra que, sob a influência do vórtice, partículas do óleo se moverão contra a direção do fluxo de água levando a formação do fenômeno.

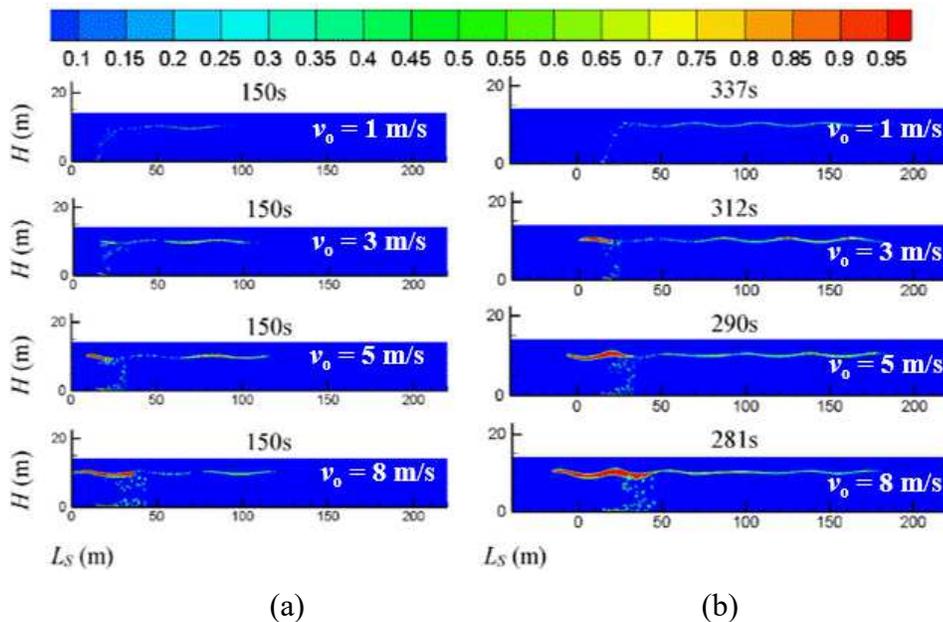
**Figura 2.47:** Características de espalhamento subaquático do óleo derramado sob diferentes

direções de vazamento ( $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ ,  $v_o = 5 \text{ m/s}$ ,  $u_{c\text{máx}} = 0,5 \text{ m/s}$ ,  $L = 40 \text{ m}$ ,  $u_{\text{wind}} = 0 \text{ m/s}$ , contornos estão presentes na fração volumétrica da água)



Fonte: Sun et al. (2019).

**Figura 2.48:** Processo de deriva de óleo derramado com tempo de vazamento sob diferentes taxas de vazamento (vazamento a jusante =  $850 \text{ kg/m}^3$ ,  $u_{c\text{máx}} = 0,1 \text{ m/s}$ ,  $L = 40 \text{ m}$ ,  $u_{\text{wind}} = 0 \text{ m/s}$ , contornos são apresentados na fração de volume de óleo)



Fonte: Adaptado de Sun et al. (2019).

# Capítulo 3

## 3 METODOLOGIA

---

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem – LPFI, da Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ) e no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos – LCTF, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), ambos do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Para estudar o escoamento externo água/óleo em *risers* submersos com orifício de vazamento, decidiu-se analisar uma área da Bacia de Santos, que é uma bacia sedimentar localizada na plataforma continental brasileira. Limita-se a norte com a Bacia de Campos, através do Alto de Cabo Frio e, a sul, com a Bacia de Pelotas através do alto de Florianópolis. De acordo com a Petrobras, a Bacia de Santos é a maior bacia sedimentar *offshore* do país, com uma área total de mais de 350 mil quilômetros quadrados e que se estende de Cabo Frio (RJ) a Florianópolis (SC), vide Figura 3.1. A empresa petrolífera afirma que os primeiros investimentos em estudos referentes à exploração e produção nesta bacia são dos anos 1970. De acordo com a Petrobras, décadas depois, voltou-se a investir na perfuração e produção de poços da Bacia de Santos. O sistema de análise petrolífero da bacia possibilitou identificar dois sistemas petrolíferos: Guaratiba-Guarujá e Itajaí-Açu-Ilhabela (ASSINE, et al. 2008).

A Petrobras afirma também que a descoberta de áreas comerciais se deu pelo desenvolvimento de novas tecnologias juntamente com parcerias que auxiliaram a superar novos desafios, como por exemplo, reservatório do pré-sal, constituindo assim uma das maiores províncias de petróleo do mundo.

**Figura 3.1:** Mapa dos campos do Pré-sal da Bacia de Santos no sul do Brasil



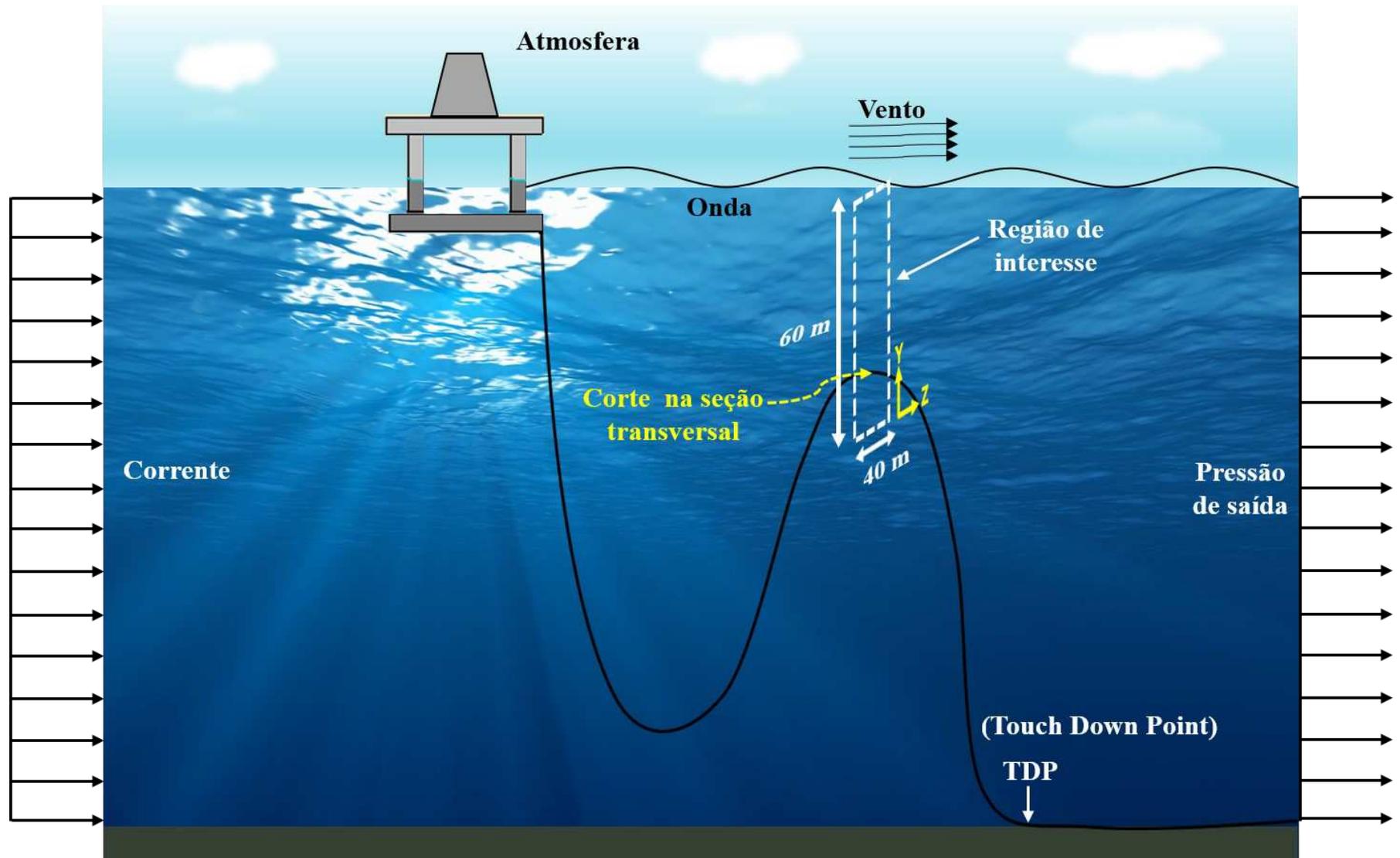
**Fonte:** Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018).

### 3.1 Descrição do Problema Físico

O foco do presente trabalho é estudar o efeito da dispersão de petróleo oriundos de vazamentos em *risers* submersos de uma determinada região específica da Bacia de Santos, localizada ao sul do Brasil, visando avaliar a dispersão do óleo vazado a partir de *risers* sob efeitos dinâmicos (movimentação da tubulação) e estáticos. Na indústria petrolífera, existem diferentes fluidos sendo transportados como óleo, água, gás, fluidos de extração (areia) entre outros através de vários tipos de *risers*.

Numa configuração *Lazy-Wave*, os *risers* flexíveis tendem a ter corcovas mais elevadas enquanto os *risers* rígidos mais baixas, sendo assim, não existe uma altura típica, variando de acordo com cada projeto adotado. Diante desta realidade, optou-se por analisar uma seção transversal de uma corcova elevada de um *riser* em configuração *Lazy-Wave*. Segundo Lemos (2020), a configuração *Lazy-Wave* é uma das configurações mais utilizadas pela Petrobras, atualmente, em seus projetos de produção de petróleo *offshore*. A estrutura de instalação *offshore* em *riser Lazy-Wave* analisada no presente trabalho com destaque da região de interesse para esta pesquisa está ilustrada na Figura 3.2.

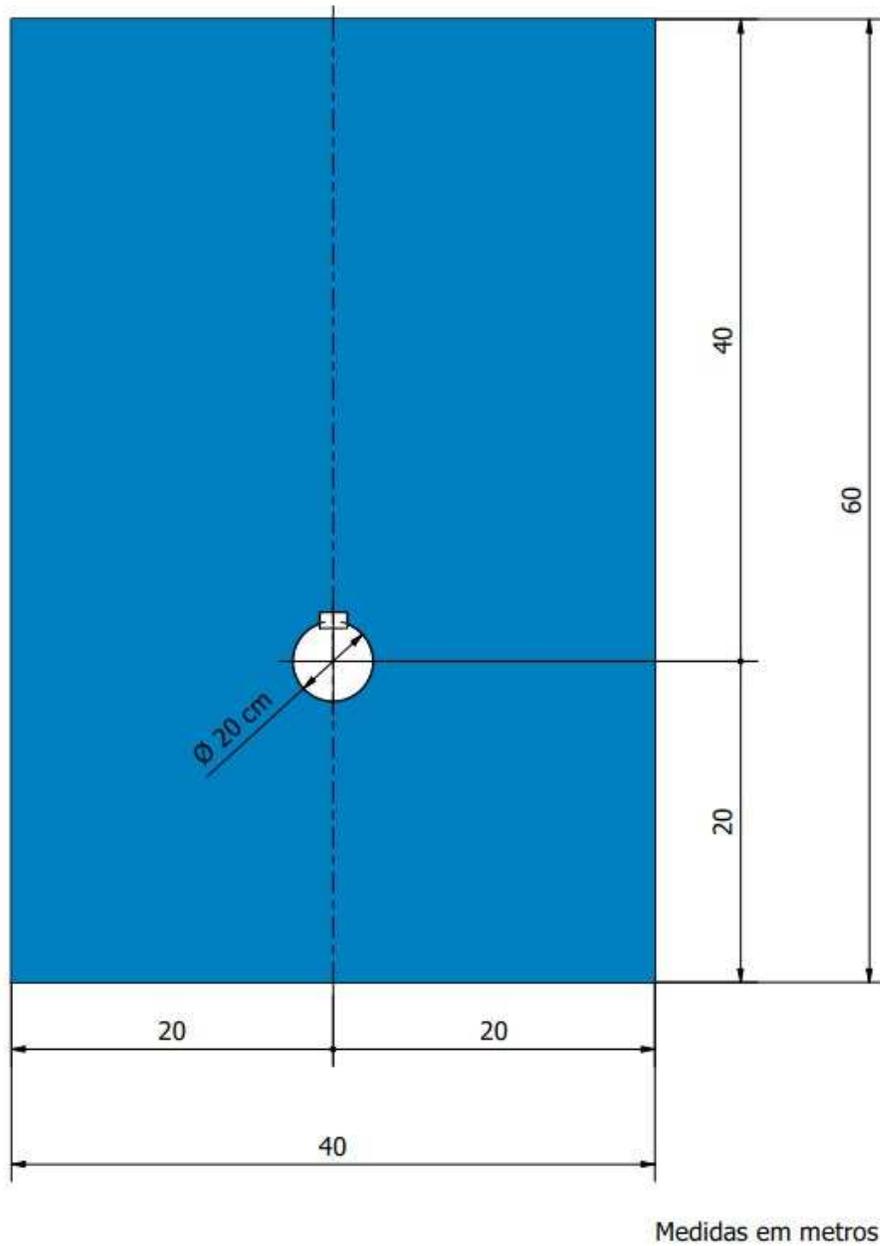
Figura 3.2: Estrutura de instalação *offshore* em *Riser Lazy-Wave* analisada no presente trabalho



Fonte: Próprio do autor (2021).

O problema físico analisado consiste na dispersão de petróleo advindo de um orifício de vazamento de uma seção transversal de uma corcova alta de um *riser* do tipo *Lazy-Wave* situado em uma região marítima de 60 m de altura e 40 m de largura. O *riser* tem um diâmetro de 20 cm e está localizado a 20 m de distância da seção de entrada mar e a 20 m da base (interior), como na Figura 3.3. A geometria foi gerada utilizando o Design Modeler da Ansys, de 2020.

**Figura 3.3:** Domínio físico analisado nesta pesquisa.



Fonte: Próprio do autor (2021).

### 3.2 Malha Numérica

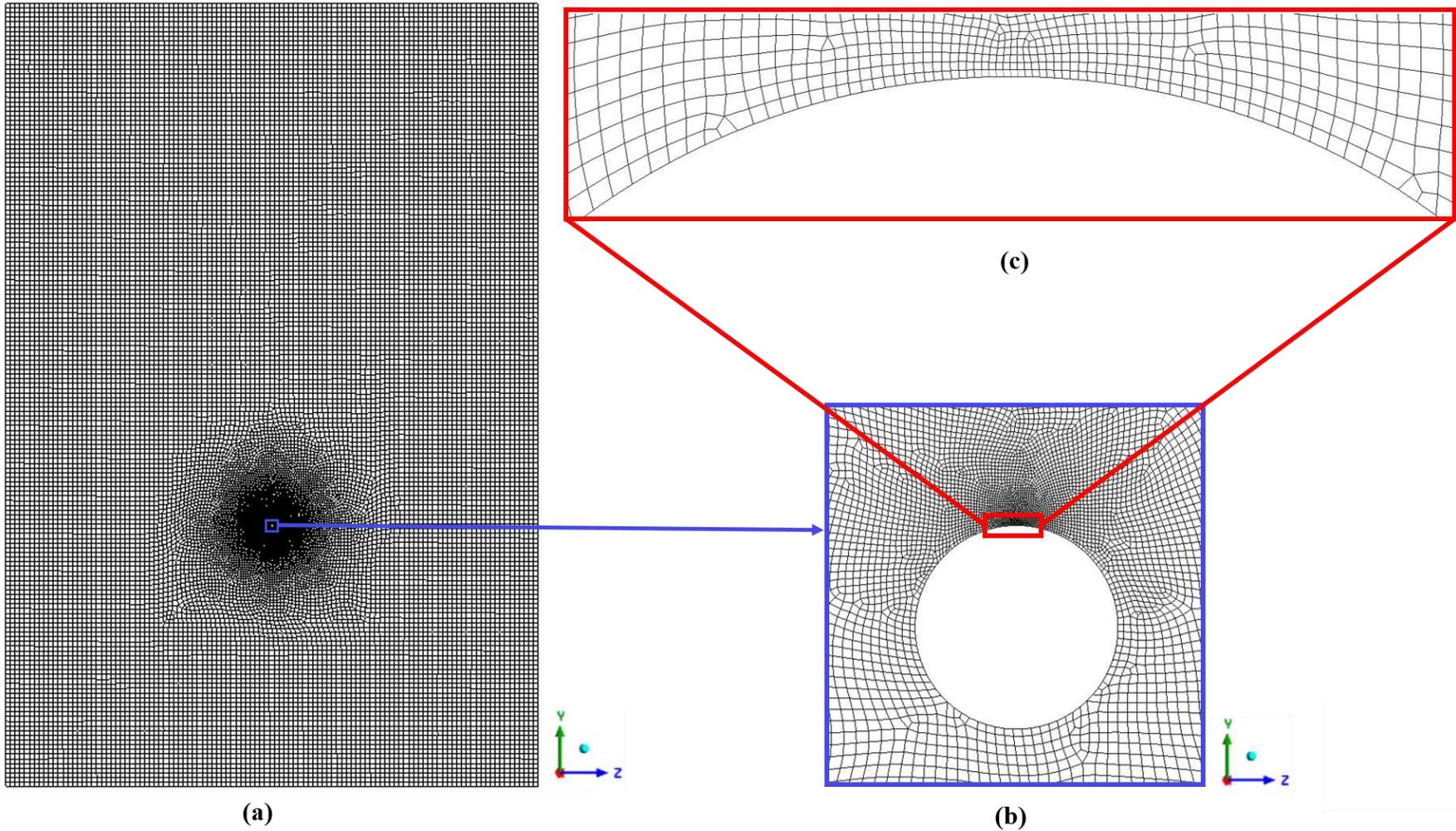
Para a geração da malha híbrida foi utilizada o Design Modeler, da Ansys, para gerar a geometria, o Meshing foi utilizado para geração da malha. Outras regiões de interesse, como a da entrada e da saída do mar e da atmosfera, foram gerados elementos com pouco refinamento nas condições de contorno adotadas. Na Figura 3.4a pode ser observado a malha adotada com 35.017 mil elementos hexaédricos e tetraédricos e 35.334 pontos nodais. Sendo apresentado, também, a região detalhada do *riser* e do orifício de vazamento (Figura 3.4b, c).

Durante toda a solução, a malha dinâmica apresenta deformações dos elementos em cada interação para cada instante. As Figuras ilustram a deformação dos elementos em diferentes instantes para uma velocidade de deslocamento do *riser* proporcional a velocidade de correnteza. Analisando a velocidade de correnteza e deslocamento do *riser* de 0,1 m/s (Caso 9), para um deslocamento do *riser* em um tempo de 5 s, pode ser observado pouca deformação dos elementos a montante do vazamento, vide Figura 3.5. Em um tempo de 10.3 s, observa-se o deslocamento dos elementos no sentido à jusante do escoamento de acordo com a velocidade da correnteza (Figura 3.6). Para um tempo de 31.3 s, observa-se que é, neste instante de tempo, em que os elementos apresentam uma maior deformação, onde o *riser* se deslocou em uma maior distância no sentido a direita do vazamento, batendo e voltando (Figura 3.7). Nos tempos finais, 59.5 s, observa-se pouca deformação dos elementos (Figura 3.8).

Aumentando a velocidade de deslocamento do *riser* de acordo com a velocidade de correnteza para 0,2 m/s (Caso 10), em um tempo de 5 s observa-se que, pouco foi o deslocamento a direita do vazamento, ou seja, no sentido a jusante do escoamento (Figura 3.9). Analisando o deslocamento do *riser* para um tempo de 10.3 s, observa-se uma maior deformação a direita em relação ao tempo anterior, vide Figura 3.10. Porém, em um tempo de 31.5 s, observa-se claramente uma grande deformação dos elementos próximos a parede do *riser* no sentido a jusante do escoamento, os mesmos são deformados de acordo com a movimentação (Figura 3.11).

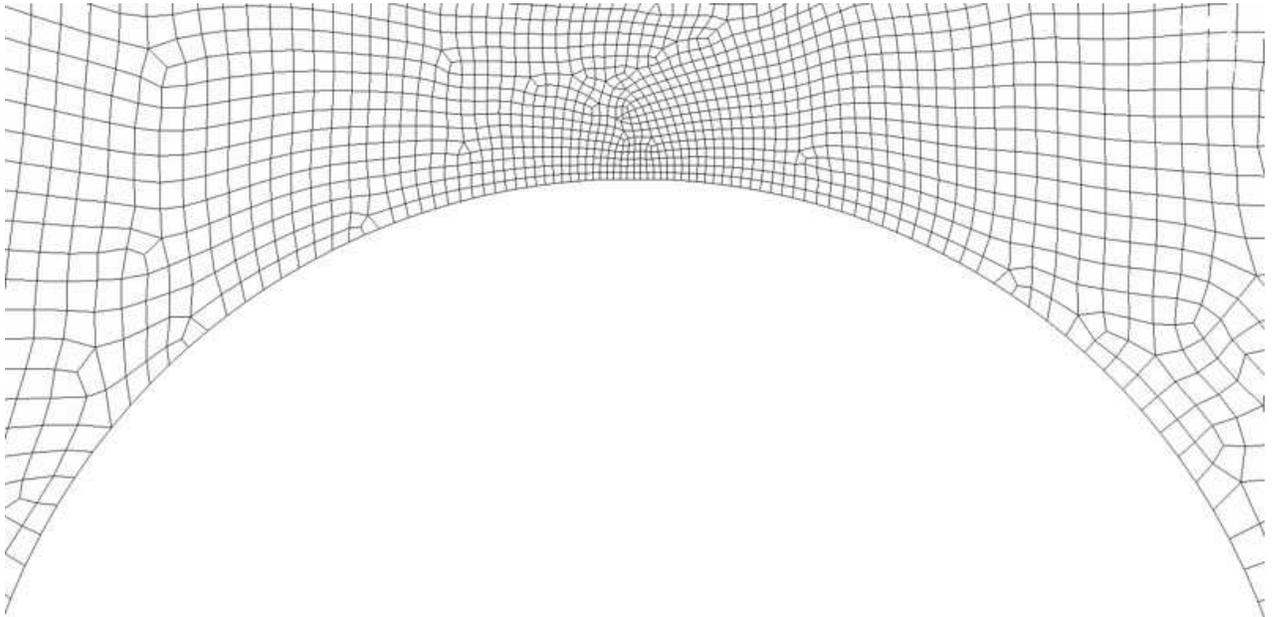
Analisando a deformação dos elementos em um tempo de 59.5 s, o *riser* se encontra com deslocamento a esquerda, ou seja, a montante do escoamento, onde, bate e volta de acordo com seu peso e velocidade de corrente, Figura 3.12.

**Figura 3.4:** (a) malha numérica representando o domínio mar e a seção transversal do *riser* analisado no presente trabalho;  
(b) detalhes da malha na região do *riser*; (c) região de vazamento

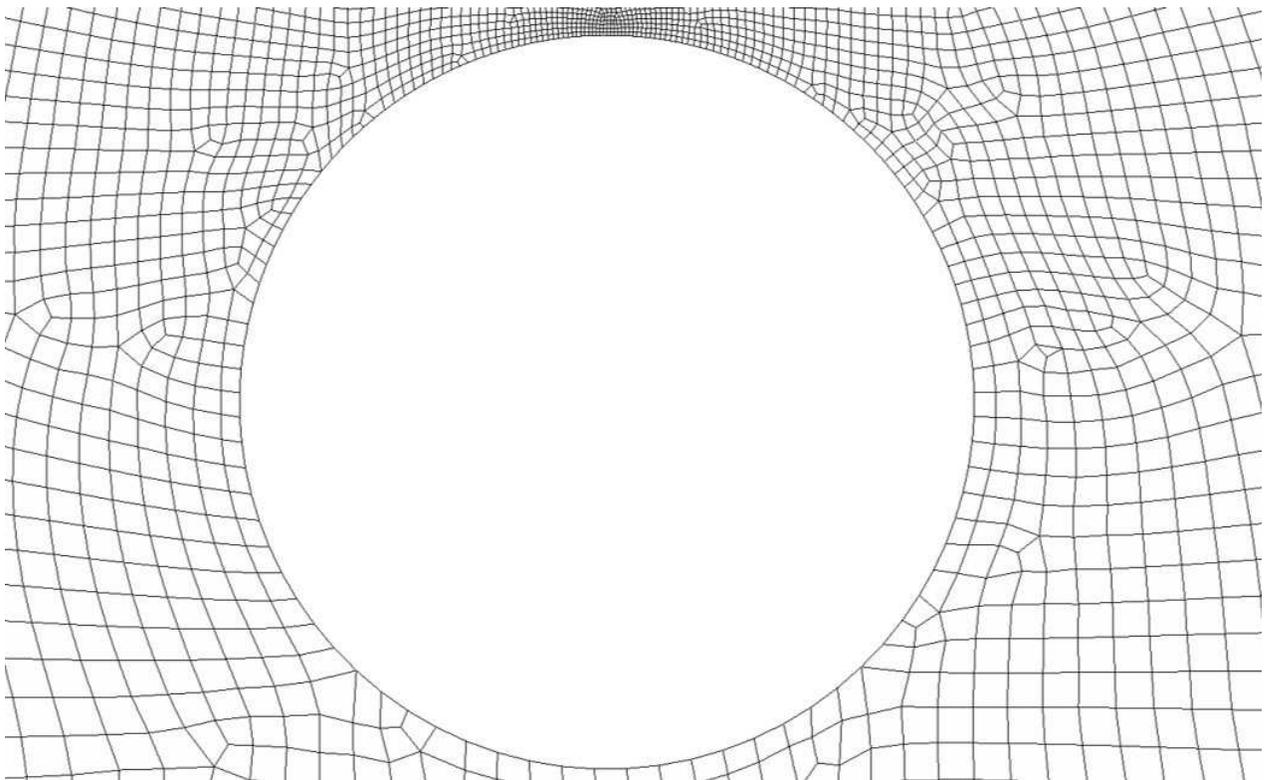


Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 3.5:** Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 5 s e velocidade de deslocamento de 0,1 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) *riser* em corte transversal



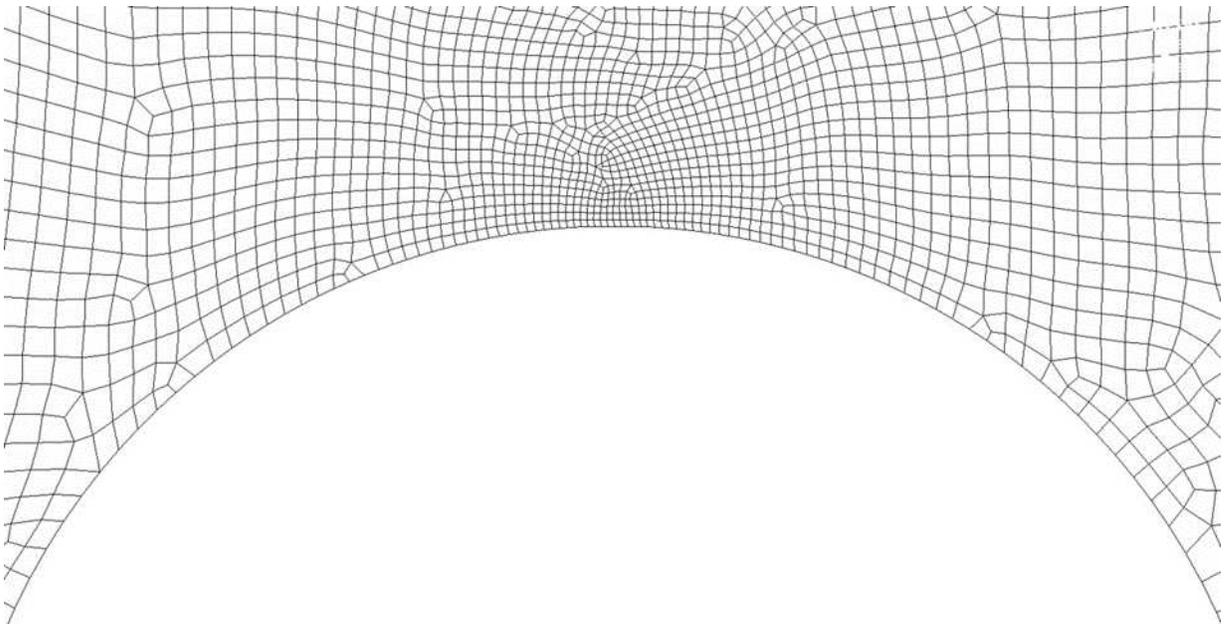
(a)



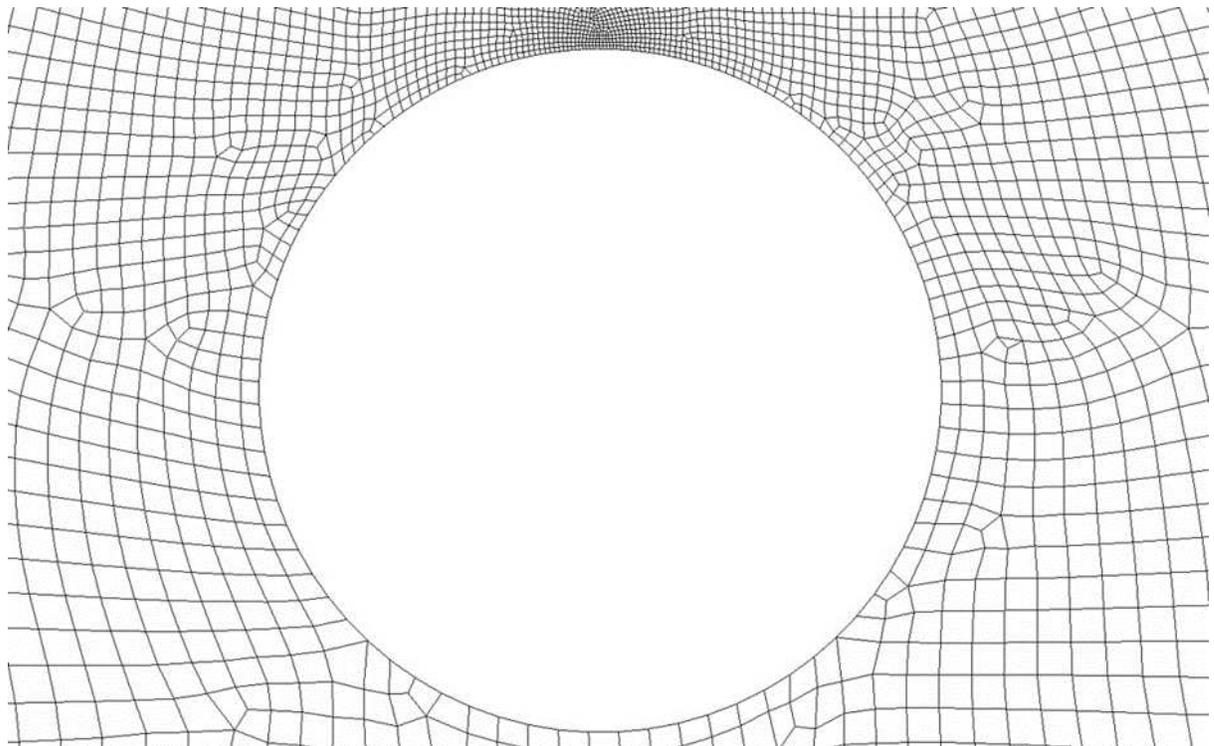
(b)

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Figura 3.6:** Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 10.3 s e velocidade de deslocamento de 0,1 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) *riser* em corte transversal



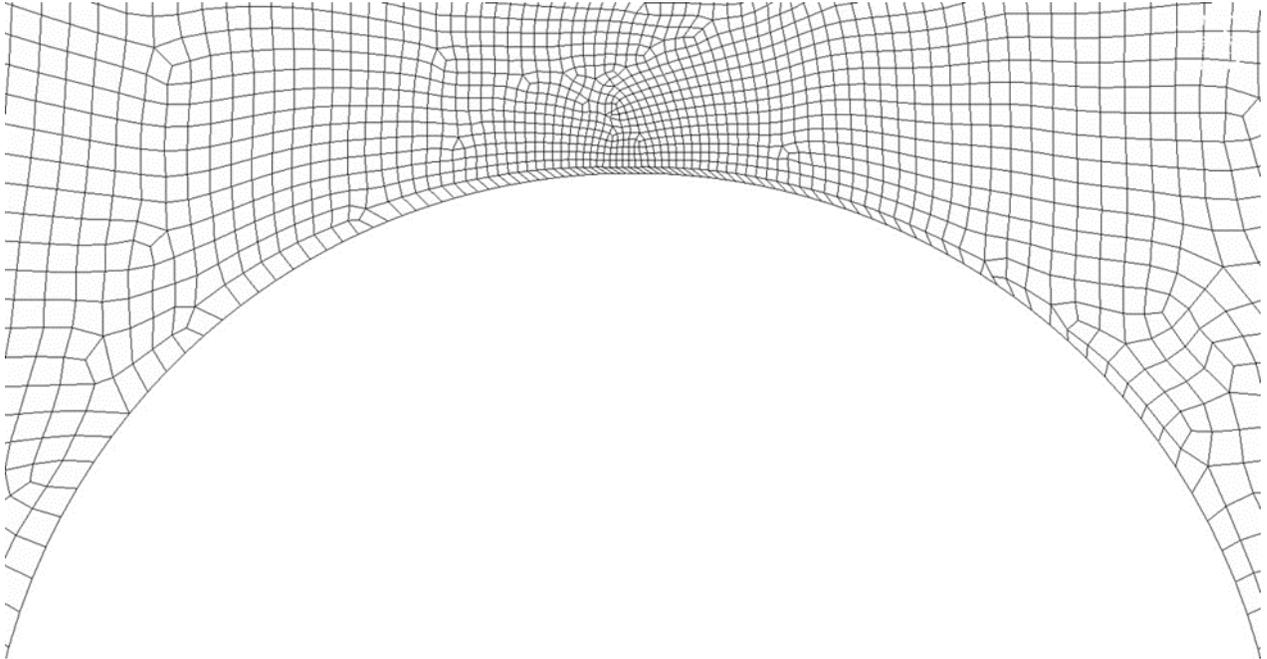
(a)



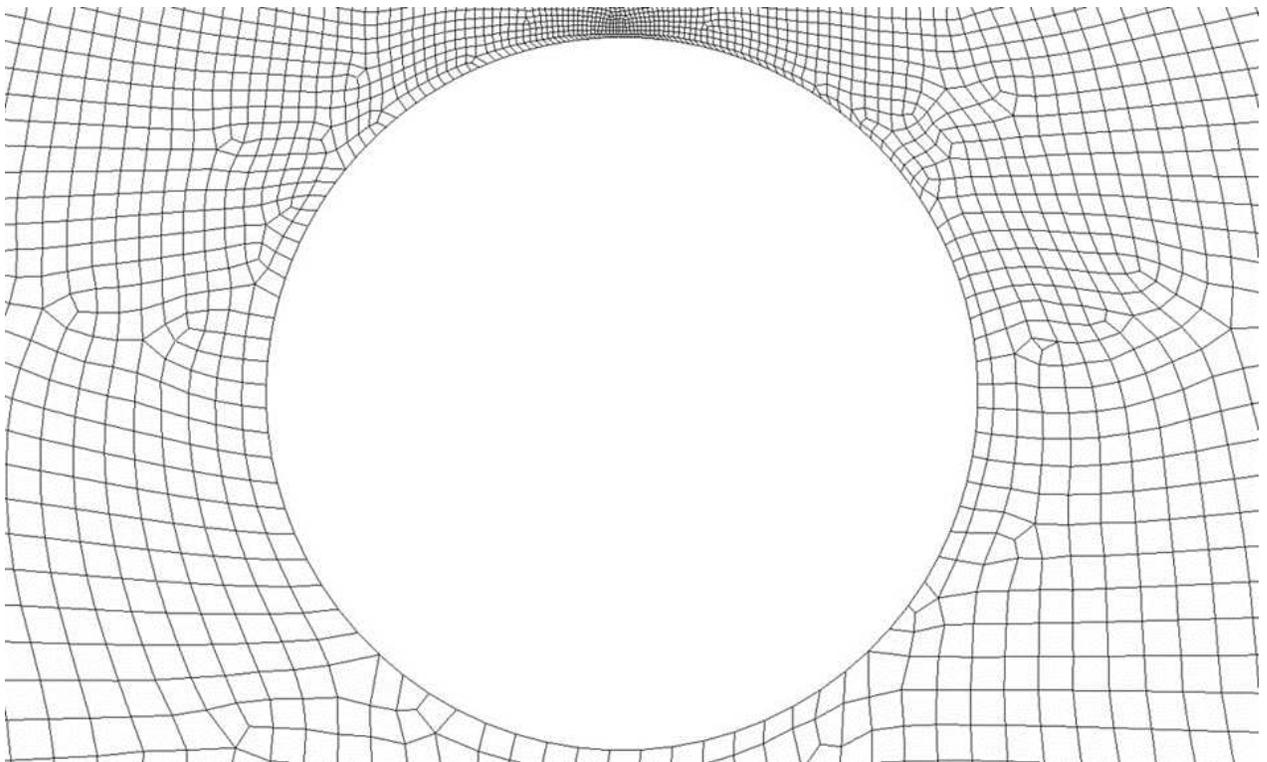
(b)

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Figura 3.7:** Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 31.3 s e velocidade de deslocamento de 0,1 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) *riser* em corte transversal



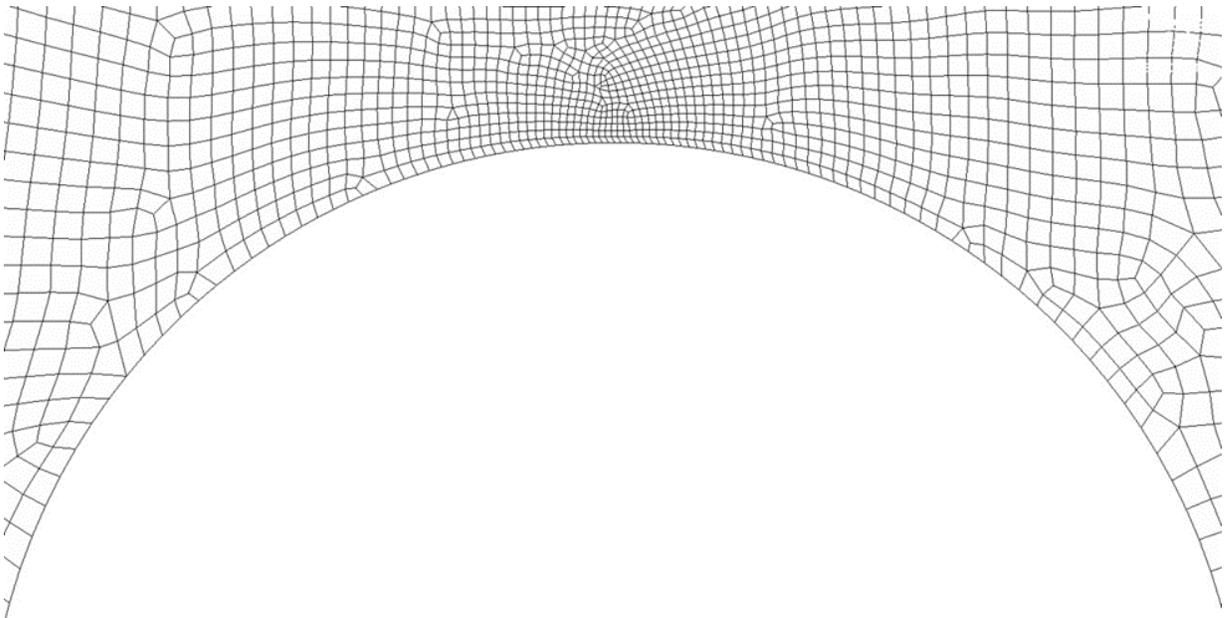
(a)



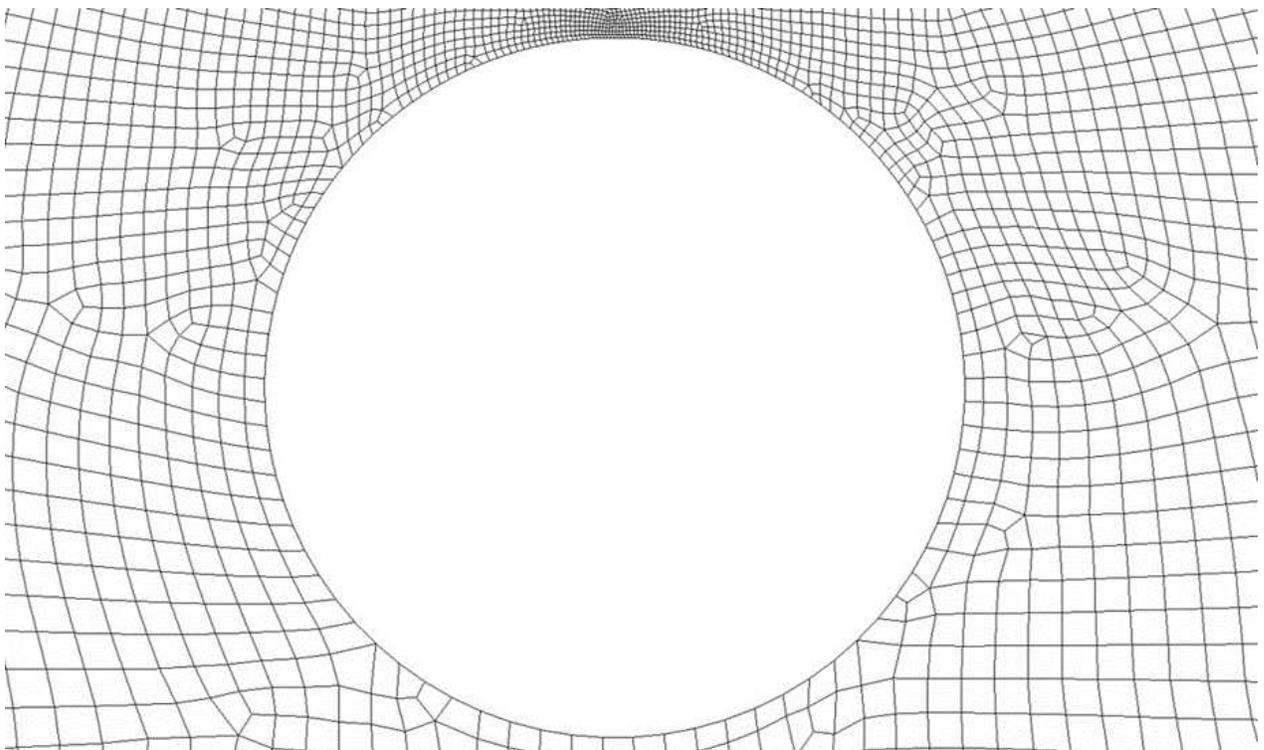
(b)

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Figura 3.8:** Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 59.5 s e velocidade de deslocamento de 0,1 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) *riser* em corte transversal



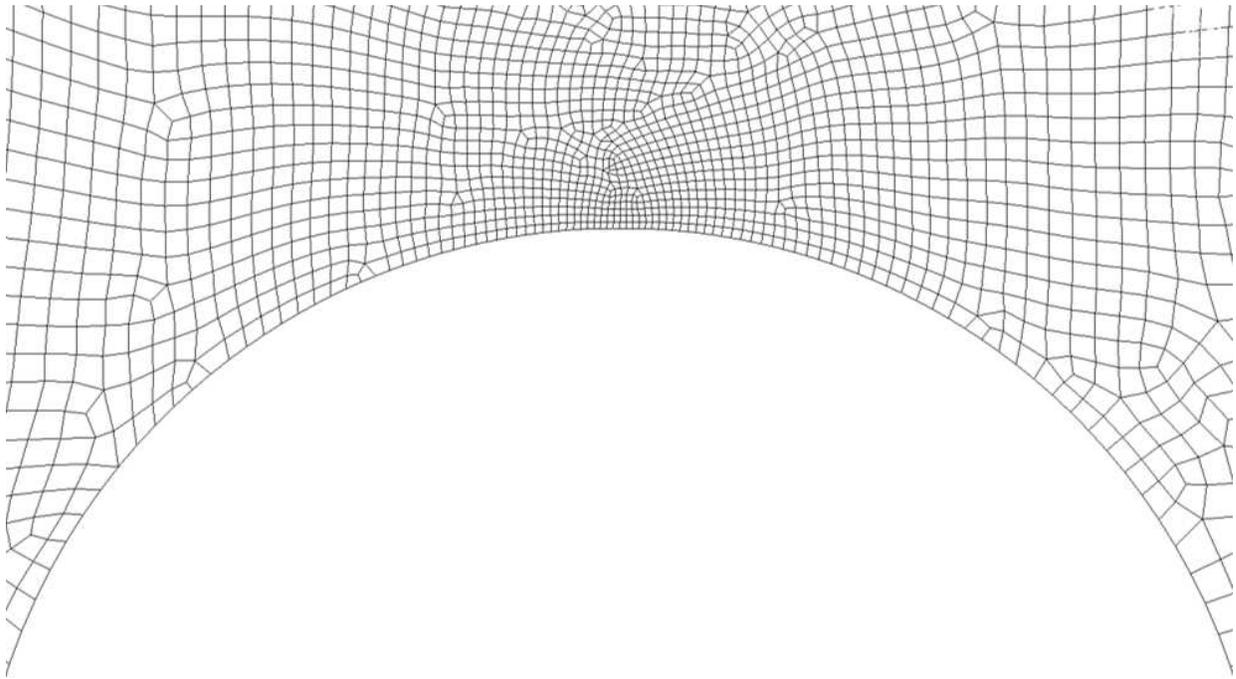
(a)



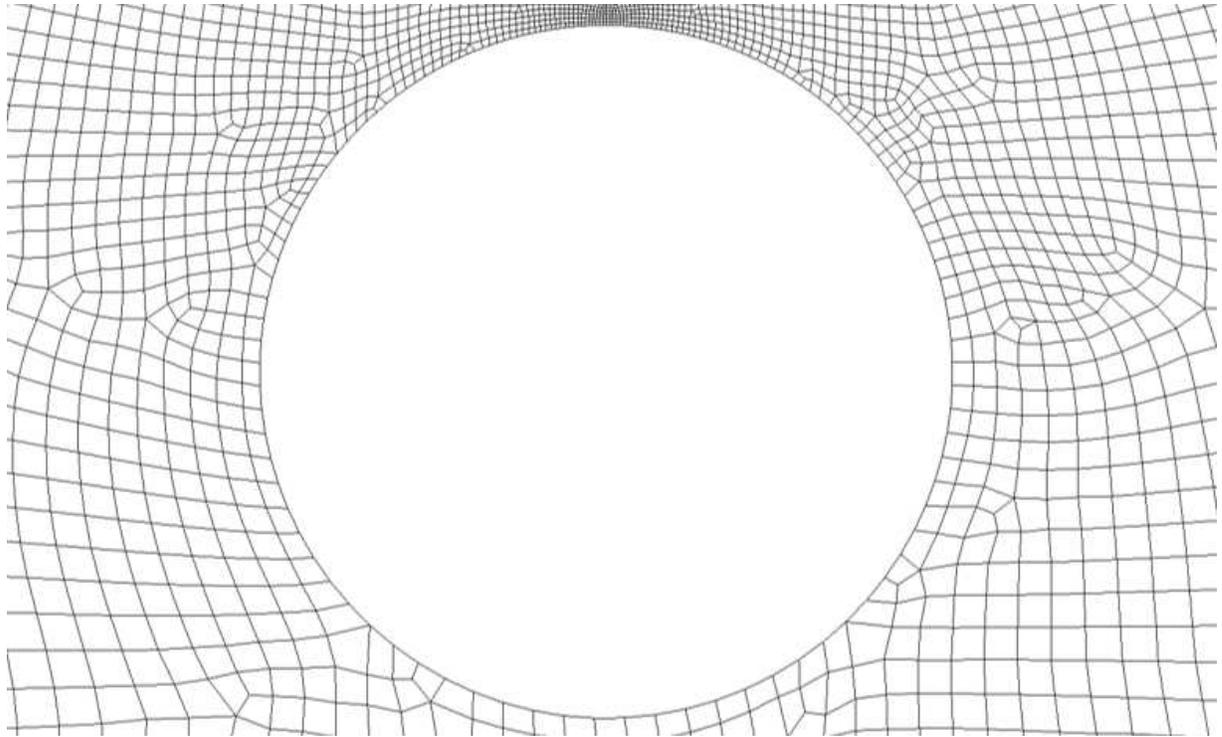
(b)

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Figura 3.9:** Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 5 s e velocidade de deslocamento de 0,2 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) *riser* em corte transversal



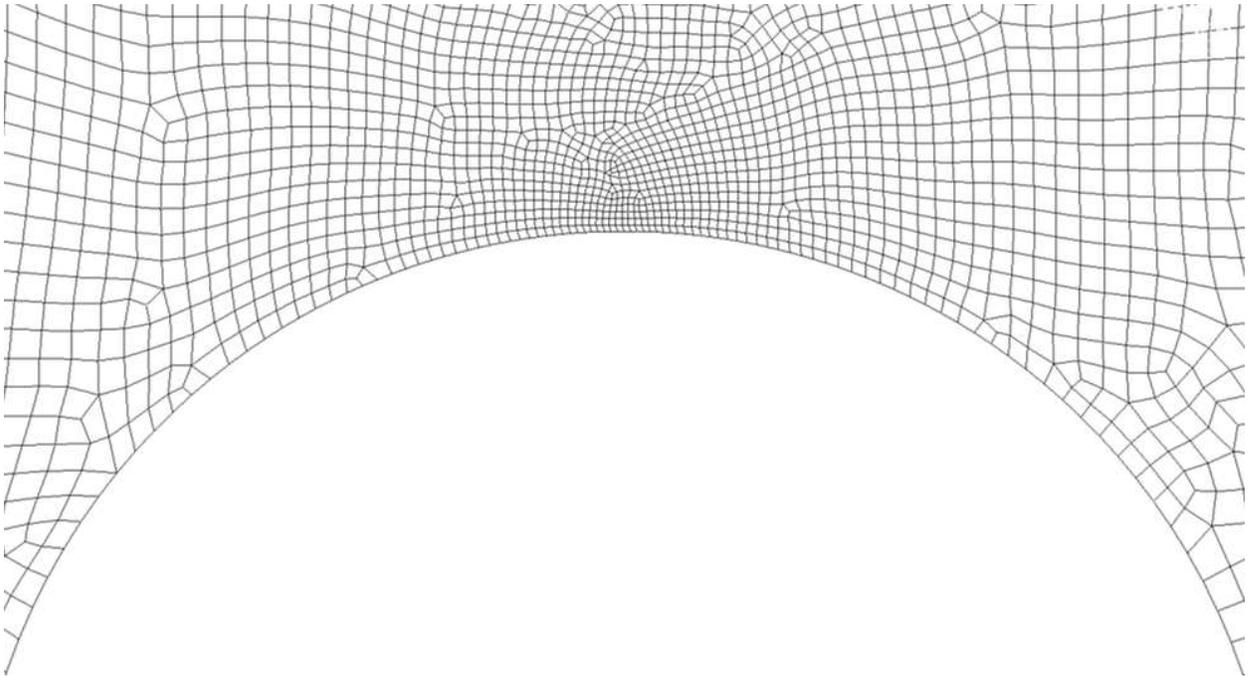
(a)



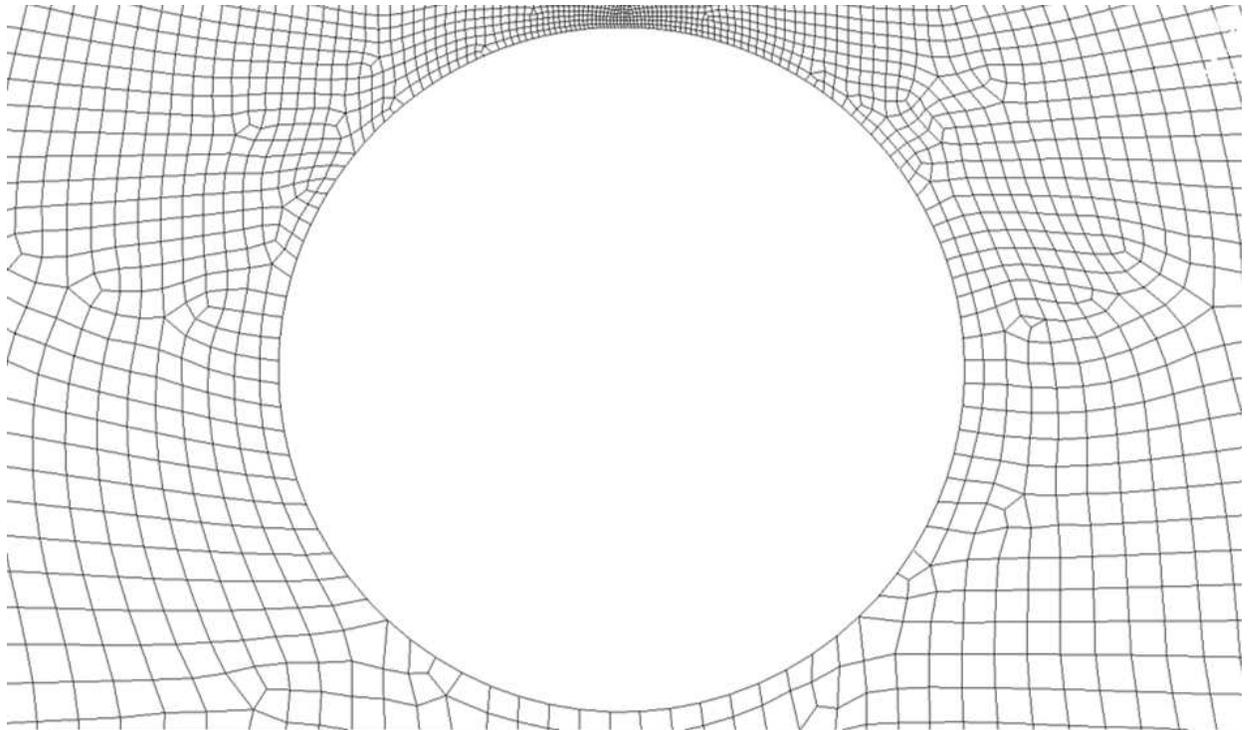
(b)

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Figura 3.10:** Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 10.3 s e velocidade de deslocamento de 0,2 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) *riser* em corte transversal



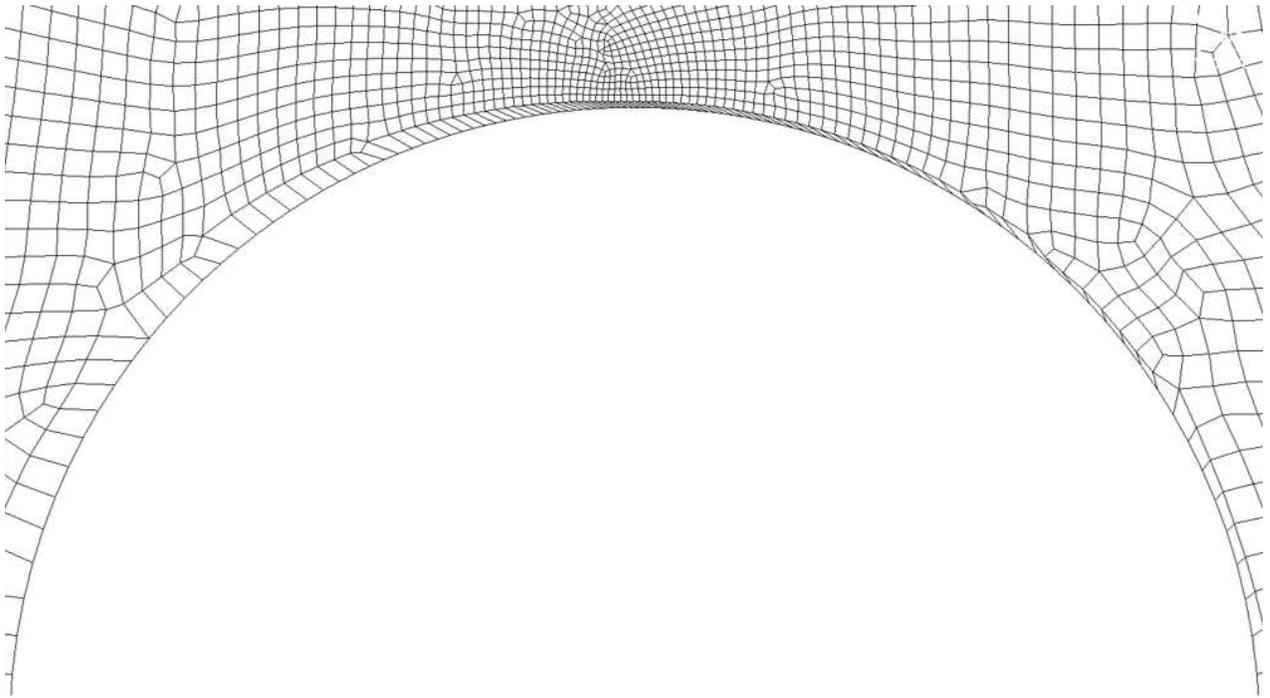
(a)



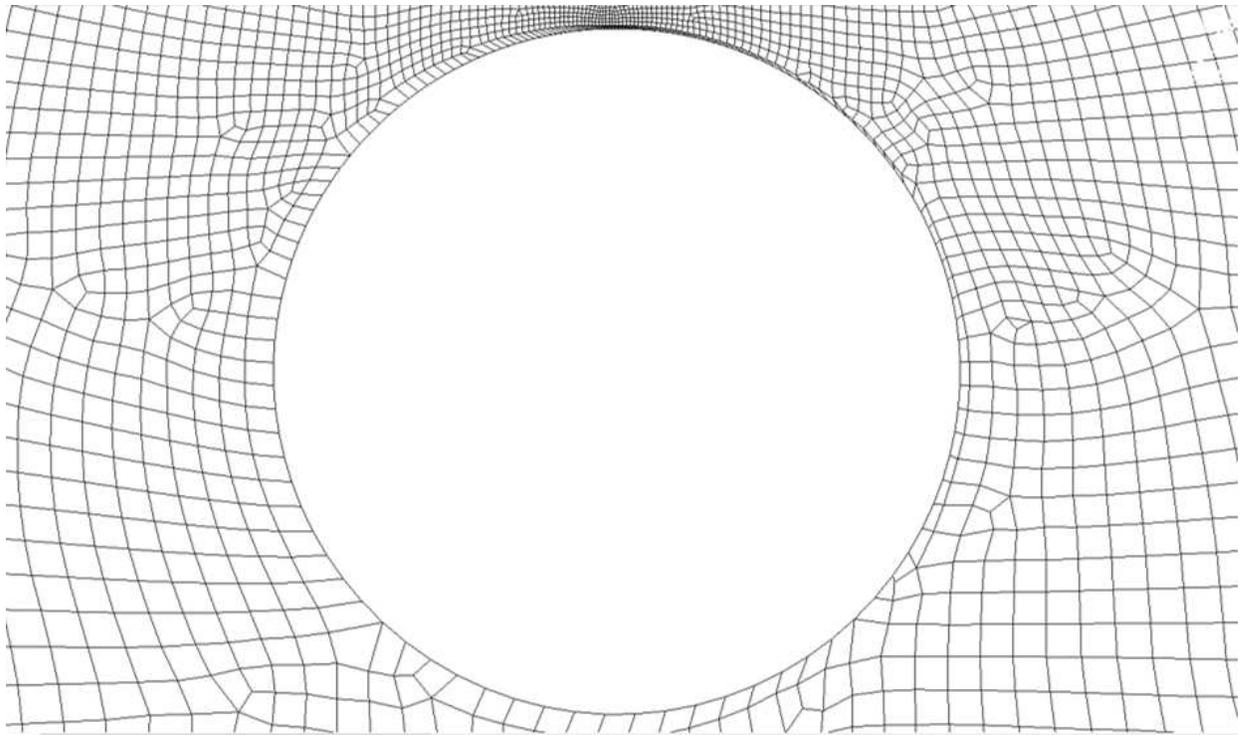
(b)

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Figura 3.11:** Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 31.3 s e velocidade de deslocamento de 0,2 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) *riser* em corte transversal



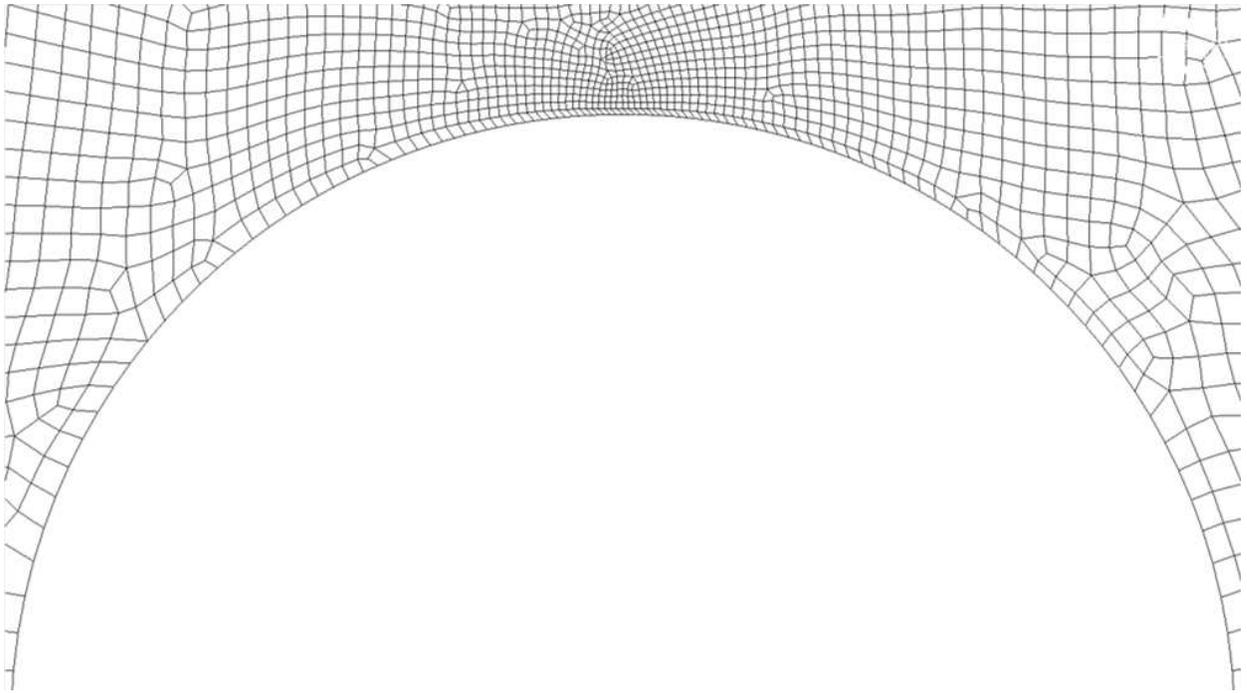
(a)



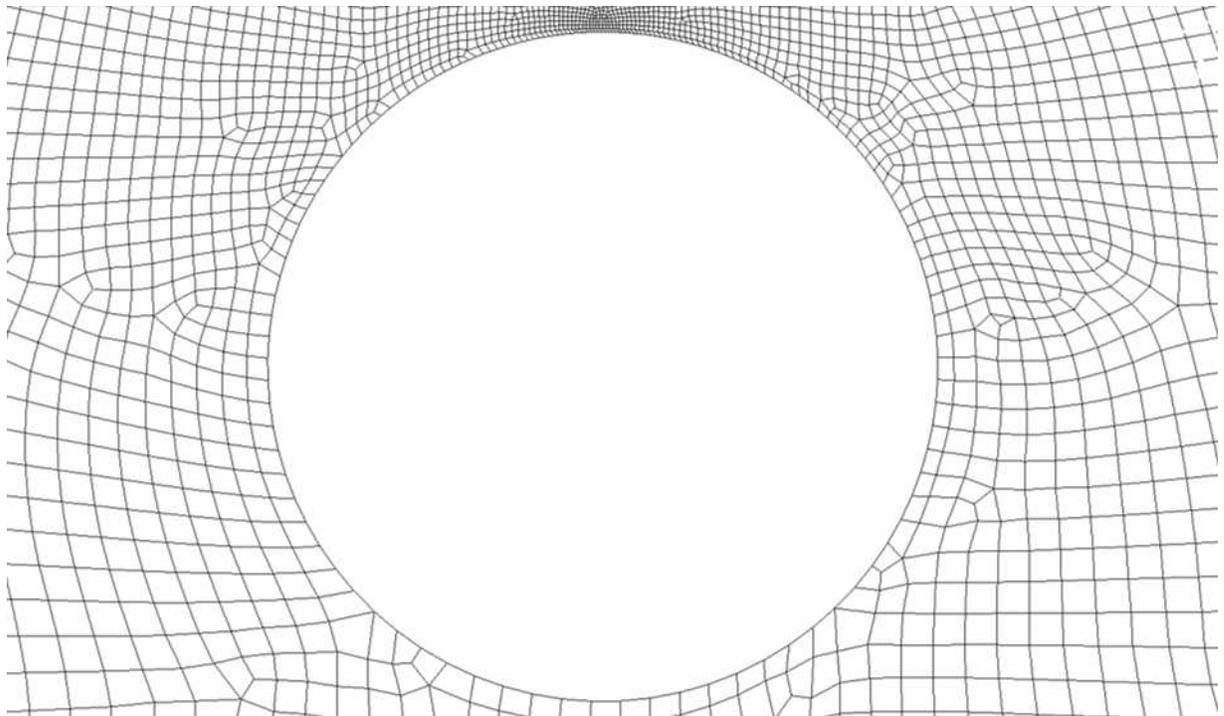
(b)

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Figura 3.12:** Detalhes da malha dinâmica em um tempo de 59.5 s e velocidade de deslocamento de 0,1 m/s (a) destaque para região do vazamento (b) *riser* em corte transversal



(a)



(b)

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

### 3.3 Modelagem Matemática

Para definir a modelagem matemática utilizada nos estudos do presente trabalho, foram necessárias as seguintes considerações:

- Fluidos incompressíveis;
- Regime transiente;
- Regime turbulento e isotérmico;
- Não há reação química entre as fases;
- Não há transferência de massa interfacial;
- Modelo multifásico: Volume de Fluidos - VOF;
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  padrão;
- Não foi considerado aderência do óleo na parede do *riser*;
- Considerou-se efeito da gravidade de  $-9.81 \text{ m/s}^2$ .

#### 3.3.1 Equações governantes

A formulação VOF baseia-se no fato de que dois ou mais fluidos (ou fases) não são interpenetrantes para cada fase adicional e uma variável é introduzida na fração de volume da fase na célula computacional. Em cada volume de controle, as frações de volume de todas as fases somam a unidade. Os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam valores médios de volume desde que a fração de volume de cada uma das fases seja conhecida em cada local. Assim, as variáveis e propriedades em qualquer célula são puramente representativas de uma das fases ou representativas de uma mistura de fases dependendo dos valores da fração volumétrica. Em outras palavras, se a fração de volume dos fluidos na célula é denotada como  $f_\alpha$ , então, as três condições (Tabela 3.1) são possíveis (ANSYS, 2020).

**Tabela 3.1:** Fração de volumes das células

Valores celulares	
$f_\alpha = 0$	A célula está vazia do fluido
$f_\alpha = 1$	A célula está cheia do fluido
$0 < f_\alpha < 1$	A célula contém a interface entre o fluido e um ou mais outros fluidos

**Fonte:** Ansys Fluent (2020).

Com base no valor local de  $f_\alpha$ , as propriedades e variáveis apropriadas serão atribuídas a cada volume de controle dentro do domínio.

### 3.4 Modelo Multifásico

#### 3.4.1 Equação da Fração Volumétrica

O rastreamento da interface entre as fases é realizado pela solução de uma equação de continuidade para a fração de volume de uma (ou mais) das fases. Para as fases, a equação da fração volumétrica é escrita da seguinte forma (Eq. 3.1):

$$\frac{1}{\rho_\alpha} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (f_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) \right] = 0 \quad (3.1)$$

onde  $f_\alpha$ ,  $\rho_\alpha$ ,  $\vec{U}_\alpha$  correspondem, respectivamente, a fração volumétrica, massa específica e vetor velocidade da fase  $\alpha$ . A equação da fração volumétrica não será resolvida para a fase primária, mas foi determinada pela seguinte restrição (Eq. 3.2):

$$\sum_{\alpha=1}^n f_\alpha = 1 \quad (3.2)$$

### 3.4.2 Equação da quantidade de movimento

Uma equação de quantidade de movimento é resolvida em todo o domínio e o campo de velocidade resultante é compartilhado entre as fases. A equação (Eq. 3.3) é dependente das frações de volume de todas as fases através das propriedades  $\rho$  e  $\mu$ .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.3)$$

onde  $\vec{F}$  são as forças vetorial interfaciais atuantes, que são dadas pela equação (3.4):

$$F = \sigma \frac{\rho \mathcal{V}_\alpha q}{(\rho_1 + \rho_2) / 2} \quad (3.4)$$

onde  $\sigma$  é a tensão superficial e  $\mathcal{V}$  é a curvatura.

### 3.4.3 Fluxo de Canal Aberto

Os efeitos do fluxo de canal aberto adotado, foram modelados usando a formulação de Volume de Fluidos e a condição de limite de canal aberto. Esses fluxos envolvem a existência de uma superfície livre entre o fluido que escoar e o fluido acima dele (geralmente o ar da atmosfera). De acordo com o Ansys (2020), em tais casos, a propagação de ondas e o comportamento da superfície livre se tornam importantes, o fluxo é geralmente governado pelas forças da gravidade e da inércia.

Os fluxos de canais abertos são caracterizados pelo Número Froude (sem dimensão) que é definido como a razão entre a força de inércia e a força hidrostática (Eq. 3.5):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (3.5)$$

onde  $V$  é a magnitude da velocidade,  $g$  é a gravidade e  $y$  é a dimensão da altura média da lâmina d'água.

O denominador na Equação (3.5) é a velocidade limite de propagação de onda em águas rasas de profundidade  $h$  (ondas não dispersivas), sendo a velocidade de onda definida pela equação (3.6):

$$V_w = \sqrt{gy} \quad (3.6)$$

Com base no número de Froude, os fluxos de canais abertos podem ser classificados nas três categorias a seguir:

- ✓ Quando,  $Fr < 1$  isto é,  $V < \sqrt{gy}$  (portanto  $V_w < 0$  ou  $V_w > 0$ ) o fluxo é conhecido como subcrítico, onde as perturbações podem viajar tanto a montante como a jusante do fluxo. Neste caso, as condições à jusante podem afetar o fluxo a montante;
- ✓ Quando  $Fr = 1$  (portanto  $V_w = 0$ ) o fluxo é conhecido como crítico, onde as ondas de propagação a montante permanecem estacionárias;
- ✓ Quando  $Fr > 1$ , isto é,  $V > \sqrt{gy}$  (portanto  $V_w > 0$ ) o fluxo é conhecido como supercrítico, onde as perturbações não podem viajar a montante. Neste caso, as condições a jusante não afetam o fluxo a montante.

No presente trabalho, o número de Froude em ambas as situações de magnitude de velocidade é considerada com subcrítico, ou seja, as perturbações do fluxo podem viajar tanto a montante como a jusante do escoamento.

A interface foi modelada através de configurações para o modelo VOF. O tipo de modelagem de interface adotada foi Sharp. Este modelo é usado apenas para modelos VOF e Multi-Fluid VOF, quando uma interface distinta está presente entre as fases.

O modelo de Força de Tensão de Superfície adotado no presente trabalho foi Força de Superfície Contínua. Este modelo inclui os efeitos da tensão superficial ao longo da interface água/óleo. A Força de superfície contínua adiciona a tensão superficial ao cálculo de Volume de Fluido (VOF) que resulta em um termo de origem na equação de quantidade de movimento.

As condições de contorno ilustradas na Tabela 3.3, aplicadas para o domínio de estudo (Figura 3.13), foram definidas como:

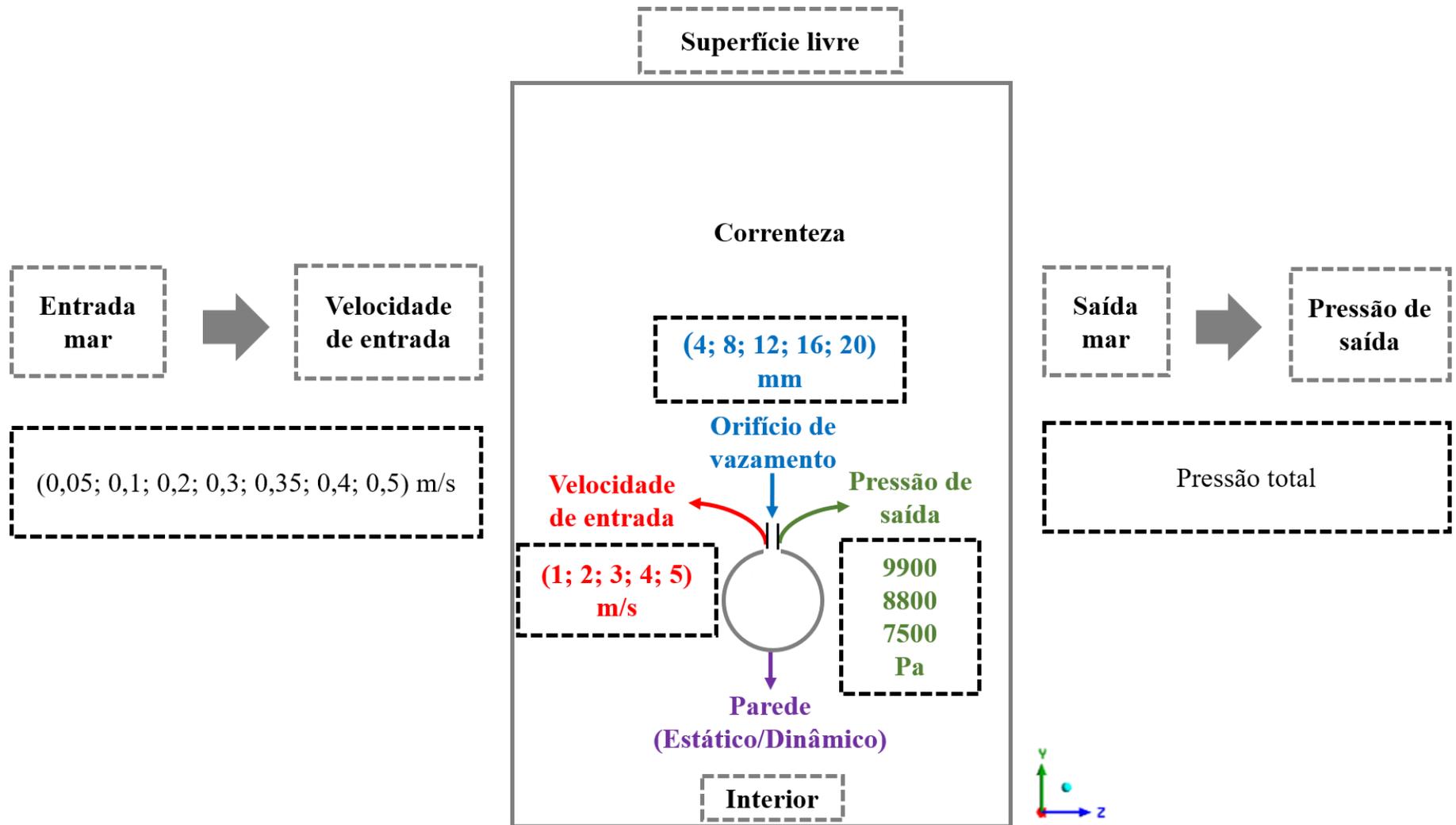
- **Entrada mar:** velocidade de entrada mar, com base nestas velocidades foram determinadas as velocidades de movimentação do *riser*; fração volumétrica:  $f_o = 0, f_w = 1$ .
- **Saída mar:** Uma condição de pressão na saída da correnteza (pressão total).
- **Região superior:** condição de superfície livre.
- **Região inferior:** condição de parede se referindo a uma superfície lisa tendo a velocidade como nula na parede.
- **Riser:** a seção transversal do *riser* foi definida como condição de parede e não deslizamento na parede do *riser*. Para estudar a dinâmica do *riser* foi inserida uma *User Defined Function* (UDFs) com valor de movimentação horizontal da parede do *riser* proporcional a cada velocidade de correnteza adotada na entrada mar, sendo utilizado um total de sete UDFs. A forma do movimento do *riser* analisada foi como sendo horizontal com movimento oscilatório da esquerda para direita.

O *software* Ansys Fluent apresenta limitações em relação à implementação de equações que venham caracterizar alguma ação no solucionador, como por exemplo, o uso de equação para movimentar uma determinada condição de contorno. As UDFs são compiladas e anexadas a estrutura do solver. Essas UDFs estão expostas no Apêndice A.

O vazamento foi bem explorado, sendo considerado três condições de contorno adotadas no orifício de vazamento:

- **Furo:** analisou-se três variáveis (velocidade, diâmetro do furo e pressão). Para isso, utilizou-se, a depender da variável estudada, condições de velocidade ou de pressão na entrada, com fração volumétrica do óleo igual a 1.
  - (a) Velocidade de entrada:** uma condição de velocidade de entrada de óleo no mar (para avaliar o efeito da velocidade de vazamento de óleo),  $f_o = 1, f_w = 0$ .
  - (b) Diâmetro do furo:** avaliou-se também o efeito do diâmetro do furo sob diferentes tamanhos de vazamento de óleo,  $f_o = 1, f_w = 0$ .
  - (c) Pressão de saída:** avaliou-se a pressão na saída do vazamento sob diferentes tempos de simulação para validar o modelo com dados experimentais,  $f_o = 1, f_w = 0$ .

**Figura 3.13:** Condições de contorno para o domínio físico analisado na pesquisa



Fonte: Próprio do autor (2021).

As condições de velocidade de corrente foram tomadas com base em dados reais de uma região do mar da Bacia de Santos de acordo com o Metocean Database (2018). As condições gerais do problema e da solução numérica são apresentadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** Condições de Contorno para o Domínio Físico analisado

<b>Região</b>	<b>Condição</b>	<b>Valor</b>
Entrada Mar	Velocidade de entrada	(0,05) m/s
		(0,1) m/s
		(0,2) m/s
		(0,3) m/s
		(0,35) m/s
		(0,4) m/s
		(0,5) m/s
Saída Mar	Pressão de saída	Pressão total
<i>Riser</i>	Parede	Estático/Dinâmico
Vazamento	Velocidade de entrada	(1; 2; 3; 4; 5) m/s
	Diâmetro do vazamento	(4; 8; 12; 16, 20) mm
	Pressão no vazamento	(9900; 8800; 7500) Pa
Base/Superior	Superfície livre	
Base/Interior	Parede	

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

O Método de solução do Ansys Fluent (2020) permite especificar vários parâmetros associados ao método de solução a ser usado no cálculo sendo habilitado apenas solucionador baseado em pressão como descrito na Tabela 3.3. Para o controle de solução, os Fatores Sub-Relaxantes contêm os fatores de sub-relaxamento para todas as equações que estão sendo resolvidas com o solucionador baseado em pressão como está apresentado na Tabela 3.4.

O método de inicialização da solução adotado no presente trabalho é a Inicialização Padrão. Este método permite definir valores para variáveis de fluxo e inicializar o campo de fluxo com esses valores, sendo a solução computada para toda a zona. O quadro de referência foi indicado pela velocidade relativa ao movimento de cada zona celular. Essa seleção é necessária apenas se o problema envolver movimentação de malhas. Os valores iniciais da solução exibem os valores das variáveis aplicadas no método de solução, como pode ser observado na Tabela 3.5.

**Tabela 3.3:** Critérios e modelos numéricos

<b>Modelos</b>	<b>Métodos</b>
Escoamento	Bifásico
Variação transiente	<i>Standard</i> (Padrão)
Tratamento de parede	(condição de não deslizamento)
Acoplamento pressão-velocidade	SIMPLE
Pressão	PRESTO!
Momento	Segunda Ordem <i>Upwind</i>
Fração volumétrica	Compressível
Energia cinética turbulenta	Primeira Ordem <i>Upwind</i>
Taxa de dissipação turbulenta	Primeira Ordem <i>Upwind</i>
Formulação Transiente	Primeira Ordem Implícito
Critério de convergência	Erro de $10^{-6}$
Formulação transiente	Primeira Ordem Implícita
Tempo total de simulação	60 s
Passo de tempo	0.01 s

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Tabela 3.4:** Fatores Sub-Relaxamento

<b>Controle de solução</b>	
Pressão	0.3
Densidade	1
Forças do corpo	1
Momento	0.7
Fração de volume	0.5
Energia cinética turbulenta	0.8
Taxa de dissipação turbulenta	0.8
Viscosidade turbulenta	1

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Tabela 3.5:** Valores iniciais da solução

<b>Inicialização da solução</b>	
Pressão manométrica (Pascal)	6.331336
Velocidade X (m/s)	0
Velocidade Y (m/s)	0
Energia cinética turbulenta ( $m^2/s^2$ )	4.749042e-05
Taxa de dissipação turbulenta ( $m^2/s^3$ )	0.290315
Fração volumétrica da fase 1	0
Fração volumétrica da fase 2	1

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

### 3.5 Modelo de turbulência

Dentre os modelos de turbulência para tratamento de fluxos turbulentos o modelo que mais se destaca é o  $k-\varepsilon$  padrão, sendo definido pelas equações de transporte que são resolvidas para o comprimento turbulento e para a escala de tempo. Muitos trabalhos que envolvem fluxos turbulentos (óleo/água) adotaram o modelo  $k-\varepsilon$  padrão como modelo de turbulência para analisar o fluxo turbulento, podendo citar, Zhu et al. (2014; 2017b), Sun et al. (2019) e Moreira et al. (2020).

No presente trabalho, o modelo de turbulência adotado para calcular o fluxo turbulento foi o modelo  $k-\varepsilon$  padrão (2 equações). Modelos de turbulência de duas equações permitem a determinação de um comprimento turbulento e escala de tempo resolvendo duas equações de transporte separadas. O modelo  $k-\varepsilon$  padrão do Ansys Fluent enquadra-se nessa classe de modelos e tornou-se o principal modelo de cálculos de fluxo de engenharia prática no tempo desde que foi proposto por Launder e Spalding, em 1972. A equação da energia cinética turbulenta é dada pela Equação (3.7):

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \bullet \left\{ f_\alpha \left[ \rho_\alpha \vec{U}_\alpha k_\alpha - \left( \mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla k_\alpha \right] \right\} = f_\alpha (G_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (3.7)$$

Em que  $k$  é a energia turbulenta,  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta. Logo, a taxa de dissipação turbulenta é dada pela Eq. 3.8:

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha \varepsilon_\alpha)}{\partial t} + \nabla \bullet \left\{ f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha \varepsilon_\alpha - \left( \mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right\} = f_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (3.8)$$

Nestas equações,  $G_\alpha$  representa a geração de energia cinética de turbulência no interior da fase  $\alpha$  devido aos gradientes médios de velocidade calculados. No modelo  $k-\varepsilon$ ;  $f_\alpha$  é a fração volumétrica da fase  $\alpha$ ;  $C_1$  e  $C_2$  são constantes empíricas;  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números turbulentos de Prandtl para  $k$  e  $\varepsilon$  respectivamente (FLUENT, 2020). O termo  $\varepsilon_\alpha$  (Eq. 3.9) corresponde à taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase  $\alpha$  e  $k_\alpha$  (Eq. 3.10) corresponde à energia turbulenta para a fase  $\alpha$ , sendo expresso da seguinte forma:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{c_\mu q_\alpha^3}{l_\alpha} \quad (3.9)$$

$$k_\alpha = \frac{q_\alpha^2}{2} \quad (3.10)$$

onde  $l_\alpha$  é o comprimento de escala espacial,  $q_\alpha$  é a escala de velocidade,  $c_\mu$  é uma constante empírica, podendo ser calculada através da Equação (3.11):

$$c_\mu = 4c_\alpha^2 \quad (3.11)$$

sendo  $C_\alpha$  uma constante empírica e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica da fase  $\alpha$ . A viscosidade turbulenta  $\mu_{t\alpha}$  é definida pela Equação (3.12):

$$\mu_{t\alpha} = c_\mu \rho_\alpha \frac{k_\alpha^2}{\varepsilon_\alpha} \quad (3.12)$$

As constantes do modelo  $C_1 C_2 c_\mu \sigma_k \sigma_\varepsilon$  possuem valores padrão descritos na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6:** Constantes do modelo de turbulência  $k$ - $\varepsilon$  padrão (2 equações).

Constantes	Valor
$C_1$	1.44
$C_2$	1.92
$C_\mu$	0.09
$\sigma_k$	1.0
$\sigma_\varepsilon$	1.3

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

Esses valores padrão foram determinados a partir de experimentos para escoamentos turbulentos, incluindo fluxos de cisalhamento frequentemente encontrados, como camadas limites, camadas de mistura e jatos. Esses valores funcionam razoavelmente bem para uma ampla gama de fluxos de cisalhamento livres e limitados por paredes (ANSYS, 2020). As equações de conservação que regem o escoamento independem do regime de escoamento. Logo, o regime turbulento é sempre transiente, ou seja, irá variar com o tempo (NIECKELE, s.d.).

### 3.6 Modelo Dinâmico

#### 3.6.1 Método de Suavização de Camada Limite

As zonas de malha dinâmica foram caracterizadas como uma zona com um movimento de corpo rígido, sendo definida para estas zonas as condições de parede do *riser* e o orifício de vazamento de óleo. O valor de cada parâmetro utilizado pode ser observado na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7:** Parâmetros de relaxamento do nó Laplace

Valores dos Parâmetros Laplace	
Fator Constante da mola	0,001
Tolerância de convergência	Erro de $10^{-6}$
Número de interações	30
Relaxamento de nó de Laplace	0,001

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

Um valor (no intervalo de 0 a 1) para movimento de relaxamento é inserido a fim de definir o relaxamento do movimento (o deslocamento dos nós) durante a atualização da malha. O relaxamento dos deslocamentos é definido pela Equação (3.13):

$$x_k = \omega(x_{computado,k}) + (1-\omega)x_{k-1} \quad (3.13)$$

onde  $x_k$  é a posição do nó na iteração  $k$  (dentro de um intervalo de tempo),  $x_{computado,k}$  é a posição do nó computada (com base no campo de fluxo) e  $\omega$  é o relaxamento de movimento. Posteriormente, um valor para os critérios residuais é inserido, a fim de definir o limite residual relativo que é usado para verificar a convergência do movimento. O critério residual é aplicado a um resíduo relativo. O *Ansys Fluent* dimensiona a diferença entre o movimento na interação  $k$  e na interação  $k-1$  pelo movimento calculado no início do intervalo de tempo. Se essa diferença de movimento relativo for menor do que os critérios residuais o movimento da malha é considerado convergente.

### 3.6.2 Formulação Transiente

A Formulação Transiente contém opções para definir diferentes formulações de solução dependentes do tempo. Esta opção aparece apenas quando o regime transiente está habilitado em tempo. As opções disponíveis incluem: Explícito (disponível apenas para o solucionador explícito com base em densidade); Primeira Ordem Implícita; Segunda Ordem Implícita; e Segunda Ordem limitada implícita. No presente trabalho a formulação transiente trabalhada foi de Primeira ordem Implícita.

### 3.7 Casos estudados

Os casos avaliados são apresentados nas Tabelas 3.8 a 3.20, observados os seguintes efeitos: velocidade de correnteza, densidade do óleo, densidade da água, viscosidade do óleo, velocidade de vazamento de óleo, diâmetro do vazamento, movimentação do *riser*. Para validação do modelo matemático adotado, os casos simulados e validados com dados experimentais (Tabela 3.20) apresentam efeitos da pressão no orifício de vazamento de acordo com o tempo de simulação adotado por Zhu et al. (2017a, 2017b) totalizando 63 casos simulados e analisados.

**Tabela 3.8:** Efeito do comportamento da pluma variando-se a velocidade da correnteza para a condição de *riser* estático

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b>	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s) <sup>(g)</sup></b>	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b>	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b>
<b>Caso 1</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,05 m/s	0	8 mm
<b>Caso 2</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 3</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,2 m/s	0	8 mm
<b>Caso 4</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,3 m/s	0	8 mm
<b>Caso 5</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,35 m/s	0	8 mm
<b>Caso 6</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,4 m/s	0	8 mm
<b>Caso 7</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,5 m/s	0	8 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>

**Tabela 3.9:** Efeito do comportamento da pluma variando-se a velocidade da correnteza para a condição de *riser* em movimento

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (m/s) <sup>(g)</sup>	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 8</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,05 m/s	0,05 m/s	8 mm
<b>Caso 9</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 10</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,2 m/s	0,2 m/s	8 mm
<b>Caso 11</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,3 m/s	0,3 m/s	8 mm
<b>Caso 12</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,35 m/s	0,35 m/s	8 mm
<b>Caso 13</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,4 m/s	0,4 m/s	8 mm
<b>Caso 14</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,5 m/s	0,5 m/s	8 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>

**Tabela 3.10:** Efeito do comportamento da pluma variando-se a densidade do óleo para a condição de *riser* estático

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/ms<sup>-1</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (m/s) (g)	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 15</b>	870 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 16</b>	900 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 17</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 18</b>	960 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 19</b>	990 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

---

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>

---

**Tabela 3.11:** Efeito do comportamento da pluma variando-se a densidade do óleo para a condição de *riser* em movimento

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/ms<sup>-1</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (m/s) (g)	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 20</b>	870 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 21</b>	900 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 22</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 23</b>	960 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 24</b>	990 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

---

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>

---

**Tabela 3.12:** Efeito do comportamento da pluma variando-se a densidade da água para a condição de *riser* estático

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/ms<sup>-1</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (m/s) (g)	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 25</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1000 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 26</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 27</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1030 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

---

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>

---

**Tabela 3.13:** Efeito do comportamento da pluma variando-se a densidade da água para a condição de *riser* em movimento

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (m/s) (g)	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 28</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1000 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 29</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 30</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1030 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>

**Tabela 3.14:** Efeito do comportamento da pluma variando-se a viscosidade do óleo para a condição de *riser* estático

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (m/s) (g)	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 31</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	0,1 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 32</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	0,5 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 33</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 34</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,5 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 35</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	2,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

---

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>


---

**Tabela 3.15:** Efeito do comportamento da pluma variando-se a viscosidade do óleo para a condição de *riser* em movimento

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (m/s) (g)	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 36</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	0,1 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 37</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	0,5 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 38</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 39</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,5 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 40</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	2,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

---

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>


---

**Tabela 3.16:** Efeito do comportamento da pluma variando-se a velocidade de vazamento do óleo para a condição de *riser* estático

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (m/s) (g)	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 41</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	1 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 42</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	2 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 43</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 44</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	4 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 45</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	5 m/s	0,1 m/s	0	8 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>

**Tabela 3.17:** Efeito do comportamento da pluma variando-se a velocidade de vazamento do óleo para a condição de *riser* em movimento

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/ms<sup>-1</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (m/s) (g)	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 46</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	1 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 47</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	2 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 48</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 49</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	4 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 50</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	5 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>

**Tabela 3.18:** Efeito do comportamento da pluma variando-se o diâmetro do furo para a condição de *riser* estático

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/ms<sup>-1</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (g)	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 51</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	4 mm
<b>Caso 52</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	8 mm
<b>Caso 53</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	12 mm
<b>Caso 54</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	16 mm
<b>Caso 55</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0	20 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

---

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>

---

**Tabela 3.19:** Efeito do comportamento da pluma variando-se o diâmetro do furo para a condição de *riser* em movimento

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b> (a)	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b> (b)	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (c)	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b> (d)	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b> (e)	<b>Viscosidade do ar (kg/ms<sup>-1</sup>)</b> (f)	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b> (m/s)	<b>Velocidade máxima da correnteza (m/s)</b> (g)	<b>Velocidade do Riser (m/s)</b> (m/s)	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b> (mm)
<b>Caso 56</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	4 mm
<b>Caso 57</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	8 mm
<b>Caso 58</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	12 mm
<b>Caso 59</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	16 mm
<b>Caso 60</b>	930 kg/m <sup>3</sup>	1,0 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	3 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	20 mm

Tensão superficial

0,07 N/m

---

**Fonte:** Zhu et al. (2014; 2017b) <sup>(a)</sup> <sup>(b)</sup> <sup>(d)</sup> <sup>(e)</sup> <sup>(f)</sup>; Solano (2020) <sup>(c)</sup>; Petrobras Metocean Database, Área Bacia de Santos (2018) <sup>(g)</sup>

---

**Tabela 3.20:** Validação do Modelo Matemático

<b>Caso</b>	<b>Densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Viscosidade do óleo (Pa.s)</b>	<b>Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Viscosidade da água (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Viscosidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Velocidade de vazamento de óleo (m/s)</b>	<b>Diâmetro do Furo (mm)</b>	<b>Pressão no vazamento de óleo (Pa)</b>	<b>Tempo de simulação (s)</b>
<b>Caso 61</b>	905,7 kg/m <sup>3</sup>	0,0616 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	0,01 m/s	4 mm	9900 Pa	0,82 s
<b>Caso 62</b>	905,7 kg/m <sup>3</sup>	0,0616 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	0,01 m/s	4 mm	8800 Pa	0,88 s
<b>Caso 63</b>	905,7 kg/m <sup>3</sup>	0,0616 Pa.s	1025 kg/m <sup>3</sup>	0,001003 Pa.s	1,225 kg/m <sup>3</sup>	1,7894e-05 kg/ms <sup>-1</sup>	0,01 m/s	4 mm	75000 Pa	1,18 s

Tensão superficial

0,07 N/m

**Fonte:** Zhu et al. (2017a, 2017b).

# Capítulo 4

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

### 4.1 Avaliação da dependência da Malha Numérica

Uma das etapas mais importantes a serem discutidas é o estudo da dependência dos resultados numéricos com relação à malha utilizada. Uma malha grosseira, ou seja, com baixa densidade de elementos, pode conduzir a resultados discrepantes ao ser comparado com resultados analíticos e/ou experimentais. Porém, uma malha mais refinada com uma alta densidade de elementos, pode inviabilizar a simulação devido ao elevado custo computacional.

Neste sentido, foram analisados 05 casos com malhas de diferentes refinamentos. Nos testes para a dependência de malha foram considerados números de elementos hexaédricos e tetraédricos, números de pontos nodais e os tempos computacionais com os respectivos parâmetros e propriedades dos fluidos em condições padrão, como mostrado na Tabela 4.1. A Tabela 4.2 apresenta informações das malhas para cada caso simulado.

**Tabela 4.1:** Parâmetros e propriedades dos fluidos para o estudo de dependência de malha

<b>Condições padrão (<i>riser</i> estático)</b>	
Densidade do óleo	930 kg/m <sup>3</sup>
Densidade da água	1025 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade do óleo	1 Pa.s
Taxa de vazamento	3 m/s
Diâmetro do furo	8 mm
Velocidade da correnteza	0,1 m/s

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Tabela 4.2:** Dependência de Malha considerando o *riser* sob efeito estático

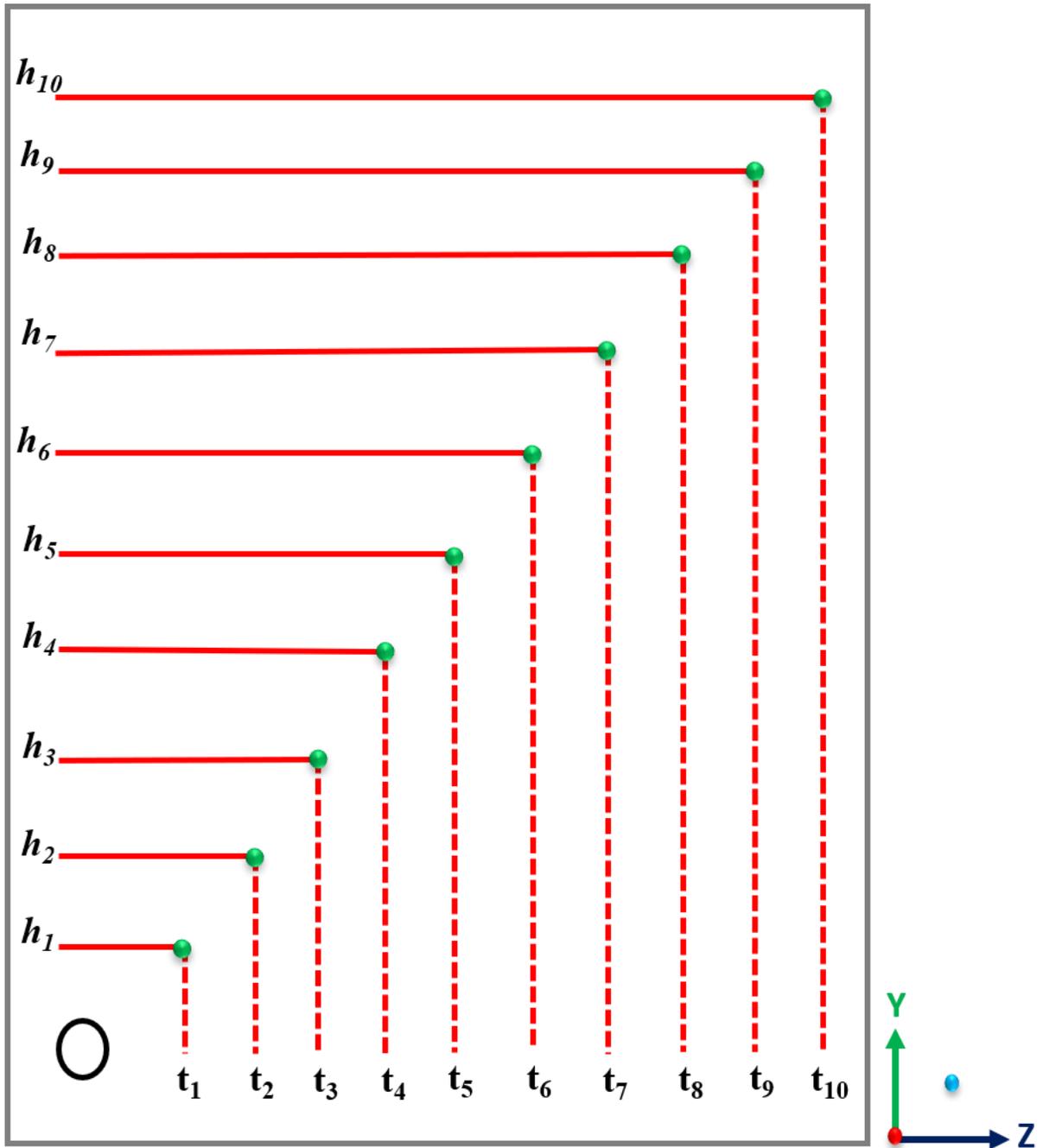
<b>Condições Padrão</b>			
<b>Caso</b>	<b>Total de elementos híbridos</b>	<b>Total de nós</b>	<b>Tempo computacional</b>
<b>Malha 1</b>	30,049	30,363	15 h e 20 min
<b>Malha 2</b>	35,017	35,334	15 h e 31 min
<b>Malha 3</b>	40,318	40,631	19 h e 29 min
<b>Malha 4</b>	45,075	45,375	20 h e 12 min
<b>Malha 5</b>	50,133	50,430	23 h e 12 min

**Fonte:** Próprio do autor (2021).

Com objetivo de analisar o comportamento físico da dispersão do óleo no oceano, tomou-se diferentes posições para cada tempo em relação à altura da pluma de óleo, onde,  $h$  representa altura e  $t$  o tempo, vide Figura 4.1.

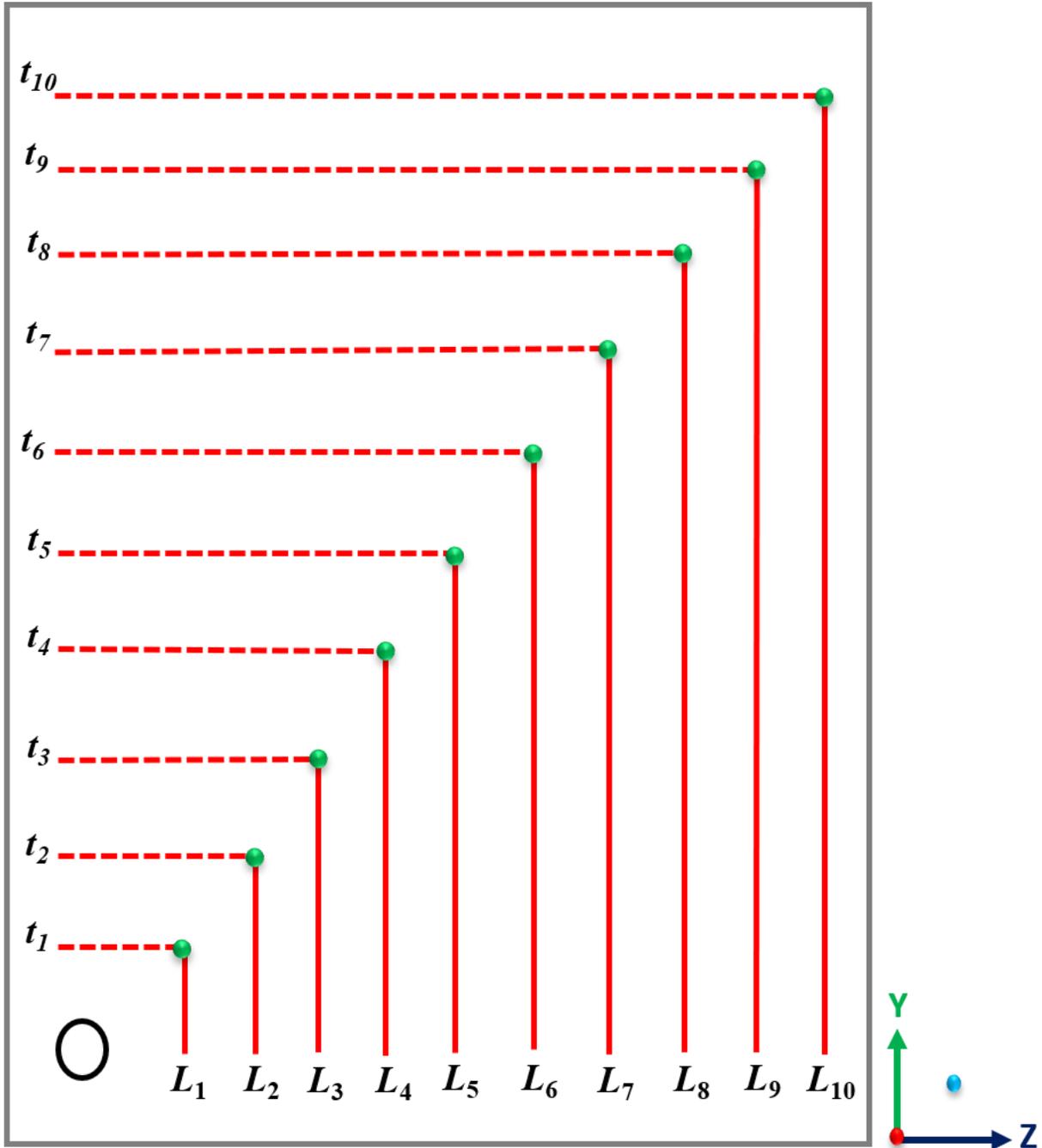
A Figura 4.2 representa as linhas de posição em relação à distância percorrida pela pluma de óleo no sentido à jusante do vazamento, em que  $L$  representa a distância percorrida pela pluma de óleo e  $t$  o tempo.

**Figura 4.1:** Linhas de posição das alturas analisadas para cada variável adotada no presente trabalho, ( $h$ ) altura e ( $t$ ) tempo



Fonte: Próprio do autor (2021).

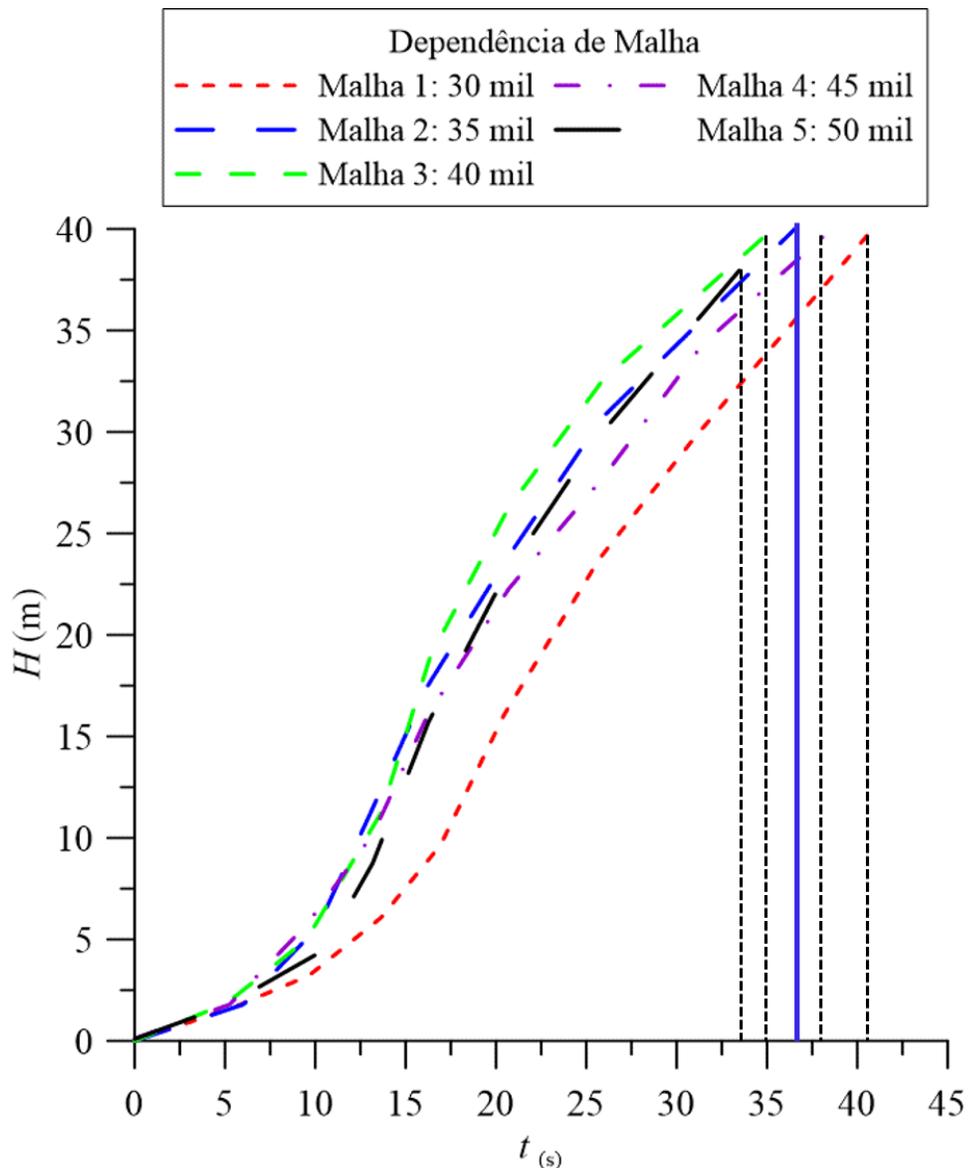
**Figura 4.2:** Linhas de posição de comprimentos analisados para cada variável adotada no presente trabalho, ( $L$ ) Distância percorrida e ( $t$ ) tempo



Fonte: Próprio do autor (2021).

Observa-se na Figura 4.3 que, na malha 1, composta de 30 mil células, o óleo levou cerca de 42 segundos para alcançar a altura máxima analisada de 40 m e as outras malhas mostraram praticamente o mesmo tempo de dispersão de óleo até a superfície livre com cerca de 35 segundos para alcançar a altura desejada, ou seja, do ponto de vazamento até a superfície livre. Diante disto, optou-se por utilizar a malha número 2, composta de 35 mil elementos, tendo em vista que o tempo de simulação não apresentou tanta discrepância em relação às demais malhas geradas.

**Figura 4.3:** Análise de dependência de malha

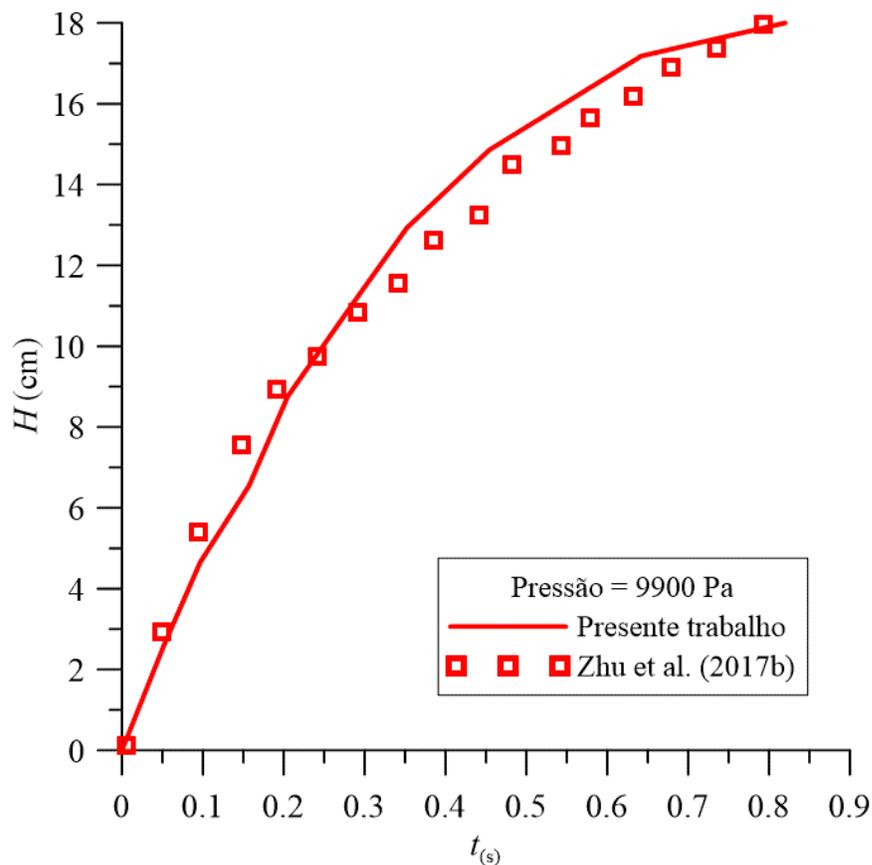


Fonte: Próprio do autor (2021).

## 4.2 Validação da Solução Numérica com Dados Experimentais

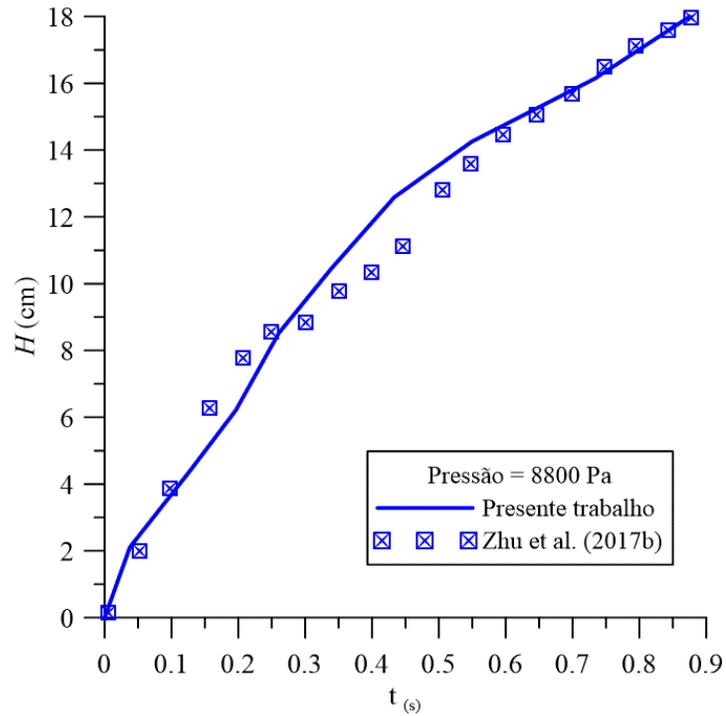
Nas Figuras 4.4 a 4.6 estão representados os resultados para três condições de pressão hidrostática (9900, 8800, 7500) Pa, relacionando à altura da primeira gota de óleo em função do tempo de vazamento assumindo as mesmas condições experimentais de Zhu et al. (2017a, 2017b), respectivamente (Caso 61, Caso 62, Caso 63). Pode-se observar uma boa concordância dos resultados da simulação com os dados experimentais. Esta boa concordância possibilita afirmar que a abordagem numérica adotada no presente trabalho pode ser usada para investigar as características do derramamento de óleo a partir de *risers* submersos.

**Figura 4.4:** Validação do modelo matemático para pressão de 9900 Pa



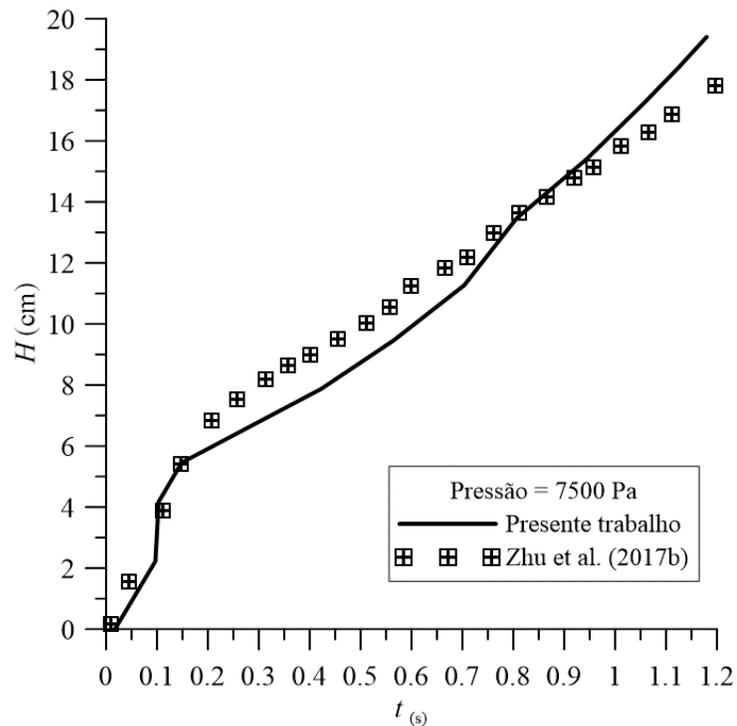
**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Figura 4.5:** Validação do modelo matemático para pressão de 8800 Pa



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.6:** Validação do modelo matemático para pressão de 7500 Pa



Fonte: Próprio do autor (2021).

### 4.3 Comportamento da Pluma de óleo durante Vazamento em *Riser* Estático e Dinâmico (ou em movimentação)

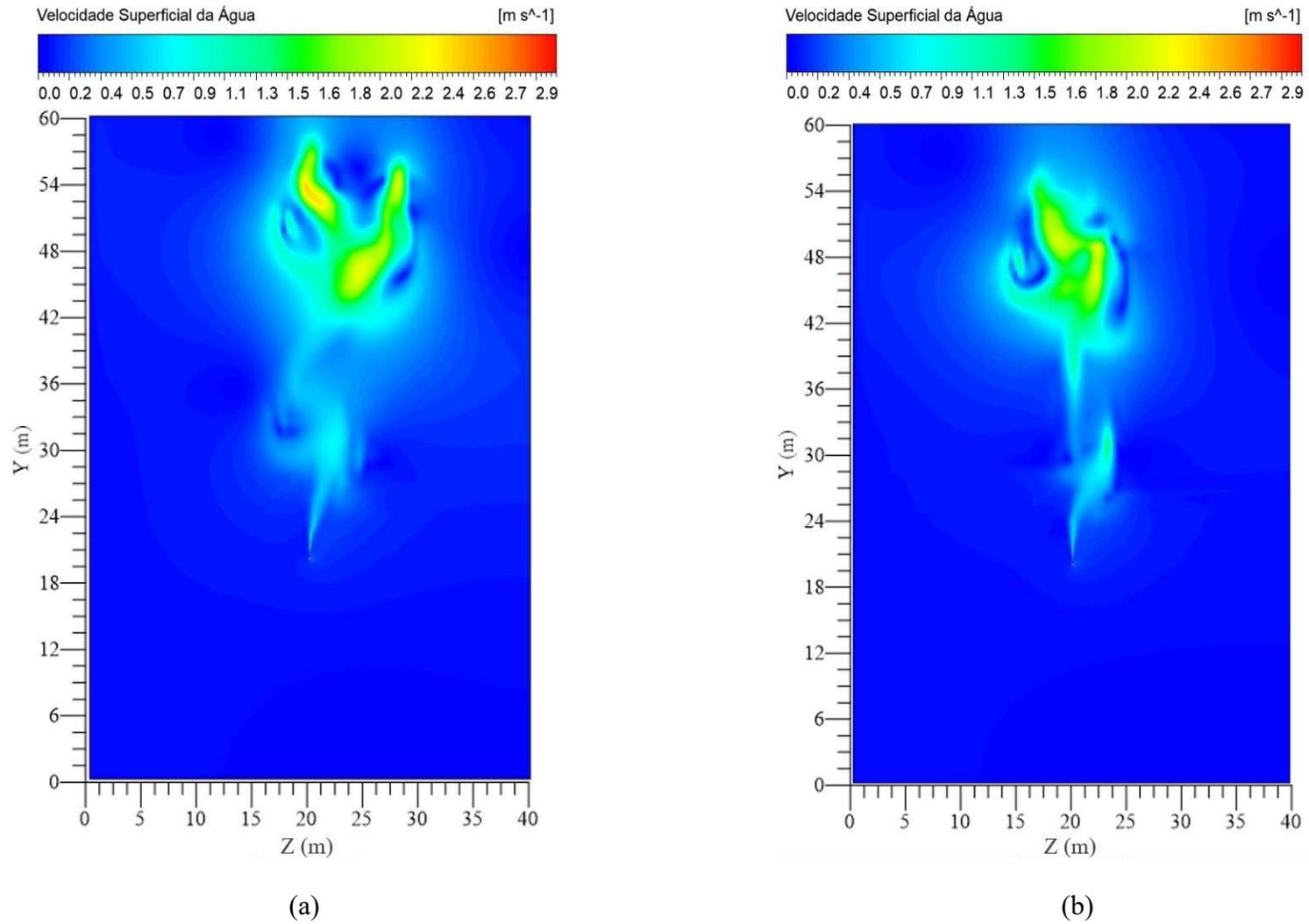
#### 4.3.1 Campo de Velocidade Superficial da Água no plano YZ

Foram analisados, inicialmente, o campo de velocidade superficial da água, com velocidades de correnteza igual a 0,05 m/s, 0,35 m/s e 0,5 m/s (Casos 1, 5, 7, 8, 12 e 14) respectivamente, em um tempo de propagação de 30 s, considerando o *riser* sob efeito estático e dinâmico. Nas Figuras 4.7a e 4.7b (Caso 1 e Caso 8), percebe-se que a velocidade superficial da água, considerando o *riser* sob efeito estático, é maior em relação ao *riser* sob movimentação. Isso ocorre devido aos efeitos de movimentação da estrutura mecânica do *riser*, onde, a correnteza se encontra a 0,05 m/s de velocidade e número de Froude igual a 0,0021 ( $Fr_0 = 0,0021$ ). À medida que vai aumentando a velocidade de correnteza, 0,35 m/s e 0,5 m/s ( $Fr_0 = 0,014$ ;  $Fr_0 = 0,021$ ), Figuras 4.8a, b e 4.9a, b (Caso 5, Caso 7, Caso 12 e Caso 14) respectivamente, observa-se que a velocidade superficial da água vai aumentando proporcionalmente considerando o *riser* sob efeitos estáticos e em movimento, e, para ambas as velocidades de correnteza, o escoamento é considerado como subcrítico, ou seja, as perturbações no fluxo podem se deslocar tanto a jusante como a montante do escoamento, sendo as forças gravitacionais que predominam o escoamento.

#### 4.3.2 Campo de fração volumétrica

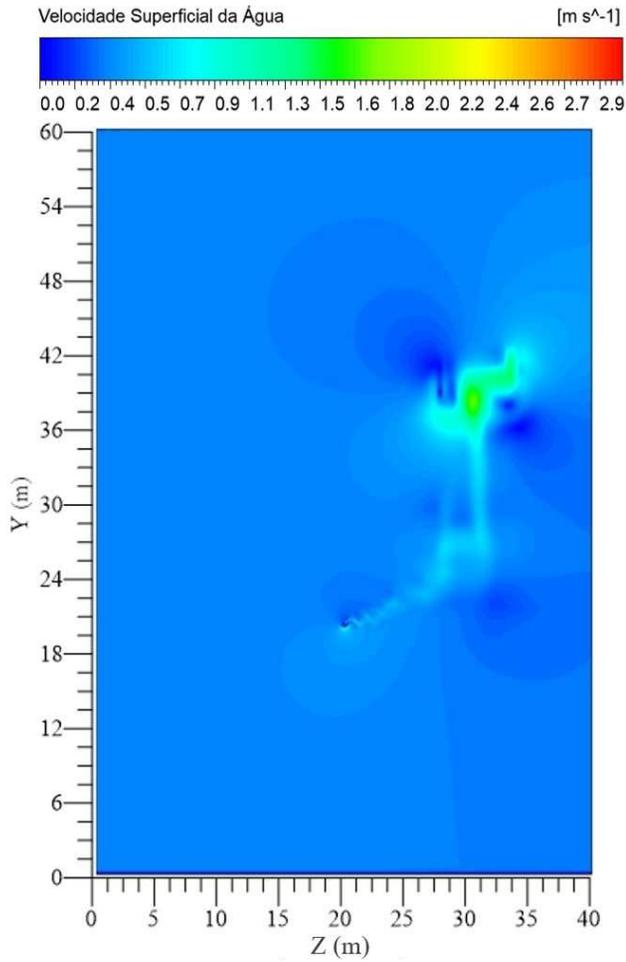
Analisando a fração volumétrica de óleo sob condições padrão (Tabela 4.1) para o *riser* estático (Figura 4.10a) e em movimento (Figura 4.10b), observa-se que, tanto para o *riser* parado, quanto em movimento, apresentam trajetos de 35 s de duração verticalmente até a superfície livre, porém, para o *riser* estático, ocorre uma maior dispersão do óleo quando comparado com o *riser* em movimento. O fluxo se encontra a uma velocidade padrão de 0,1 m/s e  $Fr_0 = 0,0041$ . Experimentalmente, Zhu et al. (2017a), observou comportamento semelhante quando ocorre a ruptura do jato de óleo em função dos efeitos de correnteza, rompendo-se o jato de óleo, devido às forças atuantes, ocorre a dispersão do óleo em direção a superfície no sentido da direção do fluxo.

**Figura 4.7:** Velocidade Superficial da água para velocidade de correnteza de 0,05 m/s em um tempo de 30 s,  $Fr_0 = 0,0021$ ;  
(a) riser estático (b) riser em movimento

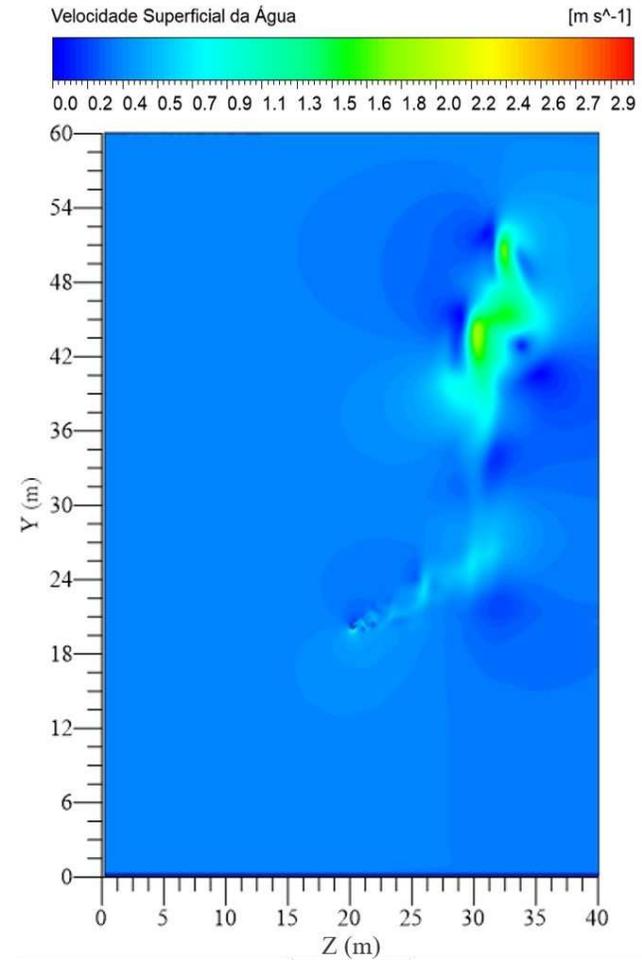


Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.8:** Velocidade Superficial da água para velocidade de correnteza de 0,35 m/s em um tempo de 30 s,  $Fr_0 = 0,014$ ;  
(a) riser estático (b) riser em movimento



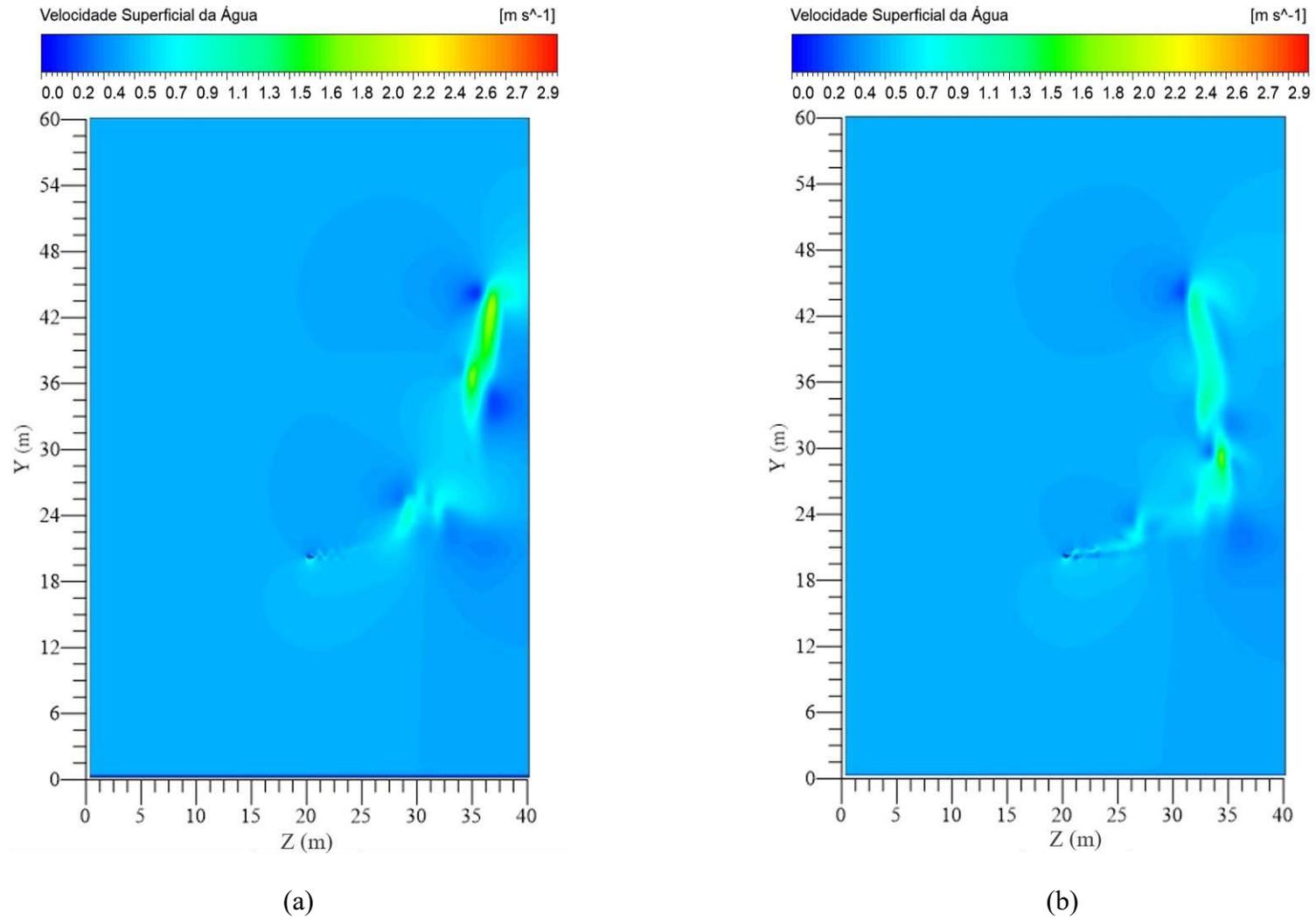
(a)



(b)

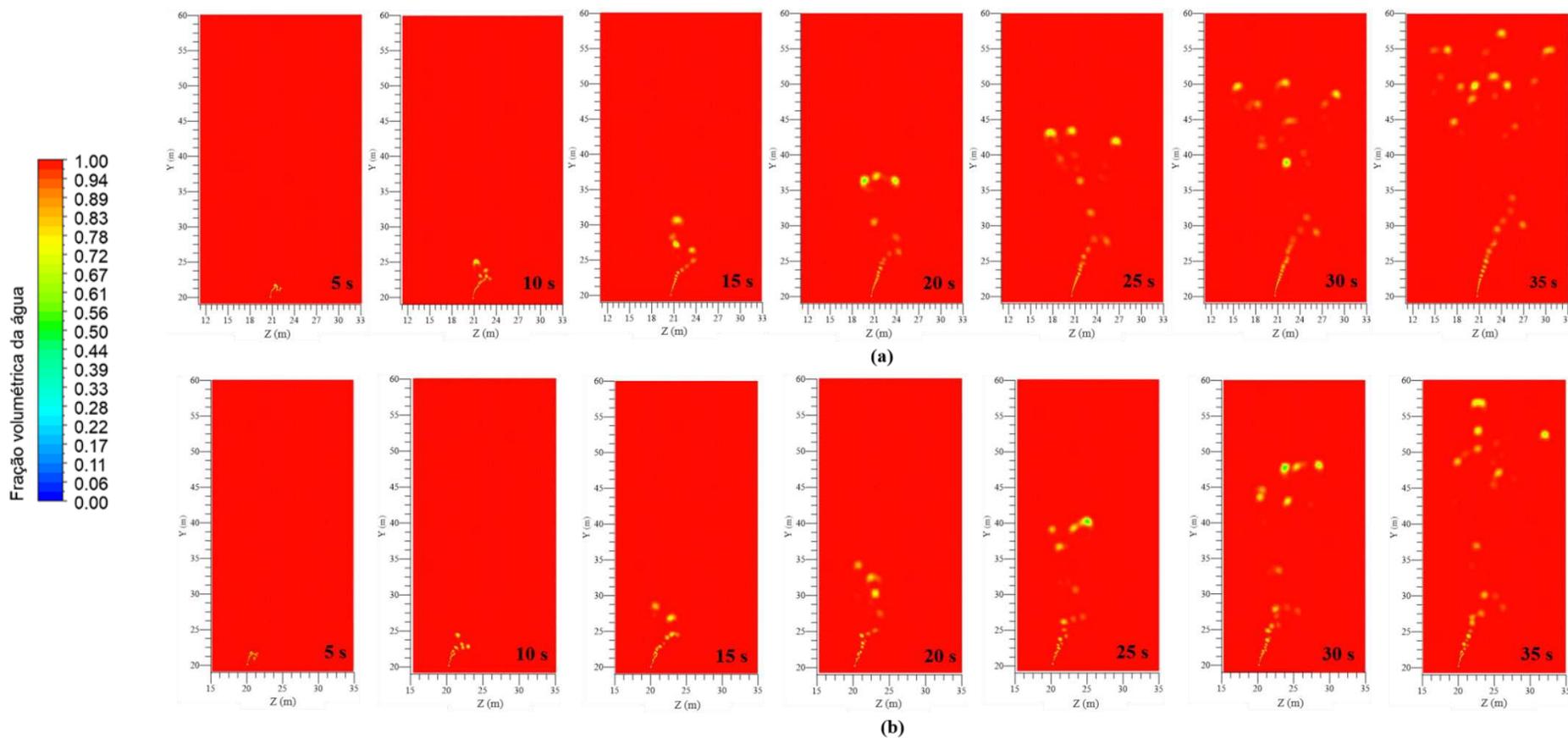
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.9:** Velocidade Superficial da água para velocidade de correnteza de 0,5 m/s, para um tempo de 30 s,  $Fr_0 = 0,021$ ;  
(a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.10:** Campo de fração volumétrica para as condições padrão (Tabela 4.1), com 0,1 m/s de velocidade de correnteza ( $Fr_0 = 0,0041$ ) para diferentes tempos de simulação: (a) estático (b) dinâmico



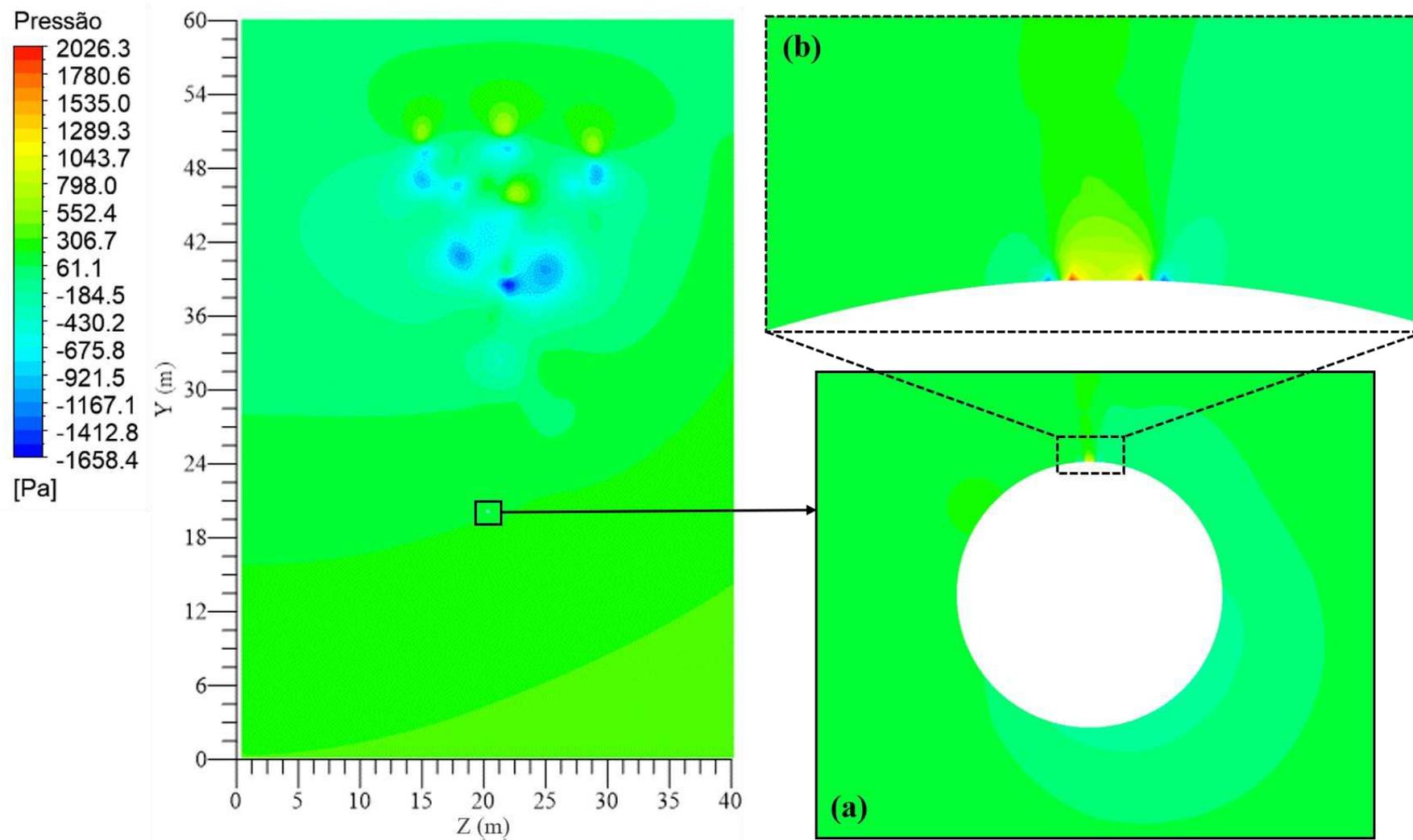
Fonte: Próprio do autor (2021).

### 4.3.3 Campo de Pressão

Com objetivo de avaliar o campo de pressão no plano YZ sob condições padrão (Tabela 4.1) em um tempo de 30 s, vê-se que os valores de pressão apresentam um decréscimo no sentido ascendente vertical devido a coluna de água, com a velocidade de correnteza adotada como sendo igual a 0,1 m/s (Caso 2) com  $Fr_0 = 0,0041$ . Comportamento semelhante é observado por Sowoud et al. (2020). Analisando o efeito do *riser* estático para as condições padrão do escoamento em torno da parede do *riser* (Figura 4.11a), observa-se valores de pressão menores, isso ocorre devido à desaceleração do fluxo (correnteza) gerando uma distribuição de baixa pressão em torno da parede do *riser*. Porém, para a região em destaque, próximo ao orifício de vazamento (Figura 4.11b), é constatado um pequeno aumento da pressão. Esse fenômeno pode ser explicado devido a saída de óleo para o oceano na região destacada, em ambas as situações.

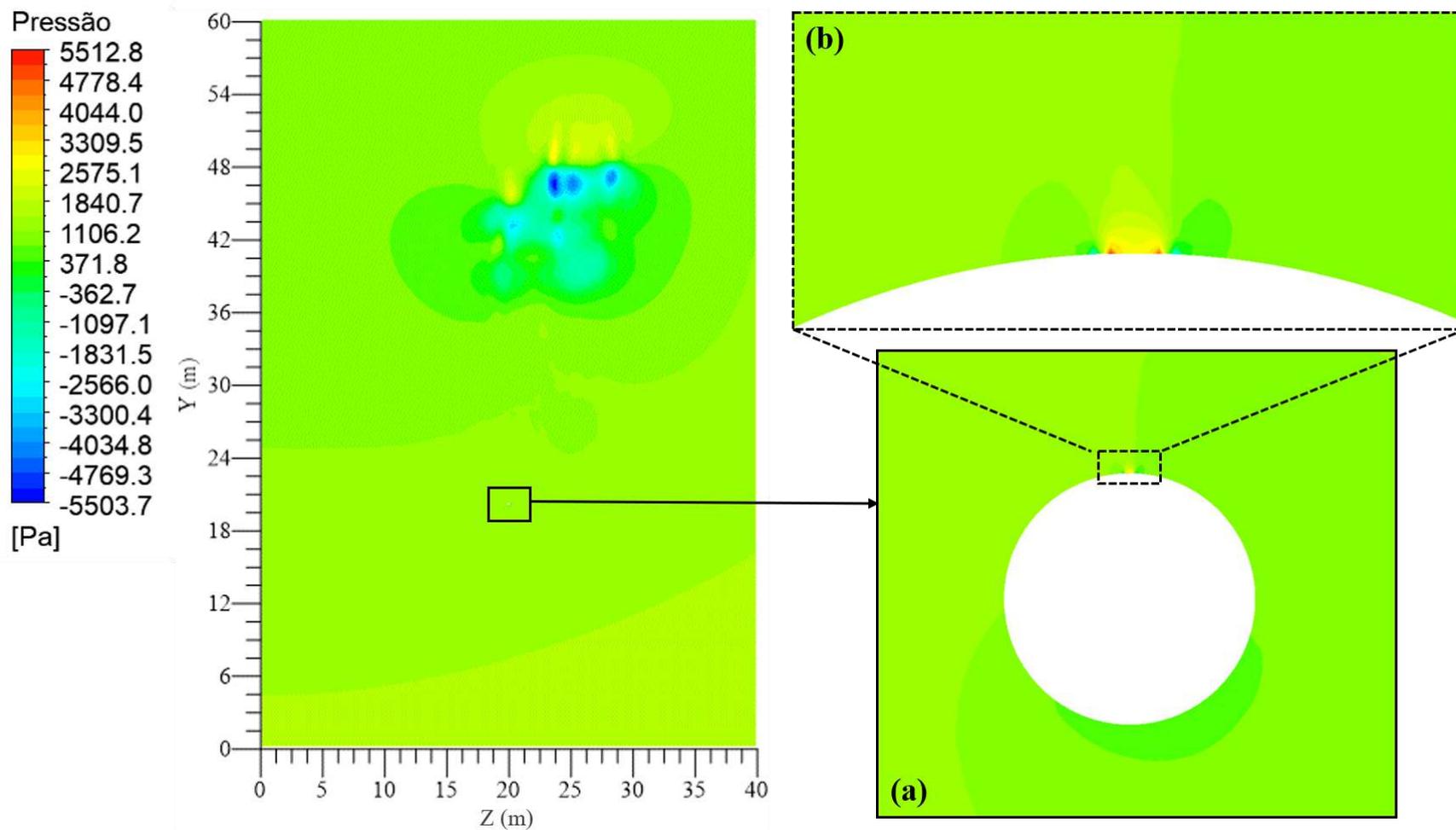
Em relação ao mesmo caso, porém com o *riser* em movimento, Caso 9, observa-se uma distribuição de pressão diferente do que a que foi apresentada na Figura 4.11. Observa-se que para o campo de pressão com o *riser* sob efeito dinâmico, têm-se valores de pressão mais elevados do que no caso do *riser* estático. Tal fato pode ser explicado devido aos movimentos do *riser* sob a coluna d'água, vide Figura 4.12. Na região próxima à parede do *riser*, há um pequeno decréscimo de pressão, devido à presença do fluido (óleo) no oceano (Figura 4.12a), porém, na região do orifício de vazamento, é possível perceber um grande aumento da pressão devido a perturbação do fluido adentrando no mar, bem como devido aos efeitos do movimento da parede do *riser* (Figura 4.12b). Se não houvesse vazamento, o escoamento em torno do *riser* causaria um decréscimo de pressão em torno da parede, distantes de possíveis pontos de estagnação.

**Figura 4.11:** Campo de pressão sobre o plano YZ sob condições padrão (0,1 m/s de velocidade de correnteza,  $Fr_0 = 0,0041$ ) riser estático: (a) seção transversal do riser (b) região próxima ao orifício de vazamento



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.12:** Campo de pressão sobre o plano YZ sob condições padrão (0,1 m/s de velocidade de correnteza,  $Fr_0 = 0,0041$ ) riser em movimento: (a) seção transversal do riser (b) região próxima ao orifício de vazamento



Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.4 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes velocidades de correnteza para o *riser* dinâmico e estático

##### 4.4.1 Campo de fração volumétrica da água durante vazamento de óleo sob diferentes velocidades de correnteza em *riser* estático e dinâmico

Considerando a correnteza a uma velocidade constante de 0,1 m/s, com número de Froude ( $Fr_0 = 0,0041$ ), observa-se na Figura 4.13 que o óleo inicialmente adentra no mar na forma de jato e, em seguida, vai perdendo velocidade e devido às forças atuantes e aos efeitos de corrente, sofre dispersão no oceano, em direção à superfície livre. Vê-se que para o campo de fração volumétrica de água considerando o *riser* sob efeito estático (Caso 2), ocorre uma maior dispersão das gotículas de óleo próxima à superfície livre (Figura 4.13 a).

Considerando o *riser* em movimento, com velocidade de corrente de 0,1 m/s (Caso 9), pode ser observado que o jato de óleo se dispersa em uma altura inferior e, conseqüentemente, menor tempo quando comparado com o *riser* sem movimento (Figura 4.13b), o que mostra o quanto é importante analisar os efeitos dinâmicos na presença de vazamento de óleo em água.

Analisando o campo vetorial da fração volumétrica de água próximo a parede do *riser* e do orifício de vazamento no plano YZ sob condições padrão (Tabela 4.1), considerando o *riser* estático e em movimento, a Figura 4.14a mostra uma representação da direção da velocidade da corrente na presença de vazamento de óleo em um tempo de simulação de 36 s. Os vetores mostram claramente o sentido do escoamento da água, considerando o mesmo efeito, estático, observa-se o sentido da direção do campo vetorial em torno da parede do *riser*. Uma zona de recirculação é formada ao lado direito da parede do *riser* sob efeito estático, esse fenômeno ocorre devido aos esforços hidrostáticas da coluna de água sobre a parede do *riser*.

Avaliando o efeito das forças de inércia e força de tensão superficial, o número de Weber no escoamento óleo/água foi superior à 10.000 em todos os casos analisados. As intrincadas formas não esféricas das gotículas mostram que o número de Weber é alto, logo, indica que as forças de inércia são muito superiores as forças de tensão superficial, com as forças de inércia predominando no escoamento.

A zona de recirculação se distânciada da parede do *riser* devido à movimentação da estrutura do *riser* fazendo com que ocorra a quebra do jato de óleo em uma altura menor em relação ao efeito estático, além de fazer com que ocorra a dispersão do óleo, mostrando a fragilidade do jato de óleo (Figura 4.14b). Observa-se no plano YZ o comportamento da pluma de óleo para o campo de fração volumétrica da água em um tempo de 36 s, com o *riser* sob efeito estático e em movimento (Figura 4.15).

Aumentando a velocidade da correnteza para 0,2 m/s (Caso 3) para o *riser* sob efeito estático e sob efeito dinâmico (Caso 10), vê-se na Figura 4.16 que a pluma de óleo na correnteza é quebrada e arrastada no sentido a jusante, levando mais tempo para alcançar os 40 m de altura do ponto de vazamento até a superfície livre. Para esta velocidade de propagação, o número de Froude é igual a 0,0082, ou seja, as perturbações do fluxo podem viajar tanto a montante como a jusante do escoamento, com destaque para as forças no momento do escoamento. Na Figura 4.16a o *riser* se encontra parado. É possível observar que o óleo apresenta um efeito mais disperso das partículas de óleo em relação ao efeito dinâmico, devido aos efeitos de força de empuxo. É também observado que 60 s foi o tempo levado para que o óleo pudesse alcançar a superfície livre.

Na Figura 4.16b, o *riser* se encontra em movimento e, dessa maneira, pode-se observar que a trajetória do óleo até a superfície livre é realizada em cerca de 35 s, tempo bem inferior quando comparado com o *riser* estático. Essa maior dispersão se deve não à perturbação causada pelo movimento do *riser* no escoamento principal, mas sim à oscilação do ponto de vazamento.

Quando se aumenta a velocidade da correnteza para 0,3 m/s, conseqüentemente, aumentará também o tempo da dispersão do óleo, visto que a força da correnteza vai arrastá-lo lateralmente, fazendo com que o óleo tenha um percurso maior no sentido da superfície livre. Quando existe movimento no *riser*, o aumento da velocidade da correnteza causa uma diminuição da dispersão do óleo, fazendo com que ele seja arrastado rapidamente.

Para uma velocidade de correnteza de 0,3 m/s (Caso 4 e Caso 11), observa-se que o petróleo lançado no mar é arrastado por mais tempo à jusante e, após ter alcançado cerca de 10 m de altura do ponto de vazamento em direção à superfície livre, ocorre uma maior dispersão do óleo no sentido a jusante e a montante da correnteza, conforme visto na Figura 4.17. Para o *riser* estático, a pluma de óleo é arrastada à jusante por cerca de 12 m de distância, levando cerca de

40 s para alcançar os 40 m de altura estudado desde o ponto de vazamento (Figura 4.17a). Para a velocidade de propagação de 0,3 m/s, o número de Froude é igual 0,012, apresentando perturbações à montante e à jusante do escoamento.

Para os efeitos dinâmicos, a dispersão do óleo ocorre mais no sentido vertical, levando menos tempo para alcançar a superfície livre. Isso se dá devido a movimentação da estrutura do *riser* que faz com que ocorra a quebra do jato de óleo em uma altura menor e, conseqüentemente, uma maior dispersão do óleo no mar levando menos tempo de percurso do ponto de vazamento até a superfície do mar (Figura 4.17b).

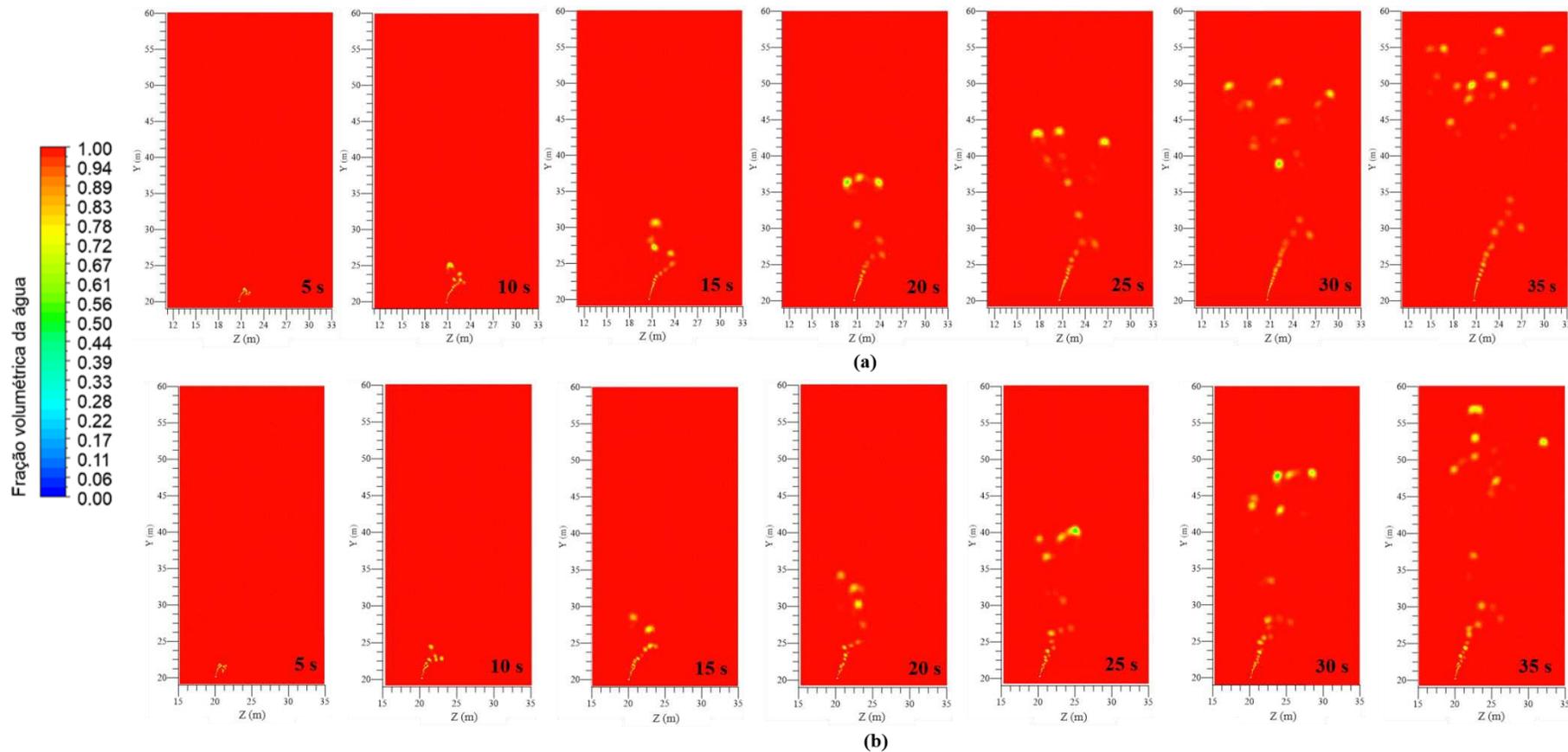
Observando o campo vetorial da fração volumétrica da água para velocidade de correnteza de 0,3 m/s (Caso 4), pode ser observado na Figura 4.18 a zona de recirculação se forma em uma região bem superior ao lado direito do vazamento, mostrando que nesta zona ocorre a circulação de água e óleo devido à alta velocidade em que a correnteza se encontra, considerando o *riser* sob efeito estático. Porém, considerando o *riser* em movimento, para mesma velocidade de corrente, 0,3 m/s (Caso 11), a zona de recirculação ocorre com uma fração de óleo maior, de acordo com o campo vetorial. O jato de óleo mostra-se com um ângulo de inclinação menor em relação ao efeito estático, isso ocorre devido a movimentação da tubulação, alterando o comportamento do jato de óleo (Figura 4.19). O campo de fração volumétrica para o *riser* estático e em movimento no Plano YZ pode ser observado na Figura 4.20.

Considerando a correnteza a uma velocidade de 0,4 m/s (Caso 6 e Caso 13) é nítida a dispersão do óleo em um mar mais severo, vale salientar que, para uma velocidade de propagação de 0,4 m/s, o número de Froude é igual a 0,016, com perturbações à montante e à jusante do escoamento. Observa-se que o petróleo alcançou a superfície livre em um tempo de 40 s, considerando o *riser* estático (Caso 6), vide a Figura 4.21a. Cerca de 14 m de comprimento foi a distância horizontal percorrida pelo petróleo em direção a saída do canal. Para o efeito dinâmico da estrutura do *riser* (Caso 13), percebe-se uma menor dispersão da pluma de óleo na fração de volume de água. Pode ser visto também que, para esse mesmo efeito, a uma velocidade de 0,4 m/s de correnteza, o óleo vazado percorre uma distância de 20 m e alcança a superfície livre em um tempo de 50 s (Figura 4.21b).

Logo, para velocidades máximas de correnteza de 0,5 m/s (Caso 7 e Caso 14), sendo Froude igual a 0,021, a pluma de óleo apresenta um trajeto muito maior à jusante alcançando uma maior distância percorrida em relação às demais velocidades de corrente analisadas. Para o Caso 7, *riser* estático, devido às altas velocidades de correnteza, a pluma de óleo leva cerca de 60 s para alcançar a superfície livre (Figura 4.22 a). O esforço de cisalhamento transfere maior energia cinética para o fluxo de óleo, resultando em maior migração, comportamento semelhante pode ser observado em Li et al. (2013a), que analisou o efeito da pressão no vazamento em oleoduto submerso. Observa-se que o óleo vazado para altas velocidades, sob efeitos dinâmicos (Caso 14) apresentam uma dispersão física menor em comparação aos efeitos estáticos (Figura 4.22b).

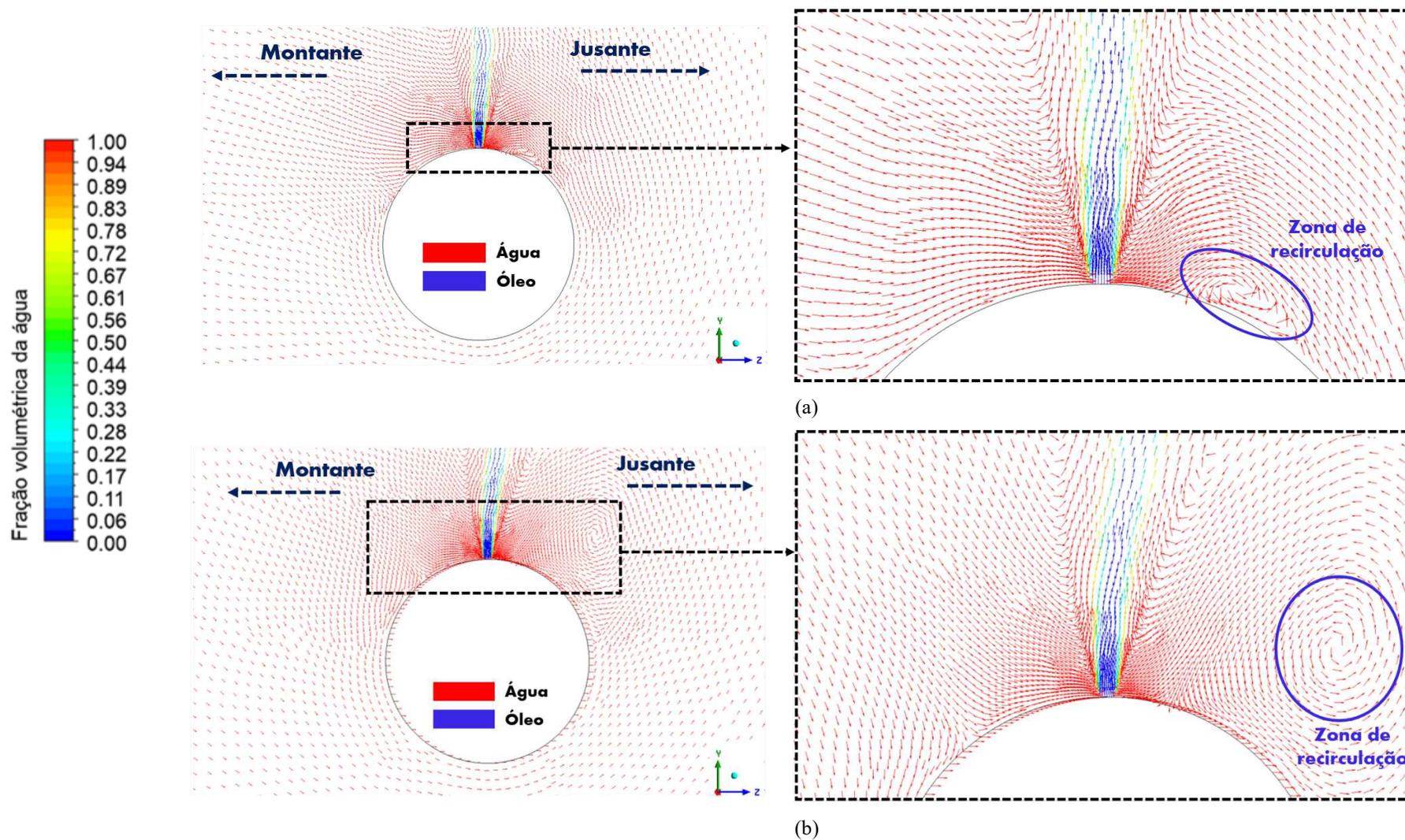
Analisando o campo vetorial próximo a parede do *riser* e do vazamento sob efeito estático, para uma velocidade de corrente de 0,5 m/s (Caso 7), observa-se que a zona de recirculação ocorre bem a direita do *riser*, não mostrando partículas de óleo para esta região (Figura 4.23). Para o *riser* em movimento (Caso 14), a zona de recirculação ocorre em região bem superior e distante do *riser*, devido a movimentação do *riser* (Figura 4.24). Já a Figura 4.25a, b, mostra o campo vetorial de todo o domínio no plano YZ, para o *riser* estático e dinâmico, respectivamente.

**Figura 4.13:** Velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ : (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



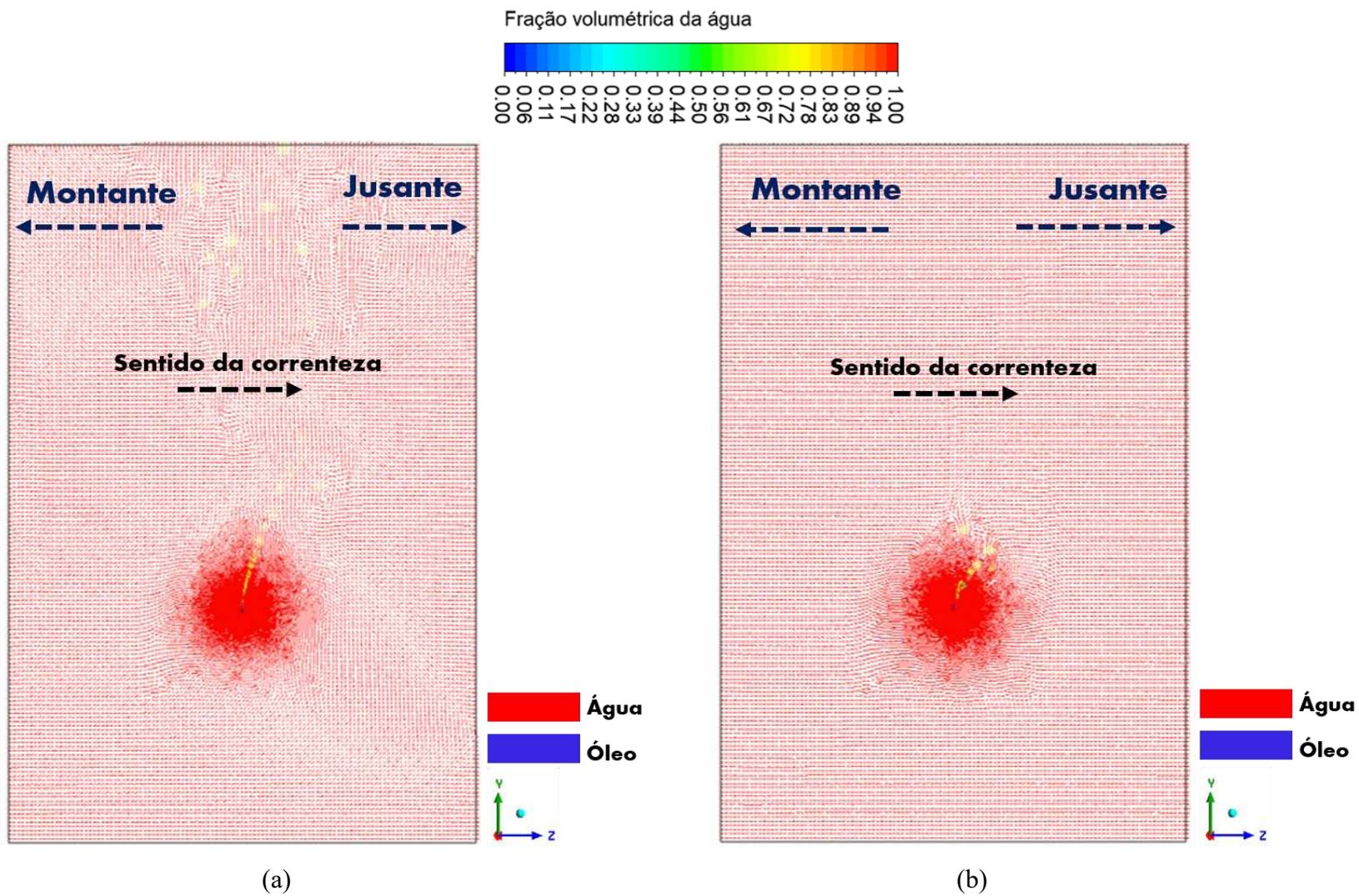
Fonte: Próprio do autor (2021).

Figura 4.14: Campo vetorial da fração volumétrica da água sob condições padrão de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ , com detalhe próximo a parede do *riser* e do orifício de vazamento; (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



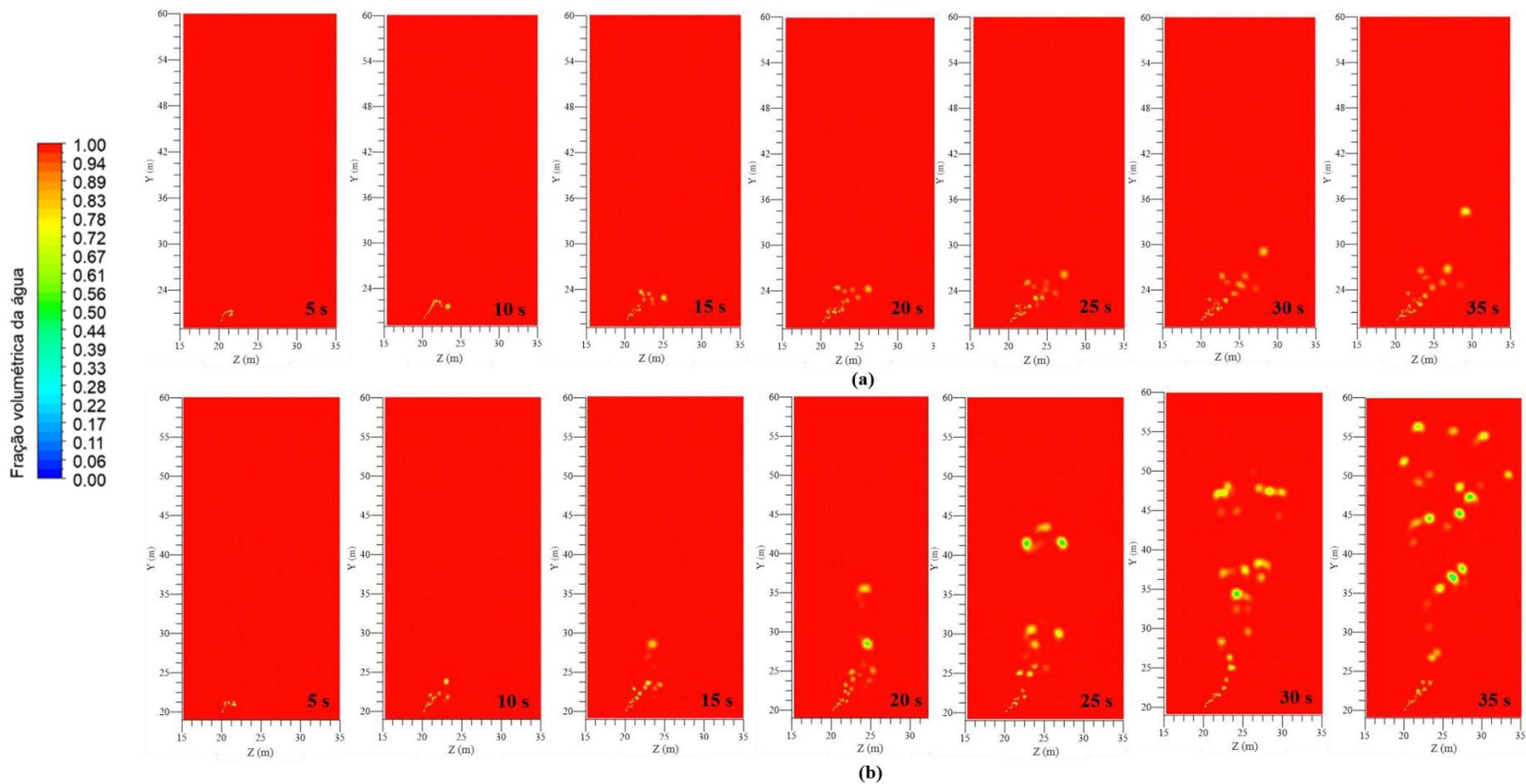
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.15:** Campo de fração volumétrica da água no plano YZ sob condições padrão de velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ : (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



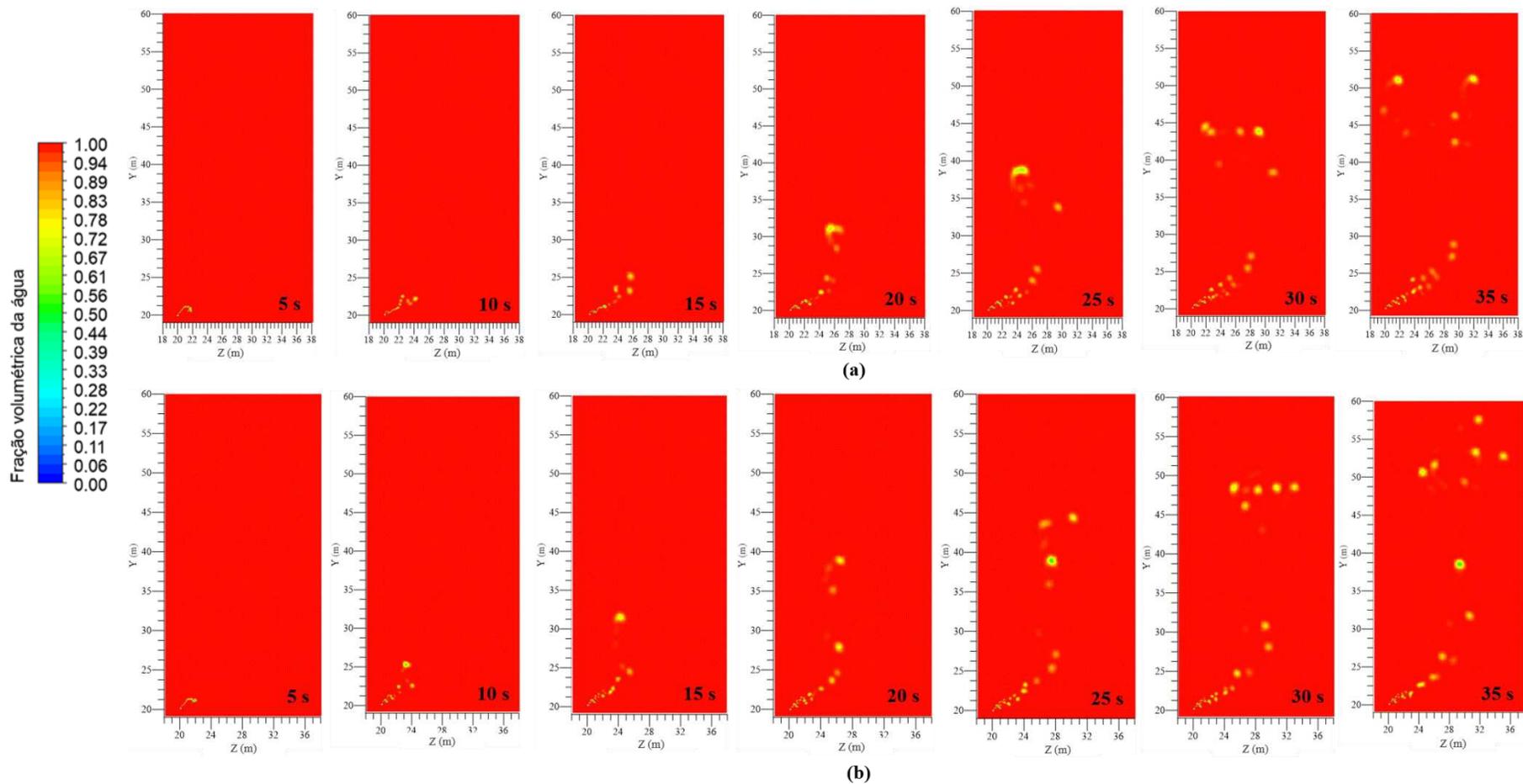
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.16:** Velocidade de correnteza de 0,2 m/s,  $Fr_0 = 0,0082$ : (a) riser estático (b) riser em movimento



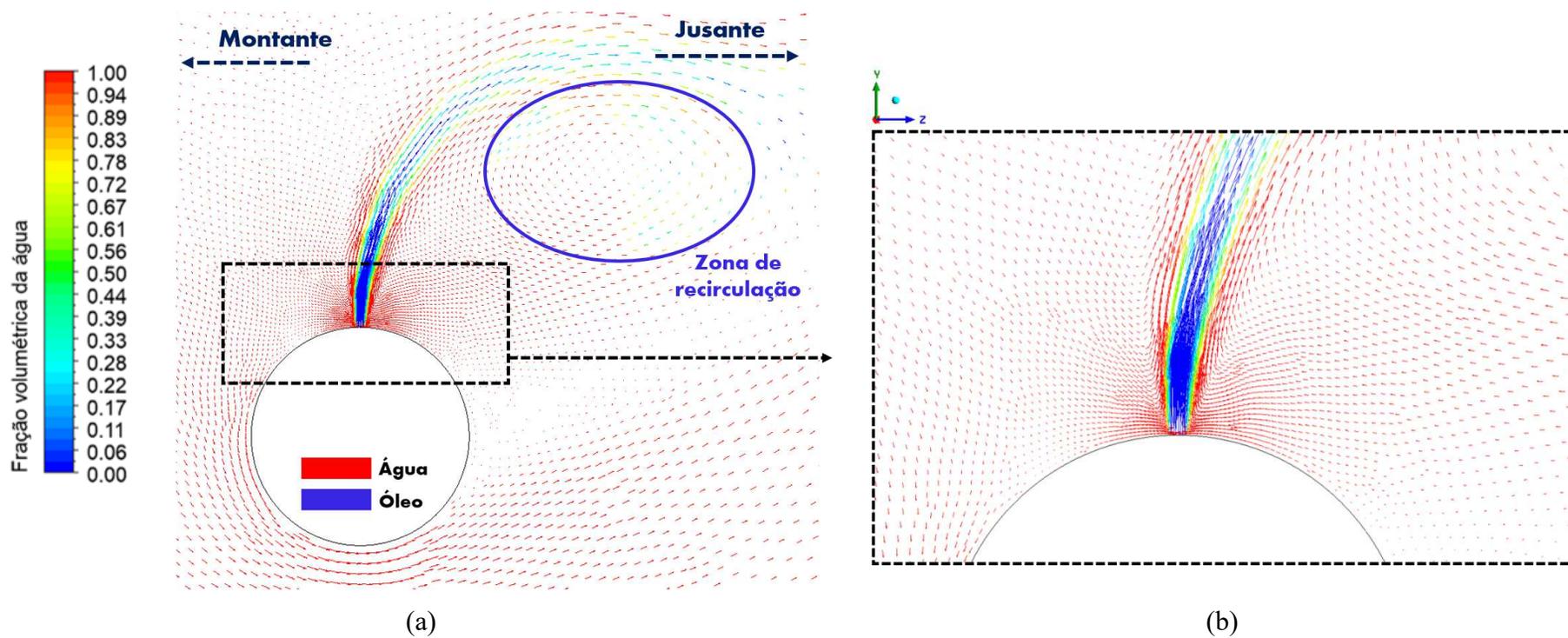
Fonte: Próprio do autor (2021).

Figura 4.17: Velocidade de correnteza de 0,3 m/s,  $Fr_0 = 0,012$ : (a) riser estático (b) riser em movimento



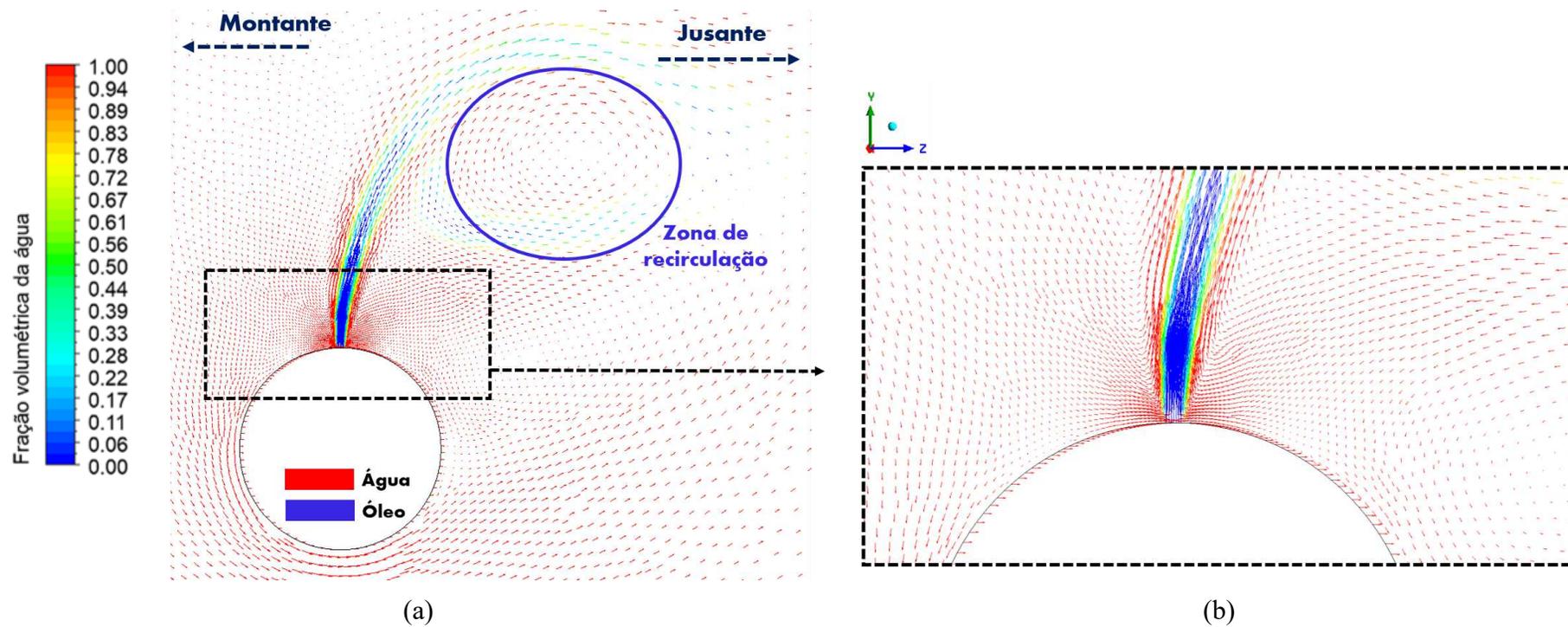
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.18:** Campo vetorial da fração volumétrica da água sob velocidade de correnteza de 0,3 m/s,  $Fr_0 = 0,012$ , riser estático; (a) detalhe próximo a parede do riser (b) orifício de vazamento



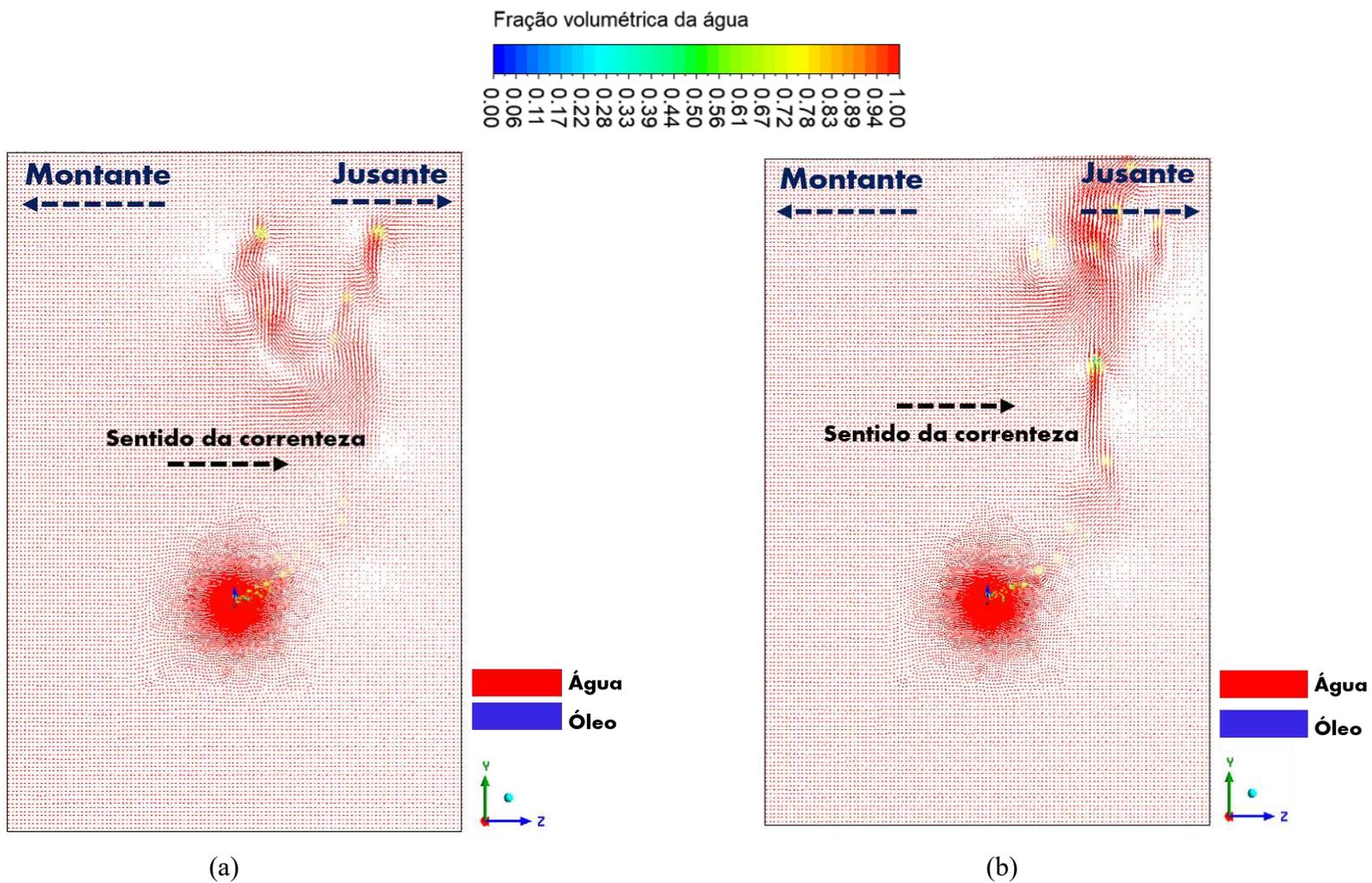
Fonte: Próprio do autor (2021).

Figura 4.19: Campo vetorial da fração volumétrica da água sob velocidade de correnteza de 0,3 m/s,  $Fr_0 = 0,012$ , para o *riser* em movimento; (a) detalhe próximo a parede do *riser* (b) orifício de vazamento



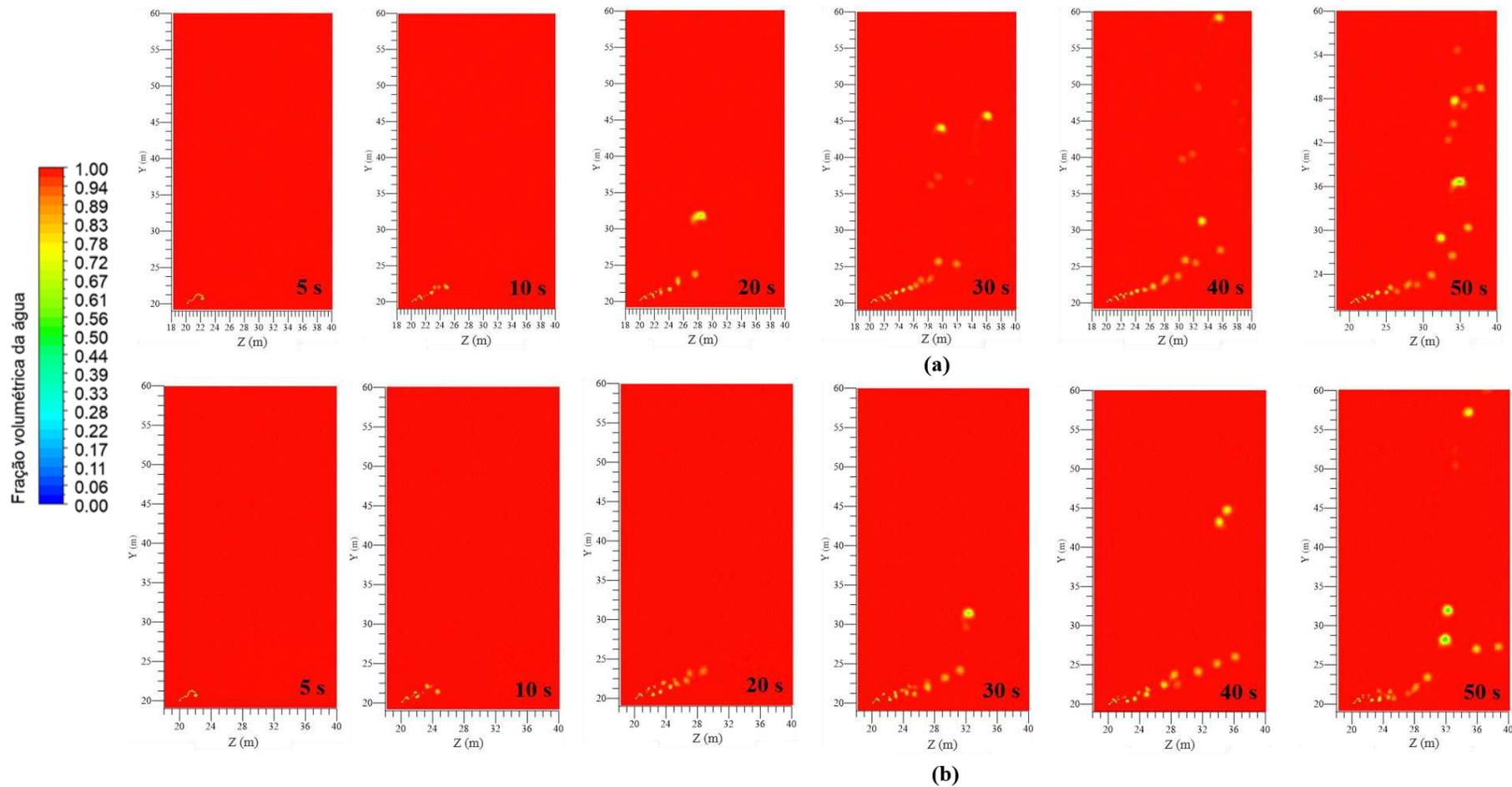
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.20:** Campo de fração volumétrica da água no plano YZ sob condições de velocidade de correnteza de 0,3 m/s,  $Fr_0 = 0,012$ :  
 (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



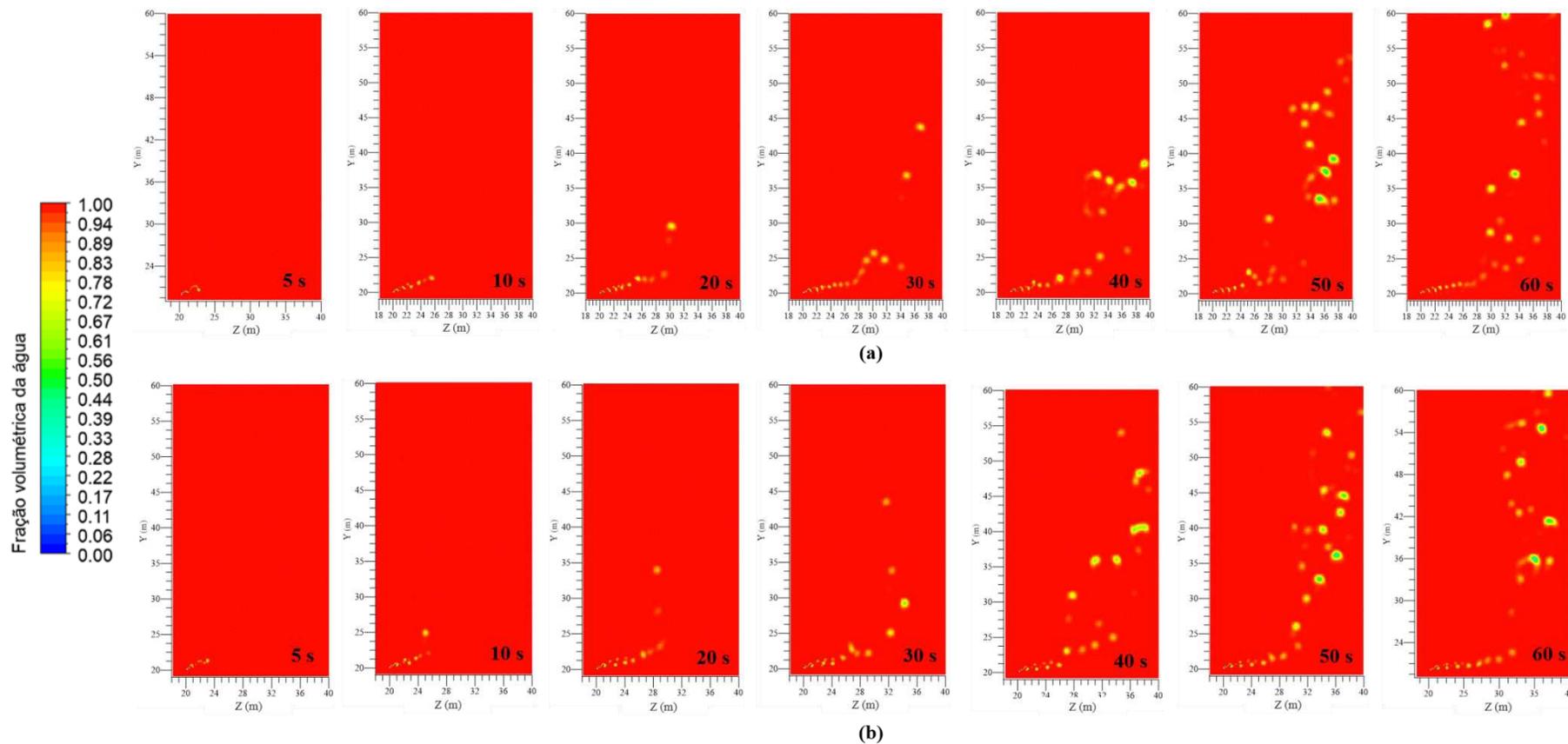
Fonte: Próprio do autor (2021).

Figura 4.21: Velocidade de correnteza de 0,4 m/s,  $Fr_0 = 0,016$ : (a) riser estático (b) riser em movimento



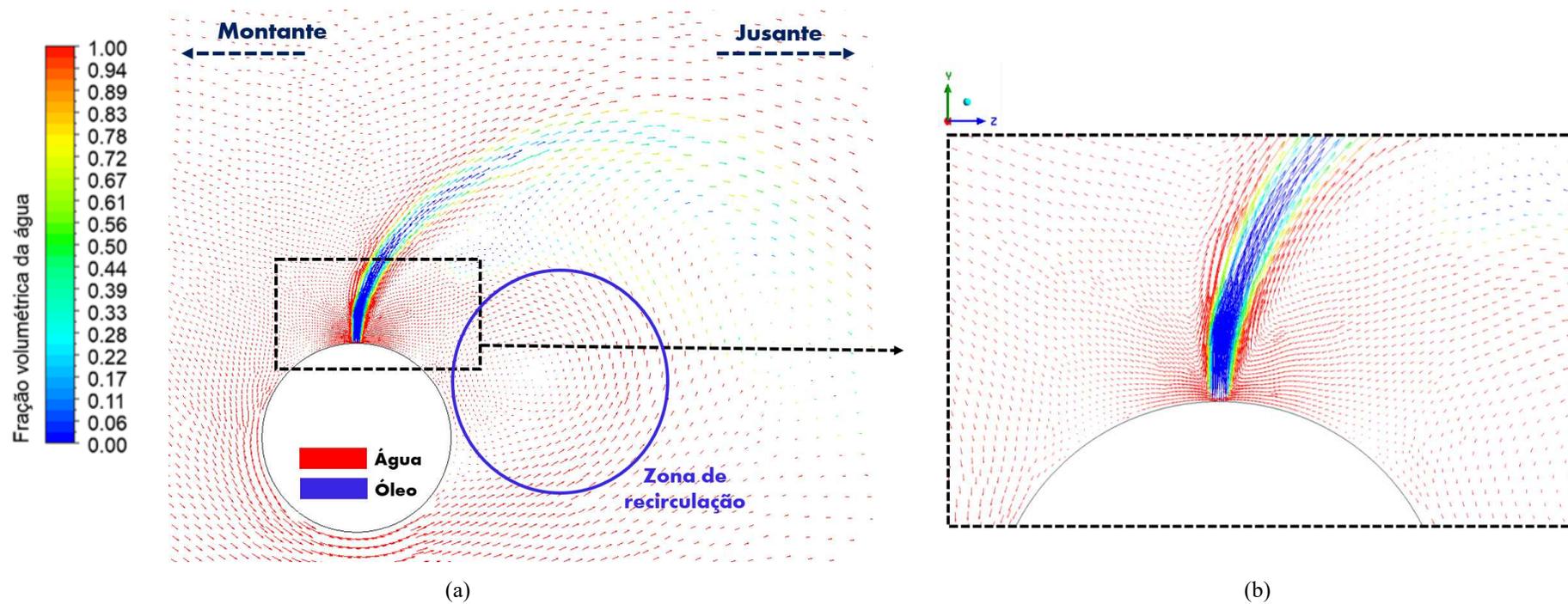
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.22:** Velocidade de correnteza de 0,5 m/s,  $Fr_0 = 0,021$ : (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



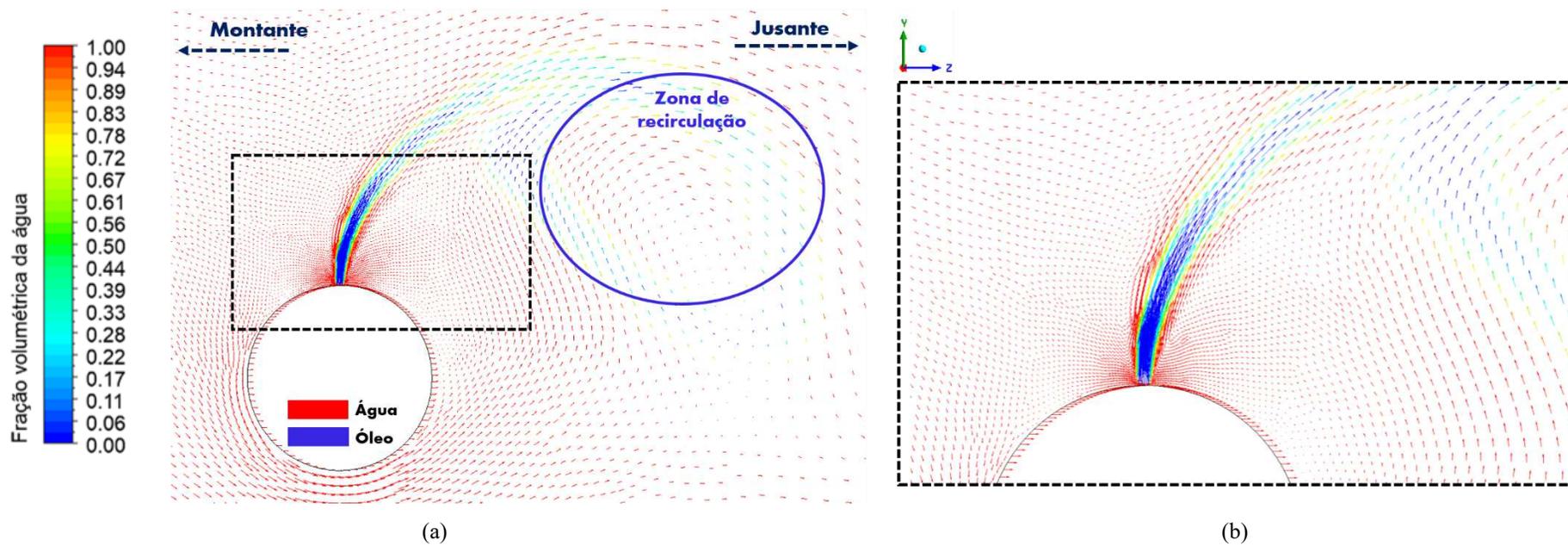
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.23:** Campo vetorial da fração volumétrica da água para velocidade de correnteza de 0,5 m/s,  $Fr_0 = 0,021$ , *riser* estático; (a) detalhe próximo a parede do *riser* (b) orifício de vazamento



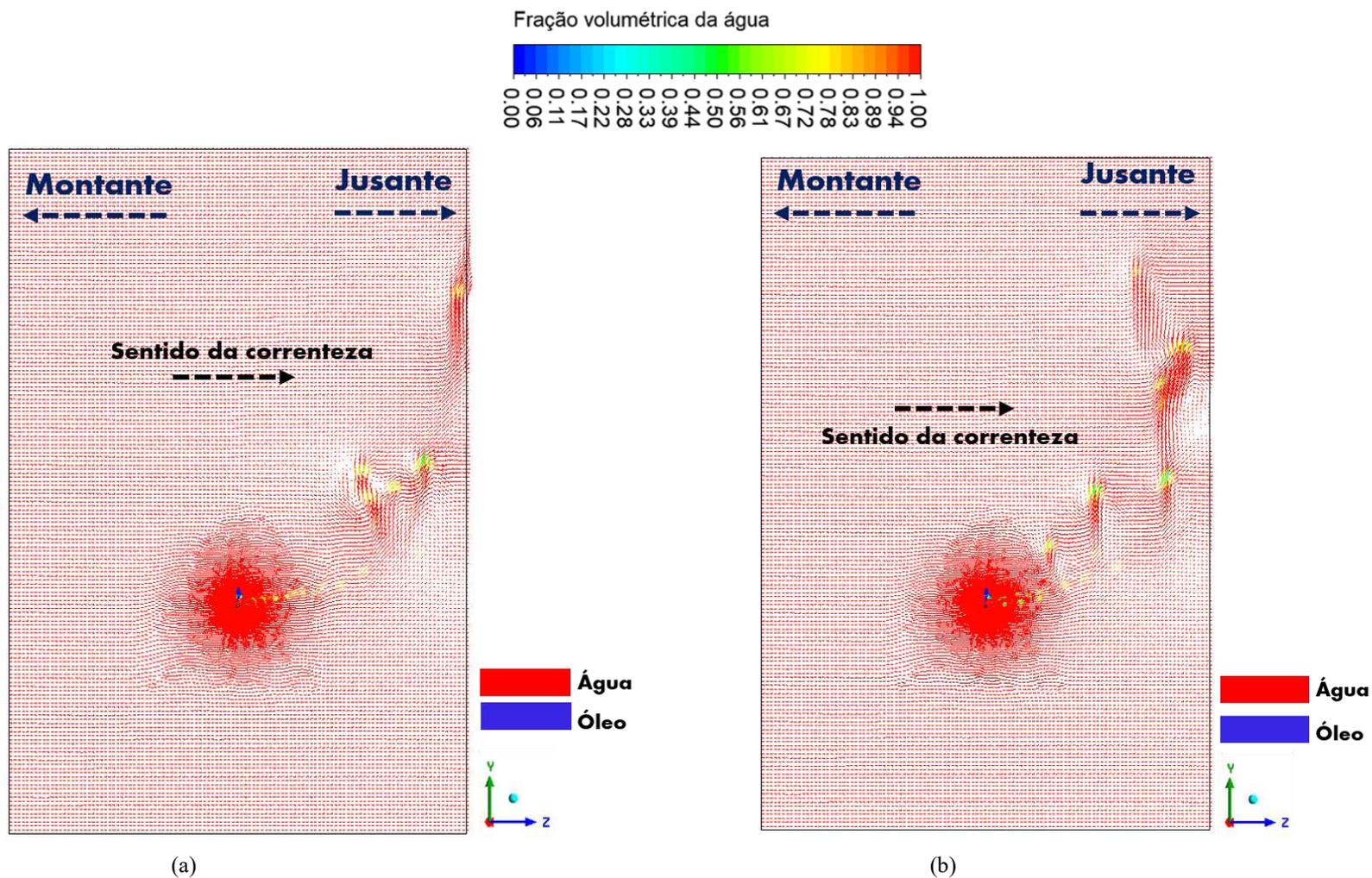
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.24:** Campo vetorial da fração volumétrica da água sob velocidade de correnteza de 0,5 m/s,  $Fr_0 = 0,021$ , *riser* movimento; (a) detalhe próximo a parede do *riser* (b) orifício de vazamento



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.25:** Campo de fração volumétrica da água no plano YZ sob velocidade de correnteza de 0,5 m/s,  $Fr_0 = 0,021$   
 (a) riser estático (b) riser em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.4.2 Efeito da movimentação do riser na altura da quebra do jato de óleo em função da velocidade da correnteza

Analisando a altura da quebra do jato de óleo em função da velocidade da correnteza para o *riser* sob efeitos estático e dinâmico, observa-se que, em uma velocidade de corrente de 0,1 m/s (Caso 2 e Caso 9),  $Fr_0 = 0,0041$ , a quebra do jato de óleo ocorre em uma altura de 1 m e 35 cm apresentando pouca dispersão para o *riser* sob efeito estático. Porém, analisando a mesma situação para o *riser* em movimento, pode ser observado, claramente, que, o efeito da movimentação do *riser* influencia bastante na altura da quebra do jato de óleo, que foi de 95 cm e também no comportamento físico da dispersão do óleo na coluna d'água em um tempo de 5.5 s (Figura 4.26a).

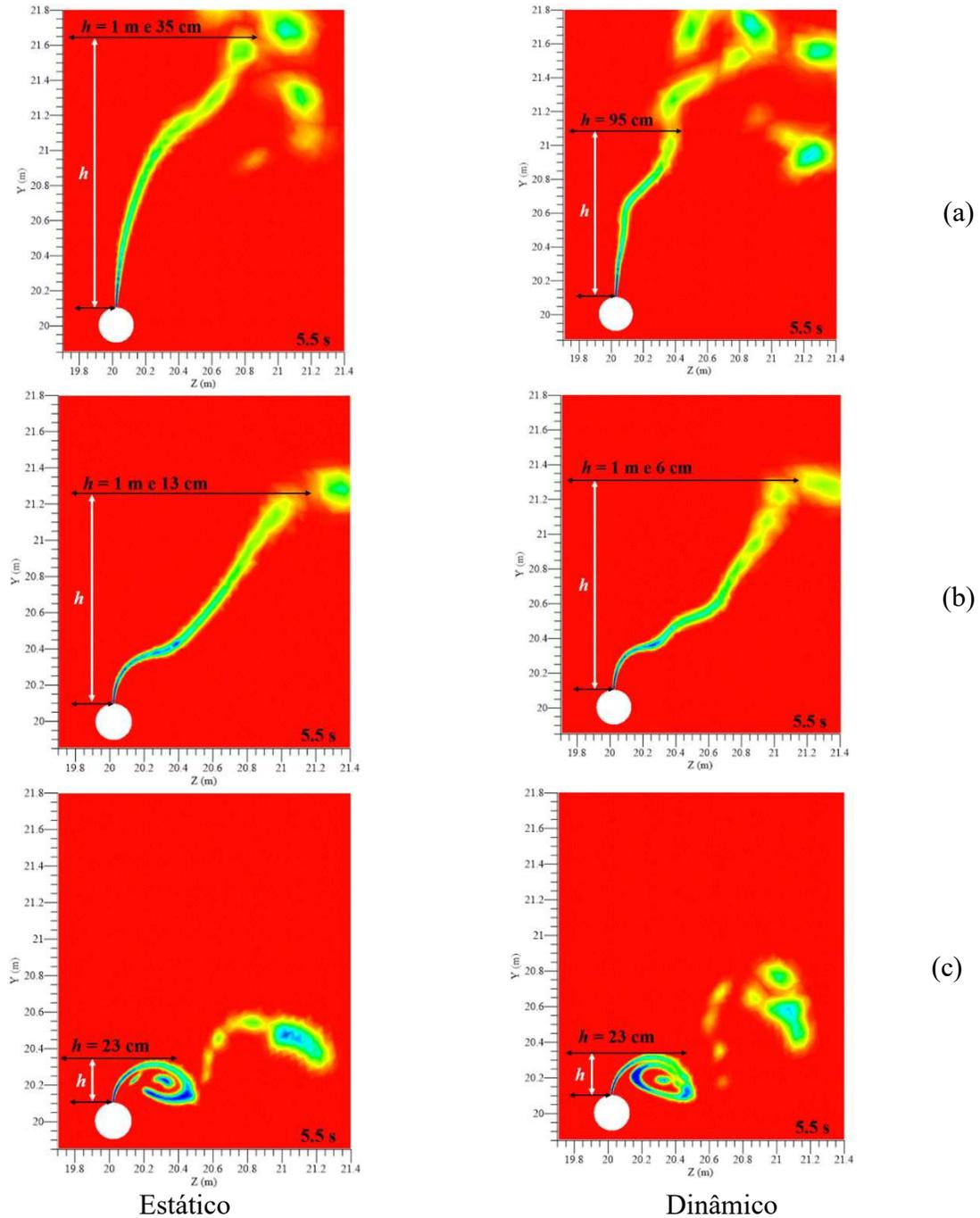
Ao aumentar a velocidade da correnteza para o *riser* sob efeito estático, a direção do jato de óleo no sentido à jusante do escoamento apresenta um ângulo menor em relação ao efeito dinâmico. Também é observado que 1 m e 13 cm foi a altura da quebra do jato de óleo para o *riser* parado em uma velocidade de correnteza de 0,3 m/s (Caso 4 e Caso 11),  $Fr_0 = 0,012$ , em 5.5 s. Considerando o efeito da movimentação do *riser*, no mesmo tempo, o jato de óleo apresenta um ângulo de inclinação maior em relação ao efeito estático, porém, a quebra do jato de óleo ocorre em uma altura de 1 m e 6 cm, 7 cm menor que o efeito estático, vide Figura 4.26b.

Para altas velocidades de correnteza, 0,5 m/s (Caso 7 e Caso 14),  $Fr_0 = 0,012$ , em um tempo de 5.5 s, o jato de óleo atinge uma altura de 23 cm apenas tanto para o *riser* sob efeito estático quanto em movimento. Observa-se que para o efeito dinâmico da parede do *riser*, a dispersão do petróleo atinge uma altura maior no sentido a jusante do escoamento e também com uma maior dispersão do mesmo na coluna de água a 1 m aproximadamente de distância do vazamento (Figura 4.26c).

Com objetivo de analisar o comportamento do óleo vazado na parede do *riser*, de acordo com a movimentação do *riser* de 0,2 m/s (Caso 10),  $Fr_0 = 0,0082$ , observa-se que, em um tempo de 5.6 s, o *riser*, ao se deslocar no sentido à jusante do escoamento, mostra uma aderência do óleo na parte externa da parede do *riser* e, à medida que o tempo vai aumentando, o ângulo de aderência do óleo na parede do *riser* aumenta proporcionalmente, chegando a atingir um ângulo de aproximadamente 90° em um tempo de 6.2 s (Figura 4.27). Para o deslocamento do *riser* no

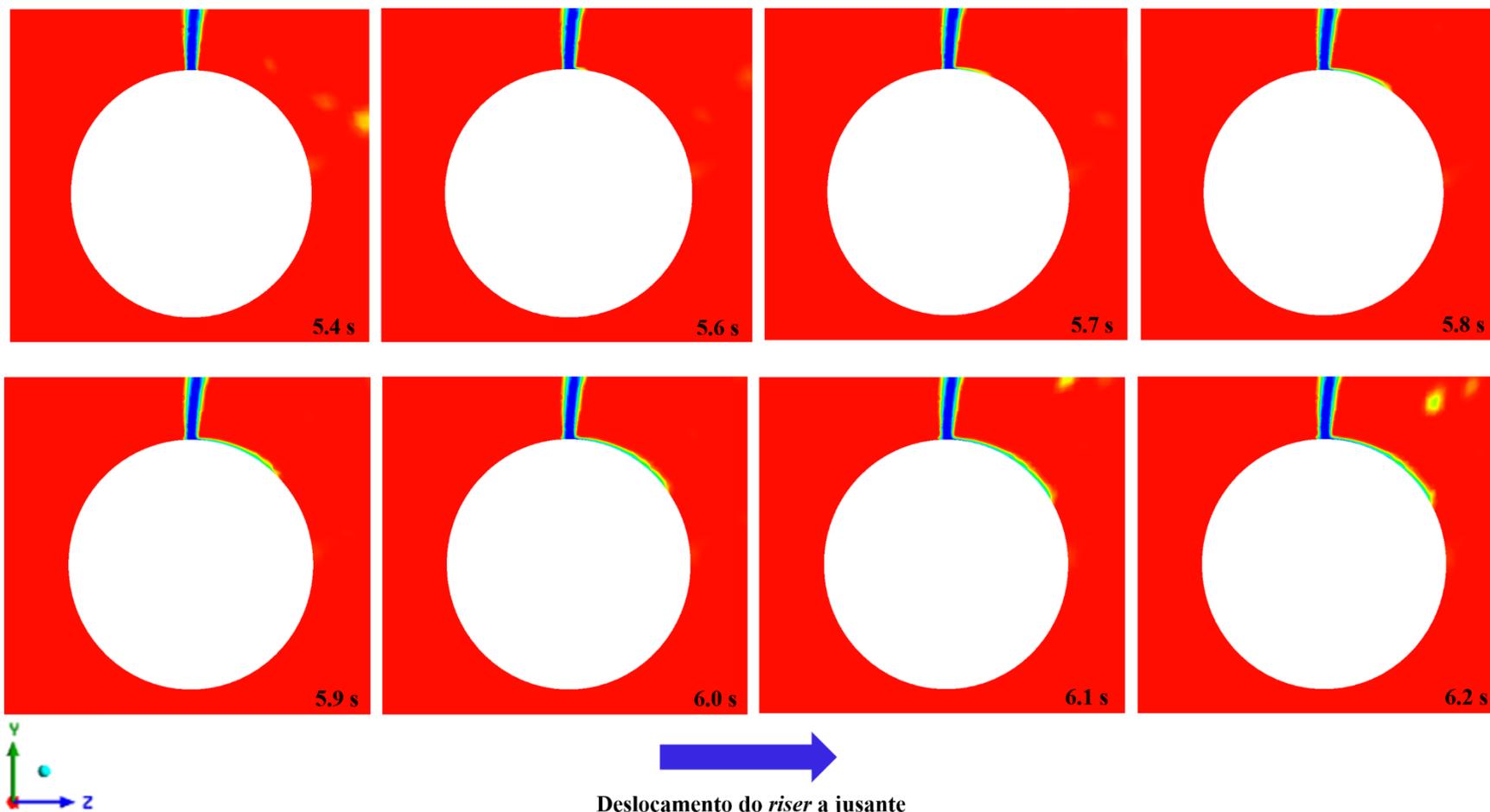
sentido a montante do escoamento, em um tempo de 6.4 s, ocorre a quebra do jato de óleo na parede do riser se dispersando em todo tempo de análise (Figura 4.28).

**Figura 4.26:** Efeito da movimentação do riser na altura da quebra do jato de óleo para uma velocidade de vazamento de óleo de 3 m/s, velocidade de correnteza e deslocamento do riser sendo: (a) 0,1 m/s (b) 0,3 m/s (c) 0,5 m/s



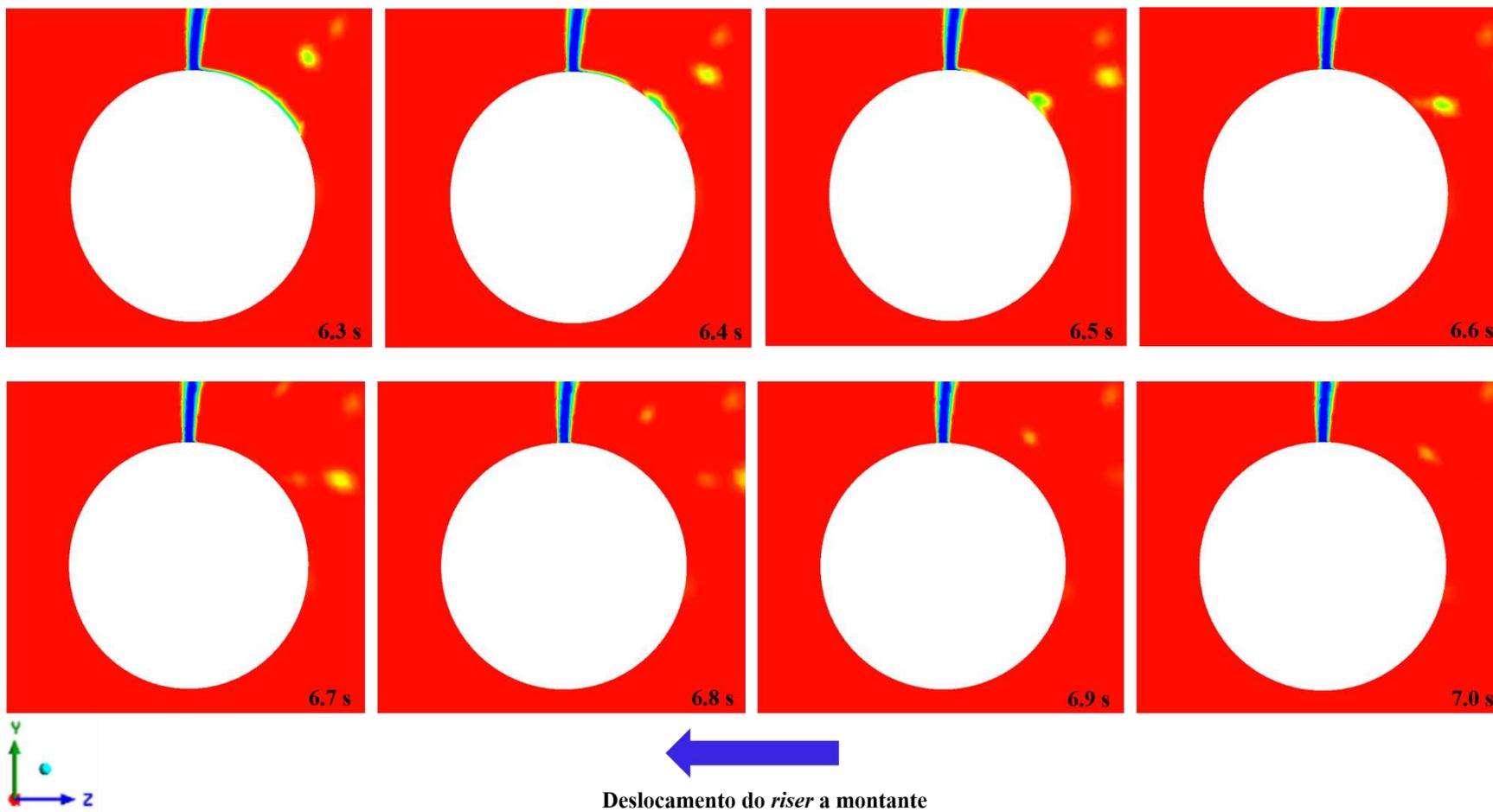
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.27:** Comportamento do óleo vazado na parede do *riser* de acordo com a movimentação do *riser* de 0,2 m/s ( $Fr_0 = 0,0082$ ) no sentido a jusante do escoamento



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.28:** Comportamento do óleo vazado na parede do *riser* de acordo com a movimentação do *riser* de 0,2 m/s ( $Fr_0 = 0,0082$ ) no sentido a montante do escoamento



Fonte: Próprio do autor (2021).

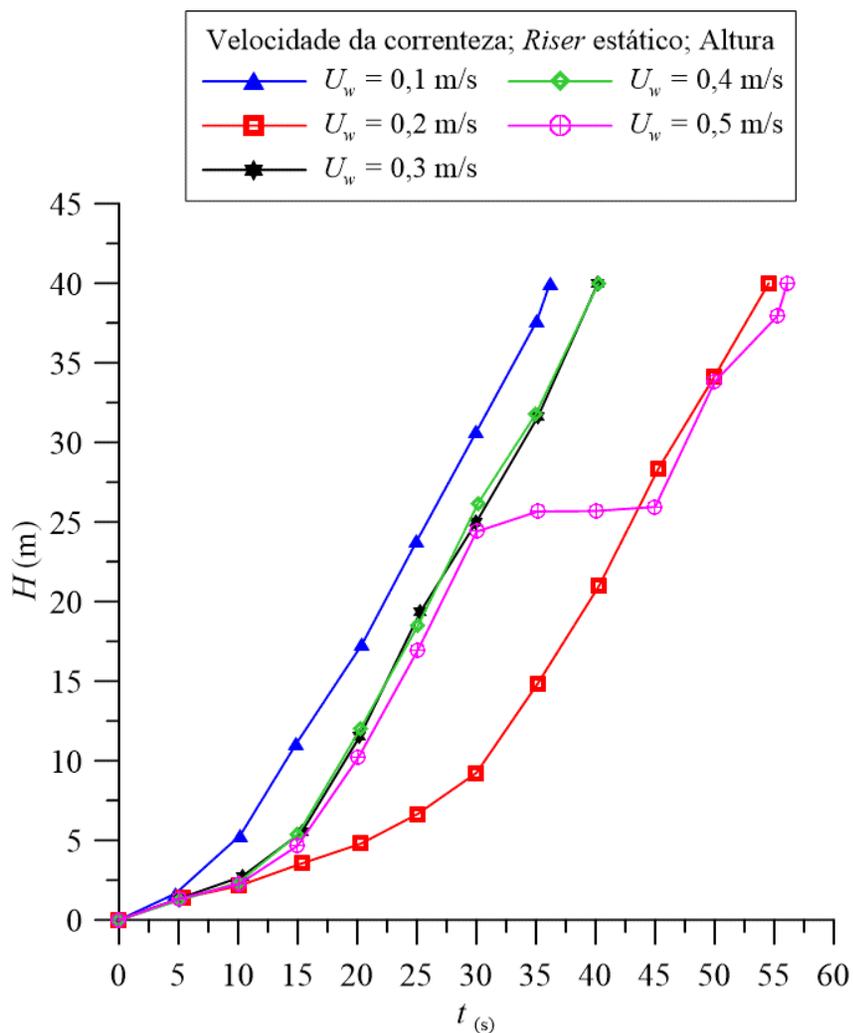
#### 4.4.3 Efeito da velocidade da correnteza na pluma de óleo para o riser estático

A Figura 4.29 mostra o efeito da velocidade da correnteza na altura da pluma de óleo vazado uma velocidade de 3 m/s ( $Fr_0 = 0,012$ ), para o riser sob efeito estático. Avaliando os resultados quantitativos das velocidades de corrente na pluma de óleo para o riser sob efeito estático, para baixas velocidades de correnteza de 0,1 m/s e 0,2 m/s (Caso 2 e Caso 3),  $Fr_0 = 0,0041$  e  $Fr_0 = 0,0082$ , respectivamente, o óleo atinge a altura máxima de 40 m de lâmina d'água em 35 s. Porém, quando essa velocidade é dobrada, esse tempo aumentou em cerca de 20 s, levando cerca de 50 s para alcançar a altura estudada do ponto de vazamento até a superfície.

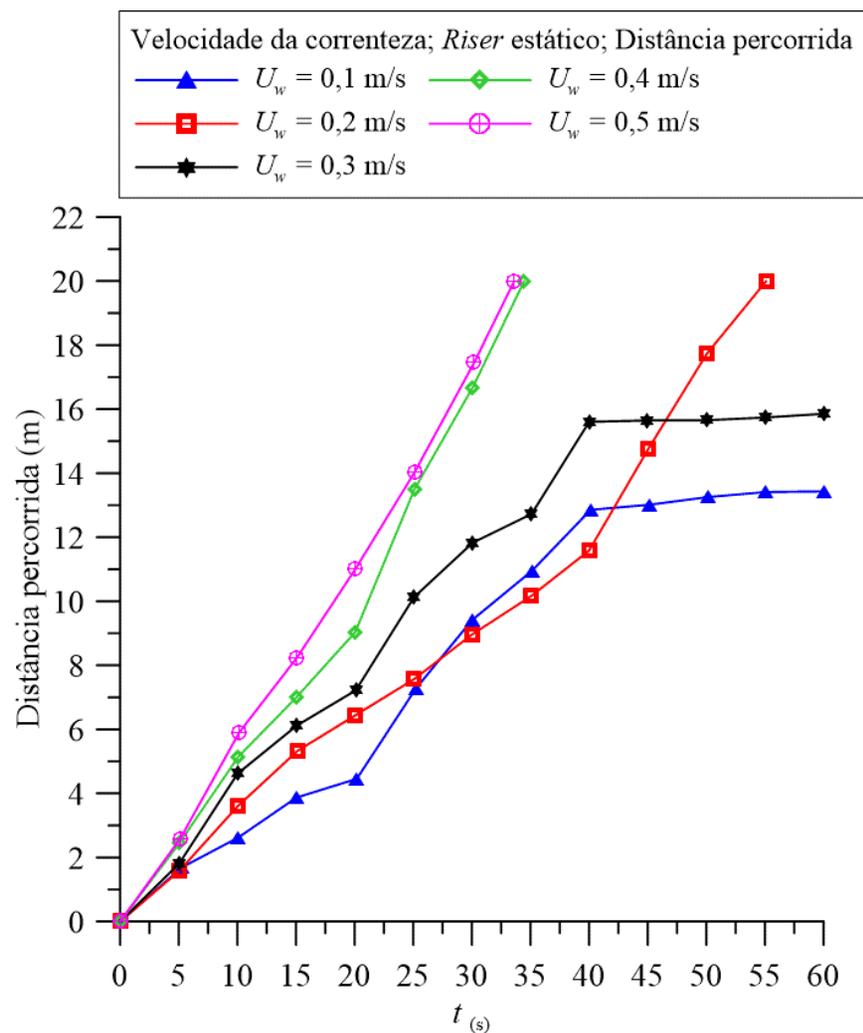
Para as velocidades de 0,3 m/s e 0,4 m/s (Caso 4 e Caso 6),  $Fr_0 = 0,012$  e  $Fr_0 = 0,016$ , respectivamente, o tempo de deriva, ou seja, o tempo de propagação das partícula as de óleo foi praticamente constante, enquanto para velocidades mais altas de 0,5 m/s (Caso 7),  $Fr_0 = 0,021$ , o óleo lançado chega a uma altura de 25 m em um tempo de 28 s. Em seguida, a cota vertical das gotas de óleo se mantém constante até os 45 s, esse fenômeno ocorre devido à ação simultânea das forças de natureza gravitacional (empuxo e peso) e de arrasto hidrodinâmico sobre as gotículas de óleo, fazendo com que modifique a posição e a forma da gota em um determinado tempo de processo.

Analisando a distância percorrida do óleo em função da velocidade da correnteza, observa-se que para uma velocidade de 0,1 e 0,3 m/s (Caso 2 e Caso 4), a mesma curva referente a esses casos se mantém constante no intervalo de tempo de 40 a 60 s, não alcançando o comprimento máximo de 20 m de distância devido aos efeitos da correnteza. Porém, para uma velocidade de corrente de 0,2 m/s (Caso 3), observa-se que o óleo atinge os 20 m de distância em 55 s. Para os maiores valores de velocidade de corrente 0,4 m/s e 0,5 m/s (Caso 6 e Caso 7), a pluma de óleo é deslocada a jusante mais rapidamente atingindo a distância máxima de 20 m em 35 s, apresentando pequenas variações e se mantendo praticamente constante durante todo o trajeto de velocidade (Figura 4.30).

**Figura 4.29:** Efeito da velocidade da correnteza na altura da pluma de óleo - *riser* estático



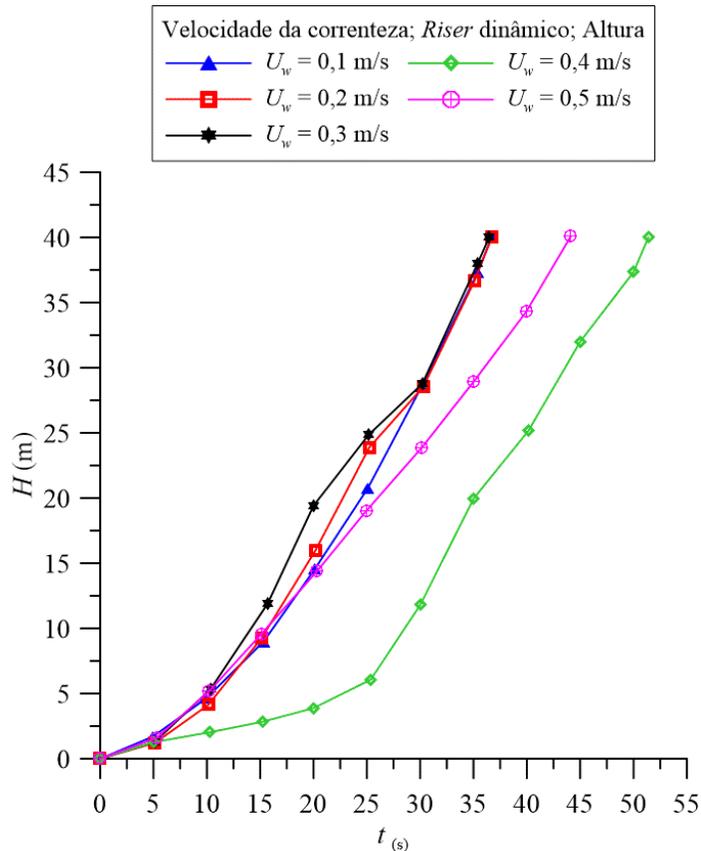
**Figura 4.30:** Efeito da velocidade da correnteza na distância percorrida da pluma de óleo - *riser* estático



#### 4.4.4 Efeito da velocidade da correnteza na pluma de óleo para o riser em movimento

Considerando o *riser* sob efeito dinâmico em diferentes velocidades de correnteza, observa-se na Figura 4.31 que para as velocidades de corrente (0,1; 0,2; 0,3) m/s referente aos casos 9, 10 e 11, a pluma de óleo alcançou a altura correspondente em praticamente o mesmo tempo de percurso. Isso ocorre devido às características do ambiente não ser muito altas, ou seja, velocidades moderadas. Já para uma velocidade de corrente de 0,4 m/s (Caso 13), o óleo levou cerca de 50 s para alcançar a superfície livre devido ao maior arraste e, conseqüentemente, percorrendo uma distância maior a jusante levando, portanto, mais tempo para alcançar a superfície livre. Comportamento diferente é observado para uma velocidade máxima de 0,5 m/s (Caso 14) alcançando a altura máxima em menos tempo. As gotas coalescem e o empuxo líquido se torna maior causando um carregamento vertical mais acentuado.

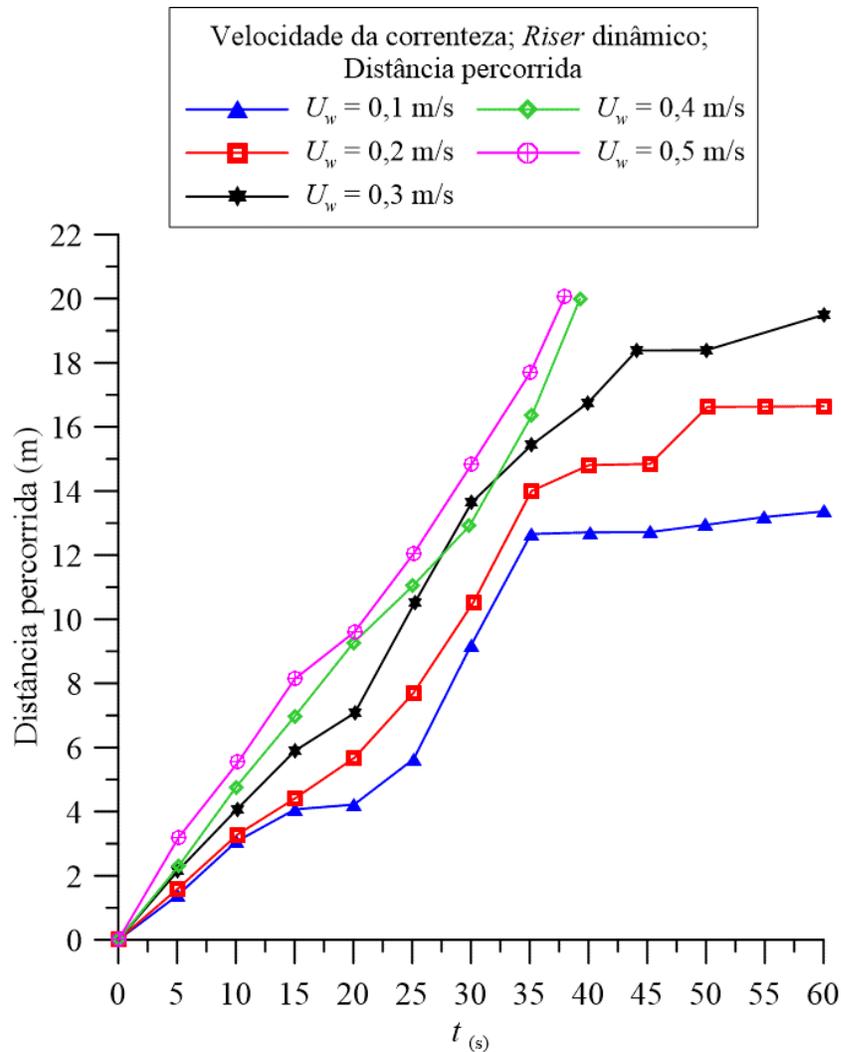
**Figura 4.31:** Efeito da velocidade da correnteza na altura da pluma de óleo - *riser* em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

Avaliando a distância percorrida da pluma de óleo para diferentes velocidades de correnteza, observa-se que, quanto menor for a velocidade de corrente (0,1; 0,2; 0,3) m/s (Caso 9, Caso 10 e Caso 11),  $Fr_0 = 0,0041$ , para  $Fr_0 = 0,0082$ ,  $Fr_0 = 0,012$ , respectivamente, menor é a distância percorrida pela pluma de óleo a partir do ponto de vazamento. Considerando uma correnteza de maior intensidade de 0,4 e 0,5 m/s (Caso 13 e Caso 14),  $Fr_0 = 0,016$  e  $Fr_0 = 0,021$ , respectivamente, observa-se que a pluma de óleo percorre 20 m de distância em um menor tempo devido aos efeitos da correnteza, conforme visto na Figura 4.32.

**Figura 4.32:** Efeito da velocidade da correnteza na distância percorrida da pluma de óleo - *riser* em movimento

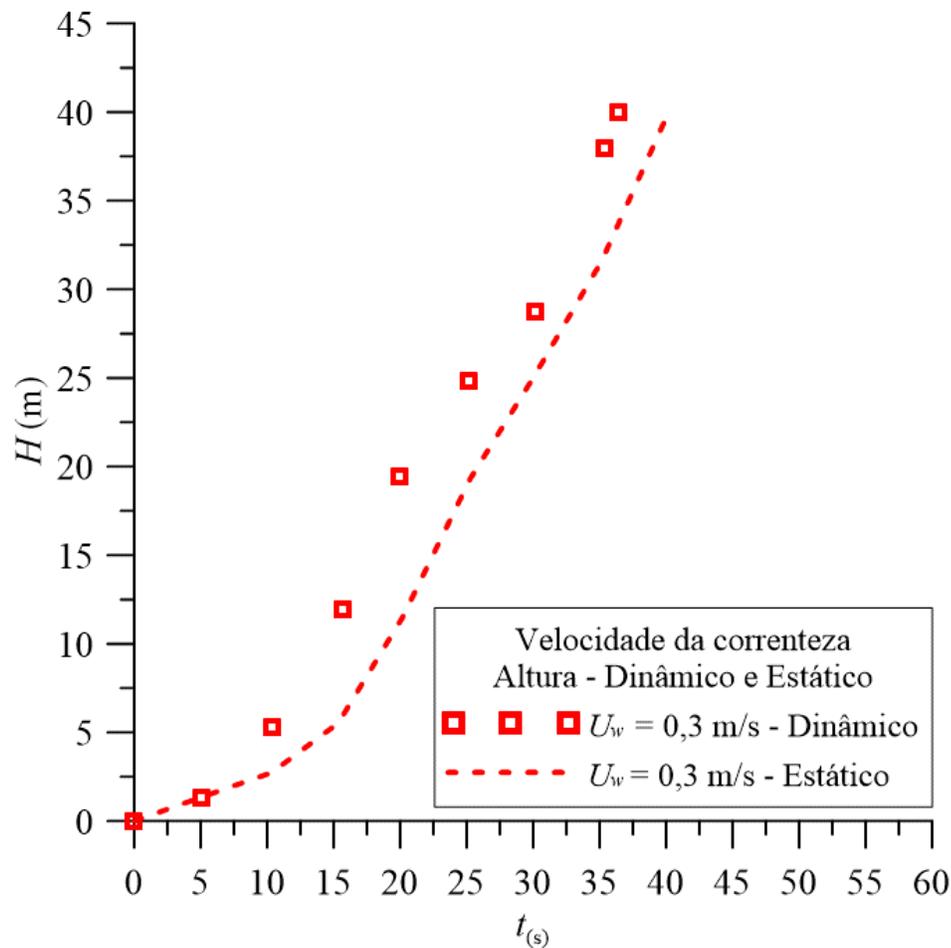


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.4.5 Influência do riser estático e dinâmico sobre a pluma de óleo a velocidade constante

Analisando a influência da interação do *riser* com a dispersão da pluma de óleo para uma velocidade de correnteza constante de 0,3 m/s (Caso 4 e Caso 11) e  $Fr_0 = 0,012$ , observa-se que para o *riser* estático a pluma de óleo leva mais tempo para alcançar a altura máxima estudada. Porém, para o *riser* em movimento, a pluma de óleo se desloca mais rapidamente em direção à superfície livre. Isso ocorre devido aos esforços hidrodinâmicos, ou seja, as forças atuantes entre a estrutura do *riser* e a coluna de água fazem com que ocorra um maior deslocamento da pluma de óleo e, conseqüentemente, uma quebra mais rápida do jato de óleo para o *riser* em movimento do que para o *riser* estático (Figura 4.33).

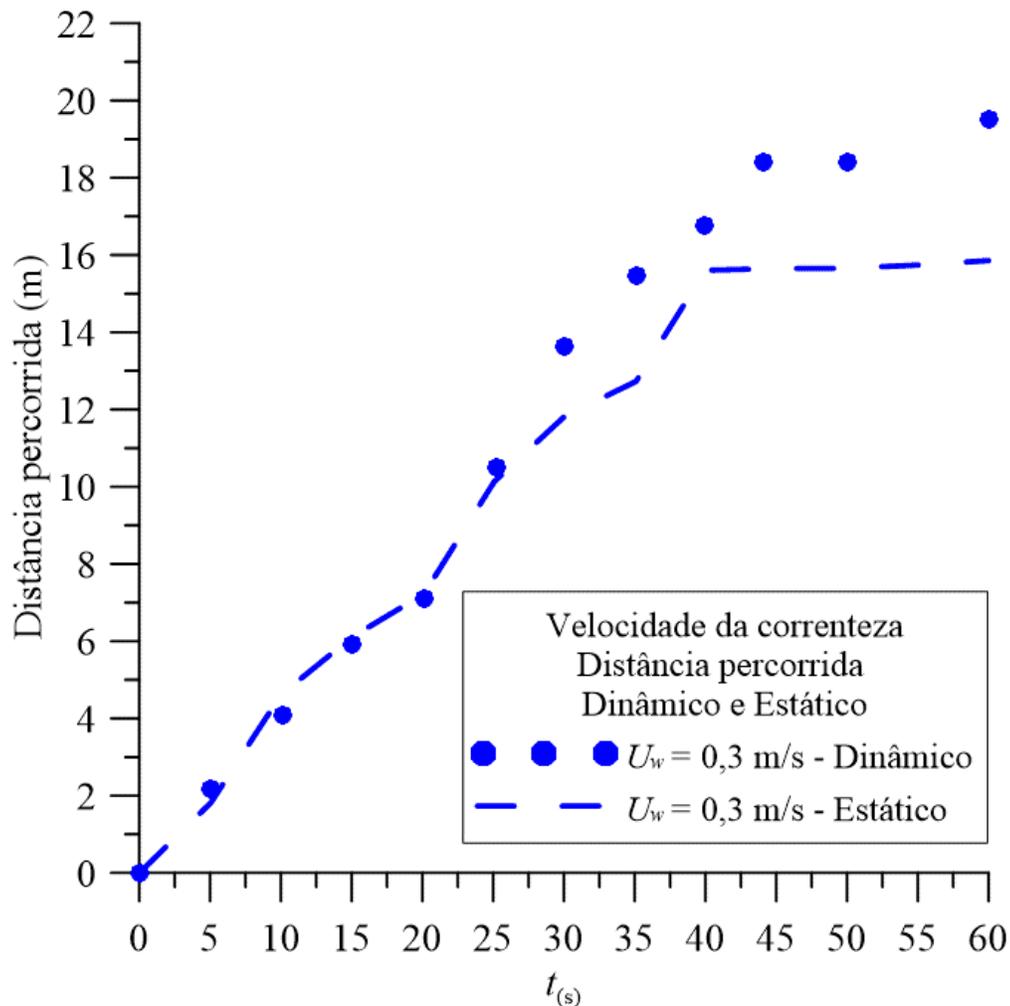
**Figura 4.33:** Efeito da velocidade da correnteza para o *riser* estático e dinâmico - altura



Fonte: Próprio do autor (2021).

Analisando o efeito da correnteza sobre a distância percorrida da pluma de óleo para o *riser* estático e dinâmico em uma velocidade de 0,3 m/s e 3 m/s de velocidade de vazamento (Caso 4), pode ser observado que, conforme mencionado anteriormente, considerando o *riser* estático, o óleo alcança uma distância de 16 m em 40 s e se mantém constante por todo o tempo analisado. Por outro lado, considerando o *riser* em movimento (Caso 11), a fração de óleo no mar chega a uma distância máxima de 20 m de comprimento em tempo total de 60 s de simulação. Mostrando mais uma vez que, avaliar o efeito dinâmico em tubulações submersas é de suma importância principalmente quando se trata de vazamento de óleo no mar (Figura 4.34).

**Figura 4.34:** Efeito da velocidade da correnteza para o *riser* estático e dinâmico distância percorrida

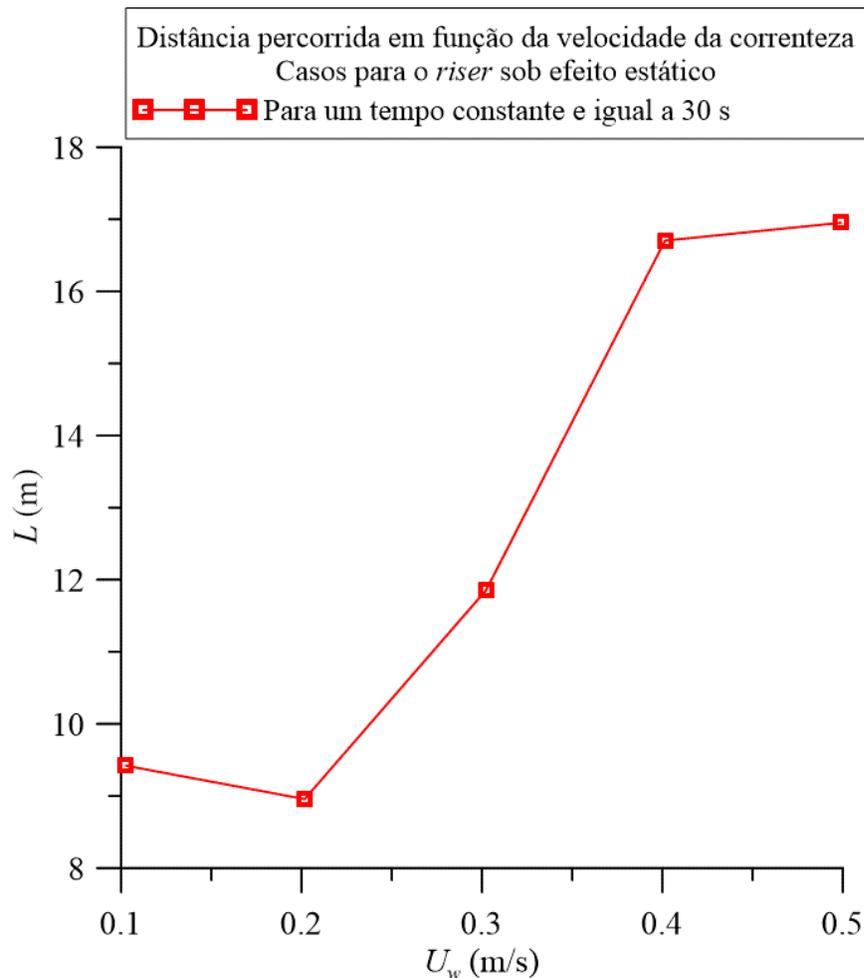


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.4.6 Efeito da velocidade de corrente na distância percorrida

Com objetivo de analisar qual foi o efeito da velocidade da corrente pela distância percorrida da pluma de óleo a jusante do escoamento (Caso 2, 3, 4, 6 e 7) para o *riser* sob efeito estático, considerou-se um tempo de simulação de 30 s. É possível observar na Figura 4.35 que, à medida que a velocidade de corrente vai aumentando, maior é a distância percorrida pela fração de volume de óleo no oceano. Isso ocorre devido aos efeitos de corrente atuantes no ambiente. Observa-se, também, que, para uma velocidade de correnteza de 0,2 m/s, a distância percorrida pela pluma de óleo foi no máximo de 9,8 m de distância à jusante do ponto de vazamento.

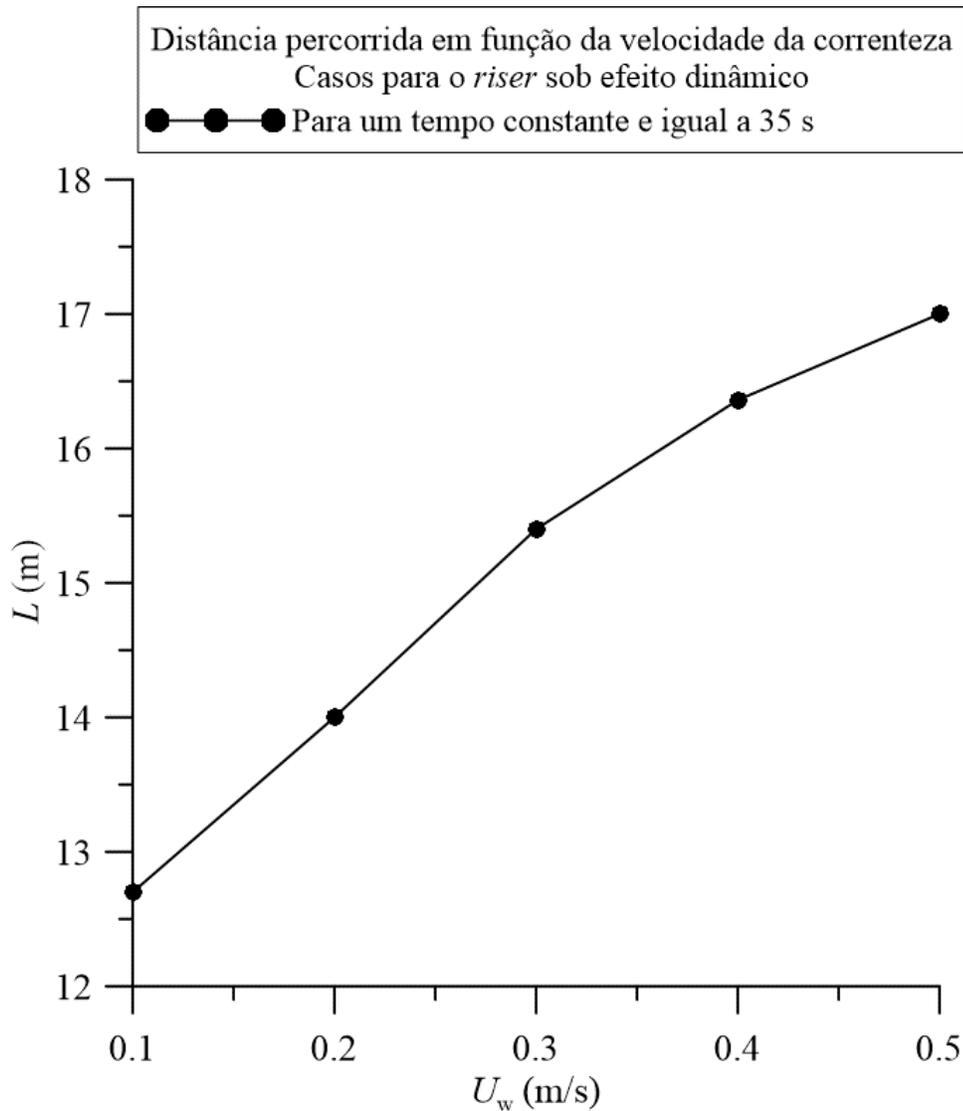
**Figura 4.35:** Distância percorrida em função da velocidade de correnteza - estático



Fonte: Próprio do autor (2021).

Avaliando o efeito da distância percorrida da pluma de óleo em função da velocidade da correnteza para o *riser* em movimento (Caso 9, 10, 11, 13 e 14), respectivamente, em um tempo de simulação de 35 s, é observado que, quanto maior for a velocidade da correnteza, maior é a distância percorrida pela pluma de óleo à jusante do vazamento. Para uma velocidade igual a 0,5 m/s (Caso 14) a pluma de óleo é carregada a uma distância máxima de 17 m em 35 s pelos efeitos das forças de empuxo líquido e arrasto (Figura 4.36).

**Figura 4.36:** Distância percorrida em função da velocidade da correnteza - *riser* em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

## 4.5 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes densidades de óleo, para o *riser* dinâmico e estático

### 4.5.1 Campo de fração volumétrica da água durante vazamento de óleo para diferentes densidades de óleo considerando o posicionamento do *riser* estático e dinâmico

Analisando os resultados qualitativos na Figura 4.37, para a fração de volume de óleo no mar, pode-se ver que para um óleo de densidade igual a  $870 \text{ kg/m}^3$  (Caso 15 e Caso 20), o óleo se dispersa tanto para o sentido à jusante quanto à montante do escoamento, apresentando uma grande quantidade de fração de volume de óleo no mar, resultado muito semelhante é observado em Zhu et al. (2014). Para estas situações, a correnteza se encontra a uma velocidade constante de  $0,1 \text{ m/s}$  ( $Fr_0 = 0,0041$ ), ou seja, baixas velocidades de corrente fazem com o óleo se desloque mais no sentido da superfície livre em menos tempo. Pode ser mencionado também que a partir do tempo de 25 s, é observado a formação de pequenas zonas de recirculação próximo a região do vazamento, sendo ocasionado pela diferença de pressão entre no vazamento e a correnteza, alterando a direção original do escoamento e levando cerca de 30 s para alcançar a altura máxima estudada (Figura 4.37a).

Pode ser observado na Figura 4.37b, comparando este mesmo valor de densidade  $870 \text{ kg/m}^3$  (Caso 20) para um vazamento de óleo oriundo de *riser* em movimento, pode-se observar o direcionamento vertical do óleo até a superfície livre, como também uma fração de volume de óleo menor no oceano em relação ao Caso 20 para o *riser* estático. Sendo observado também que para o efeito dinâmico, o óleo atinge a superfície livre em um maior tempo (35 s).

Analisando um óleo com densidade igual a  $900 \text{ kg/m}^3$  (Caso 16), pode ser observado que para o efeito estático a pluma de óleo apresenta maior dispersão à jusante e à montante do escoamento, alcançando a superfície livre em um tempo de 35 s (Figura 4.38a). Considerando o mesmo caso, com o *riser* sob efeito dinâmico (Caso 21), observa-se que a pluma de óleo também alcança a superfície livre em um tempo de 35 s de propagação (Figura 4.38b).

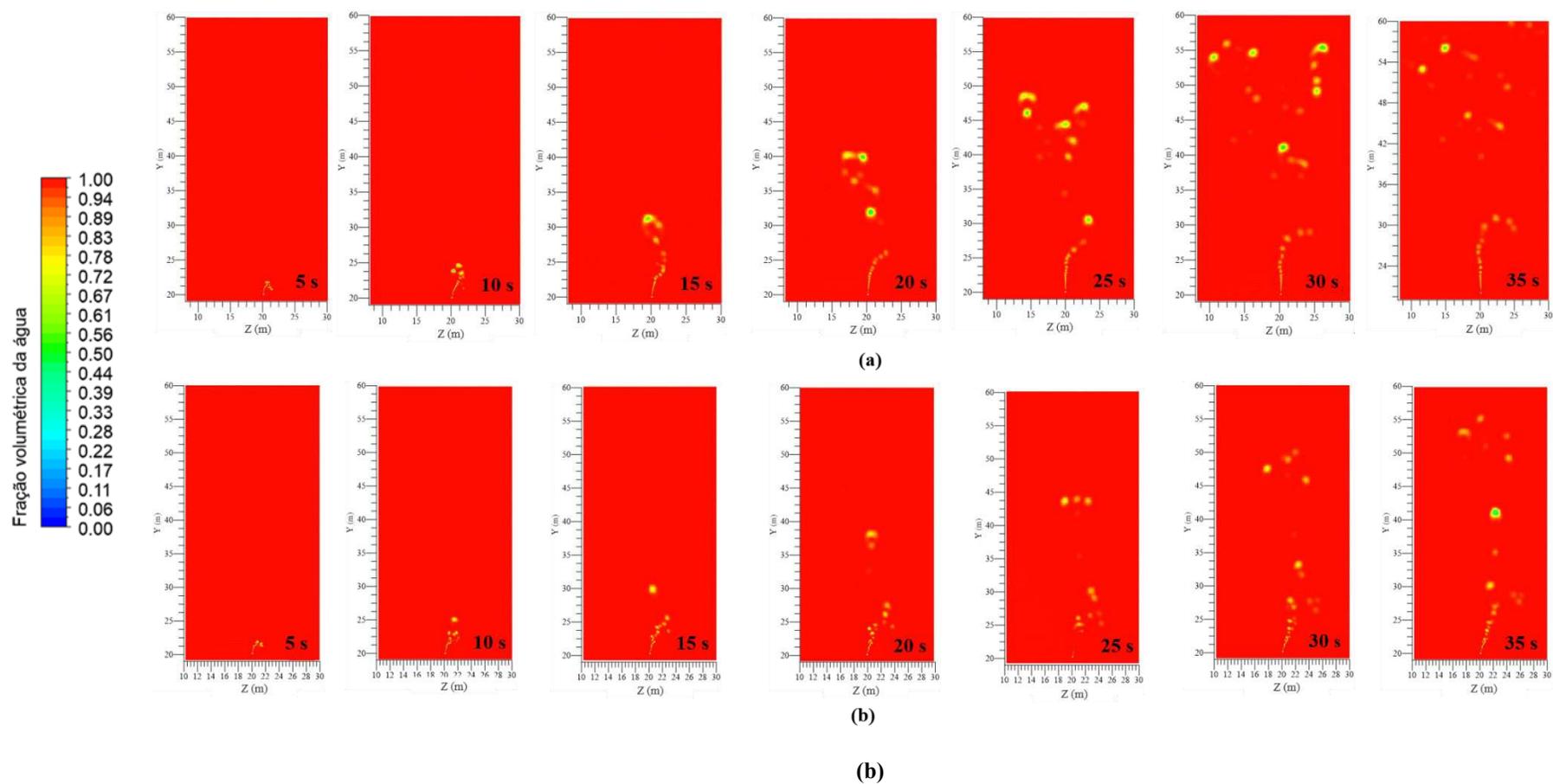
Sob condições padrão com densidade de óleo equivalente a  $930 \text{ kg/m}^3$  (Caso 17), observa-se comportamento semelhante nas partículas de óleo lançado no mar. À medida que a pluma de óleo vai perdendo velocidade ocorre a quebra da mesma formando uma maior dispersão das

partículas de óleo próximo a superfície livre (Figura 4.39a). Comportamento semelhante pode ser visto também para o caso dinâmico (Caso 22). Ambos os casos alcançam a altura máxima em 35 s para mesma densidade (Figura 4.39b).

Para densidade do óleo igual a  $960 \text{ kg/m}^3$  (Caso 18), considerando o *riser* parado, pode-se observar um comportamento inclinado no sentido à jusante próximo ao vazamento, percebe-se que para os 35 s de migração de óleo no sentido vertical, a 12 m de altura do ponto de vazamento, ocorre o rompimento das partículas de óleo em uma dimensão e dispersão maior próximo a superfície do mar devido ao efeito de força de empuxo, Figura 4.40a. Para o *riser* em movimento (Caso 23), é observado que a ruptura do jato de óleo ocorre em uma região inferior à que é observada para o *riser* estático, mostrando, mais uma vez, a importância de estudar o efeito de movimentação do *riser* oriundos de vazamento.

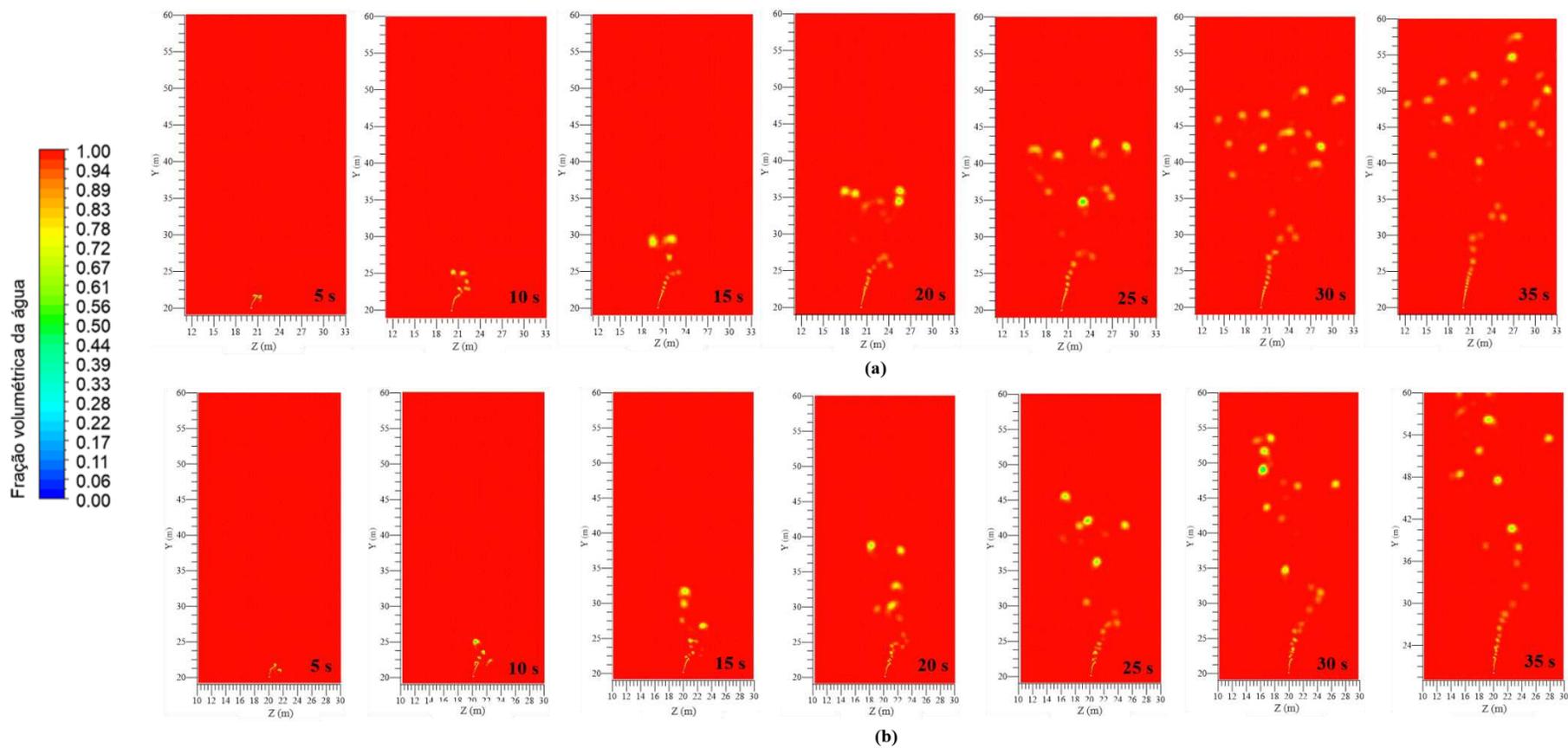
Aumentando a densidade do óleo analisado sobe as mesmas condições de onda e corrente, tem-se que: considerando o *riser* parado, para uma densidade de  $990 \text{ kg/m}^3$  (Caso 19), o óleo leva cerca de 40 s para alcançar a superfície livre adotada. Percebe-se que para os 15 e 20 segundos iniciais ocorre a formação de comportamento giratório pela pluma de óleo próximo a região do vazamento e se estabilizando a partir dos 30 s de simulação para o *riser* estático (Figura 4.41a). Quando considerado o efeito dinâmico no *riser* para esta mesma densidade de óleo (Caso 24), vê-se uma dispersão mais verticalizada em direção a superfície livre do domínio de estudo (Figura 4.41b).

**Figura 4.37:** Efeito da densidade do óleo de  $870 \text{ kg/m}^3$  para uma velocidade de correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ ,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático, (b) *riser* em movimento



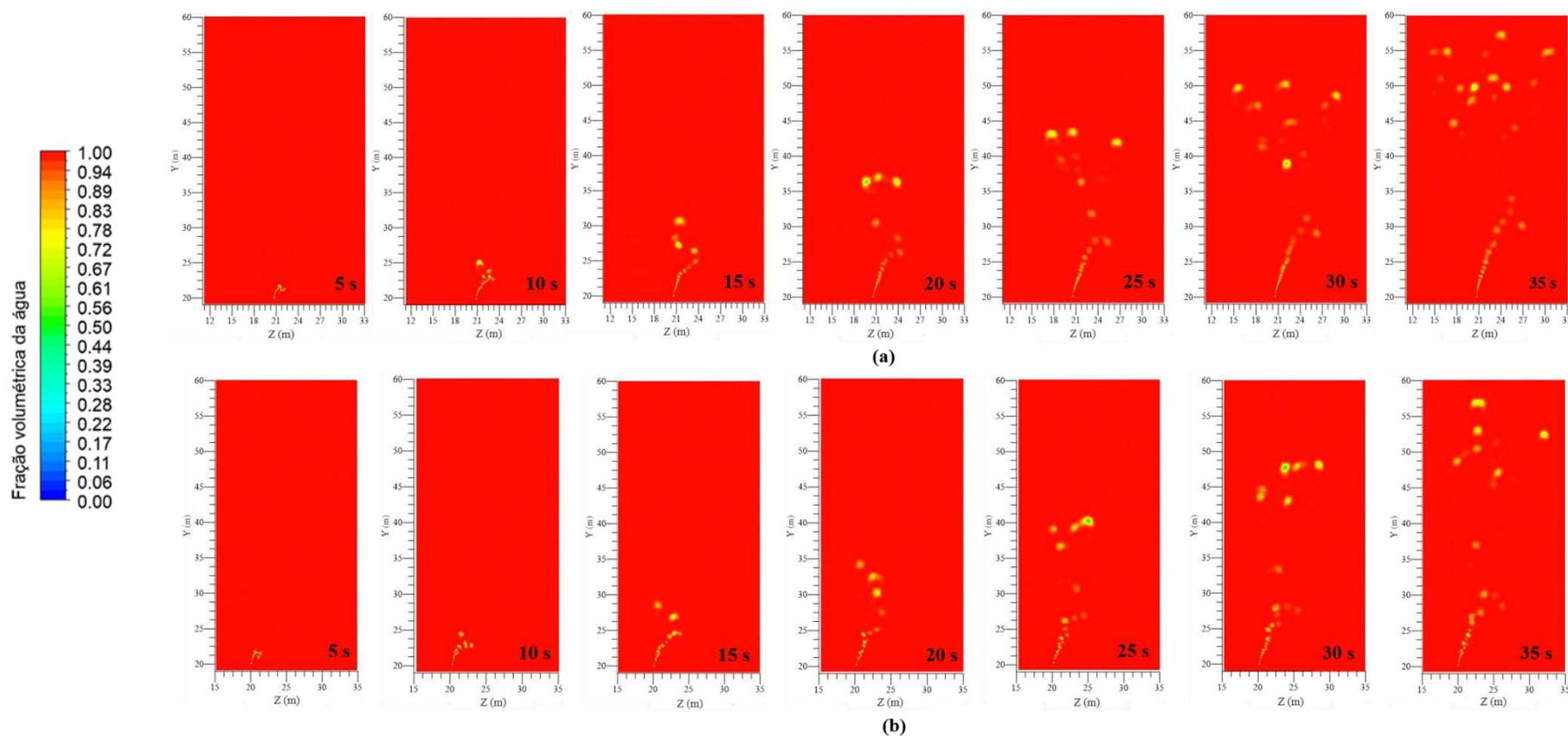
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.38:** Efeito da densidade do óleo de  $900 \text{ kg/m}^3$  para uma velocidade de correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ ,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático, (b) *riser* em movimento



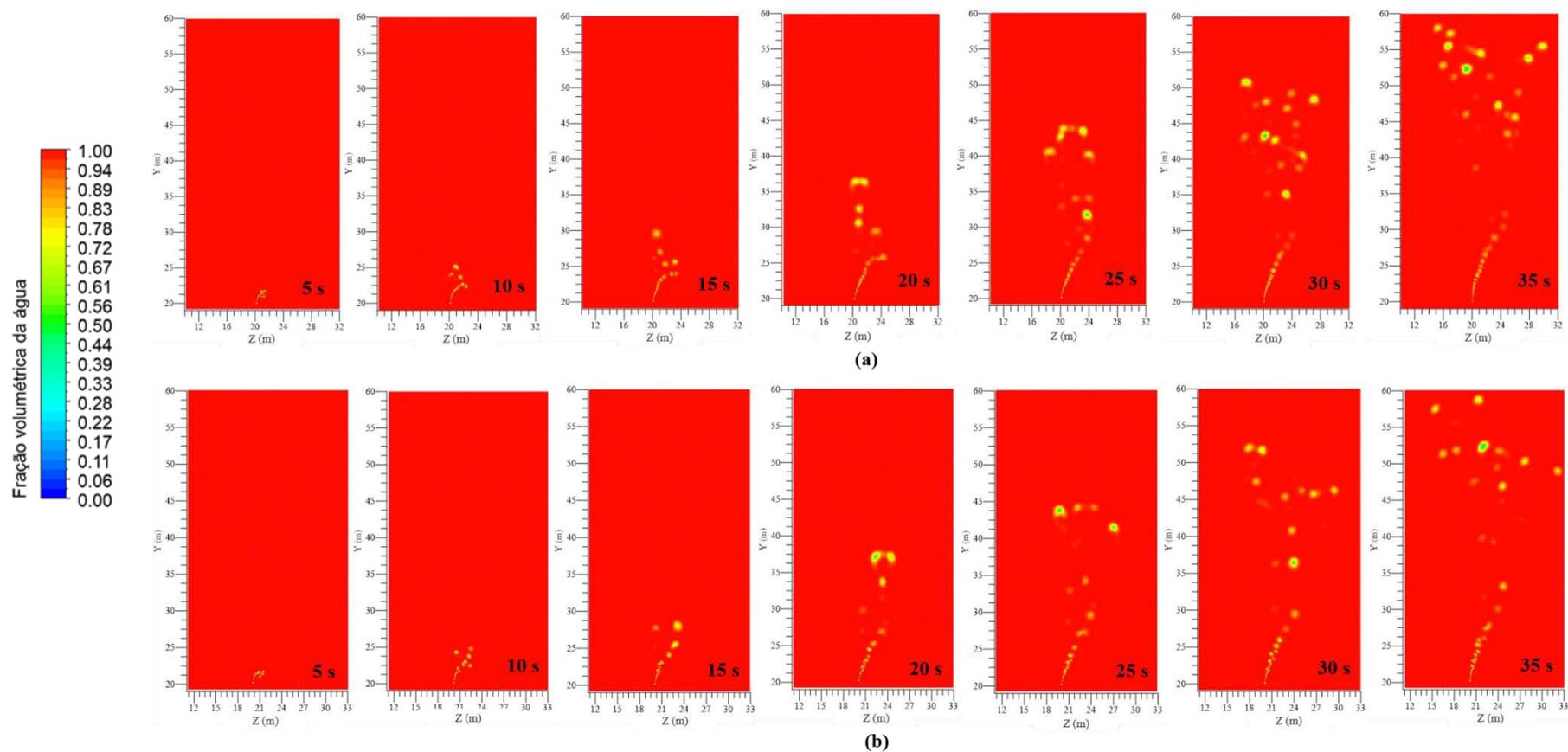
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.39:** Efeito da densidade do óleo de  $930 \text{ kg/m}^3$  para uma velocidade de correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ ,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático, (b) *riser* em movimento



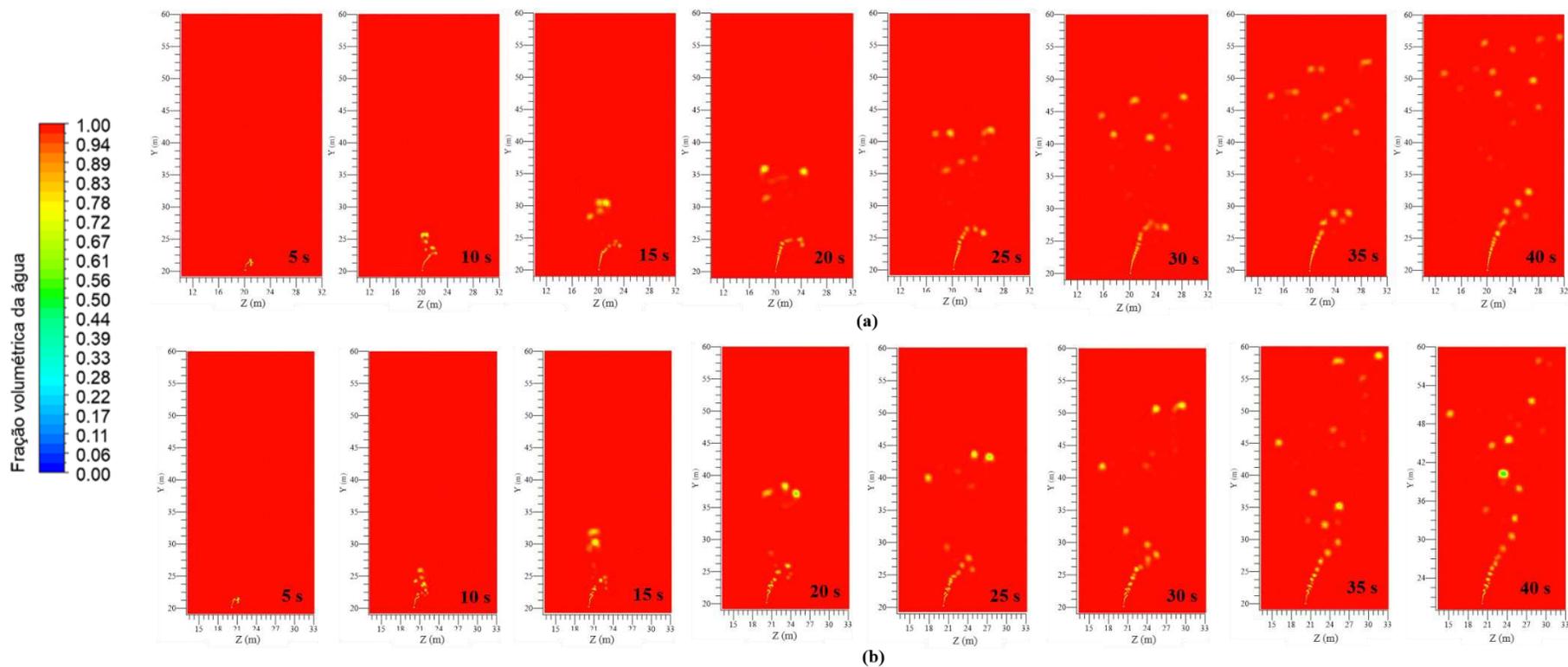
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.40:** Efeito da densidade do óleo de  $960 \text{ kg/m}^3$  para uma velocidade de correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ ,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático, (b) *riser* em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.41:** Efeito da densidade do óleo de  $990 \text{ kg/m}^3$  para uma velocidade de correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ ,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático, (b) *riser* em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

#### ***4.5.2 Efeito da movimentação do riser na altura da quebra do jato de óleo em função da densidade do óleo***

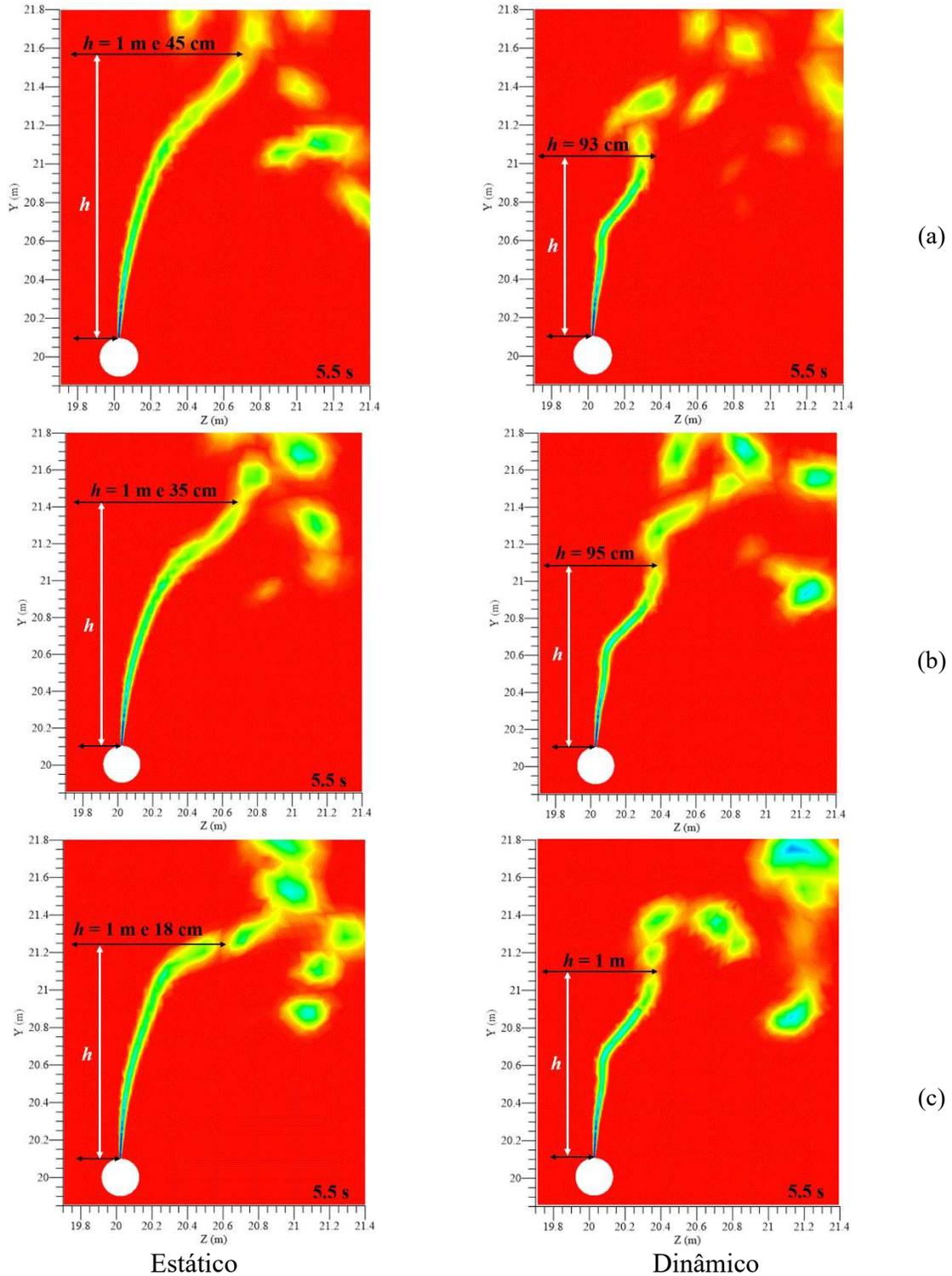
Com objetivo de analisar a altura da quebra do jato de óleo em função da densidade do óleo para o *riser* sob efeito estático e dinâmico, em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s ( $Fr_0 = 0,0041$ ), foi observado que para o *riser* estático e óleo com uma densidade de  $870 \text{ kg/m}^3$  (Caso 15), em um tempo de 5,5 s, a altura da quebra do jato de óleo chegou à uma altura de 1 m e 45 cm, porém, para o *riser* em movimentação (Caso 20) a quebra se deu em uma altura de 93 cm, mostrando mais uma vez a fragilidade do jato de óleo para o *riser* em movimentação (Figura 4.42 a).

Observando a altura da quebra do jato de óleo para uma densidade do óleo de  $930 \text{ kg/m}^3$ , considerando o *riser* sob efeito estático, observa-se que a altura da quebra do jato para um óleo mais denso é menor que para o óleo mais leve, sendo para esta densidade (Caso 17) 1 m e 35 cm de altura de quebra do jato de óleo. Considerando o *riser* sob efeito dinâmico, ou seja, em movimento (Caso 22), observa-se, mais uma vez, que o efeito dinâmico tem grande influência na física do problema analisado, chegando a uma altura de quebra de jato de óleo de 95 cm em um mesmo tempo de 5.5 s. Pode ser observado também que para o efeito dinâmico há uma maior fração de volume de óleo no oceano e com maior dispersão (Figura 4.42b).

Para um óleo muito denso,  $990 \text{ kg/m}^3$  (Caso 19), para o *riser* sob efeito estático, a altura da quebra do jato de óleo foi de 1 m e 18 cm, podendo ser dito que, à medida que aumenta a densidade do óleo para o *riser* sob efeito estático, a altura da quebra do jato de óleo diminui proporcionalmente, aumentando também a fração de volume de óleo no mar em um mesmo tempo de 5.5 s. Para o *riser* em movimento (Caso 24), a quebra do jato de óleo foi de 1 m apenas, mostrando, novamente, a influência de sua movimentação na altura da quebra do jato de óleo em mesmo tempo de 5.5 s (Figura 4.42c).

**Figura 4.42:** Efeito da movimentação do riser na altura da quebra do jato de óleo para uma velocidade de vazamento de 3 m/s e velocidade de correnteza de 0,1 m/s:

(a) 870 kg/m<sup>3</sup> (b) 930 kg/m<sup>3</sup> (c) 990 kg/m<sup>3</sup>

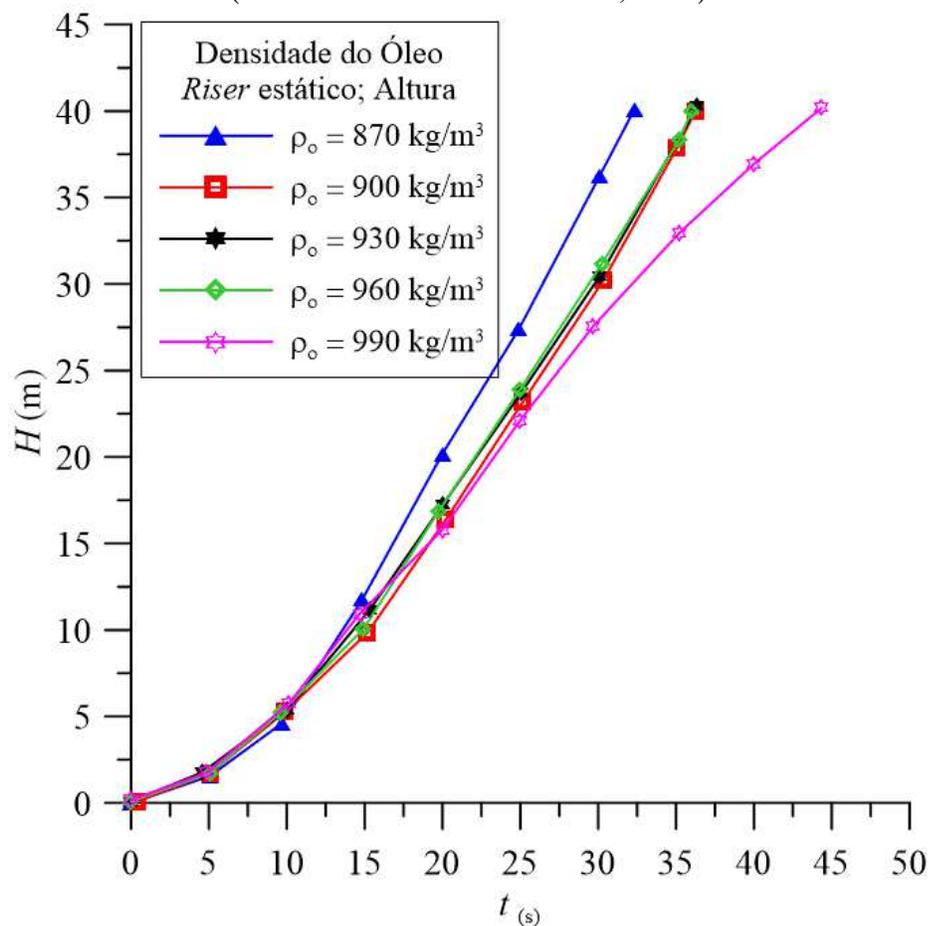


Fonte: Próprio do autor (2021).

### 4.5.3 Efeito da densidade da pluma de óleo em água a partir de vazamento em riser estático

Considerando o efeito da densidade da pluma de óleo para o *riser* estático, observa-se que para um óleo mais leve,  $870 \text{ kg/m}^3$  (Caso 15), a pluma de óleo atinge a superfície livre em menos tempo que o óleo mais denso. Para um óleo de  $990 \text{ kg/m}^3$  de densidade (Caso 19), à medida que a altura de propagação da pluma de óleo vai aumentando, a inclinação da curva vai se reduzindo até a superfície livre (Figura 4.43). Para as densidades de  $900$ ,  $930$  e  $960 \text{ kg/m}^3$  (Caso 16, 17 e 18), observou-se que o óleo atinge a altura máxima de  $40 \text{ m}$  em praticamente o mesmo tempo de percurso. Um óleo menos denso tende a subir mais rápido para uma determinada velocidade de correnteza devido ao maior empuxo líquido e ambas as situações se encontram a uma velocidade de correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$  ( $Fr_0 = 0,0041$ ).

**Figura 4.43:** Efeito da densidade do óleo para o *riser* estático - altura da pluma de óleo (velocidade da correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ )

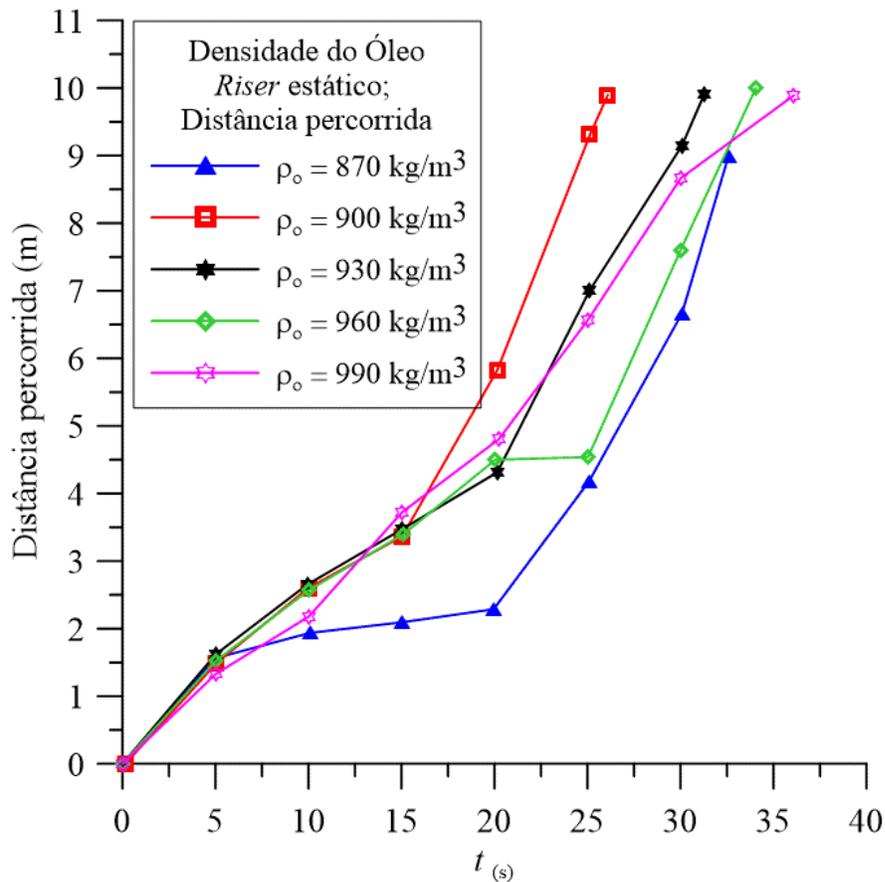


Fonte: Próprio do autor (2021).

Analisando a distância que a fração de volume de óleo atingiu em diferentes densidades, pode-se observar que ambas as densidades apresentam uma variação significativa em relação à distância percorrida. Um óleo de densidade de  $870 \text{ kg/m}^3$  (Caso 15) não alcança os 10 m de comprimento em um tempo de 40 s por ser um óleo leve irá se deslocar mais rápido horizontalmente devido aos efeitos de forças empuxo e corrente, logo, atingindo os 40 m de altura como foi observado nos resultados anteriores (Figura 4.44).

Em relação aos outros valores de densidade estudado  $900, 930, 960$  e  $990 \text{ kg/m}^3$  (Casos 16, 17, 18 e 19), observa-se que a distância percorrida pela fração de volume de óleo é proporcional a cada valor de densidade analisada, ou seja, menor o tempo de deslocamento no sentido à jusante do vazamento, com velocidade de correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$  e número de Froude igual a  $0,0041$ .

**Figura 4.44:** Efeito da densidade do óleo para o *riser* estático - distância percorrida pela pluma de óleo; (velocidade da correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ )

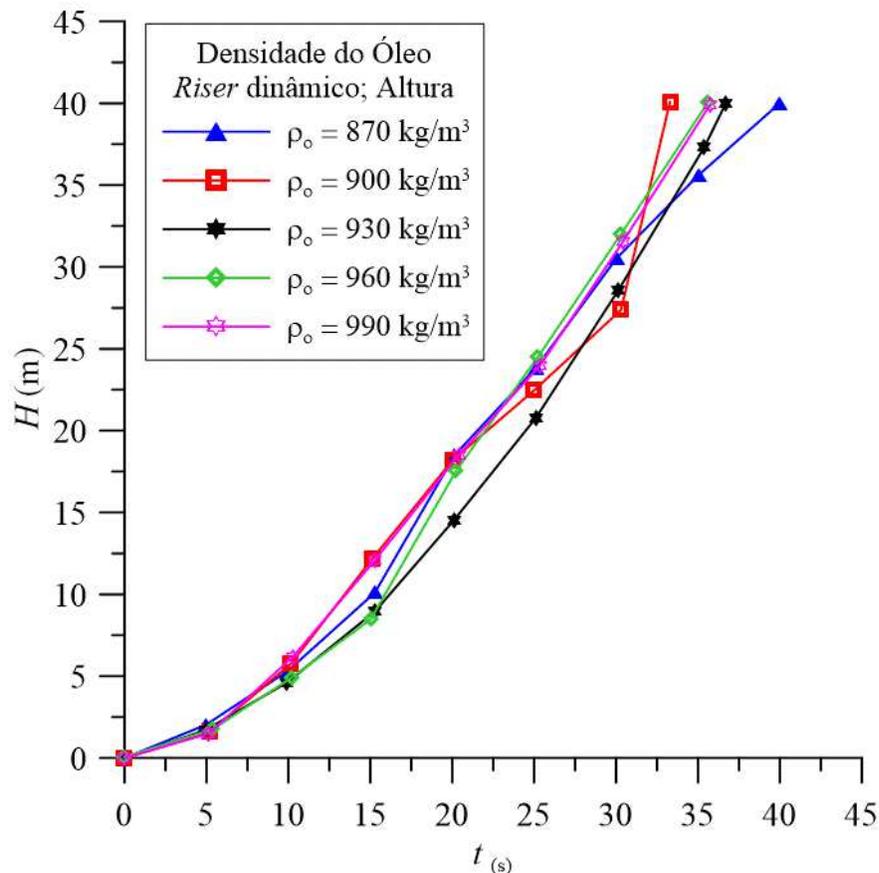


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.5.4 Efeito da densidade da pluma de óleo em água a partir de vazamento em riser com movimento

Analisando o efeito da densidade da pluma de óleo para o vazamento em *riser* com movimento (Caso 20 ao Caso 24) pode ser observado que para todas as densidades analisadas sob as mesmas condições de corrente, pouca discrepância foi constatada considerando o efeito dinâmico para estrutura do *riser*. Além disso, ambas as densidades atingiram a altura máxima de 40 m do ponto de vazamento de óleo até a superfície livre em menos de 40 s. Uma variação não muito significativa é constatada nas densidades de 870 e 900 kg/m<sup>3</sup> (Caso 20 e Caso 21), respectivamente. Isso pode ser explicado devido o óleo ser mais leve, o que faz com que seja arrastado mais rapidamente pelos efeitos da corrente (Figura 4.45).

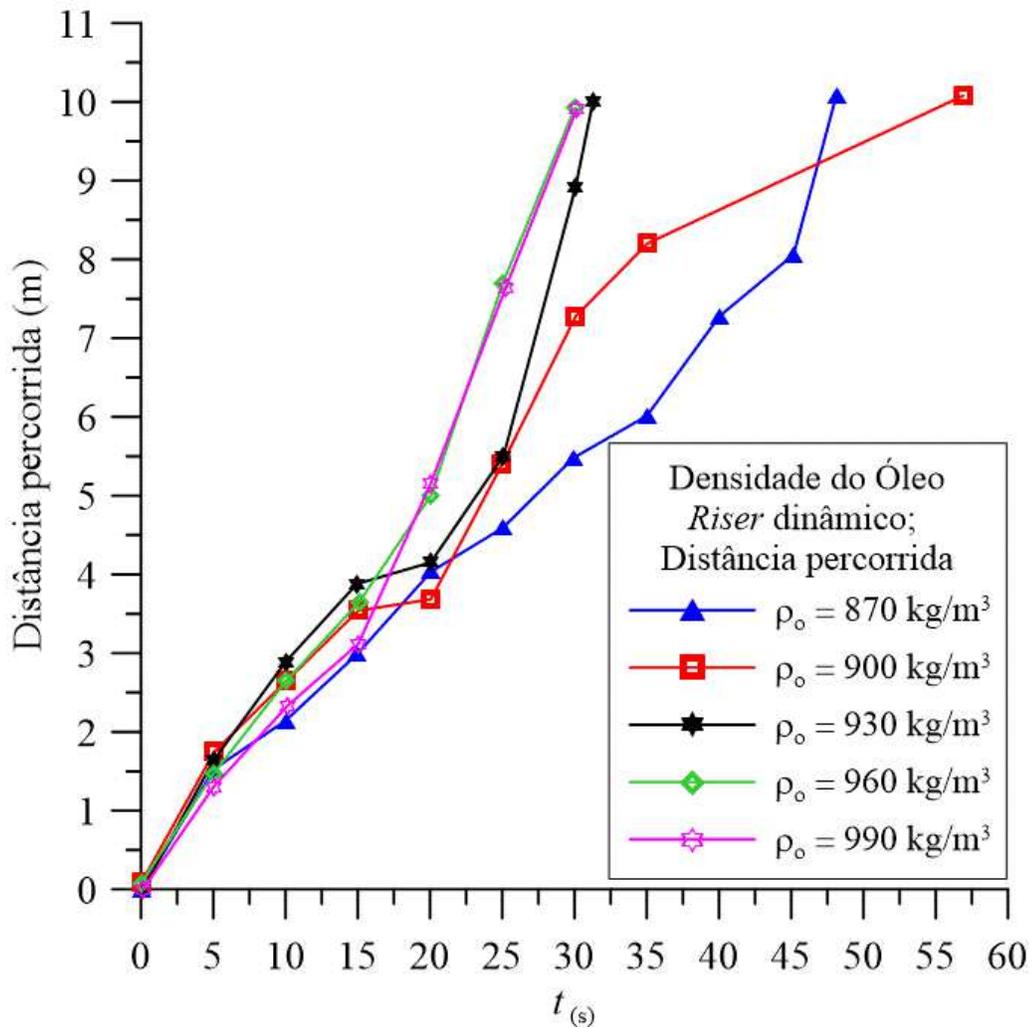
**Figura 4.45:** Efeito da densidade do óleo para o *riser* dinâmico - altura da pluma de óleo; (velocidade da correnteza de 0,1 m/s)



Fonte: Próprio do autor (2021).

Analisando o processo de derramamento de óleo e levando em consideração a distância percorrida sob os efeitos dinâmicos da estrutura do *riser*, tem-se que, como é observado para óleo de densidade baixa, a fração de volume de óleo leva mais tempo para alcançar uma distância de 10 m de comprimento em direção a saída do canal (Caso 20 ao Caso 24), respectivamente. Este fato está relacionado à dispersão do óleo na direção vertical ser menor do que a jusante e também as forças atuantes na correnteza marítima. Para os demais valores, o petróleo vazado atinge os 10 m de distância percorrida em praticamente mesmo tempo de deriva, Figura 4.46.

**Figura 4.46:** Efeito da densidade do óleo para o *riser* dinâmico - distância percorrida pela pluma de óleo (velocidade da correnteza de 0,1 m/s)

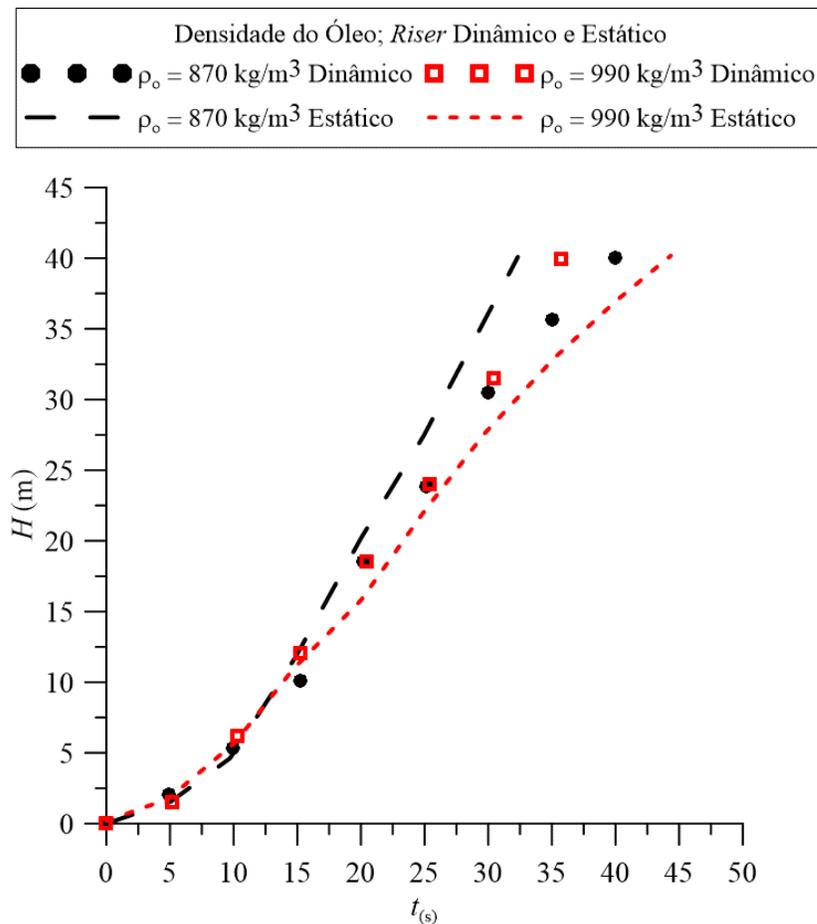


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.5.5 Efeito do riser estático e dinâmico sobre a pluma de óleo de densidade leve e pesada

Comparando o efeito da densidade do óleo sobre a pluma de óleo para os posicionamentos estático e dinâmico do *riser* tem-se que o efeito dinâmico causa uma maior dispersão na correnteza levando mais tempo para alcançar a altura desejada (Figura 4.47). Para um óleo mais denso de  $990 \text{ kg/m}^3$  (Caso 19 e Caso 24), o comportamento gráfico afirma que este tipo de óleo por ser mais pesado, leva mais tempo para alcançar a superfície livre devido aos efeitos de fluatibilidade e gravidade. Para a mesma densidade em que o *riser* se encontra sob efeito estático (Caso 15 e Caso 20), o tempo de deriva é bem maior em relação ao *riser* dinâmico, esse fato pode ser explicado pelas forças hidrodinâmicas que são causadas pelos esforços devido ao movimento entre a estrutura do *riser* e o fluido (água).

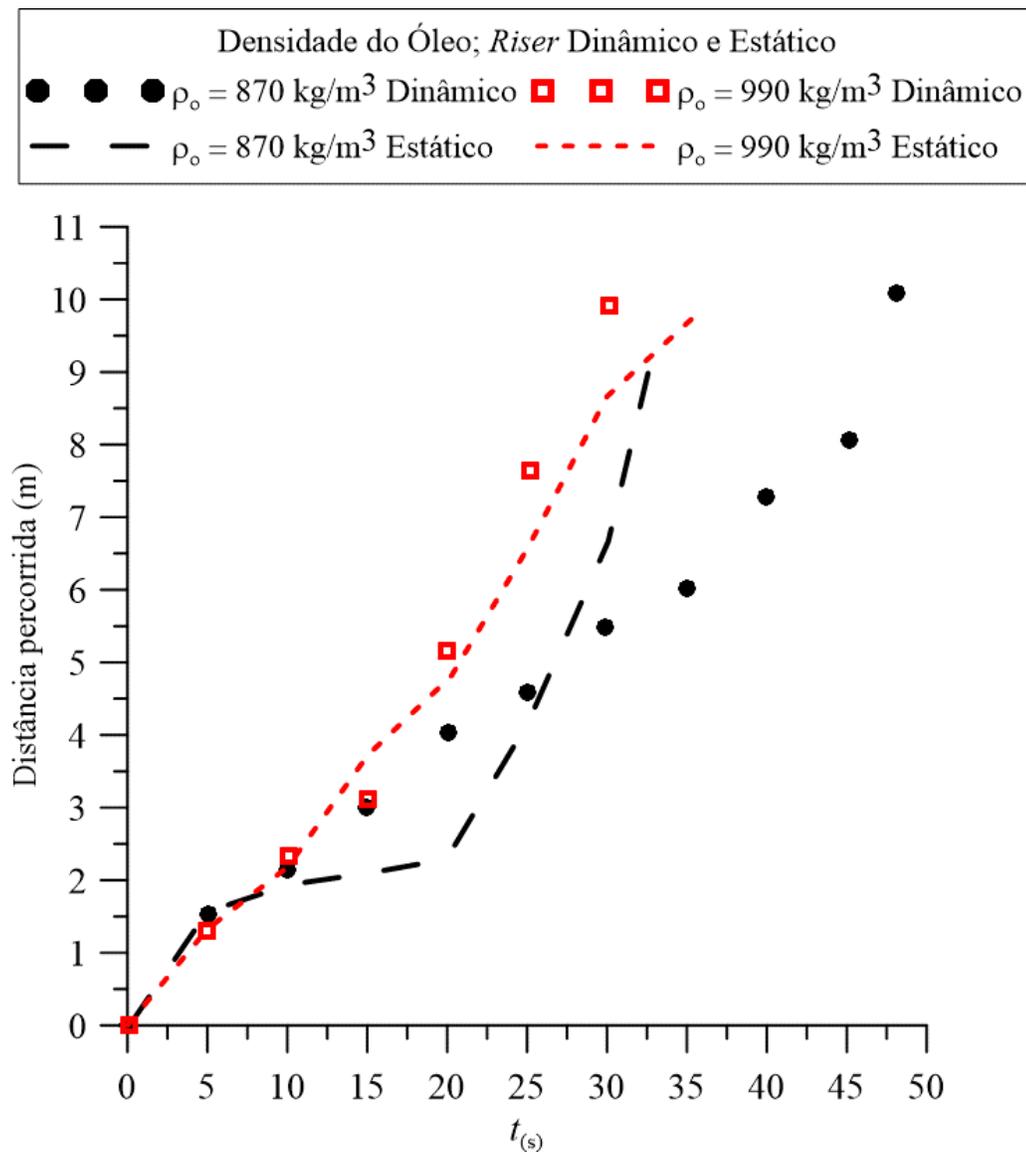
**Figura 4.47:** Efeito da densidade do óleo para o *riser* dinâmico e estático altura; velocidade da correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$



Fonte: Próprio do autor (2021).

Agora, analisando os mesmos efeitos de densidade, porém, para a distância percorrida pelo petróleo lançado na correnteza marítima, é possível perceber que um óleo leve vazado de um *riser* em movimento leva cerca de 50 s para alcançar uma distância de 10 m. No entanto, este mesmo óleo, considerando o *riser* estático, alcança uma distância máxima de 9 m de comprimento, apresentando um deslocamento constante em todo tempo de estudo (60 s) (Figura 4.48).

**Figura 4.48:** Efeito da densidade do óleo para o *riser* dinâmico e estático, distância percorrida; (velocidade da correnteza de 0,1 m/s)

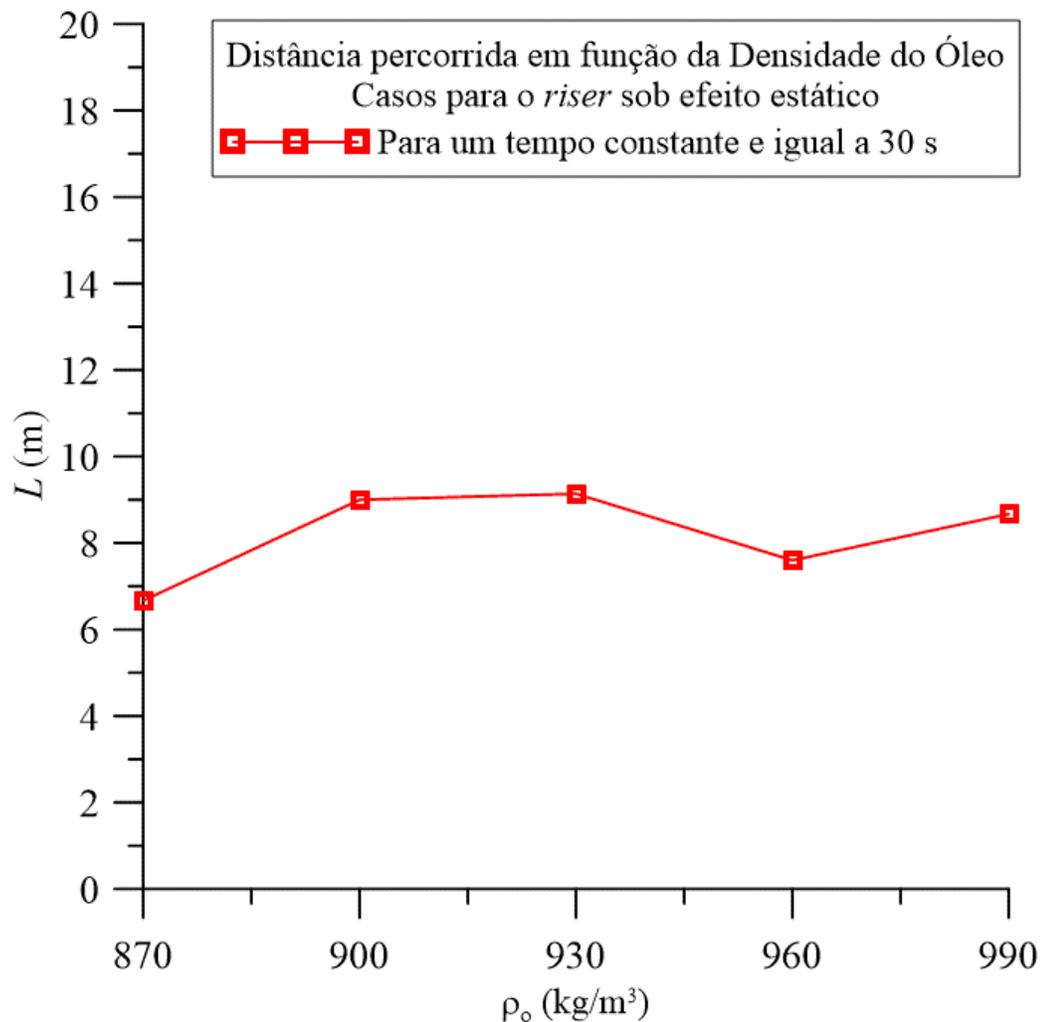


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.5.6 Efeito da distância percorrida em função da densidade do óleo

Observando-se o efeito da distância percorrida em função da densidade do óleo, é possível observar que, a pluma de óleo de densidade 900, 930 e 990  $\text{kg/m}^3$  (Caso 16, Caso 17 e Caso 19) respectivamente, atinge a distância de 9 m de comprimento em relação à distância percorrida no mesmo tempo de estudo (30 s). O óleo mais leve se desloca menos no sentido da saída do oceano (Figura 4.49) com velocidade de propagação da correnteza de 0,1 m/s ( $Fr_0 = 0,0041$ ).

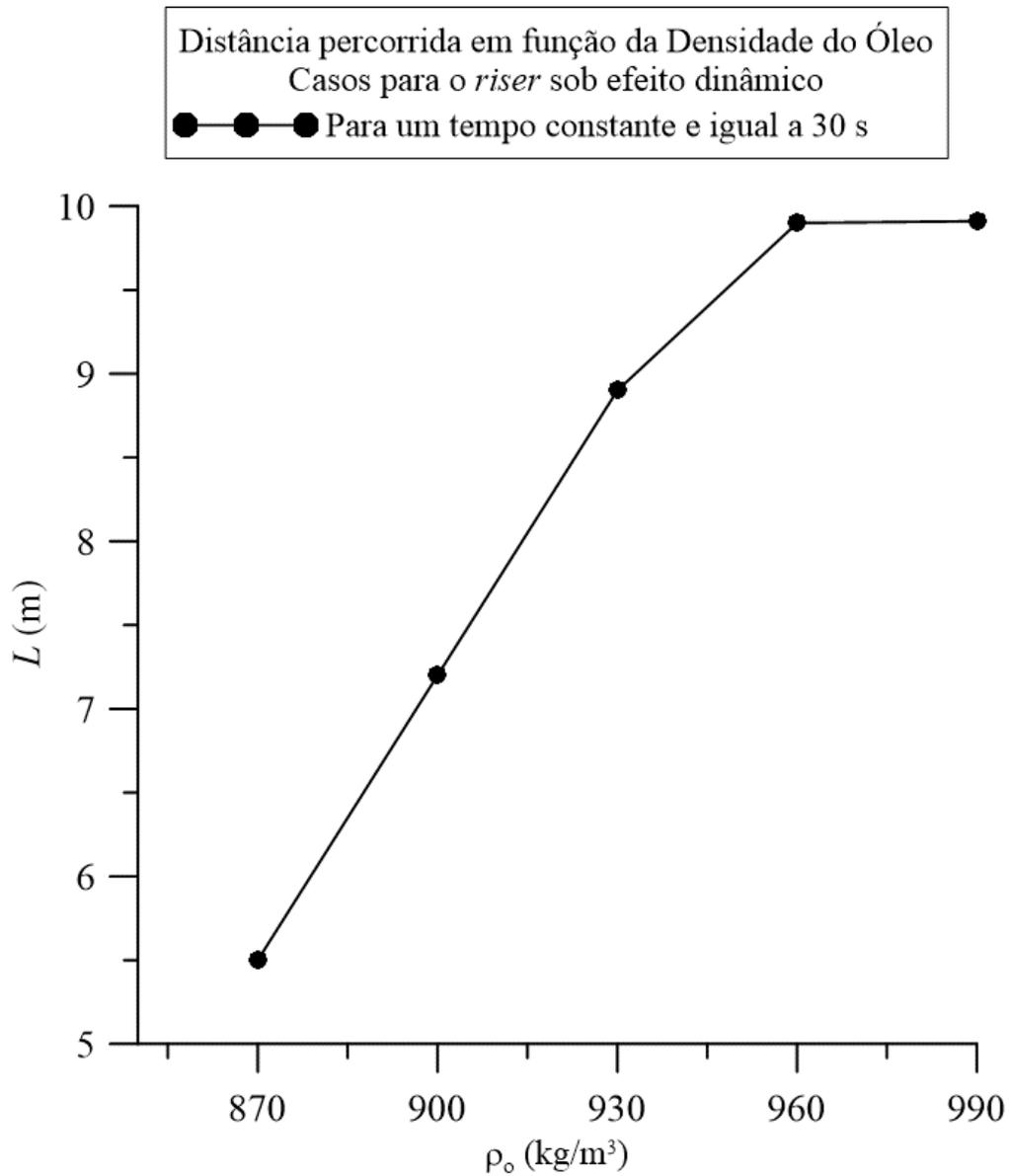
**Figura 4.49:** Efeito da distância percorrida em função da densidade do óleo - estático; velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Analisando a distância percorrida da pluma de óleo em um tempo constante (30 s) em função da densidade do óleo sob efeito dinâmico, observa-se que quanto maior a densidade do óleo, maior é a distância percorrida pela pluma. No intervalo de densidade entre 960 e 990 kg/m<sup>3</sup> (Caso 23 e Caso 24), observa-se que a curva se mantém constante no mesmo comprimento de 10 m de distância percorrida (Figura 4.50).

**Figura 4.50:** Distância percorrida em função da densidade do óleo - dinâmico; velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

## 4.6 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes densidades de água, para o *riser* dinâmico e estático

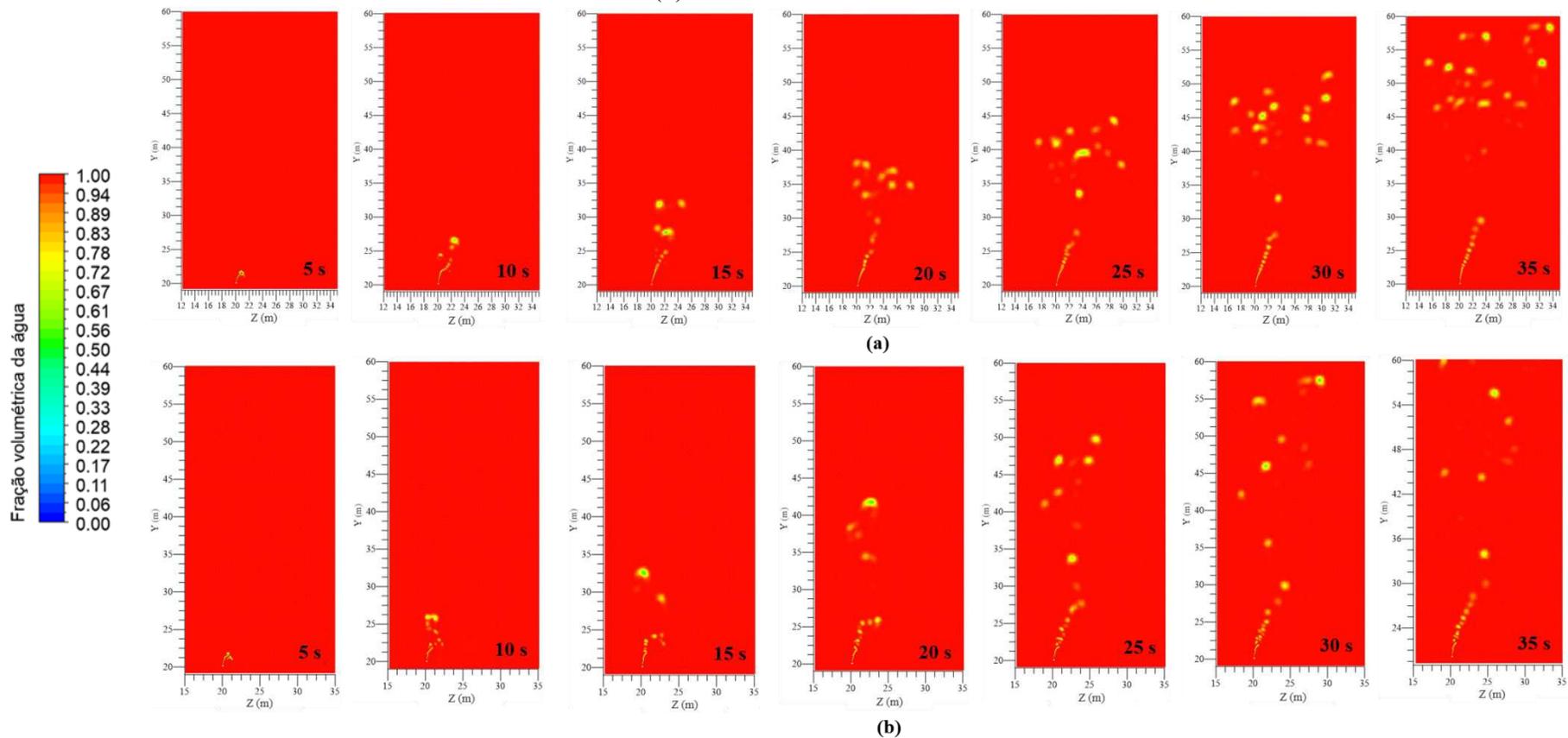
### 4.6.1 Campo de fração volumétrica da água durante vazamento de óleo sob diferentes valores densidades da água para o *riser* sob condição estático e dinâmico

Como a densidade da água do mar contém uma alta concentração de sais e varia de acordo com a temperatura, é de suma importância avaliar o comportamento da trajetória de petróleo na água sob diferentes valores de densidades, em que a velocidade de propagação da correnteza para estas situações é considerada padrão, sendo de 0,1 m/s ( $Fr_0 = 0,0041$ ). Diante disto, tomou-se como condição padrão para a água a densidade de 1025 kg/m<sup>3</sup> (Caso 26) e dois valores de 1000 kg/m<sup>3</sup> e 1030 kg/m<sup>3</sup> (Caso 25 e Caso 27) para fazer o comparativo da dispersão do petróleo.

Os resultados qualitativos (Figuras 4.51 a 4.53) para a fração volumétrica da água sob diferentes densidades, mostram que o comportamento da pluma de óleo vazado oriundos de *riser* estático em água com valor de densidade de 1000 kg/m<sup>3</sup> (Caso 25), se dispersa mais na região próximo a superfície livre tanto para o sentido a montante como a jusante do escoamento (Figura 4.51a). Considerando o efeito dinâmico (Caso 28), para este mesmo valor de densidade, observa-se que o comportamento da fração volumétrica de óleo em água difere significativamente em relação ao efeito estático, gastando menos tempo para alcançar a superfície livre (Figura 4.51b). Comportamento semelhante é observado no caso sob condição padrão onde a água apresenta uma densidade de 1025 kg/m<sup>3</sup> (Figura 4.52a, b).

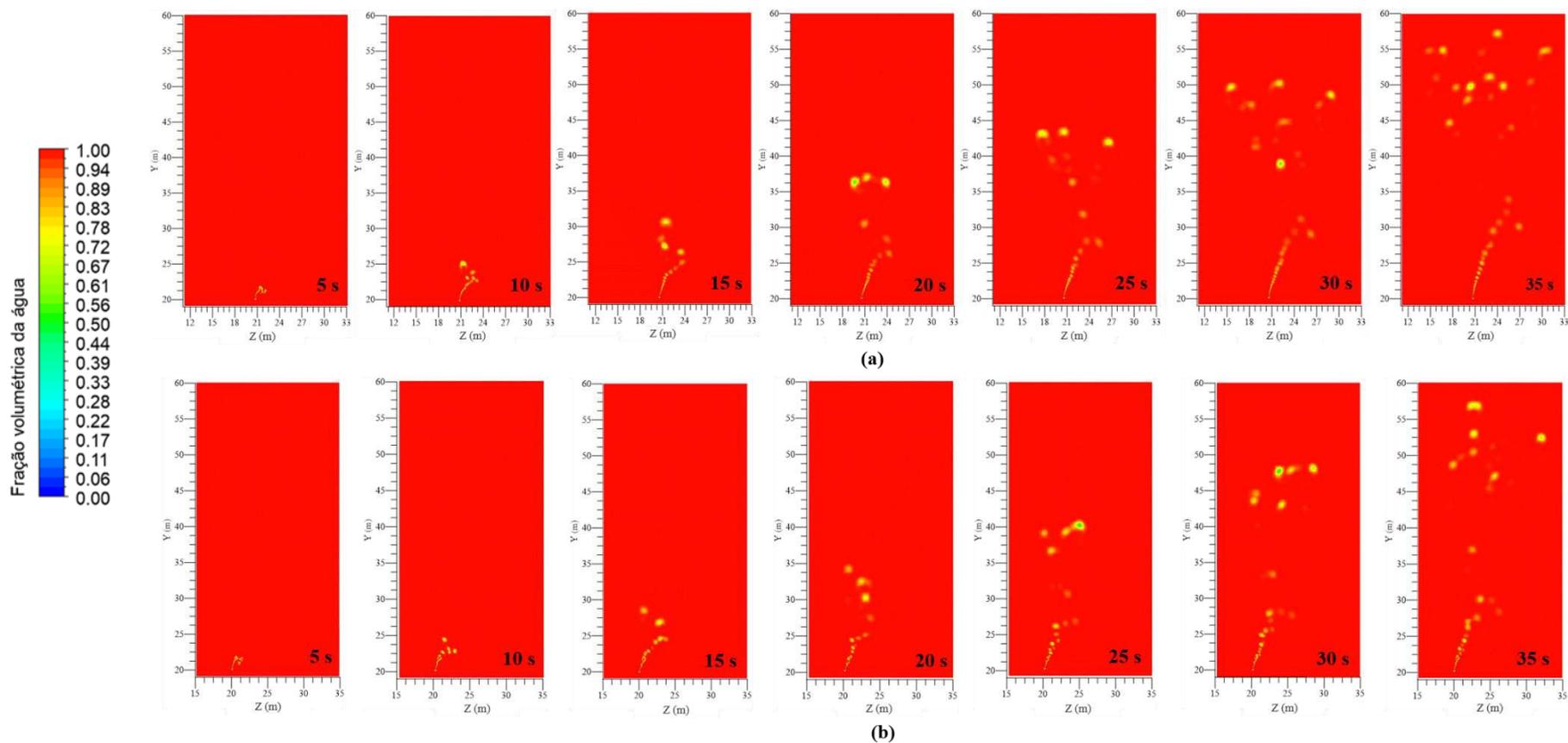
Considerando uma água mais salgada (1030 kg/m<sup>3</sup>) (Caso 27), onde as partículas de óleo ficam mais concentradas em relação a uma água menos densa, o tempo de deslocamento até a superfície livre ultrapassa 35 s em relação ao mesmo efeito com densidades menores (Figura 4.53a). Analisando o mesmo caso, porém sob efeito dinâmico (Caso 30), é observado próximo a região do vazamento que, à medida que a pluma de óleo vai se deslocando no sentido vertical, vai perdendo velocidade e a dispersão ocorre verticalmente na direção da superfície livre devido aos efeitos de fluuabilidade das gotículas de óleo na água (Figura 4.53b).

**Figura 4.51:** Efeito da densidade água de  $1000 \text{ kg/m}^3$ , para uma velocidade da correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ ,  $Fr_0 = 0,0041$ : (a) *riser* estático  
(b) *riser* em movimento



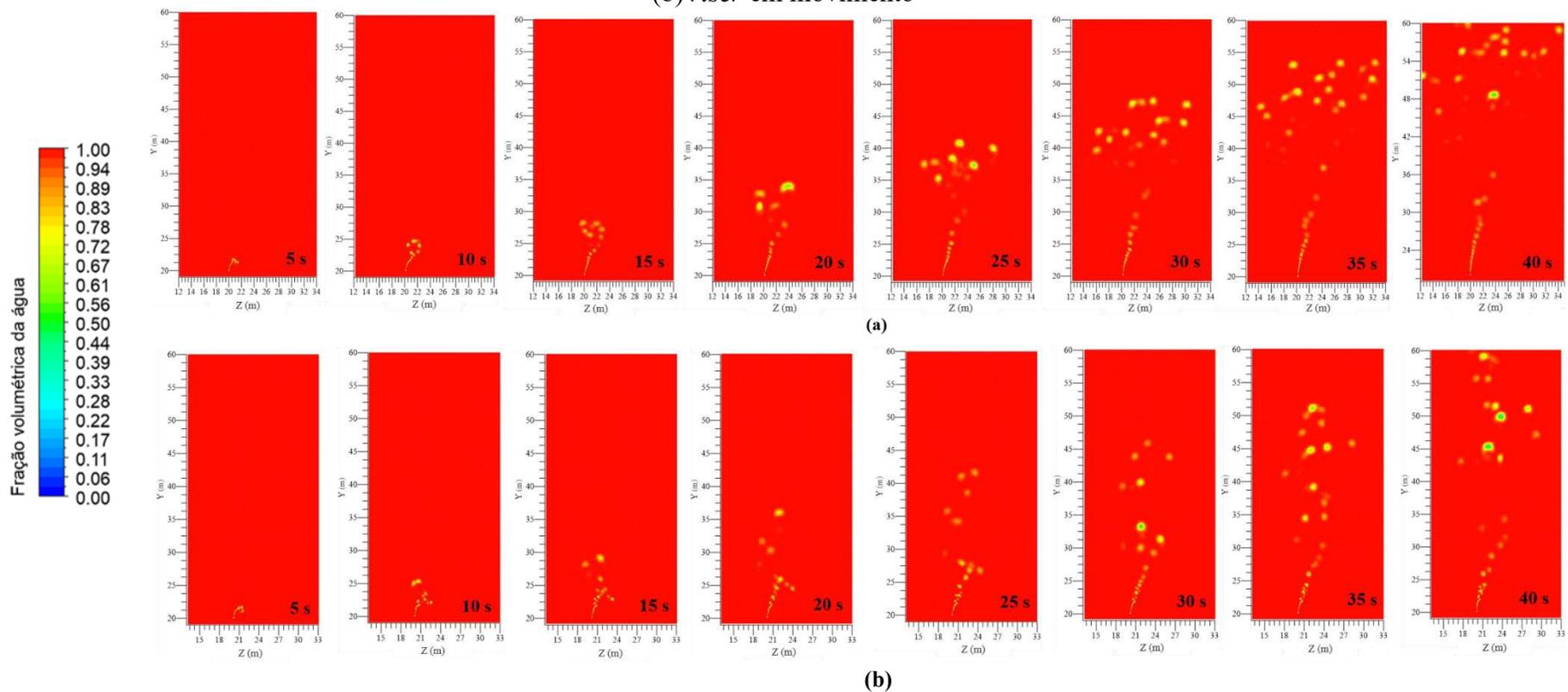
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.52:** Efeito da densidade água de  $1025 \text{ kg/m}^3$ , para uma velocidade da correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ ,  $Fr_0 = 0,0041$ : (a) *riser* estático, (b) *riser* em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.53:** Efeito da densidade água de  $1030 \text{ kg/m}^3$ , para uma velocidade da correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ ,  $Fr_0 = 0,0041$ : (a) riser estático, (b) riser em movimento

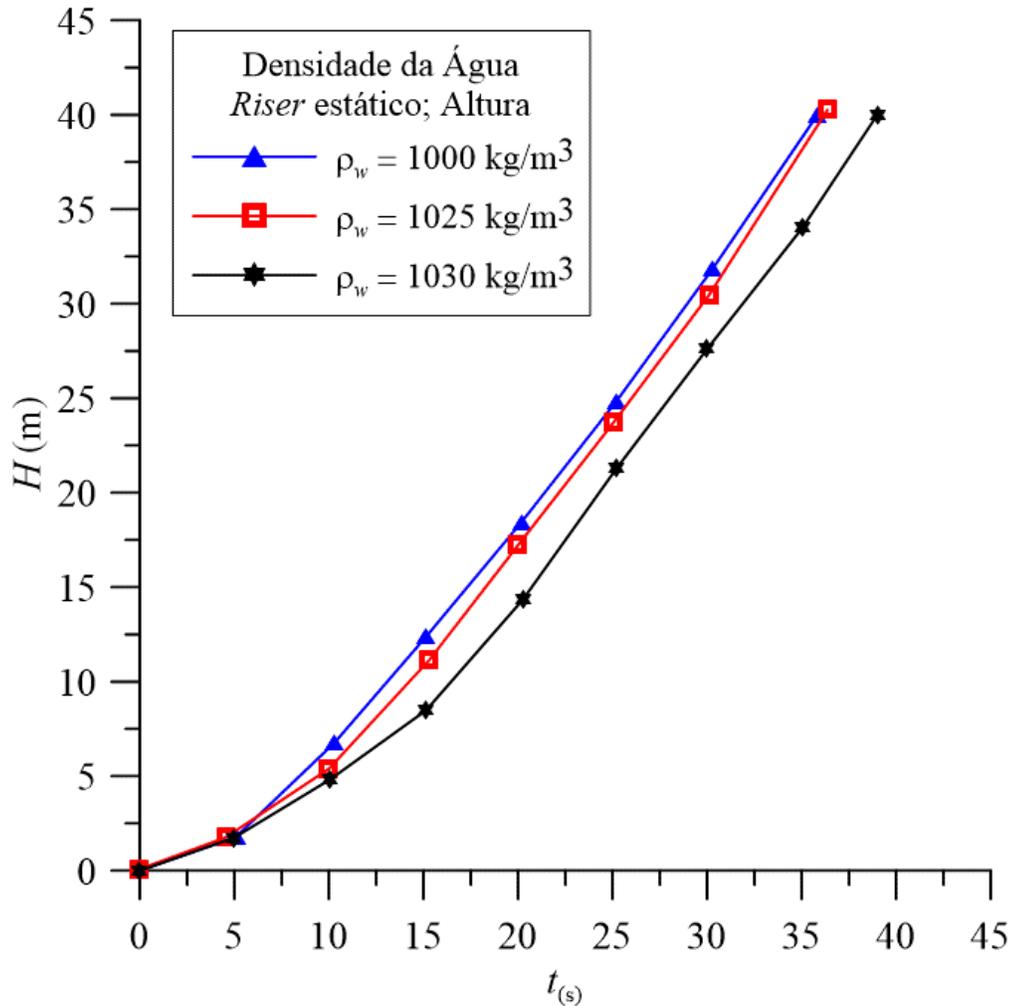


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.6.2 Efeito da densidade da água sobre a pluma de óleo para o riser estático

Considerando o *riser* estático, observa-se que para as duas primeiras densidades de  $1000 \text{ kg/m}^3$  e  $1025 \text{ kg/m}^3$  (Caso 25 e Caso 26), o óleo apresenta um comportamento semelhante, levando praticamente o mesmo tempo pra se deslocar na água em uma altura de 40 m desde o ponto de origem. Logo, para uma água com alta concentração de sal de  $1030 \text{ kg/m}^3$  (Caso 27), a pluma de óleo leva mais tempo para se deslocar do ponto vazamento até a alcançar a superfície livre (Figura 4.54).

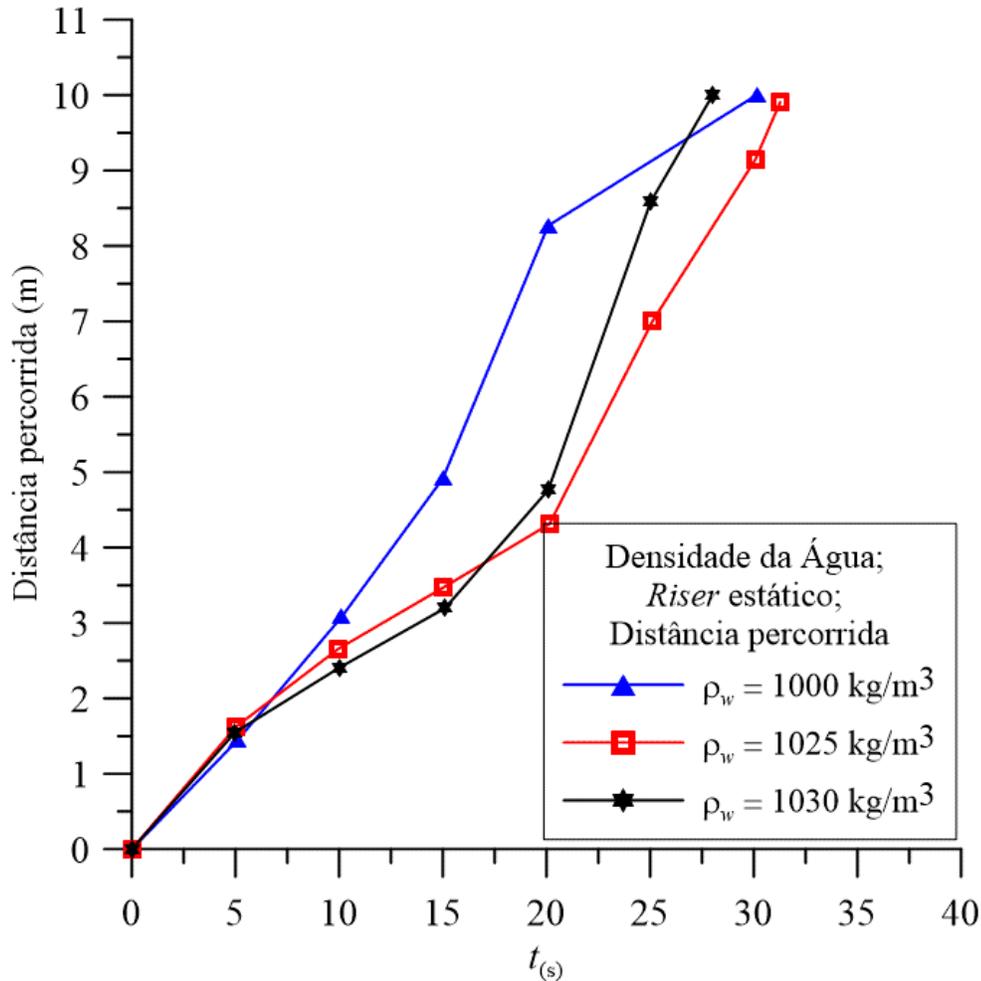
**Figura 4.54:** Efeito da densidade da água do mar para o *riser* estático - para uma velocidade da correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$ ; altura da pluma de óleo



Fonte: Próprio do autor (2021).

Considerando o efeito da densidade da água do mar na distância percorrida pela pluma de óleo considerando o *riser* parado, é possível observar que, para uma densidade padrão ( $1025 \text{ kg/m}^3$ ) a pluma de óleo percorre 10 m de comprimento em aproximadamente 30 s (Caso 26). Porém, para uma água menos densa de  $1000 \text{ kg/m}^3$  (Caso 25), a pluma de óleo chega a alcançar 8 m de distância em 20 s apresentando um aumento nesse tempo até atingir a distância delimitada para este efeito que é de 10 m. É importante mencionar que, para o efeito da densidade da água, o óleo se encontra com uma densidade de  $930 \text{ kg/m}^3$  e  $0,1 \text{ m/s}$  de velocidade de correnteza ( $Fr_0 = 0,0041$ ) (Figura 4.55).

**Figura 4.55:** Efeito da Densidade da água do mar para o *riser* estático e distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$

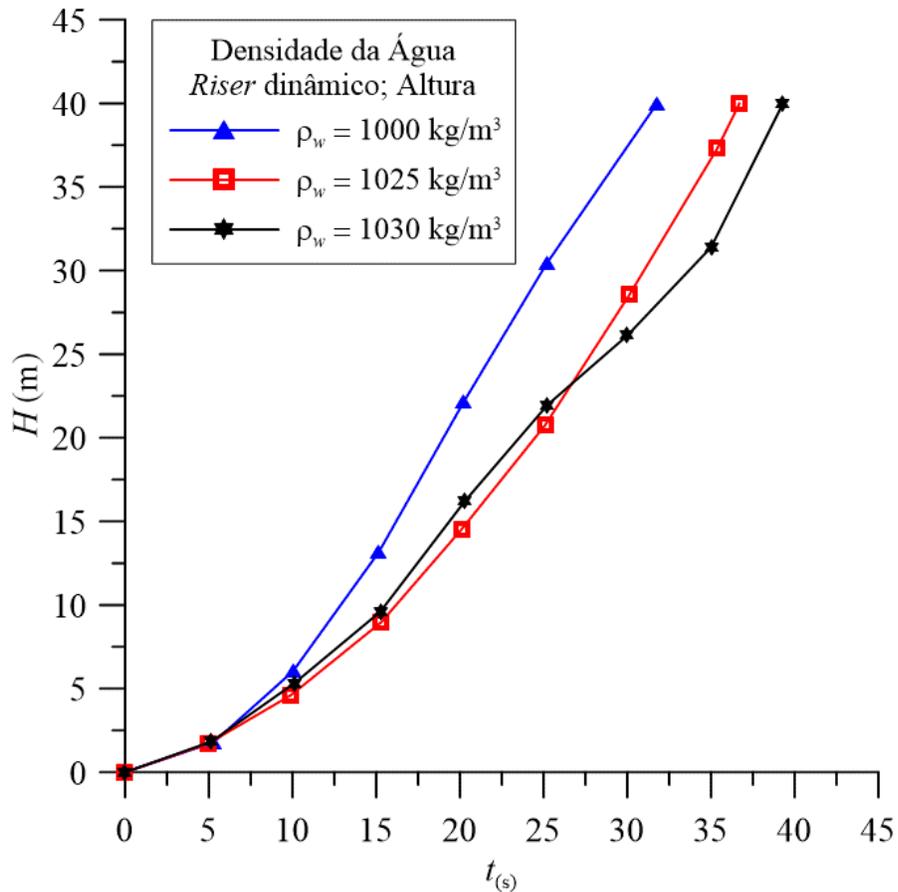


Fonte: Próprio do autor (2021).

### 4.6.3 Efeito da densidade da água sobre a pluma de óleo para o riser em movimento

Na Figura 4.56 observa-se o efeito que a densidade da água provoca sobre a altura da pluma de óleo para todos os casos dinâmicos (Caso 28, 29 e 30). Quanto menor for a concentração de sal na água, menor o tempo de trajetória da fração de volume de óleo até a superfície livre. Quanto maior a concentração de sais na água, maior o tempo de deriva da pluma de óleo até a superfície livre. Observa-se que, para um *riser* sob efeito estático, a pluma de óleo levou cerca de 30 s pra alcançar a altura máxima em uma água de densidade de  $1030 \text{ kg/m}^3$  (Caso 30), enquanto para a situação em que o *riser* se encontra em movimento, o tempo gasto é de 37 s de propagação desde o ponto de vazamento até altura máxima analisada, mostrando assim, mais uma vez, a importância de estudar o efeito da movimentação do *riser*.

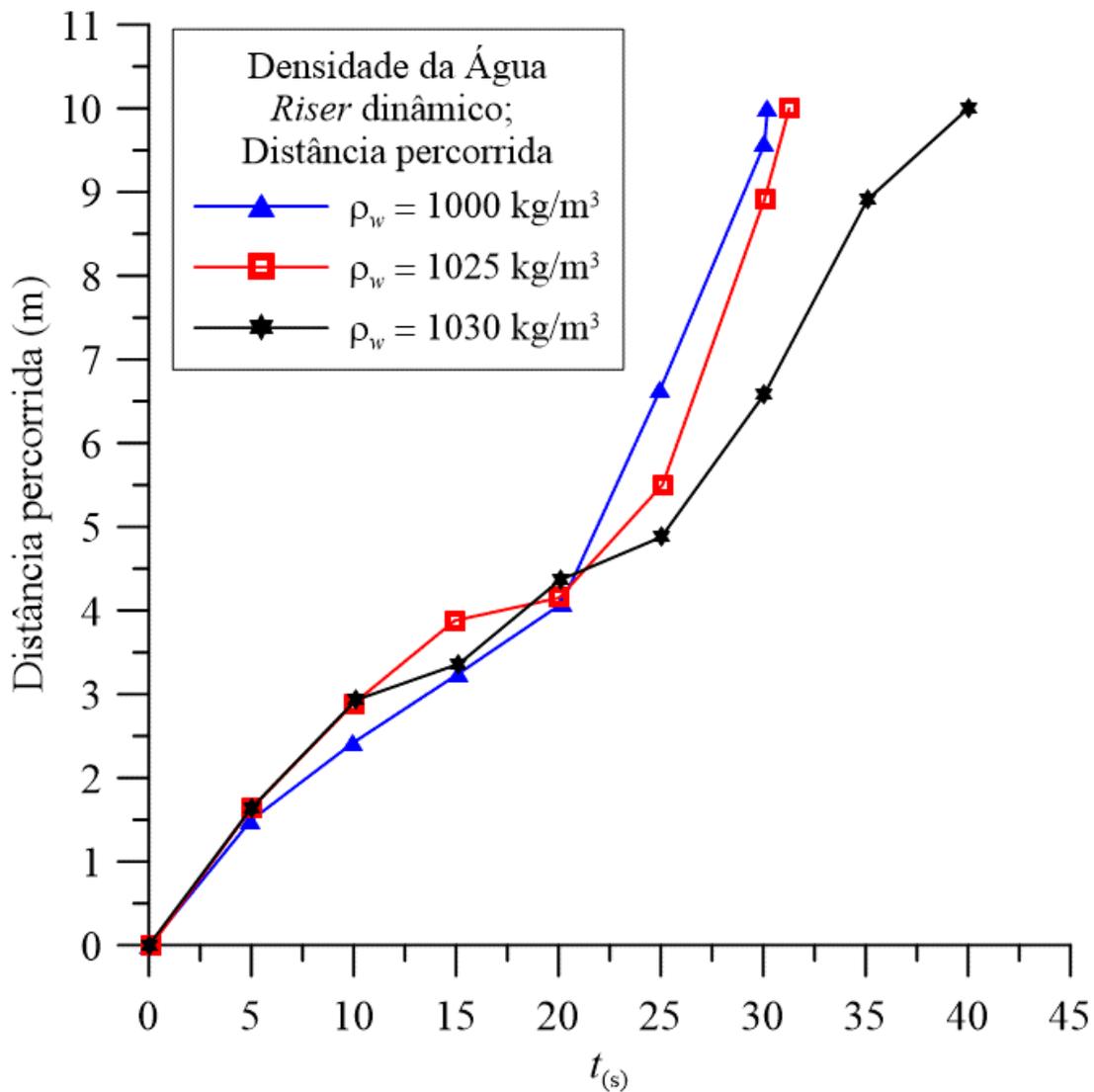
**Figura 4.56:** Efeito da densidade da água do mar para o *riser* dinâmico - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$



Fonte: Próprio do autor (2021).

Discorrendo sobre o efeito da densidade da água do mar em relação à pluma de óleo para o *riser* em movimento, com base na distância percorrida, é possível observar que, para uma água salgada de  $1030 \text{ kg/m}^3$  (Caso 30), a fração de volume de óleo atinge uma distância máxima de 10 m de comprimento em aproximadamente 40 s. Enquanto para densidades menores, 1000 e  $1025 \text{ kg/m}^3$  (Caso 28 e Caso 29) pouca discrepância é observada nas curvas apresentadas graficamente (Figura 4.57).

**Figura 4.57:** Efeito da densidade da água do mar para o *riser* dinâmico - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de  $0,1 \text{ m/s}$



Fonte: Próprio do autor (2021).

#### ***4.6.4 Comportamento da pluma de óleo para diferentes densidades de água considerando o posicionamento estático e dinâmico do riser***

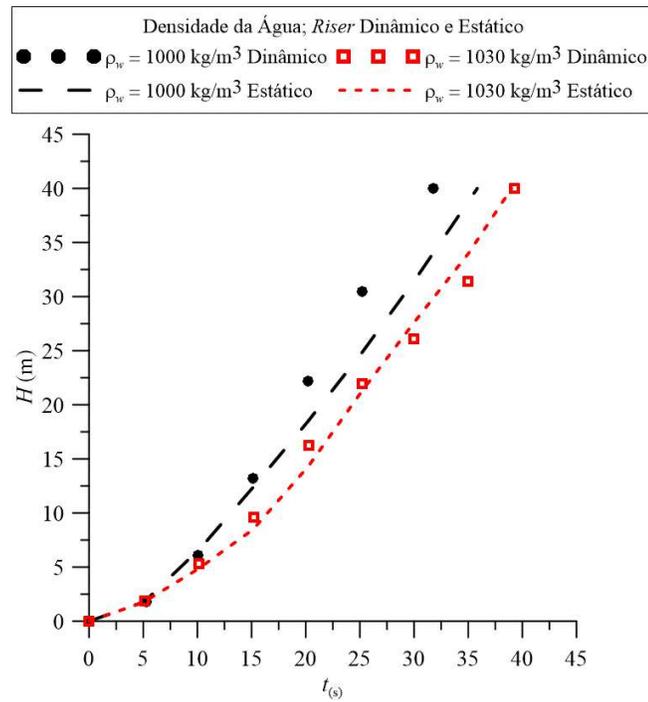
Pode ser observado na Figura 4.58, os perfis das curvas da fração de volume de óleo em relação à altura no tempo para uma água menos densa e outra mais densa. A Figura mostra claramente que para uma água de menor concentração de sal,  $1000 \text{ kg/m}^3$  (Caso 25 e Caso 28), a curva apresenta uma maior inclinação no tempo, tanto para o efeito dinâmico, quanto estático.

Vislumbra-se, também, que a dinâmica na estrutura do *riser* tem um efeito bem significativo para este tipo de situação a fração de óleo atinge os 40 m de altura delimitada em 32 s, aproximadamente, enquanto para o *riser* estático, leva cerca de 37 s para alcançar o nível de altura adotada, ou seja, para menores concentração de sal, a fração de volume de óleo lançado no mar vai sendo dispersado com maior facilidade devido aos efeitos hidrodinâmicos da estrutura do *riser* com a coluna de água e também por causa das forças de arraste, empuxo e cisalhamento. Consequentemente, as partículas de óleo irão se deslocar com maior velocidade e menor tempo de propagação até superfície livre (Figura 4.58).

Por se tratar de uma água muito densa,  $1030 \text{ kgm}^3$  (Caso 27 e Caso 30), percebe-se que nas regiões próximas ao vazamento o efeito dinâmico teve uma pequena variação em relação ao efeito estático. Porém, à medida que as gotículas de óleo se aproximam da superfície livre, ambas chegam à altura máxima em um mesmo intervalo de tempo, que é de 38 s.

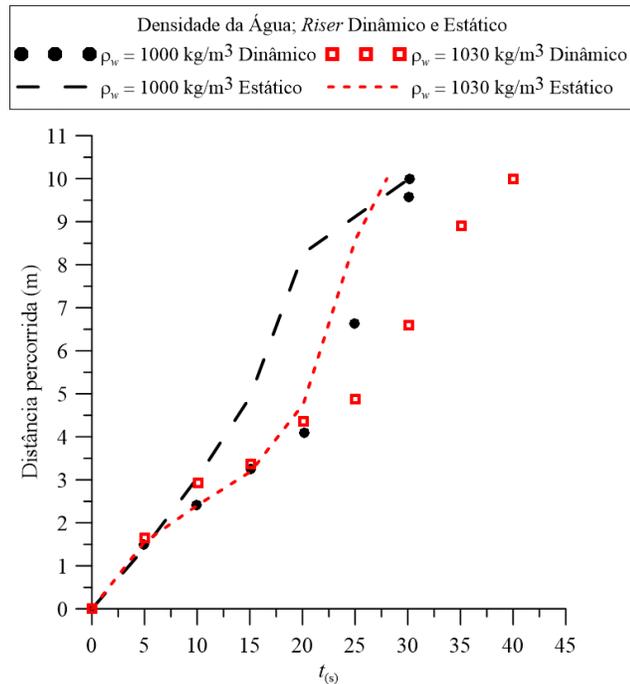
Analisando a distância percorrida pela pluma de óleo em uma região marítima que apresentam densidades diferentes, pode ser mencionado que, em relação ao caso em que a densidade da água foi considerada menor de  $1000 \text{ kgm}^3$  (Caso 25 e Caso 28), o comportamento da pluma de óleo oriundo de vazamento em *riser* estático apresenta uma variação bem significativa em relação ao *riser* em movimento. Para uma água que apresenta uma maior concentração de sal ( $1030 \text{ kgm}^3$ ), observa-se claramente que para o efeito dinâmico a pluma de óleo alcança uma distância de 10 m de comprimento em, aproximadamente, 43 s. Para o efeito estático cerca de 28 s são gastos para se deslocar em 10 m de distância (Figura 4.59).

**Figura 4.58:** Efeito da densidade da água para o *riser* dinâmico e estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.59:** Efeito da densidade da água para o *riser* dinâmico e estático na distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s

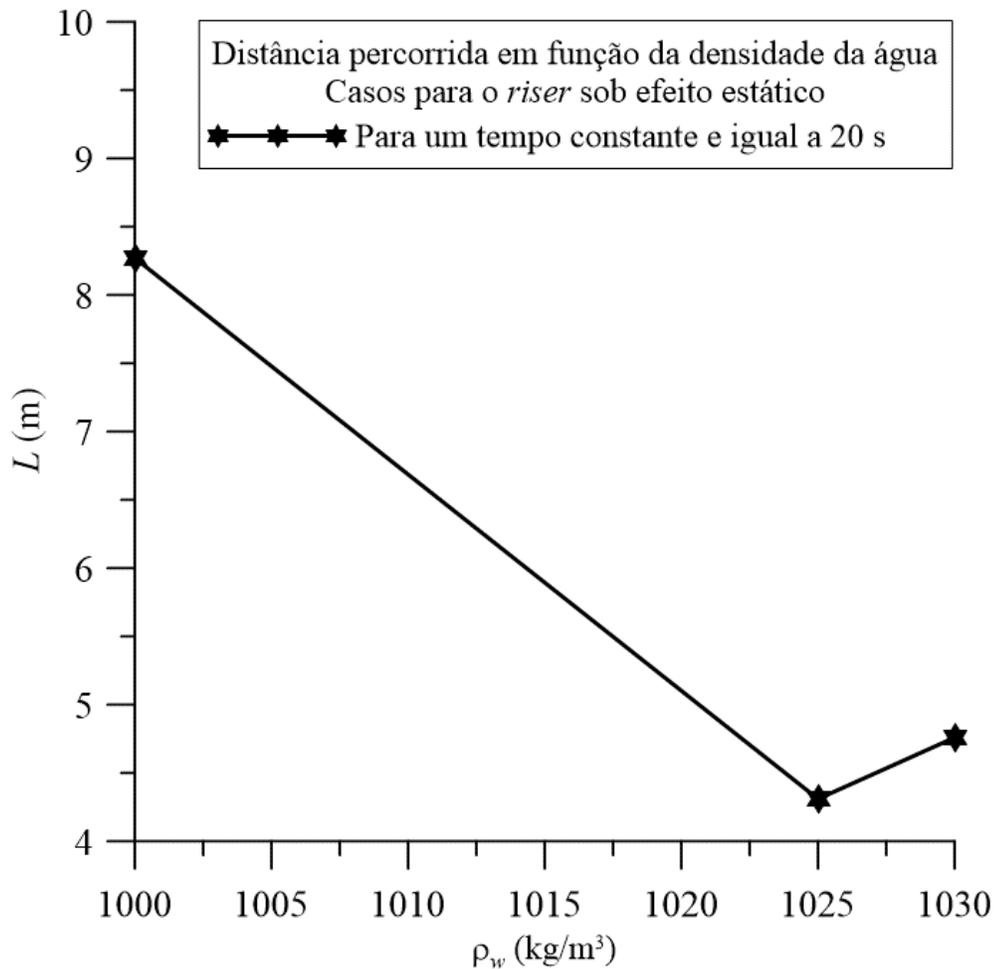


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.6.5 Efeito da densidade da água em função distância percorrida

Com objetivo de avaliar a distância percorrida da pluma de óleo em função da densidade da água do mar, tomou-se um tempo constante (20 s) considerando três valores de densidade adotadas para água (1000, 1025, 1030)  $\text{kg/m}^3$  conforme ilustra a Figura 4.60. Pode ser observado que, à medida que aumenta a concentração de sal na água, ou seja, quando mais densa for a água menor é a distância percorrida pela pluma de óleo em um tempo de 20 s considerando o *riser* sem movimentação. Para a densidade considerada padrão (1025  $\text{kg/m}^3$ ) a fração de volume de óleo chega a uma distância máxima de 4,5 m, porém, aumentado essa densidade o volume de óleo chega a um alcance de até 5 m de distância.

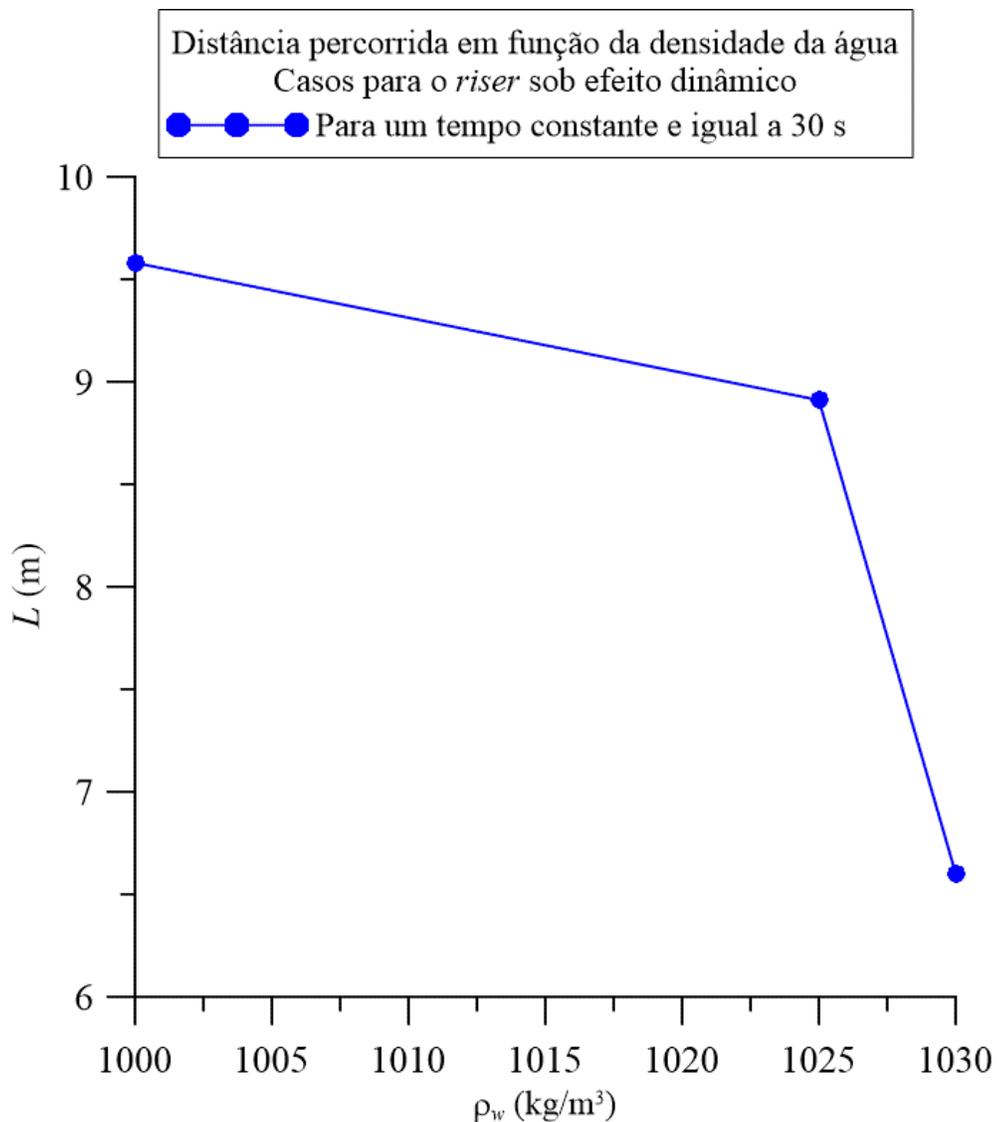
**Figura 4.60:** Efeito da distância percorrida em função da densidade da água para os casos estáticos; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Agora, ao analisar uma distância percorrida pela pluma de óleo em função da densidade da água em um tempo constante (30 s), tem-se que, quanto maior a concentração de sal na água menor a distância percorrida pela pluma de óleo. Observa-se que para uma água de densidade de  $1000 \text{ kg/m}^3$ , a pluma de óleo chega a uma distância de 9,6 m de comprimento, vale salientar que a densidade do óleo para estes casos é de  $930 \text{ kgm}^3$ . Para uma água com alta concentração de sal de  $1030 \text{ kg/m}^3$  (Caso 30), a distância máxima da pluma de óleo sob efeito dinâmico foi de 6 m de distância (Figura 4.61).

**Figura 4.61:** Distância percorrida em função da densidade da água para os casos dinâmicos; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

## 4.7 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes viscosidades do óleo, para o *riser* dinâmico e estático

### 4.7.1 Campo de fração volumétrica da água durante vazamento de óleo sob diferentes viscosidades do óleo considerando do *riser* estático e dinâmico

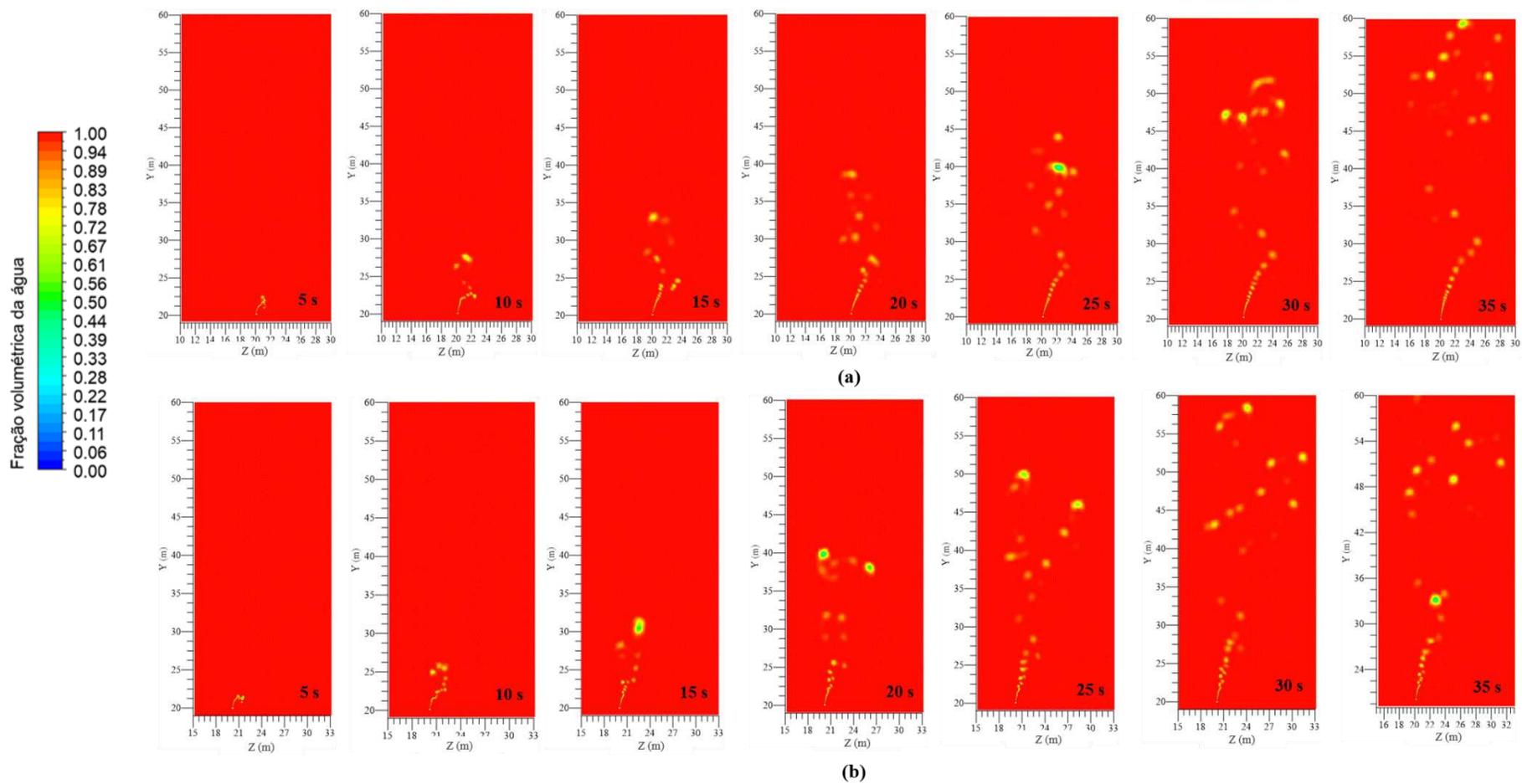
Observa-se que, para uma viscosidade de 0,1 Pa.s, o tempo de dispersão da pluma de óleo até a superfície livre é de 35 s, tanto para o efeito estático quanto para o efeito dinâmico do *riser* (Caso 31 e Caso 36), Figura 4.62. Para o efeito estático (Caso 31) é observado uma maior quantidade de volume de óleo próximo a região da superfície livre (Figura 4.62a). Porém, considerando a movimentação do *riser* (Caso 36), observa-se uma maior dispersão das partículas de óleo próximo a região de vazamento devido aos efeitos hidrodinâmicos da estrutura do *riser* com a coluna de água, fazendo com que a pluma de óleo seja rasgada em uma menor altura e se dispersando em uma maior proporção, onde, as gotículas de óleo são menores no efeito dinâmico devido as forças de empuxo ser maior (Figura 4.62b).

Um óleo de viscosidade 0,5 Pa.s (Caso 32), para o efeito estático, é possível ser mencionado que nas regiões próximas ao orifício de vazamento, o jato apresenta um deslocamento vertical quando é quebrado devido aos efeitos de correnteza, apresentando um comportamento inclinado no sentido a jusante (Figura 4.63a). Em relação ao *riser* em movimento (Caso 37), é observado que a pluma de óleo se dispersa em uma altura menor que para o *riser* estático, isso ocorre devido as forças viscosas, porém, próximo à superfície livre a dispersão tem um comportamento semelhante para os dois efeitos da estrutura do *riser* (Figura 4.63b).

Para a viscosidade padrão, 1,0 Pa.s, considerando o *riser* estático (Caso 33), observa-se que o óleo mostra um comportamento mais disperso a montante e a jusante do orifício de vazamento próximo a superfície, Figura 4.64a, com número de Froude igual a 0,0041. Considerando o *riser* em movimentação (Caso 38), uma fração de volume de óleo maior pode ser constatada pelo campo de fração volumétrica de água (Figura 4.64b).

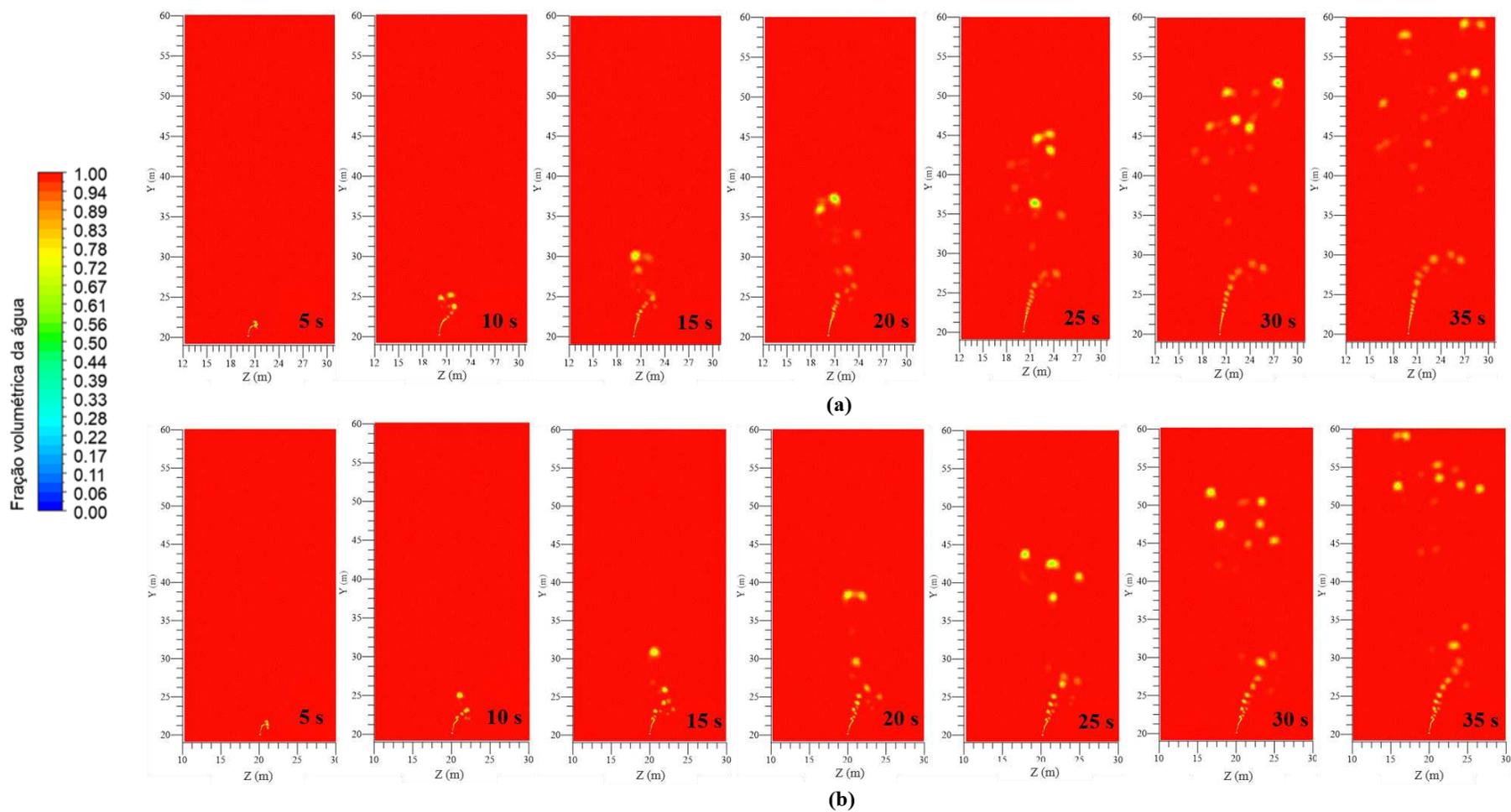
A princípio, no instante inicial do vazamento de óleo, o petróleo se encontra de forma agregada na região interna do vazamento na parede do *riser*. Assim, forças viscosas e tensão superficial são as forças atuantes, a partir do instante que o óleo é lançado na correnteza na forma de jato, o mesmo irá ser quebrado em um determinado instante de tempo e altura devido aos efeitos de corrente. As forças cisalhantes, empuxo e flutuabilidade irão fazer com que o óleo de viscosidade elevada (1,0; 1,5; 2,0) Pa.s (Casos 33, 34, 35, 38, 39, 40), venha se dispersar no oceano tanto para efeitos estáticos quanto dinâmico (Figuras 4.64 - 4.66). Para ambas as viscosidades do óleo, a velocidade da correnteza adotada é de 0,1 m/s, com número de Froude igual a 0,0041, indicando que as perturbações do fluido ocorrem a jusante e a montante do escoamento, com as forças gravitacionais predominando o escoamento, em relação ao número de Weber, as forças atuantes são as forças de inércia.

**Figura 4.62:** Efeito da viscosidade do óleo de 0,1 Pa.s para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático  
(b) *riser* em movimento



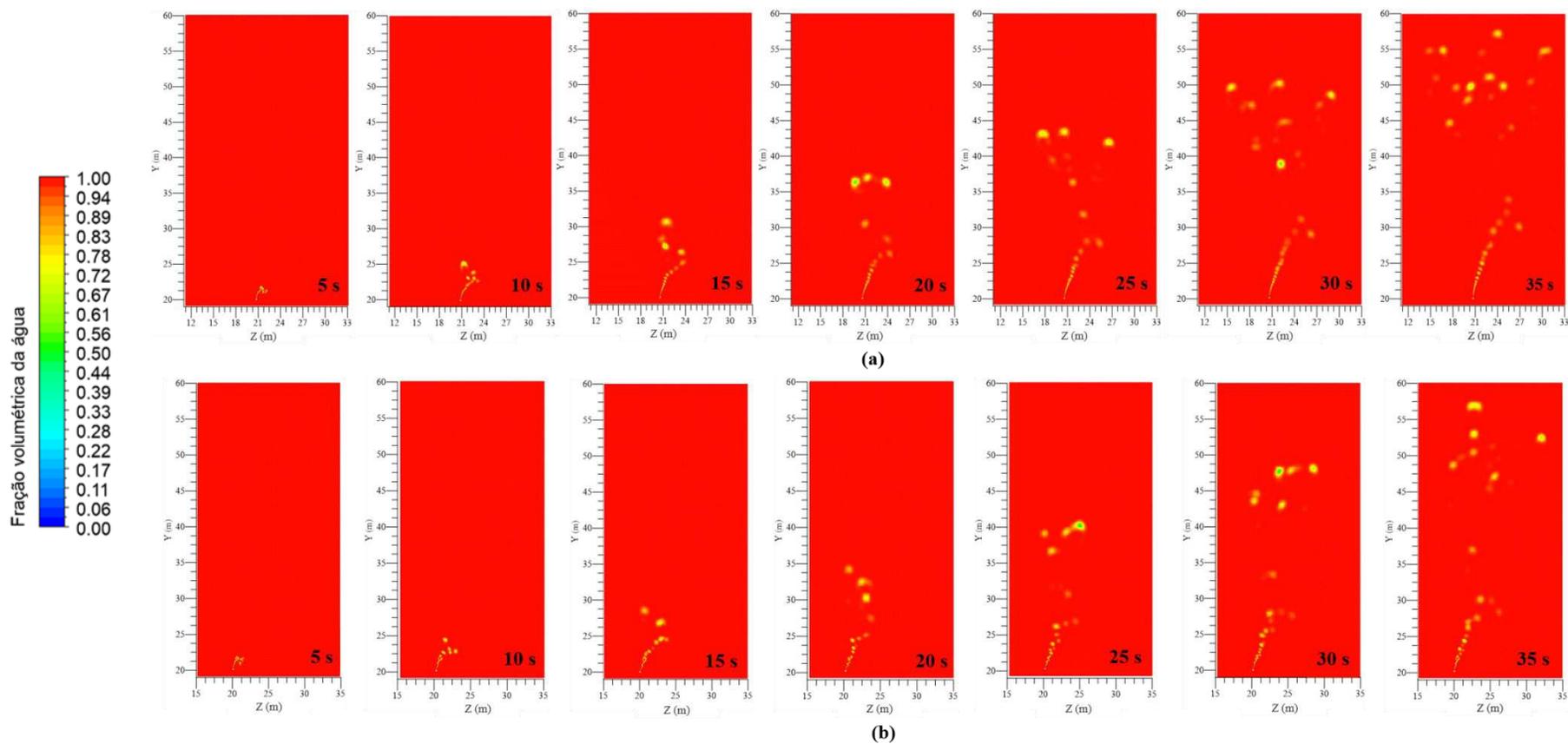
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.63:** Efeito da viscosidade do óleo de 0,5 Pa.s para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático  
(b) *riser* em movimento



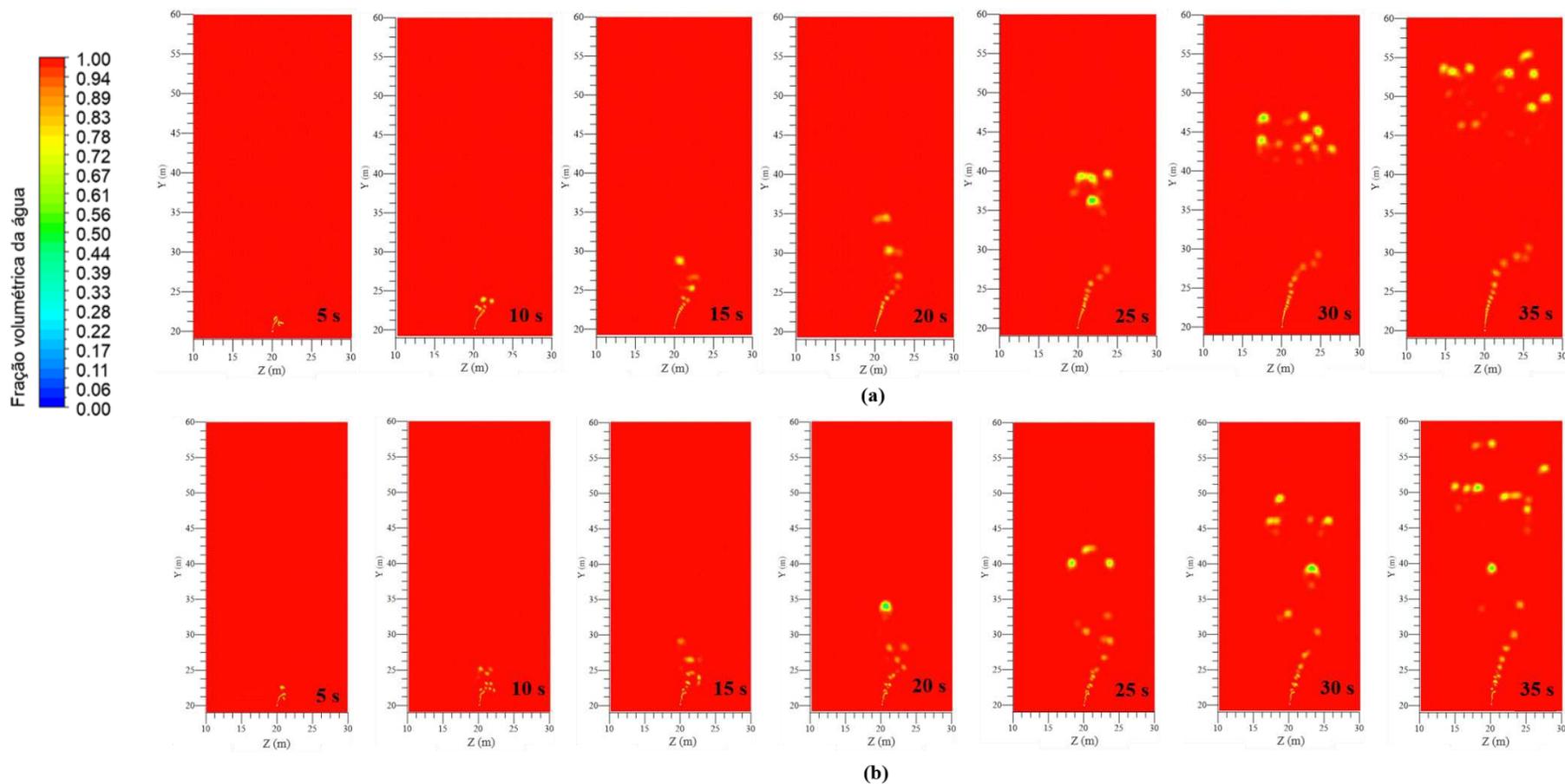
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.64:** Efeito da viscosidade do óleo de 1,0 Pa.s para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático  
(b) *riser* em movimento



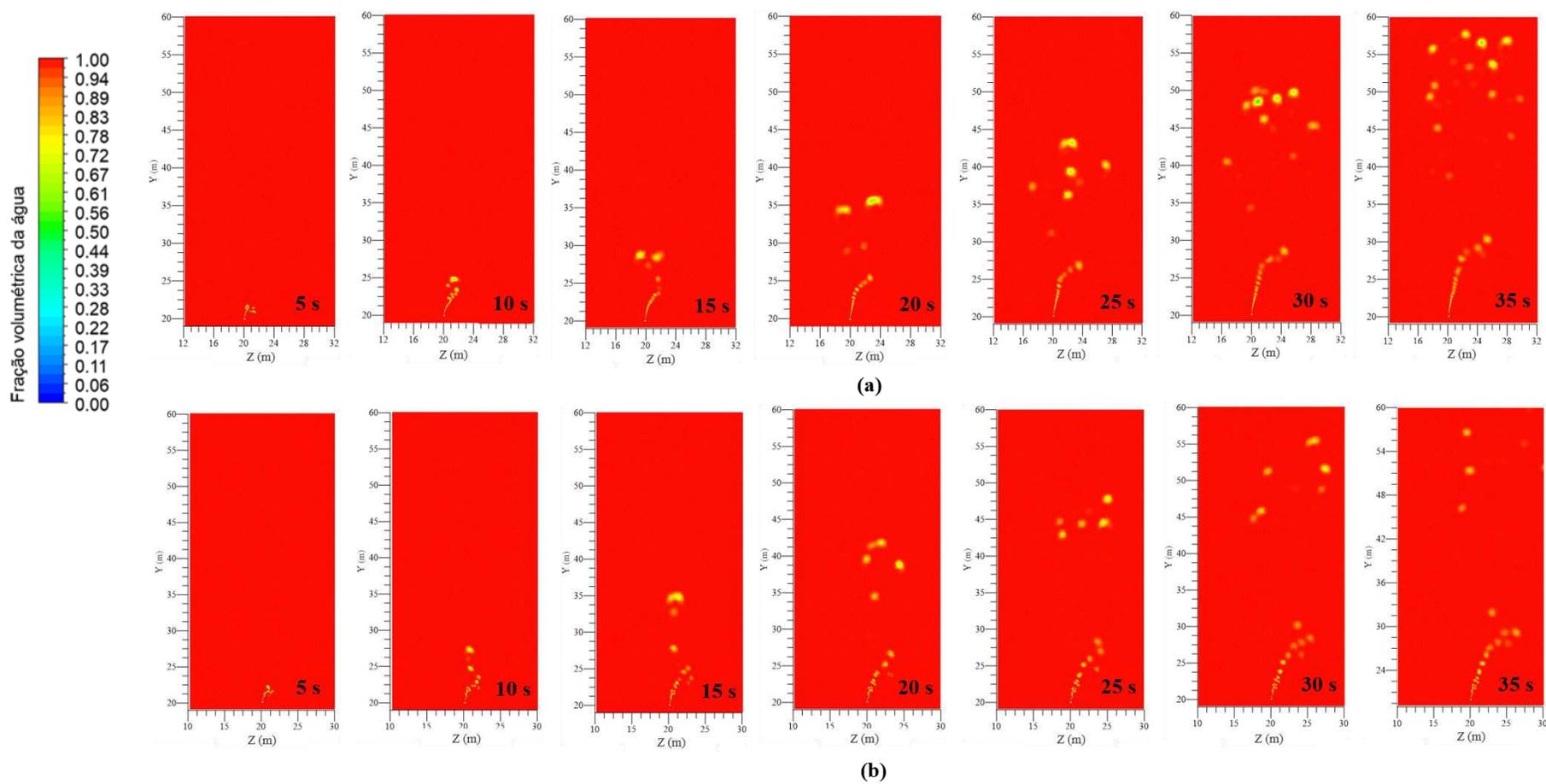
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.65:** Efeito da viscosidade do óleo de 1,5 Pa.s para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s;  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático  
(b) *riser* em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.66:** Efeito da viscosidade do óleo de 2,0 Pa.s para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s;  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático  
(b) *riser* em movimento.

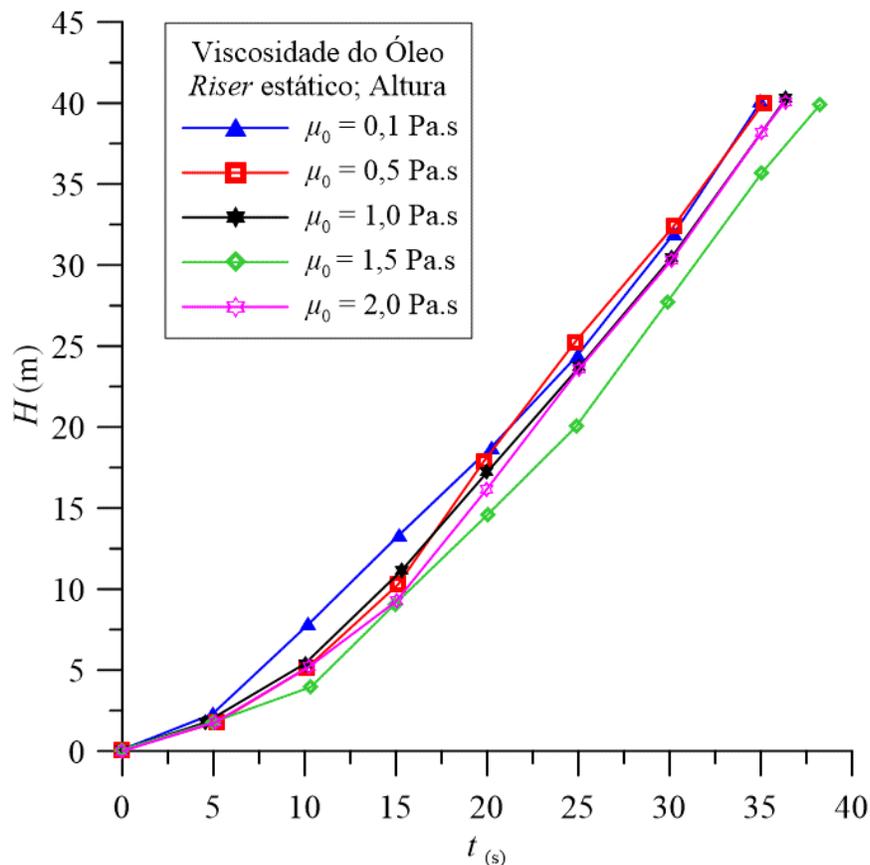


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.7.2 Análise da viscosidade do óleo considerando o riser estático

Ao analisar a altura da pluma de óleo sob diferentes valores de viscosidades pode-se mencionar que, para o vazamento em *riser* estático (Caso 31 ao Caso 35), pouca foi a discrepância entre todas as viscosidades analisadas, com destaque para sobreposição das curvas, ou seja, as forças viscosas não são tão atuantes para o efeito estático. Comportamento semelhante é observado em Zhu et al. (2017b) e Sun et al. (2019), quando estudaram vazamento de óleo a partir de oleodutos estáticos. Para uma viscosidade de 1,5 Pa.s (Caso 34), observa-se uma pequena elevação no tempo de deriva da pluma até a altura máxima (40 m) do ponto de origem de vazão de óleo até a superfície, com uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s ( $Fr_0 = 0,004$ ; Weber superior a 10.000) (Figura 4.67).

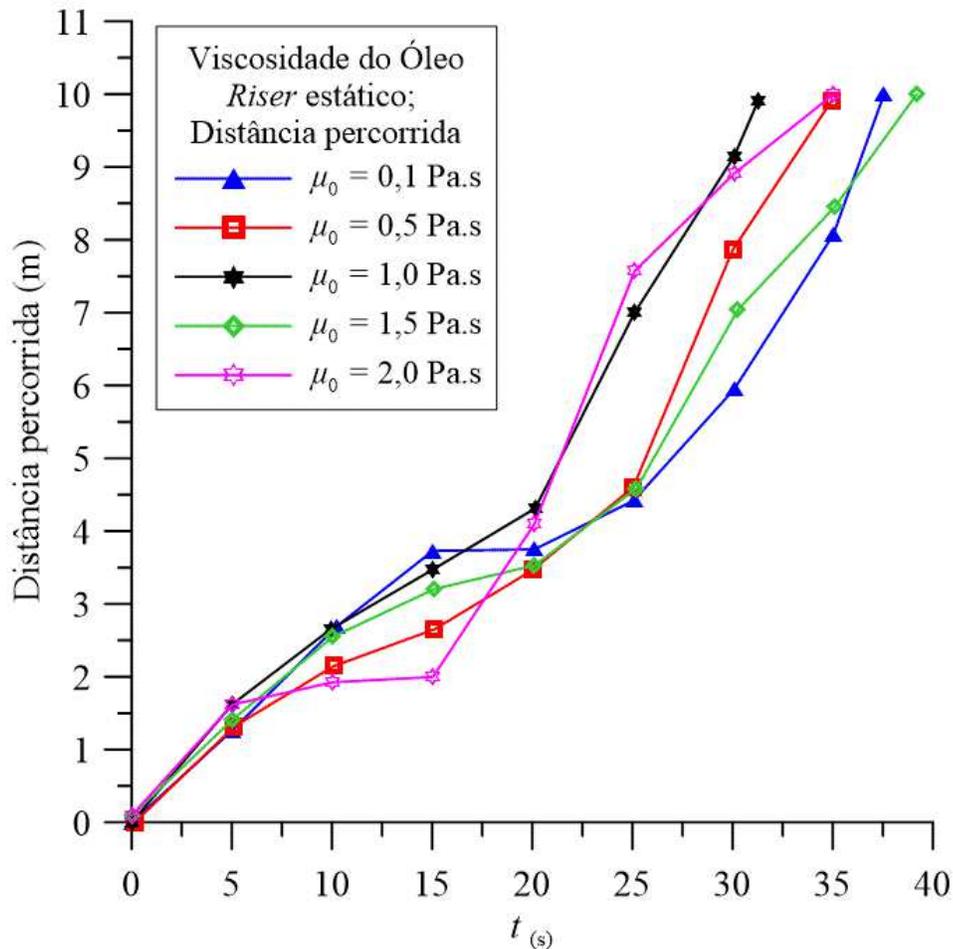
**Figura 4.67:** Efeito da viscosidade do óleo para o *riser* estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

No entanto, levando em consideração a distância percorrida pela pluma de óleo, as curvas de distância percorrida em função do tempo apresentam formatos variados, mostrando que nesta situação as forças viscosas e as forças cisalhantes são predominantes devido a diferença de viscosidade do fluido vazado (Figura 4.68). A partir dos 5 m de distância do ponto de vazamento ambas as viscosidades se mantêm praticamente com o mesmo comportamento de acordo com o gráfico, logo, à medida que o óleo vai se deslocando a jusante do escoamento no tempo, variações são apresentadas em relação ao tempo em todo o percurso para todas as viscosidades.

**Figura 4.68:** Efeito da viscosidade do óleo para o *riser* estático - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s

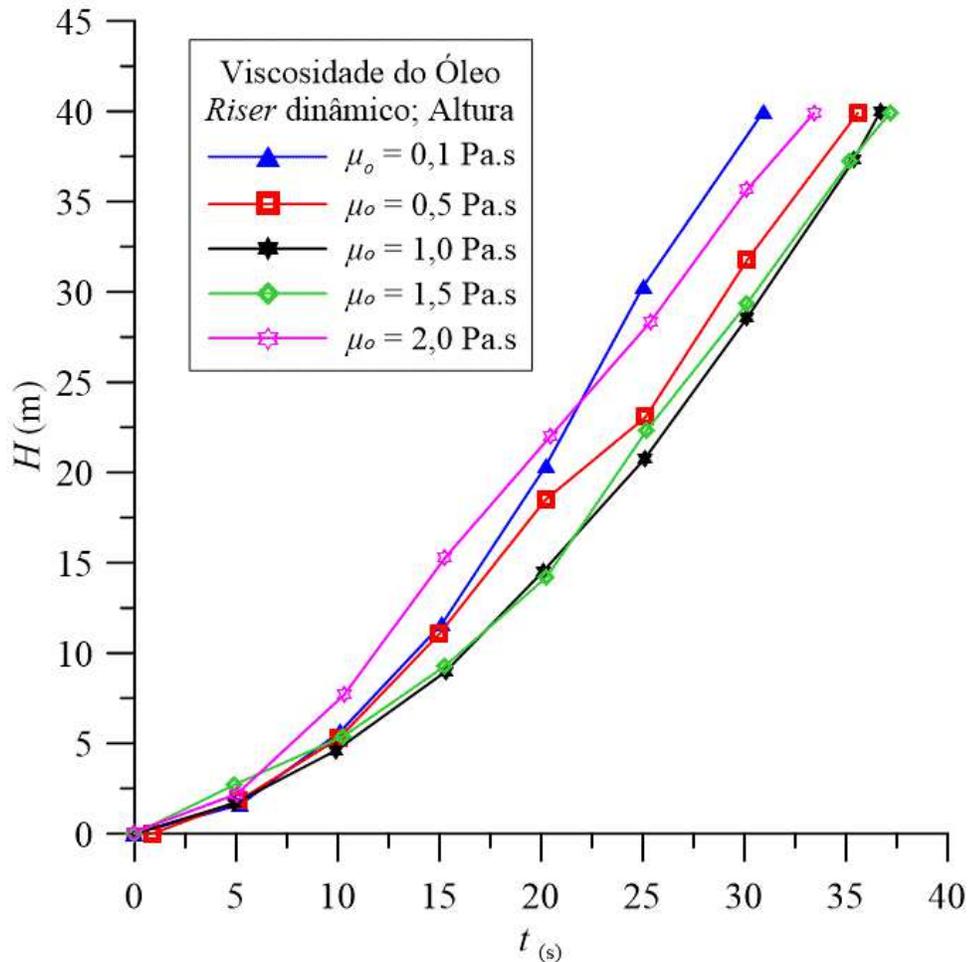


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.7.3 Análise da viscosidade do óleo considerando a movimentação do riser

Analisando o efeito dinâmico do *riser* (Caso 36 ao Caso 40) em relação à altura da pluma de óleo sob diferentes valores de viscosidades, observa-se que, ao contrário do que foi observado para o efeito estático, a movimentação do *riser* mostra que a altura da pluma de óleo apresenta discrepâncias de tempo entre as curvas com viscosidades diferentes. A pluma de óleo de viscosidade de 0,1 Pa.s (Caso 36) alcança a superfície livre em um menor tempo de propagação em relação as demais viscosidades estudadas, sendo a velocidade de propagação da correnteza de 0,1 m/s ( $Fr_0 = 0,0041$ ) (Figura 4.69).

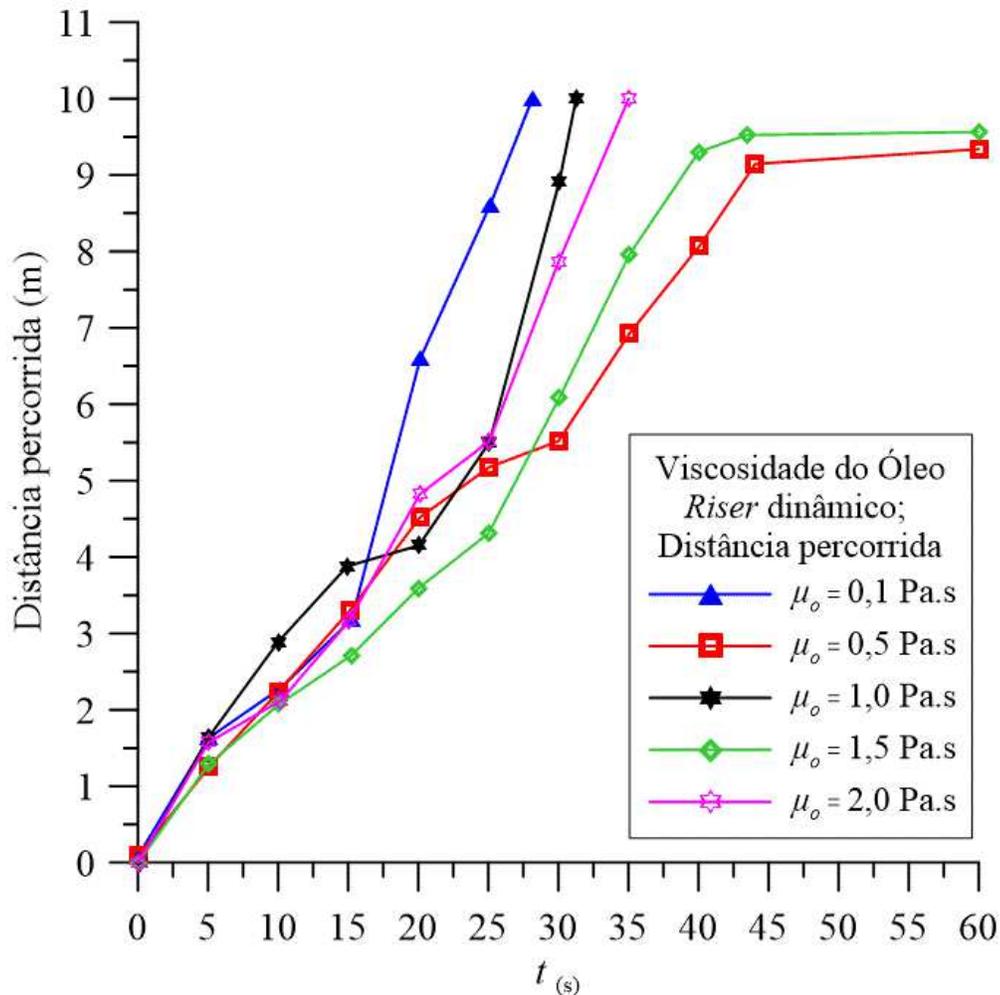
**Figura 4.69:** Efeito da viscosidade do óleo para o *riser* dinâmico - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Observando a distância percorrida pela pluma de óleo com o *riser* sob efeito dinâmico em diferentes viscosidades, pode ser mencionado que, para um óleo menos viscoso, maior é a distância percorrida da fração de volume de óleo na água, contudo, também é possível observar que, para as viscosidade de 0,5 Pa.s e 1,5 Pa.s (Caso 37 e Caso 39), as curvas de viscosidades apresentam comportamento constante a partir do tempo de 40 s, não alcançando a distância delimitada de 10 m de comprimento. Esse comportamento pode ser explicado devido aos efeitos de força de empuxo que as forças cisalhantes provocam nas gotículas de óleo (Figura 4.70).

**Figura 4.70:** Efeito da viscosidade do óleo para o *Riser* Dinâmico - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



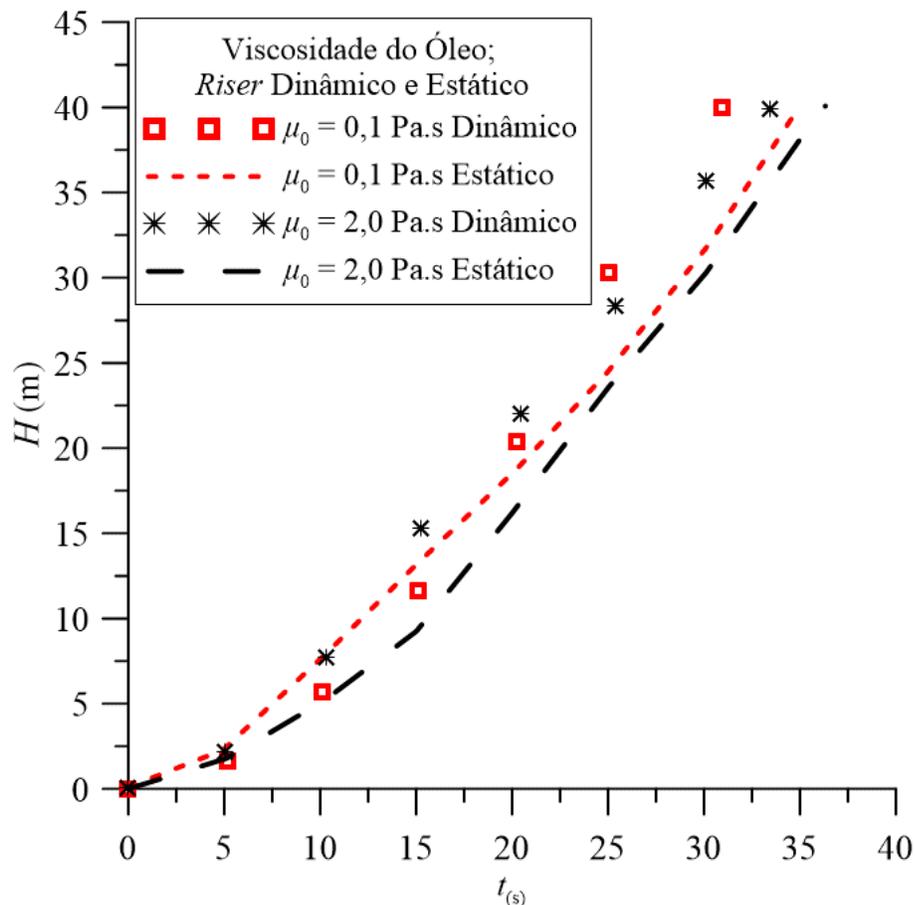
Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.7.4 Efeito do deslocamento do riser estático e dinâmico sobre a pluma de óleo para diferentes viscosidades de óleo

Analisando o efeito dinâmico e estático para dois valores de viscosidades de óleo, pode-se observar que, para um óleo de baixa viscosidade de 0,1 Pa.s (Caso 31 e Caso 36), um menor tempo de deriva do óleo em relação à altura máxima estudada (40 m) é observado. Ao considerar o riser parado (estático), este tempo de propagação da pluma de óleo aumenta cerca de 4 s devido aos efeitos hidrodinâmicos da movimentação entre o riser e a lâmina d'água (Figura 4.71).

Porém, um óleo de alta viscosidade de 2,0 Pa.s (Caso 35 e Caso 40), o efeito da movimentação do riser corresponde a um tempo de deslocamento do óleo menor em relação ao efeito estático, interferindo na condição inicial das gotículas que compõem o jato ao vaziar.

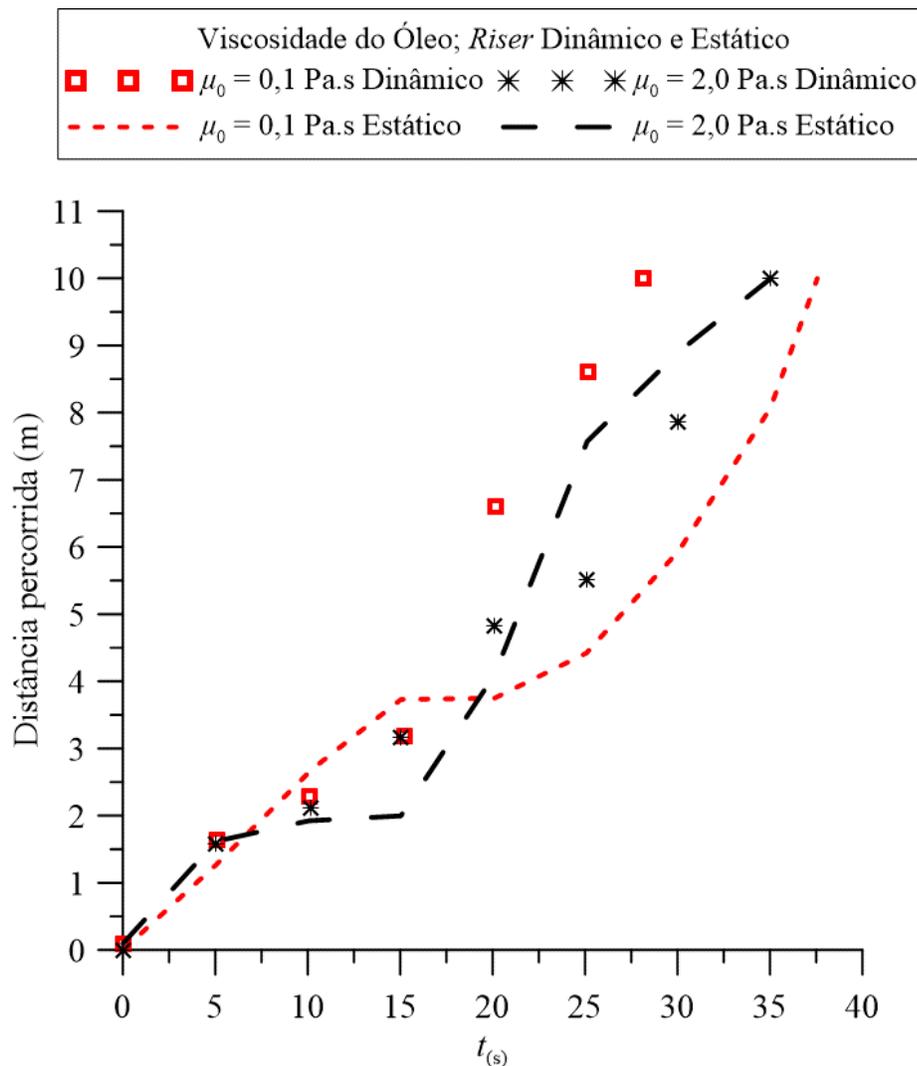
**Figura 4.71:** Efeito da viscosidade do óleo para o riser dinâmico e estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Levando em consideração a distância percorrida pela pluma de óleo sob efeito dinâmico e estático, pode ser observado que, para baixas viscosidades de óleo, o deslocamento da fração de volume de óleo sob efeito dinâmico ocorre mais rapidamente do que para o efeito estático. Ao analisar altas viscosidades, observa-se que os efeitos dinâmico e estático não apresentam tanta discrepância no deslocamento horizontal da pluma de óleo na direção de saída do mar (Figura 4.72).

**Figura 4.72:** Efeito da densidade da água para o *riser* dinâmico e estático - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s

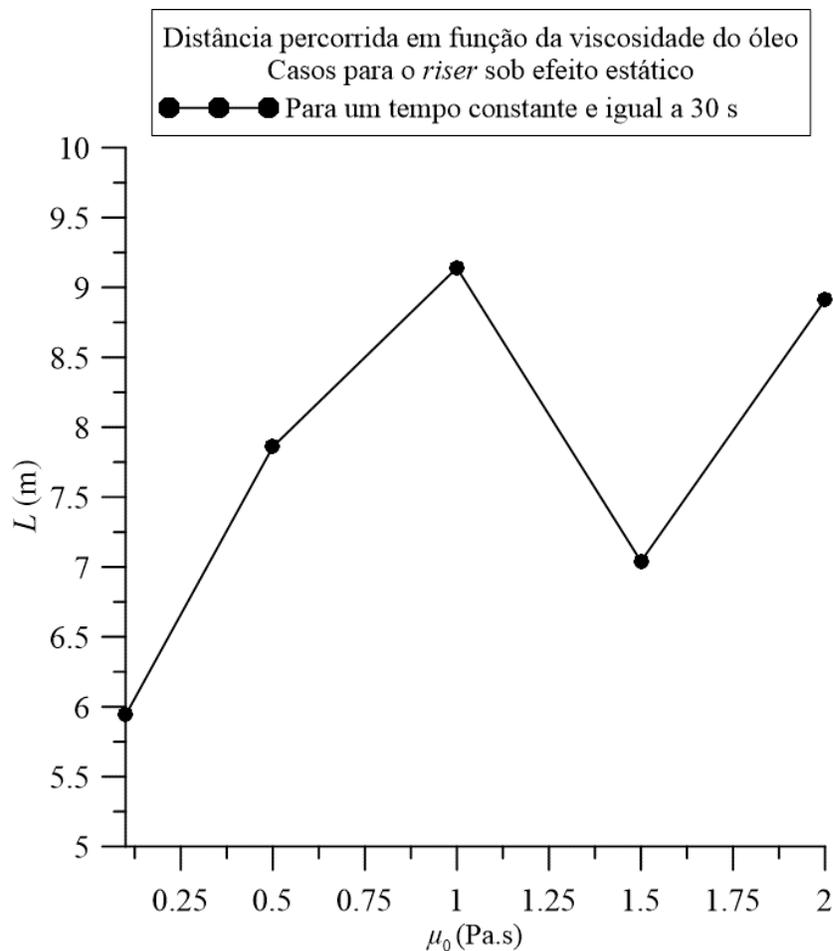


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.7.5 Efeito da viscosidade do óleo na distância percorrida pela pluma de óleo

Ao analisar o efeito da viscosidade na distância percorrida da pluma de óleo, tomou-se um tempo fixo de 30 s para analisar o efeito das cinco viscosidades adotadas para o óleo, sendo 0,1; 0,5; 1,5; 2,0 Pa.s (Caso 31, 32, 33, 34 , 35), respectivamente, com o *riser* sob efeito estático, conforme ilustra a Figura 4.73. Observa-se um aumento significativo na distância percorrida da pluma de óleo para os três primeiros valores de viscosidade com o tempo, porém, para uma viscosidade de 1,5 Pa.s (Caso 34) ocorre um decréscimo elevado na distância da pluma de óleo. O óleo com viscosidades de 1,0 Pa.s e 2,0 Pa.s alcançam a distância máxima percorrida, ou seja, 10 m de comprimento à jusante do orifício de vazamento (Figura 4.73).

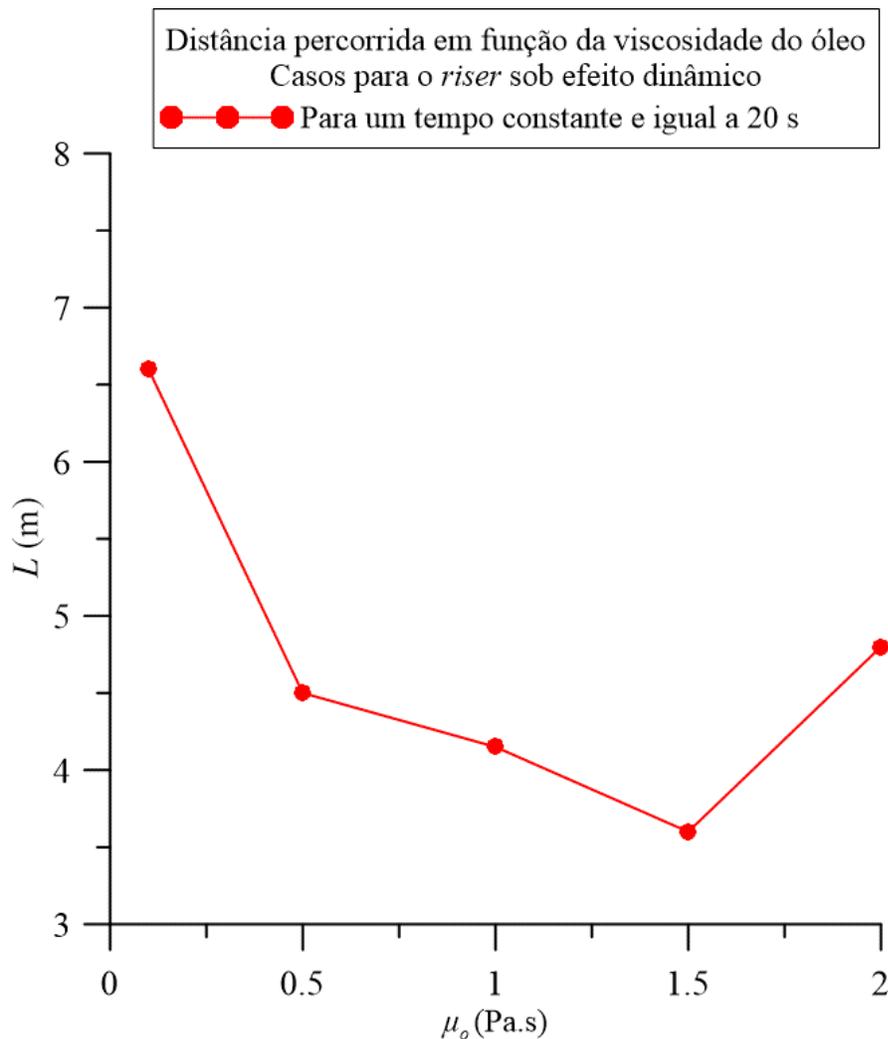
**Figura 4.73:** Efeito da distância percorrida em função da viscosidade do óleo, para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

O efeito da distância percorrida da pluma de óleo em função da viscosidade do óleo para todos os casos sob efeito dinâmico é apresentado na Figura 4.74. Observa-se que, para um óleo de viscosidade 0,1 Pa.s (Caso 36), a distância da pluma de óleo percorrida foi em torno de 6,5 m de distância. Essa distância apresenta um decaimento para as viscosidades de 0,5; 1,0; 1,5 Pa.s (Caso 37, 38, 39), conseqüentemente, para um óleo mais viscoso a pluma de óleo chega a uma distância de no máximo 5 m em 20 s.

**Figura 4.74:** Distância percorrida em função da viscosidade do óleo - dinâmico; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

## 4.8 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes velocidades de vazamento de óleo, para o *riser* dinâmico e estático

### 4.8.1 Campo de fração volumétrica da água sob diferentes velocidades de vazamento de óleo considerando o posicionamento estático e dinâmico do *riser*

Um parâmetro muito importante a ser analisado no presente estudo é a velocidade de vazamento com que o óleo adentra na corrente marítima. Analisando, inicialmente, os resultados qualitativos da disseminação da pluma de óleo na correnteza marítima sob diferentes velocidades de vazamento, pode ser observado que, para uma velocidade de vazamento de 1 m/s, (Caso 41 e Caso 46), o processo de disseminação do óleo até a superfície livre é deslocado lentamente, levando cerca de 60 s para alcançar 33 m de altura, com 0,1 m/s de velocidade de correnteza ( $Fr_0 = 0,0041$ , Weber superior a 10.000), com forças gravitacionais e forças de inércia atuantes no escoamento, respectivamente. Como a velocidade de vazamento é baixa, a pluma de óleo adentra no mar lentamente, conseqüentemente, a pluma de óleo é arrastada pelas forças de correnteza no sentido à jusante e à medida que vai perdendo velocidade se desloca na direção da superfície do mar (Figura 4.75a).

Observando o mesmo caso, porém, considerando o *riser* em movimento (Caso 46), é nítida a discrepância do comportamento da pluma de óleo, devido a dinâmica da estrutura da parede do *riser* na coluna de água, as forças de arraste não são tão atuantes na fração de óleo para o *riser* em movimento, quanto para o *riser* estático, possibilitando assim uma elevação mais rápida da pluma de óleo até a superfície livre (Figura 4.75b).

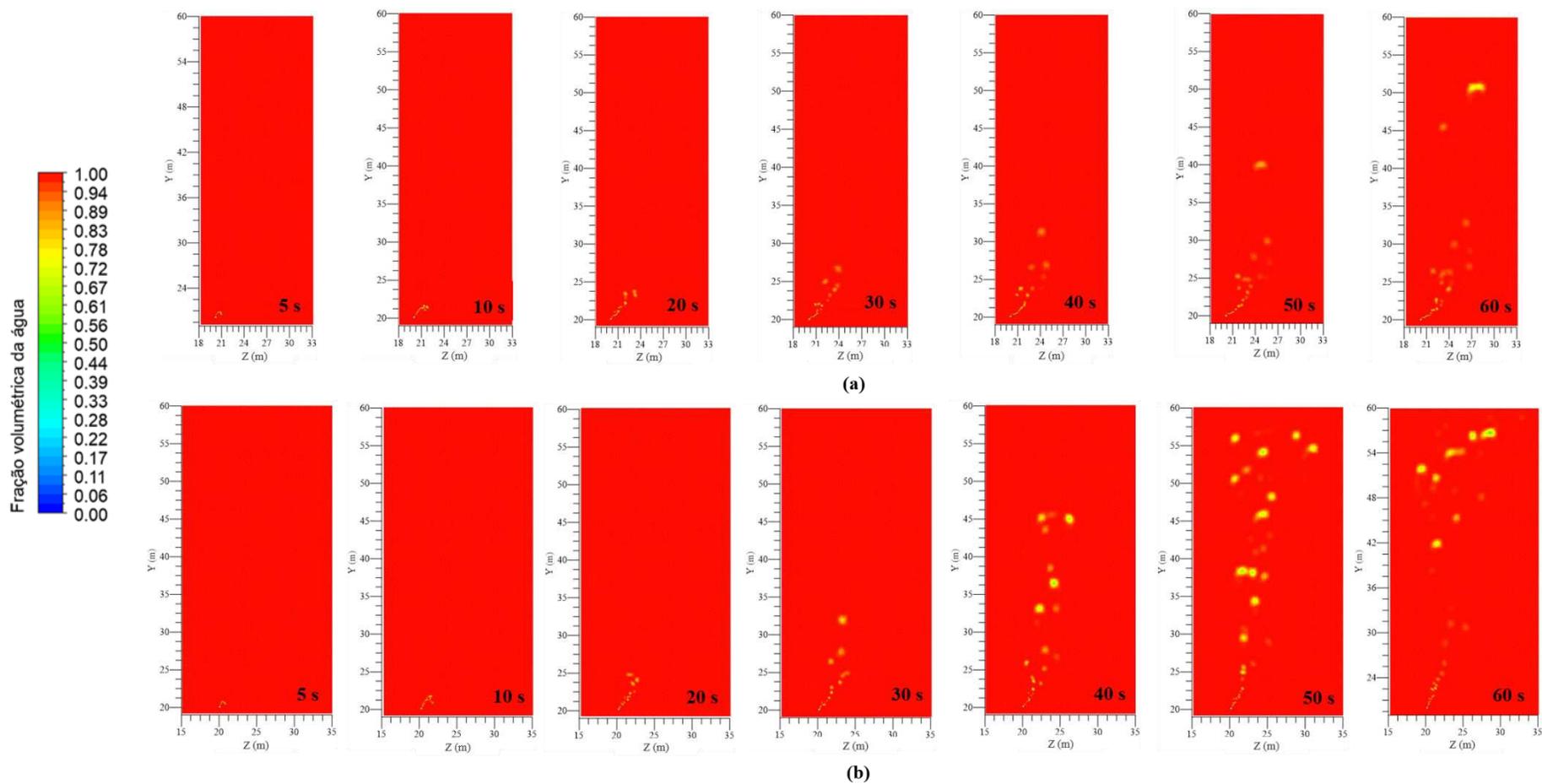
Aumentando a velocidade de vazamento para 2 m/s (Caso 42 e Caso 47), pode ser observado para o *riser* estático que, a pluma de óleo ao adentrar na coluna de água, a cinética é bem mais elevada provocando uma aceleração do deslocamento do petróleo até a superfície livre. Percebe-se a disseminação da fração de óleo é maior nas regiões próximas à superfície livre, levando cerca de 40 s de trajetória (Caso 42) (Figura 4.76a). Considerando os efeitos dinâmicos (Caso 47), comportamento semelhante é observado no processo de deriva do óleo verticalmente (Figura 4.76b).

Para uma velocidade de vazamento de 3 m/s é observado para o caso estático (Caso 43) que o óleo apresentou maior dispersão tanto à jusante como à montante, no sentido do vazamento, porém, apenas 35 s foi gasto para alcançar a altura máxima de 40 m (Figura 4.77a). Para o efeito dinâmico (Caso 48), o comportamento da pluma de óleo se orienta mais no sentido vertical, levando mesmo tempo para alcançar a superfície do mar (Figura 4.77b).

Aumentando esse valor da velocidade de vazamento para 4 m/s observa-se que, para o efeito estático (Caso 44), a pluma de óleo apresenta uma verticalização. Como o óleo se encontra em alta velocidade e a velocidade da correnteza marítima para estas situações é de apenas 0,1 m/s ( $Fr_0 = 0,0041$ ), isso tende a colaborar para que a pluma de óleo apresente esse tipo comportamento (Figura 4.78a, b). Resultado semelhante é apresentado por Sun et al. (2019), quando analisa o efeito de onda e corrente em processo de derramamento de óleo oriundo de oleoduto submerso estáticos (Figura 4.78a).

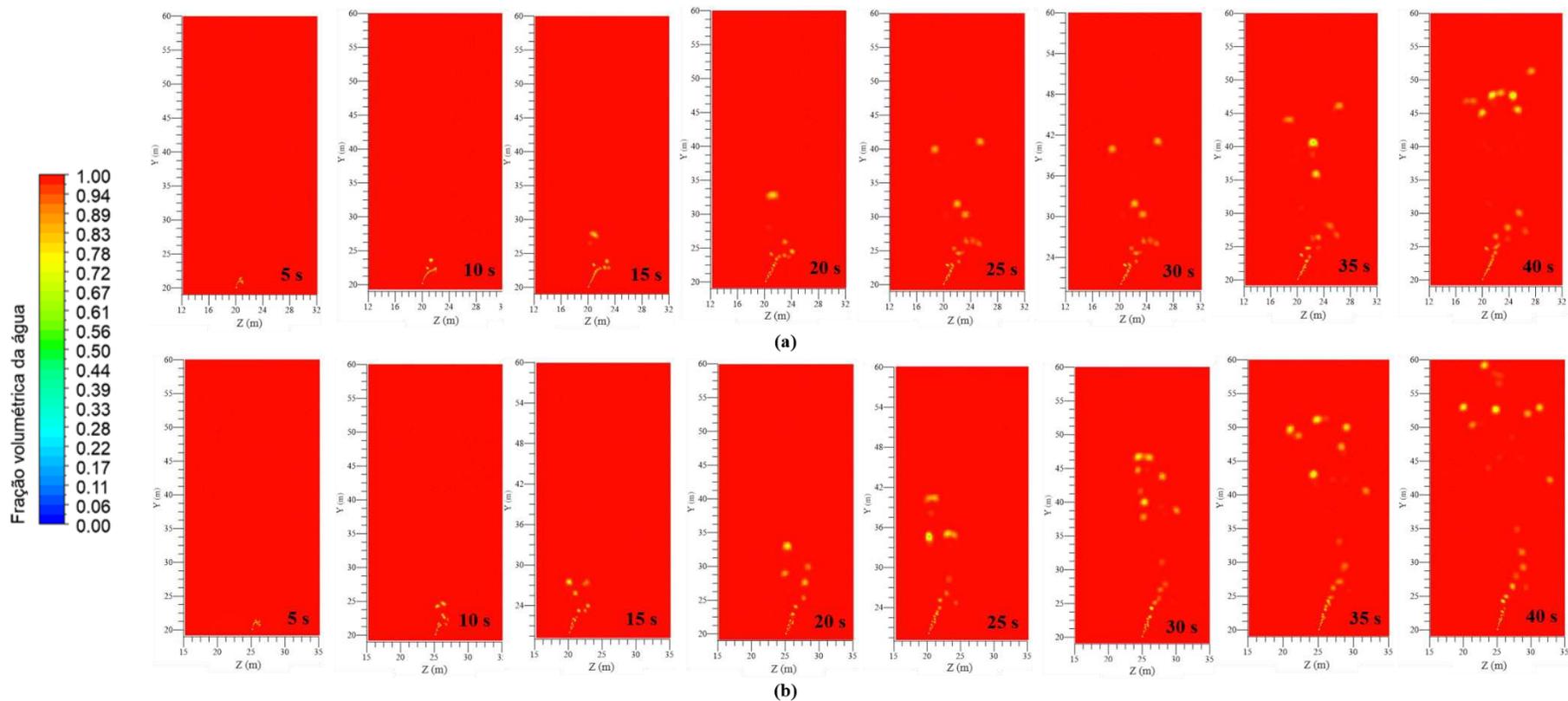
Para a velocidade de vazamento de 5 m/s considerando o *riser* estático (Caso 45), o óleo apresentou uma pequena zona de recirculação mudando a direção do escoamento próximo a região do vazamento com uma dispersão maior próximo a superfície livre devido aos efeitos de flutuabilidade das partículas de óleo. Como pode ser observado também nos dados numéricos de vazamento de óleo em água de Jiang et al. (2016), sendo constatado a formação de vórtices na fração de óleo no mar sob diferentes tempos de simulação (Figura 4.79a). Para o efeito dinâmico (Caso 50) não é observado a formação de zona de recirculação na coluna de água, pois a quebra do jato de óleo ocorre em uma altura bem inferior comparado ao efeito estático, no entanto, a dispersão do fluido ocorre mais no sentido horizontal (Figura 4.79b).

**Figura 4.75:** Efeito da velocidade de vazamento de óleo de 1 m/s em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



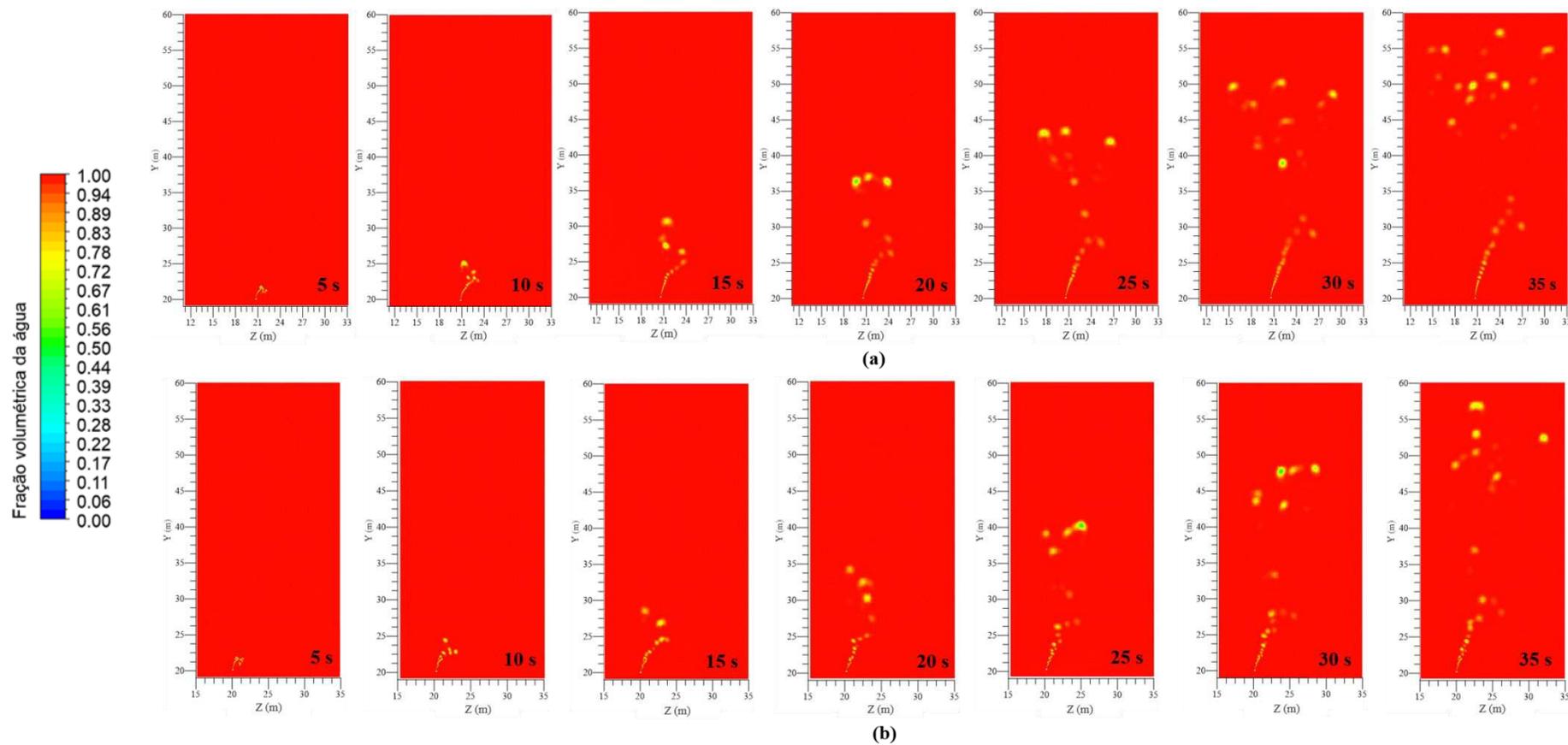
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.76:** Efeito da velocidade de vazamento de óleo de 2 m/s em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



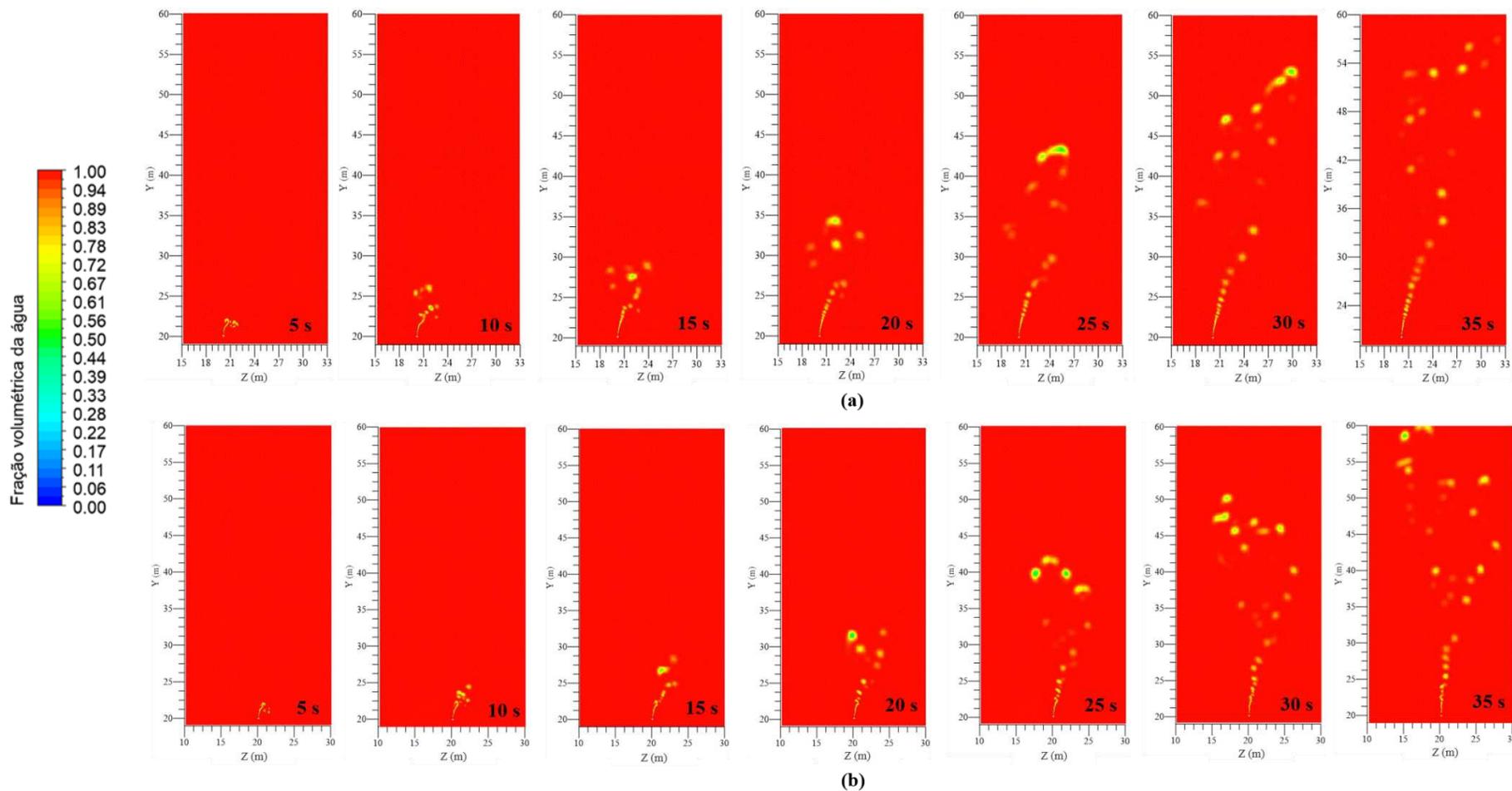
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.77:** Efeito da velocidade de vazamento de óleo de 3 m/s em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático  
(b) *riser* em movimento



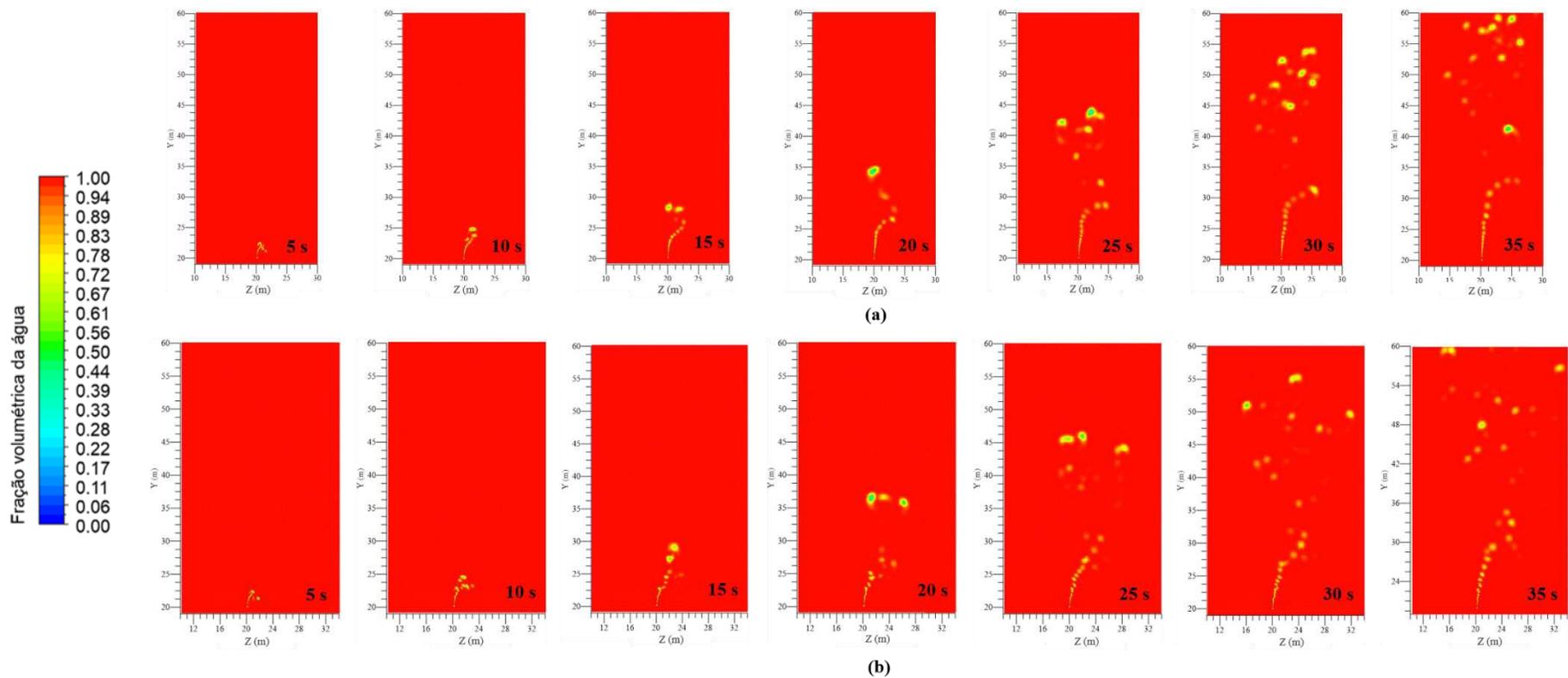
**Fonte:** Próprio do autor (2021).

**Figura 4.78:** Efeito da velocidade de vazamento de óleo de 4 m/s em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) riser estático (b) riser em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.79:** Efeito da velocidade de vazamento de óleo de 5 m/s em uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático  
(b) *riser* em movimento

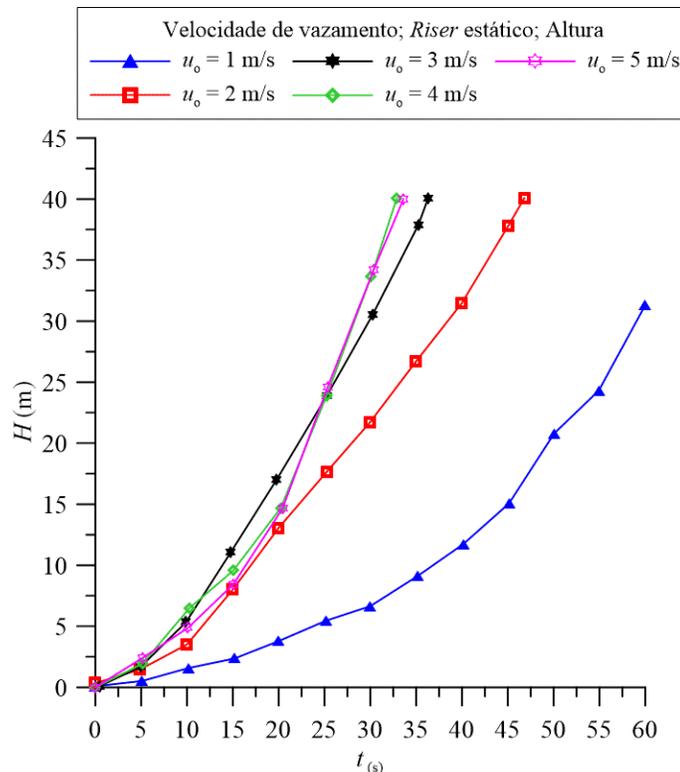


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.8.2 Efeito da velocidade de vazamento de óleo considerando o riser sob efeito estático

Com base em diferentes valores de velocidades de vazamento e considerando a estrutura do riser estática (Caso 41 ao Caso 45) pode ser mencionado que, para baixas velocidades de vazamento maior é o tempo de elevação da pluma de óleo até a superfície livre. Observa-se que, para uma velocidade de vazamento de 1 m/s (Caso 41), a pluma de óleo alcança uma altura de 32 m em todo o tempo de estudo (60 s). Observa-se que, para um valor de 2 m/s (Caso 42), essa diferença é bem significativa em relação à anterior. Para as três últimas velocidades de vazamento (Caso 43, 44, 45), pouca é a discrepância na altura da fração de volume de óleo até a superfície livre, em que ambas as velocidades atingem a altura máxima em praticamente o mesmo tempo. Para os dois maiores valores de velocidade de vazamento 4 m/s e 5 m/s, percebe-se que as curvas estão praticamente sobrepostas não apresentando tanta discrepância no tempo de propagação desde o ponto de vazamento até a superfície livre (Figura 4.80).

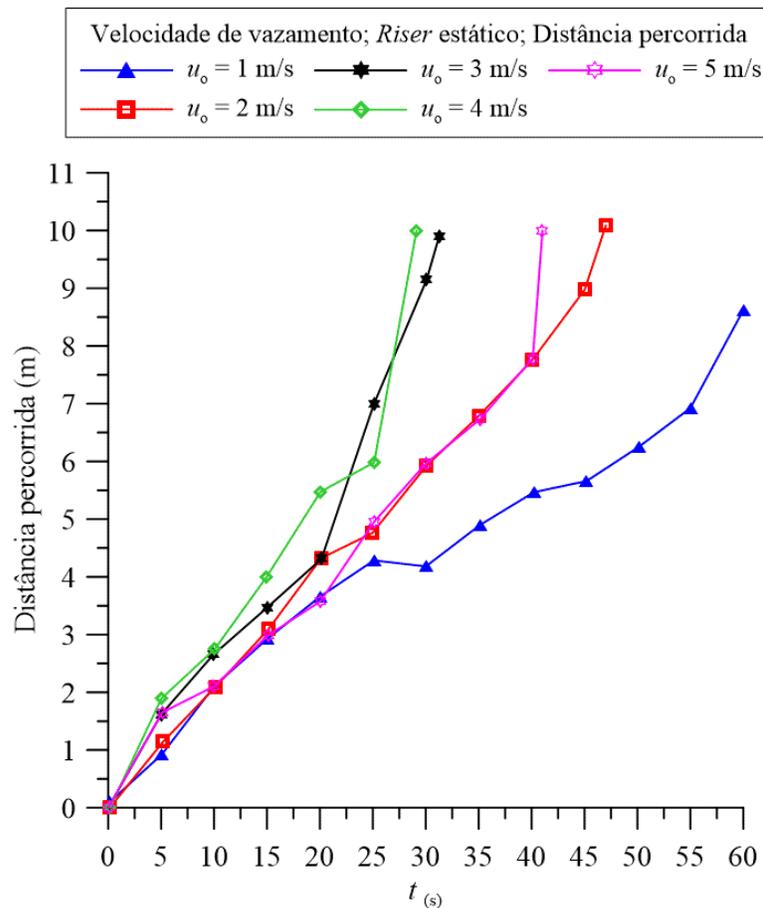
**Figura 4.80:** Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o riser estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Observando qual foi a distância percorrida pela pluma de óleo em diferentes velocidades de vazamento, assim como foi observado na altura, para velocidades de 1 m/s, a pluma de óleo leva mais tempo para se deslocar a jusante do escoamento não atingindo os 10 m de comprimento delimitado em todo o tempo de simulação (Caso 41). Conseqüentemente, valores de velocidade de vazamento igual a 3 m/s e 4 m/s, apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, quanto maior a velocidade de vazamento menor o tempo de deslocamento da fração de volume de óleo até a superfície livre. Para uma velocidade de vazamento de 5 m/s (Caso 45) um tempo de 40 s é necessário, podendo ser explicado devido o óleo está com alta velocidade de escoamento e o seu deslocamento ocorrer mais no sentido vertical, logo, levando mais tempo pra se deslocar a jusante e alcançar uma distância máxima, a velocidade de correnteza de 0,1 m/s ( $Fr_0 = 0,0041$ ), Figura 4.81.

**Figura 4.81:** Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o *riser* estático - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s

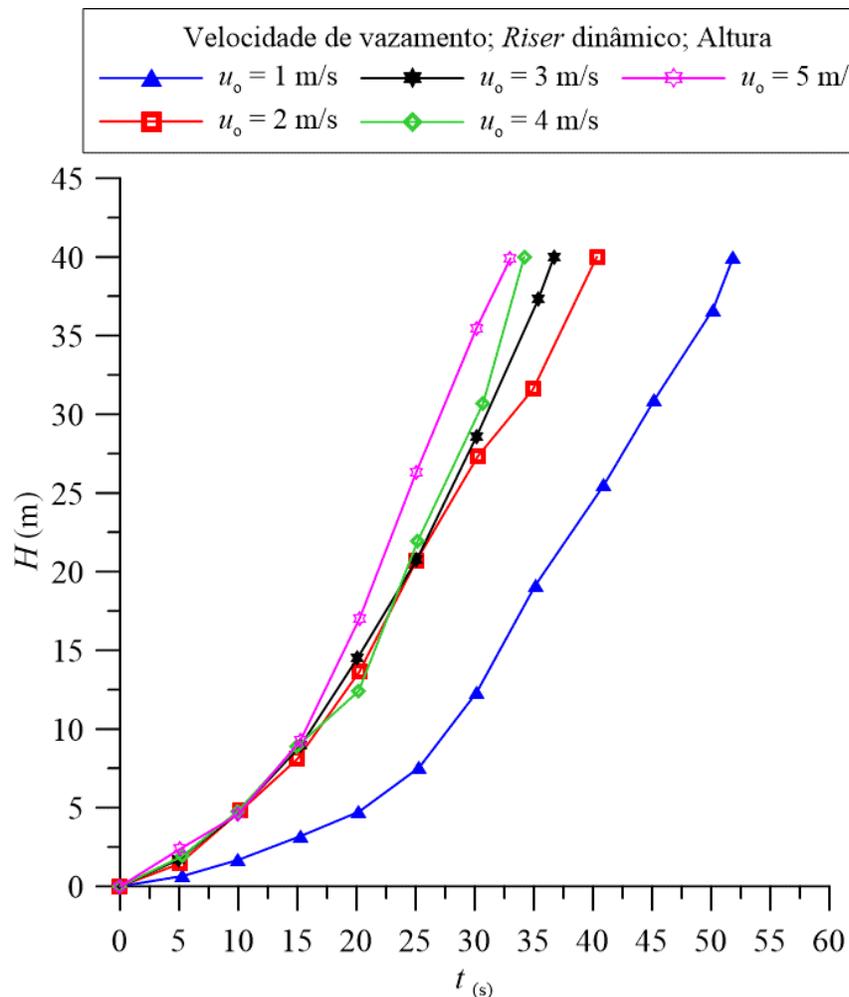


Fonte: Próprio do autor (2021).

### 4.8.3 Efeito da velocidade de vazamento de óleo considerando o riser em movimentação

Considerando todas as velocidades de vazamento sob efeito dinâmico da estrutura do *riser* (Caso 46 ao Caso 50), pode ser observado que, para maiores velocidades de vazamento, menor o tempo que a pluma de óleo leva para se deslocar no sentido à jusante do escoamento. As demais velocidades de vazamento se mantêm na distância percorrida, apresentando uma pequena variação de deslocamento à velocidade de 2 m/s (Caso 47). O efeito dinâmico não interferiu significativamente no deslocamento da fração de óleo para altas velocidades de vazamento (Figura 4.82).

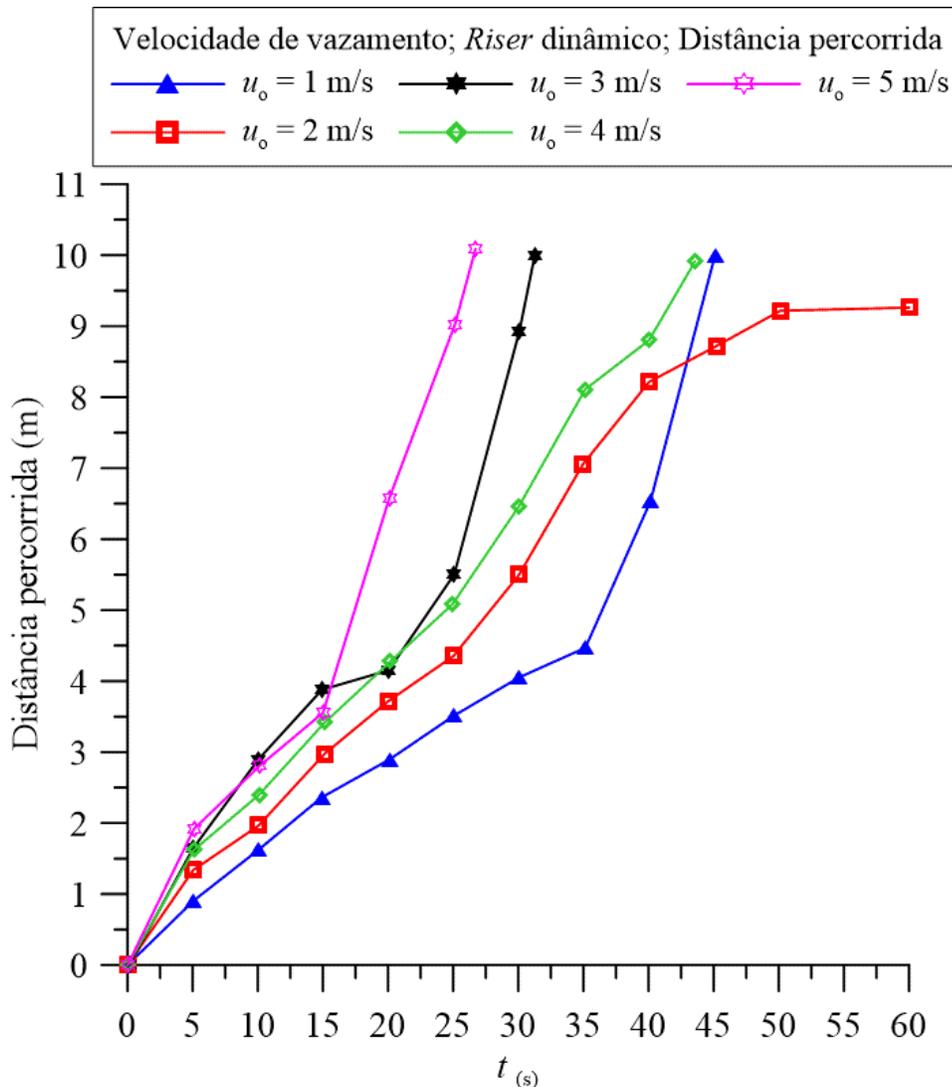
**Figura 4.82:** Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o *riser* dinâmico - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

A distância percorrida pela pluma de óleo sob efeito dinâmico pode ser observada na Figura 4.83. Observa-se que, para velocidade de vazamento de 1 m/s (Caso 46), a pluma de óleo atinge os 10 m de distância em um tempo de 45 s. Porém, para uma velocidade de 2 m/s (Caso 47), o óleo chega a uma distância máxima de 9 m em 46 s, e se mantém constante em todo o tempo de simulação. Os demais valores de velocidade com que o óleo adentra na correnteza variam significativamente sendo a velocidade de 4 m/s (Caso 49) a que apresenta uma pequena variação na curva em relação ao tempo de percurso (Figura 4.83).

**Figura 4.83:** Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o *riser* dinâmico - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s

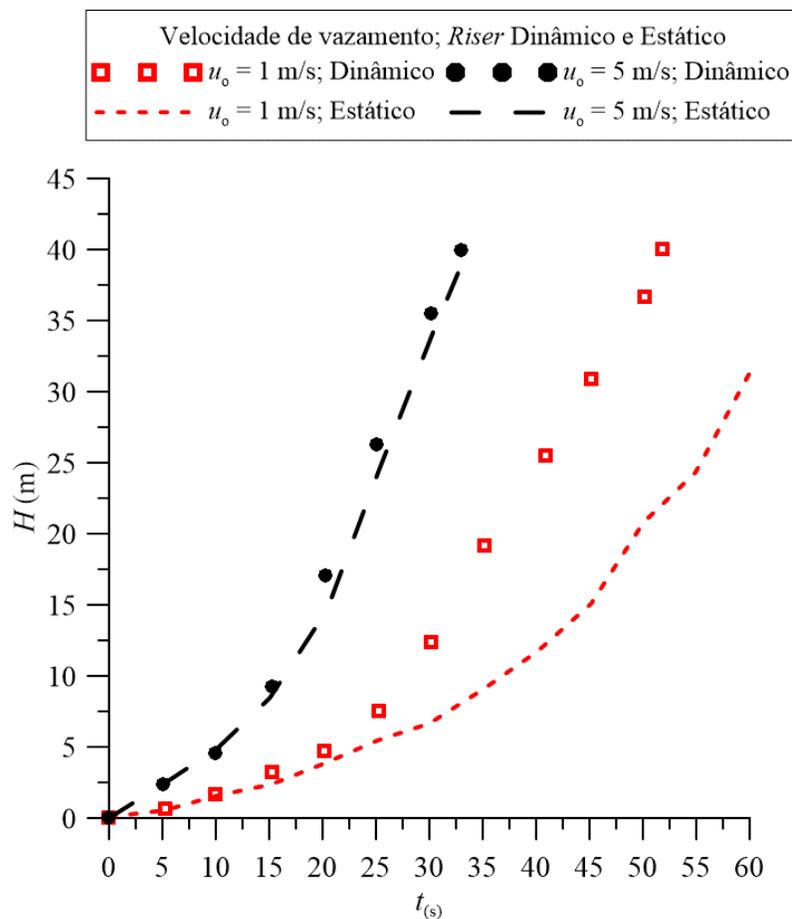


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.8.4 Efeito do riser estático e dinâmico sob a pluma de óleo para diferentes velocidades de vazamento

Com objetivo de comparar o efeito dinâmico e estático, tomou-se dois valores de velocidade do óleo para analisar o tempo de deriva da pluma de óleo até a superfície livre. Observa-se a discrepância entre o efeito dinâmico e estático (Casos 41, 45, 46 e 50) para as velocidades de vazamento de 1 m/s e 5 m/s, sendo de suma importância avaliar o efeito dinâmico para este tipo de situação, pois ele se aproxima cada vez mais da realidade. Porém, para valores de altas velocidades do óleo, o efeito dinâmico não mostrou tanta discrepância, pois as curvas se mostram sobrepostas como já fora mencionado. Para baixas velocidades de vazão de óleo, maior o tempo de percurso da pluma de óleo até chegar à superfície livre (Figura 4.84).

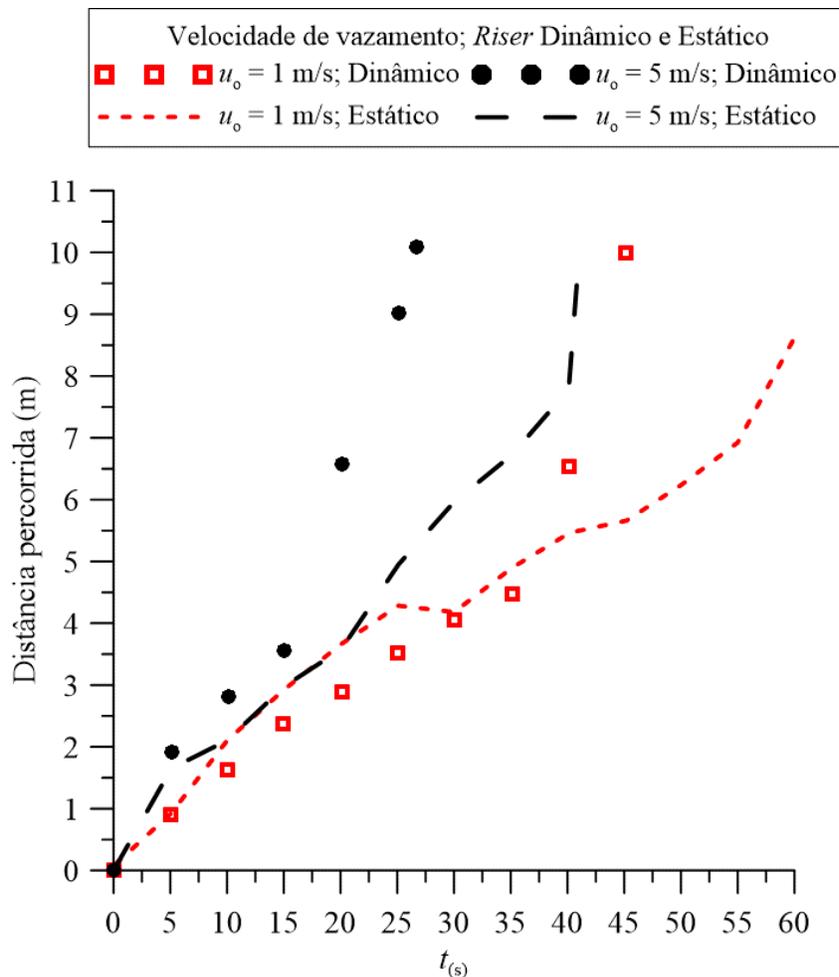
**Figura 4.84:** Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o *riser* dinâmico e estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Analisando agora as curvas para velocidades de vazamento sob *risers* na condição dinâmica e estática com base na distância percorrida pela pluma de óleo para os mesmos casos da situação anterior, pode ser mencionado que, em relação ao deslocamento horizontal da pluma de óleo, tanto o efeito estático quanto o efeito dinâmico apresentam uma grande diferença de percurso da pluma para cada velocidade de vazamento analisada. Para o efeito dinâmico, as duas velocidades comparadas alcançam a distância delimitada de 10 m, porém, para maiores velocidades de vazamento de óleo são gastos cerca de 27 s para alcançar os 10 m de distância e para menores velocidades de vazamento cerca de 45 s são gastos, devido as forças de empuxo e ação de corrente que é de 0,1 m/s de velocidade ( $Fr_0 = 0,0041$ ). Enquanto para o *riser* estático, maior é o tempo de deslocamento do volume de óleo no mar, Figura 4.85.

**Figura 4.85:** Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o *riser* dinâmico e estático - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s

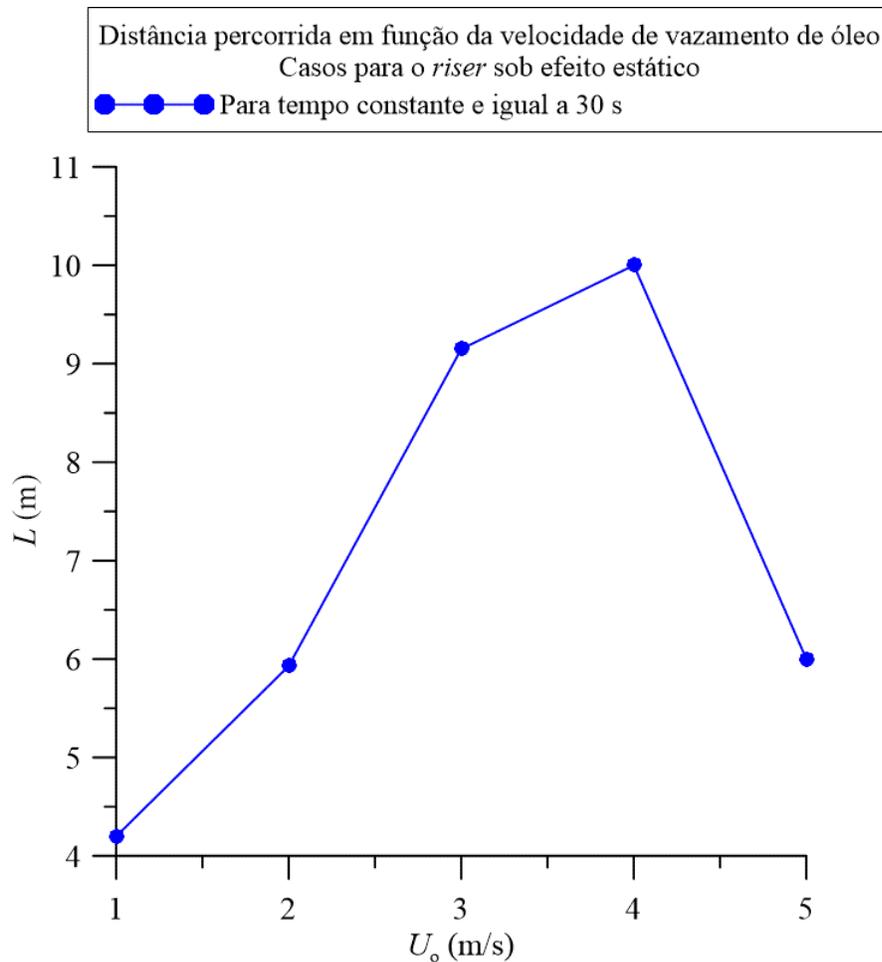


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.8.5 Efeito da distância percorrida em função da velocidade de vazamento do óleo

Pode ser observado na Figura 4.86, a distância percorrida da pluma de óleo em função da velocidade de vazamento para o *riser* sob efeitos estáticos (Casos 41 ao Caso 45). Observa-se nas velocidades de vazamento de óleo de 1, 2, 3, 4 m/s (Casos 41, 42, 43, 44) que ocorre, continuamente, uma elevação na distância percorrida pela pluma de óleo na correnteza de acordo com a velocidade de vazamento para o *riser* parado. Porém, para uma velocidade de 5 m/s (Caso 45) a curva apresenta um decréscimo na distância percorrida, onde, para esta velocidade a pluma de óleo não ultrapassa os 6 m de comprimento em todo percurso para um tempo de 30 s, Figura 4.86.

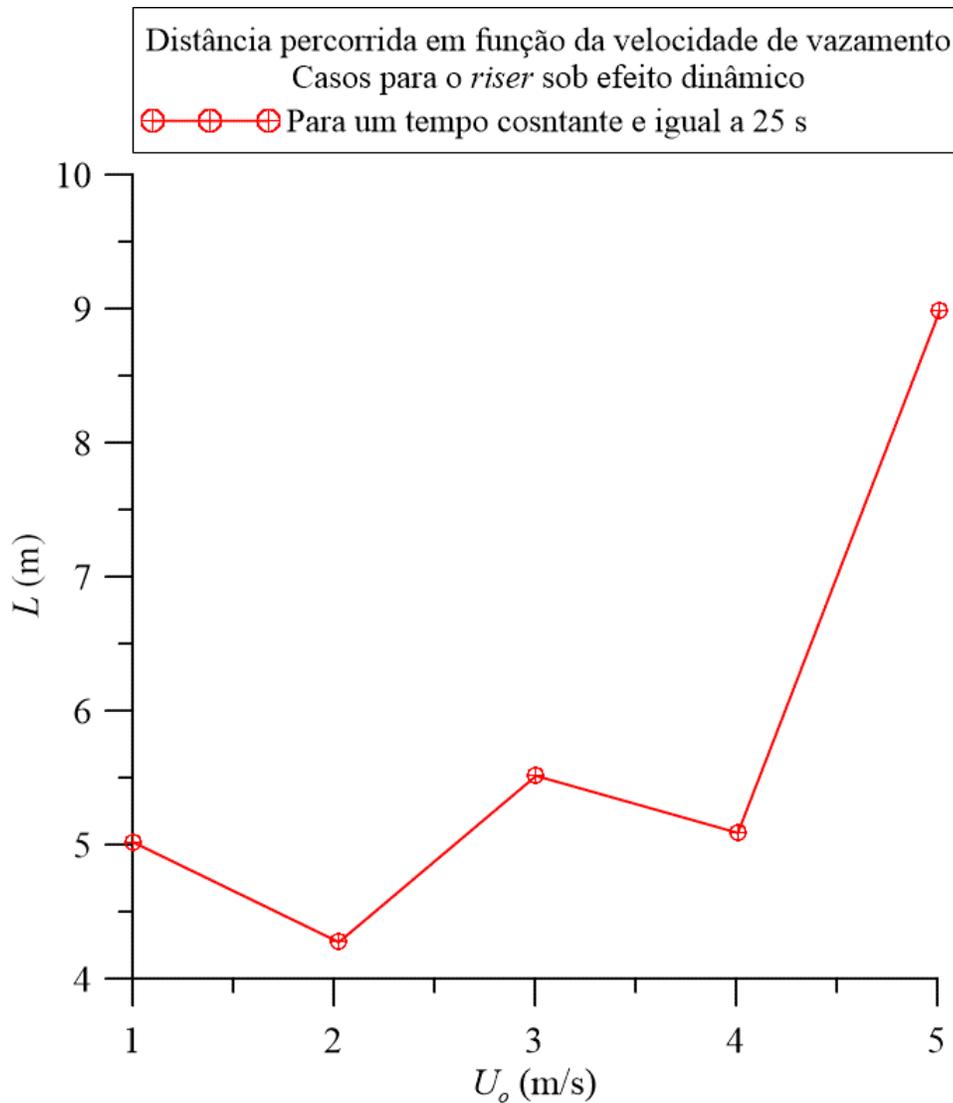
**Figura 4.86:** Efeito da distância percorrida em função da velocidade de vazamento casos estáticos; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Graficamente, pode ser observado a distância percorrida pela pluma de óleo em função da velocidade de vazamento para todos os casos dinâmicos (Caso 46 ao Caso 50) em um tempo constante de 25 s. Observa-se que a velocidade de vazamento de 2 m/s (Caso 47) mostrou que, em 25 s de simulação, foi a que alcançou uma menor distância percorrida de 4,5 m e, para o efeito estático, esse mesmo valor alcançou uma distância de 6 m de comprimento em 30 s. Vê-se que quanto maior for a velocidade do vazamento, maior é a distância percorrida para o efeito dinâmico, chegando a uma distância máxima de 9 m de percurso em 25 s (Figura 4.87).

**Figura 4.87:** Efeito da distância percorrida em função da velocidade de vazamento - casos dinâmicos; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

## **4.9 Comportamento da pluma de óleo na fração volumétrica da água, sob diferentes diâmetros de vazamento de óleo, para o *riser* dinâmico e estático**

### ***4.9.1 Campo de fração volumétrica da água durante vazamento de óleo sob diferentes diâmetros de vazamento de óleo a partir de riser estático e dinâmico***

Analisando a fração de volume de óleo nos campos de fração volumétrica da água para diferentes diâmetros de vazamentos, considerando o *riser* sob efeito estático e dinâmico, é notado que, para diâmetros de saída de óleo de 4 mm (Caso 51), maior é o tempo de elevação subaquática do óleo até a superfície livre (Caso 51 e Caso 56). Observa-se que, com o tempo, o jato de óleo próximo a região do vazamento apresenta um certo ângulo de inclinação no sentido à jusante do escoamento, possivelmente devido aos efeitos de corrente, da diferença de pressão do vazamento e a correnteza marítima (Figura 4.88a). Para o mesmo caso, porém com o *riser* em movimento (Caso 56), observa-se nas regiões próximas ao vazamento certa estratificação da pluma de óleo, sendo gasto 35 s para ela alcançar a superfície livre (Figura 4.88b).

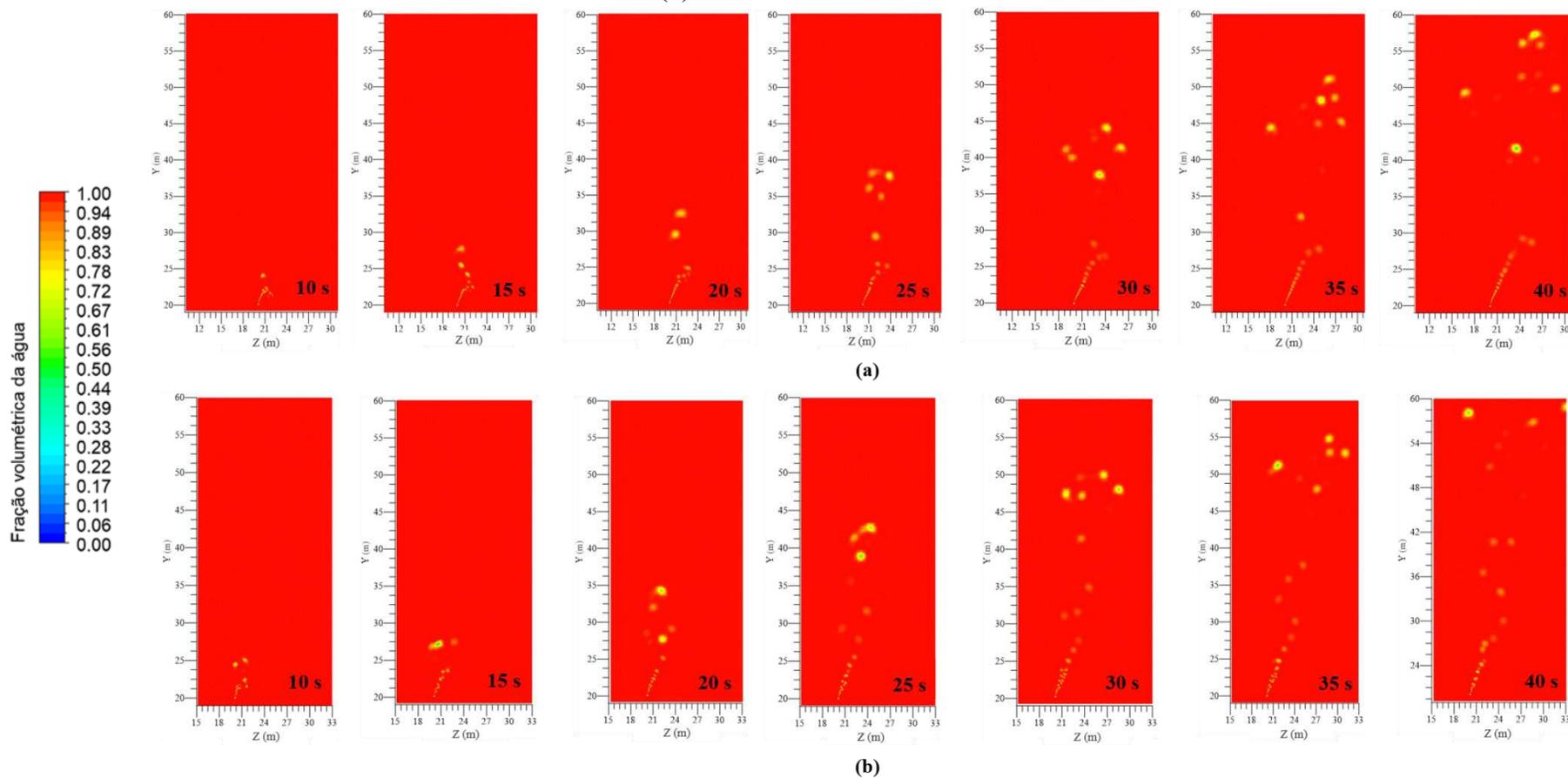
Aumentando o diâmetro do vazamento para 8 mm, observa-se para um caso estático (Caso 52) que, naturalmente, a quantidade de óleo lançada no mar também é maior com uma dispersão mais volumosa próximo a superfície do mar (Figura 4.89a). Para o mesmo caso, no entanto, com efeito dinâmico do *riser* (Caso 57), a pluma de óleo apresenta maior dispersão próximo a região do vazamento, devido aos efeitos hidrodinâmicos da estrutura do *riser* com a coluna de água (Figura 4.89b).

Para um diâmetro de 12 mm (Caso 53) observa-se comportamento semelhante na dispersão subaquática de óleo na coluna de água. Consequentemente uma maior quantidade de óleo na correnteza (Figura 4.90a). Para o mesmo caso, considerando a movimentação do *riser* (Caso 58), percebe-se que a quantidade de óleo lançada na coluna de água é inferior ao caso estático com mesmo diâmetro de vazamento (Figura 4.90b).

Para o vazamento de diâmetro de 16 mm (Caso 54), observa-se que para o efeito estático do *riser*, o comportamento da pluma de óleo faz com que ela se desloque mais no sentido vertical, alcançando cerca de 30 s de trajetória até a superfície livre, (Figura 4.91a). Para o efeito dinâmico (Caso 59), observa-se que uma fração de volume de óleo maior é constatada na

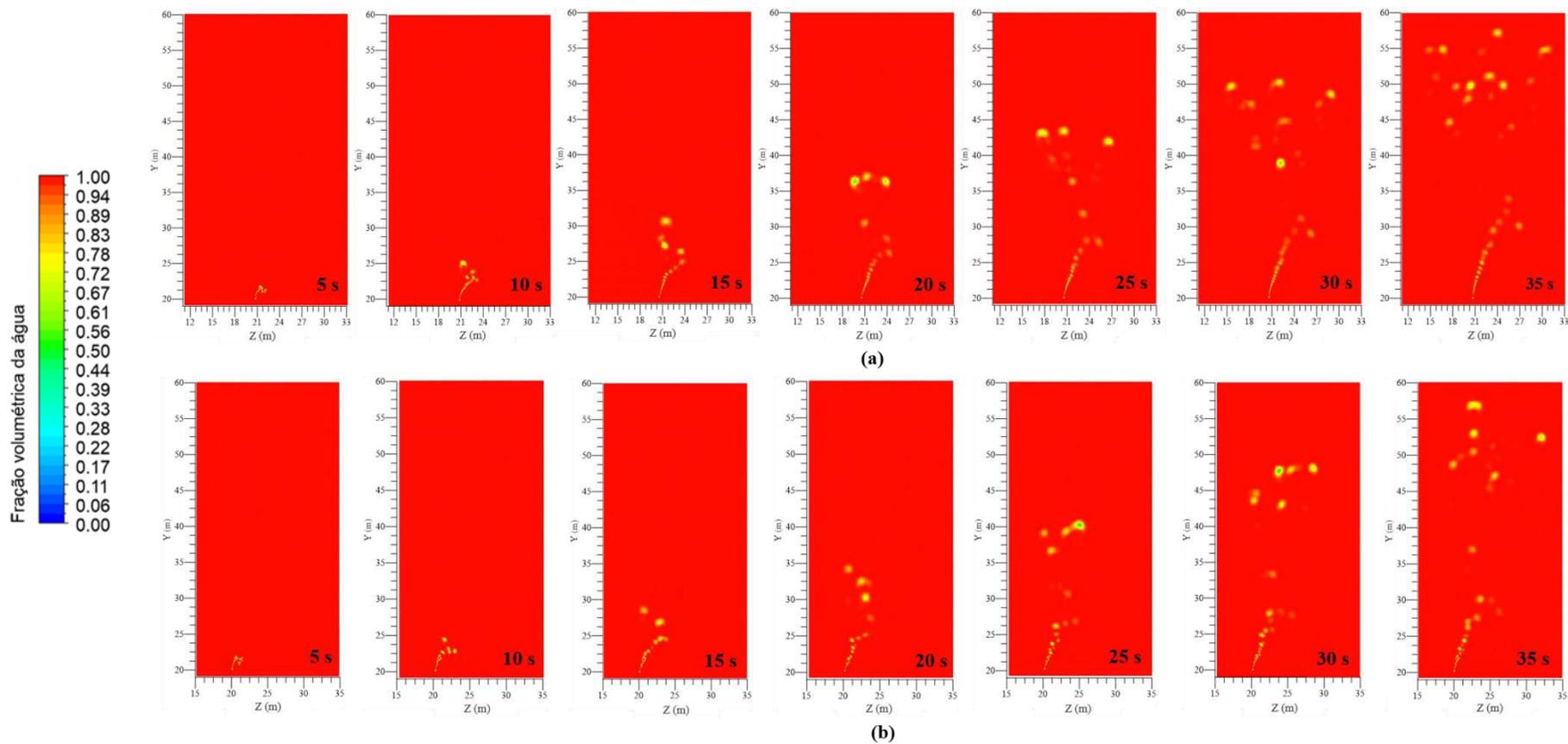
correnteza, sendo gasto o mesmo tempo de trajetória da pluma de óleo até a superfície livre (Figura 4.91b). Mesmo comportamento pode ser observado para um diâmetro de 20 mm (Caso 55 e Caso 60), apresentando uma maior magnitude de volume de óleo na água e conseqüentemente uma maior dispersão na correnteza com movimentos oscilatórios (Figura 4.92a, b). Ambas as situações de diâmetro de vazamento ocorrem a velocidade de correnteza de 0,1 m/s com número de Froude igual a 0,0041.

**Figura 4.88:** Efeito do diâmetro de vazamento de óleo de 4 mm para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático  
(b) *riser* em movimento



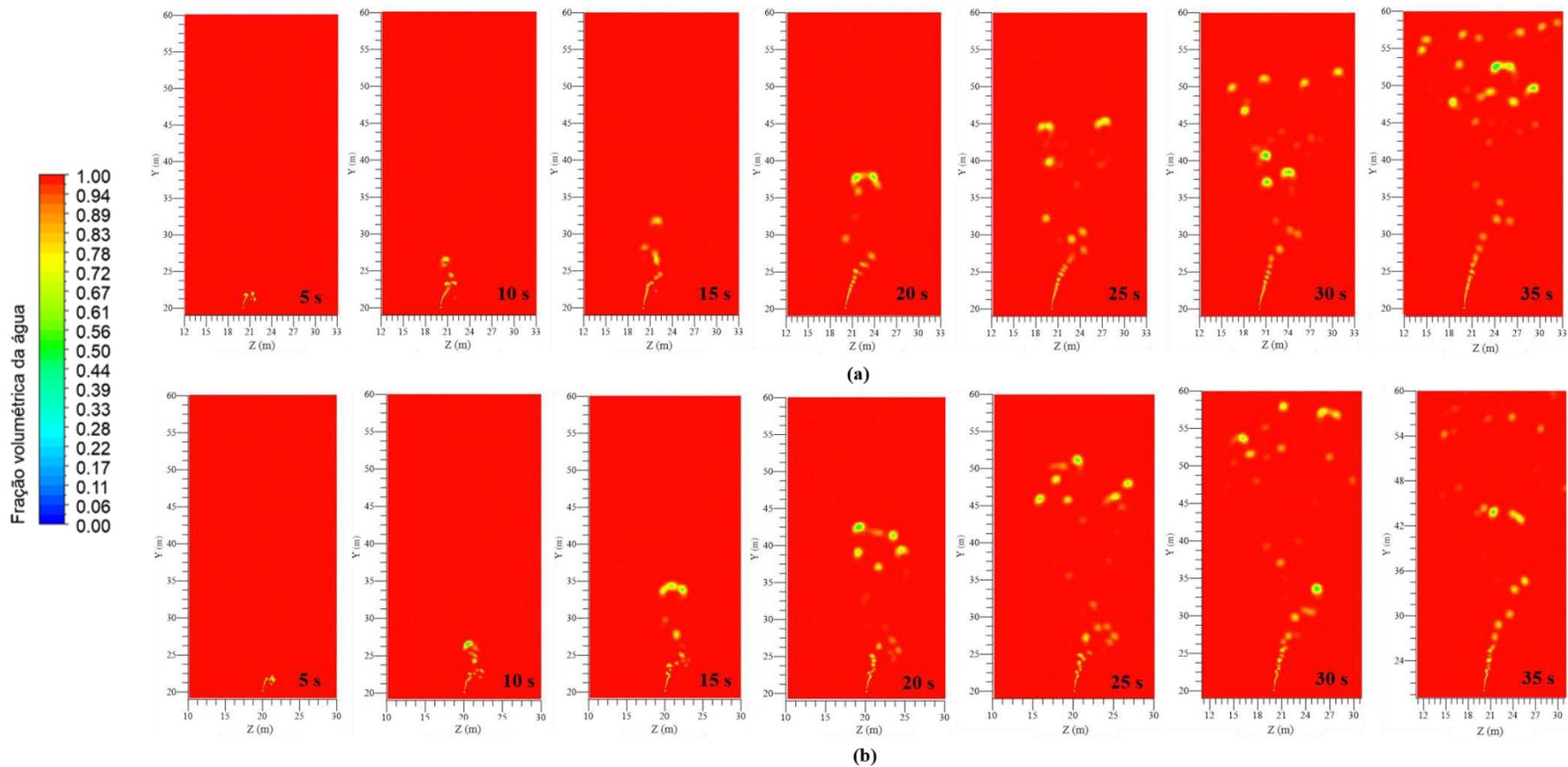
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.89:** Efeito do diâmetro de vazamento de óleo de 8 mm para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



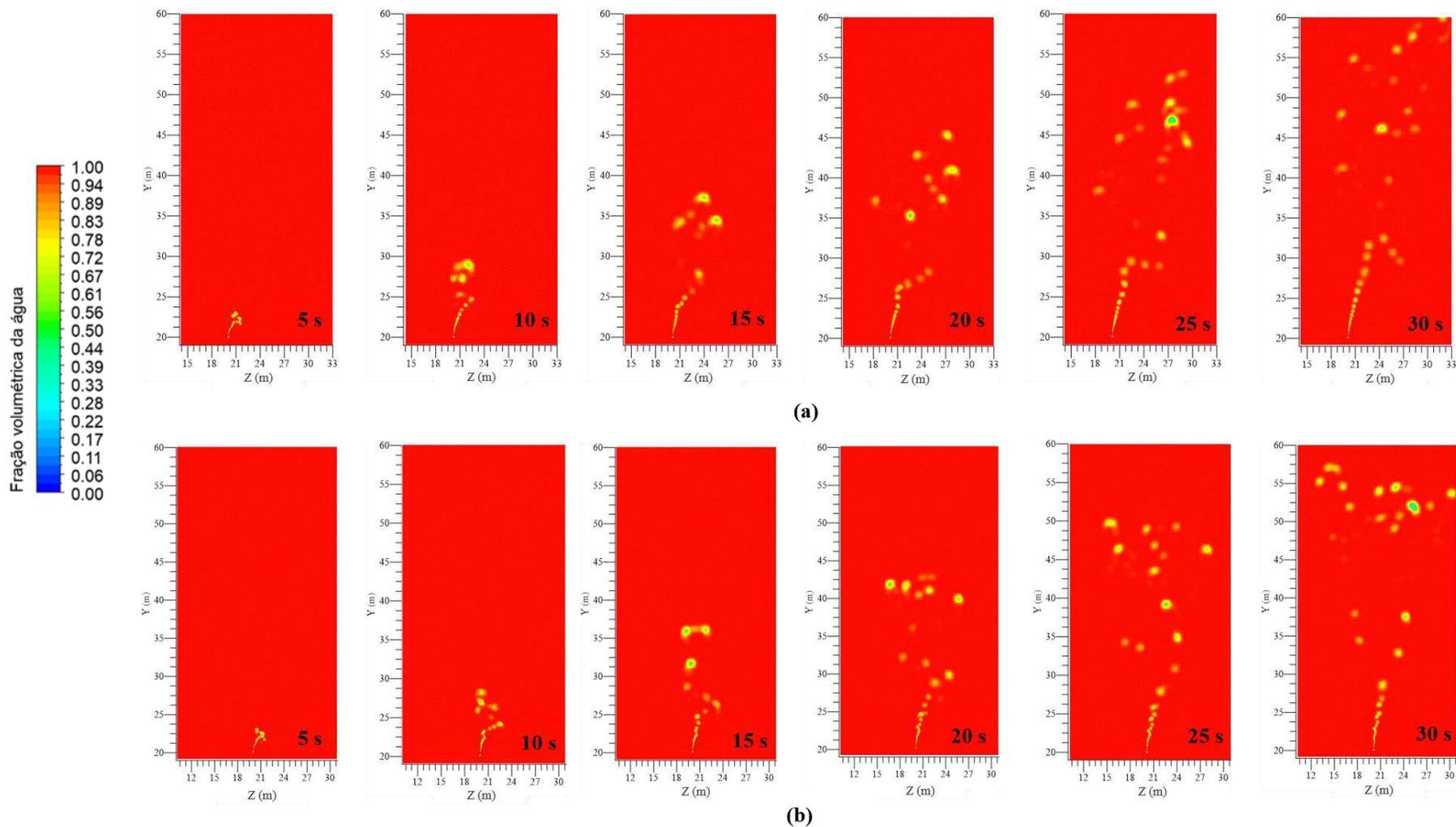
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.90:** Efeito do diâmetro de vazamento de óleo de 12 mm para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



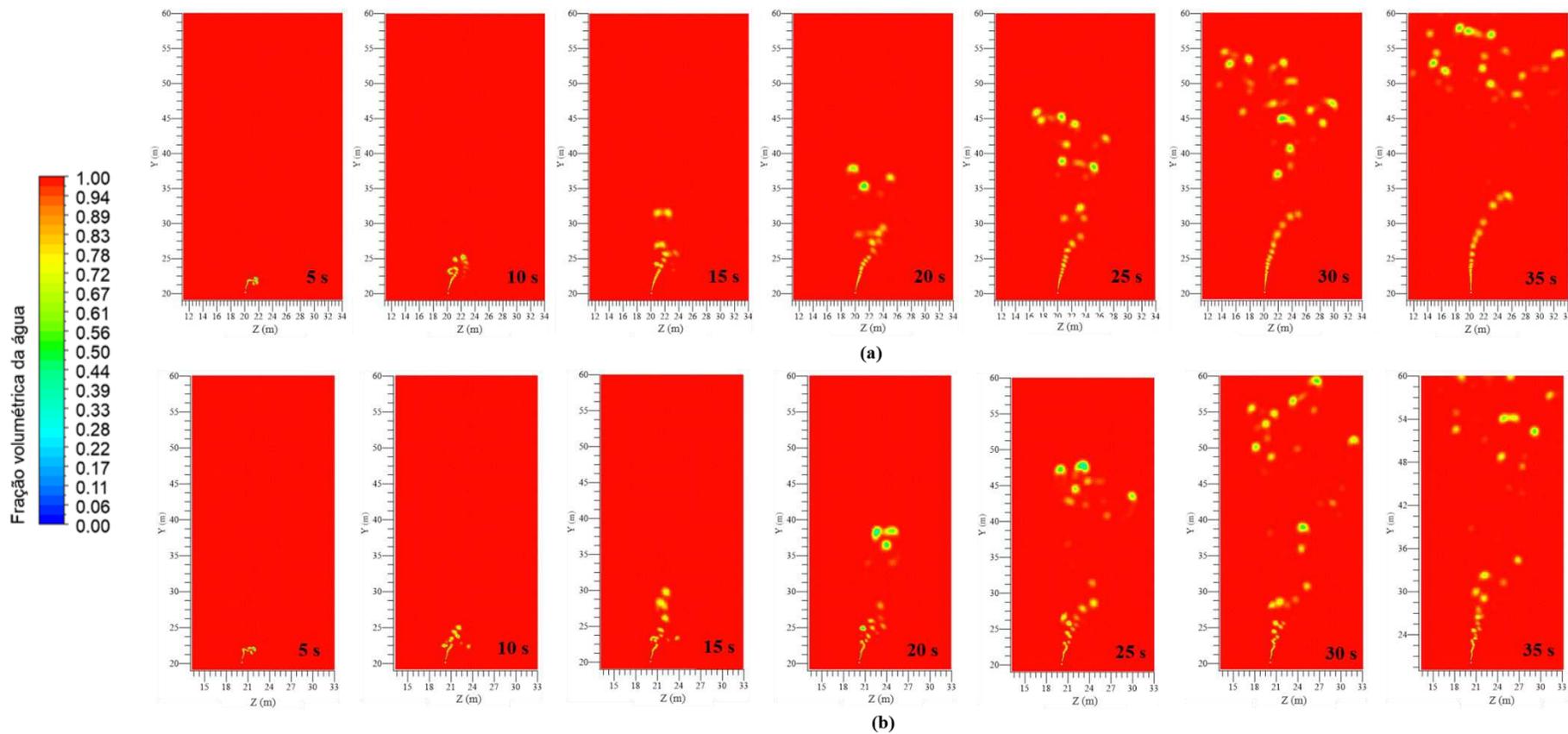
Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.91:** Efeito do diâmetro de vazamento de óleo de 16 mm para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

**Figura 4.92:** Efeito do diâmetro de vazamento de óleo de 20 mm para uma velocidade de correnteza de 0,1 m/s,  $Fr_0 = 0,0041$ ; (a) *riser* estático (b) *riser* em movimento



Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.9.2 Efeito da movimentação do *riser* na altura da quebra do jato de óleo em função do diâmetro do furo

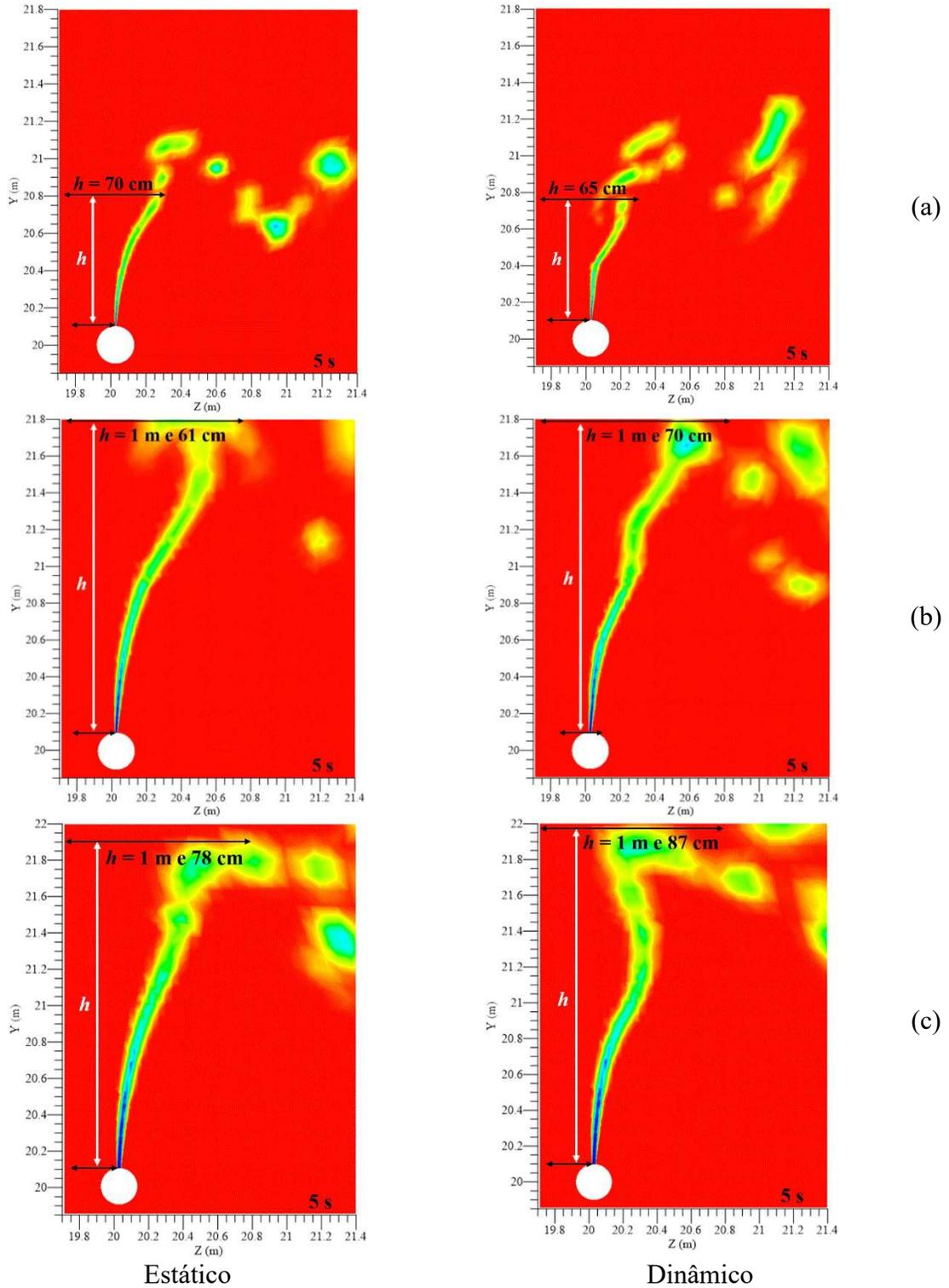
Analisando a influência da movimentação do *riser* na altura da quebra do jato de óleo em função do diâmetro do vazamento, pode ser constatado que para o *riser* sob efeito estático, um diâmetro do furo de 4 mm (Caso 51) mostra que o jato de óleo é quebrado a uma de 70 cm do ponto de vazamento em direção a superfície livre, em um tempo de 5 s, mostrando um comportamento da dispersão mais no sentido a jusante do escoamento. Considerando o *riser* em movimentação (Caso 56) percebe-se que em um mesmo período de tempo, a quebra do jato de óleo ocorre em uma altura inferior ao *riser* estático e para o *riser* em movimento, uma altura de 65 cm (Figura 4.93a).

Aumentando o diâmetro do furo para 12 mm, considerando o *riser* sob efeito estático (Caso 53), pode ser observado um comportamento meio que inclinado do jato de óleo em direção à superfície livre com uma altura de quebra de jato de óleo de 1 m e 61 cm em um tempo de 5 s. Porém, para o mesmo caso, considerando o *riser* em movimento (Caso 58), observa-se que a movimentação influenciou para uma altura maior da quebra do jato de óleo em relação ao efeito estático. Pode ser observado também que uma maior dispersão do óleo vazado no sentido a jusante do escoamento para o *riser* em movimentação (Figura 4.93b).

Observando o diâmetro de furo de 20 mm, como já era de se esperar, uma maior fração de volume de óleo na coluna de água em relação aos demais diâmetros analisados. Para o *riser* parado (Caso 55) o jato de óleo apresenta um comportamento inclinado com uma altura de quebra de 1 m e 87 cm. Analisando o mesmo caso para efeito dinâmico do *riser* (Caso 60), observa-se que o jato de óleo apresenta um comportamento desviado devido a movimentação do *riser*, com uma altura de quebra de jato de óleo de 1 m e 87 cm (Figura 4.93c).

**Figura 4.93:** Efeito da movimentação do *riser* na altura da quebra do jato de óleo para uma velocidade de vazamento de 3 m/s e velocidade de correnteza de 0,1 m/s:

(a) 4 mm (b) 12 mm (c) 20 mm

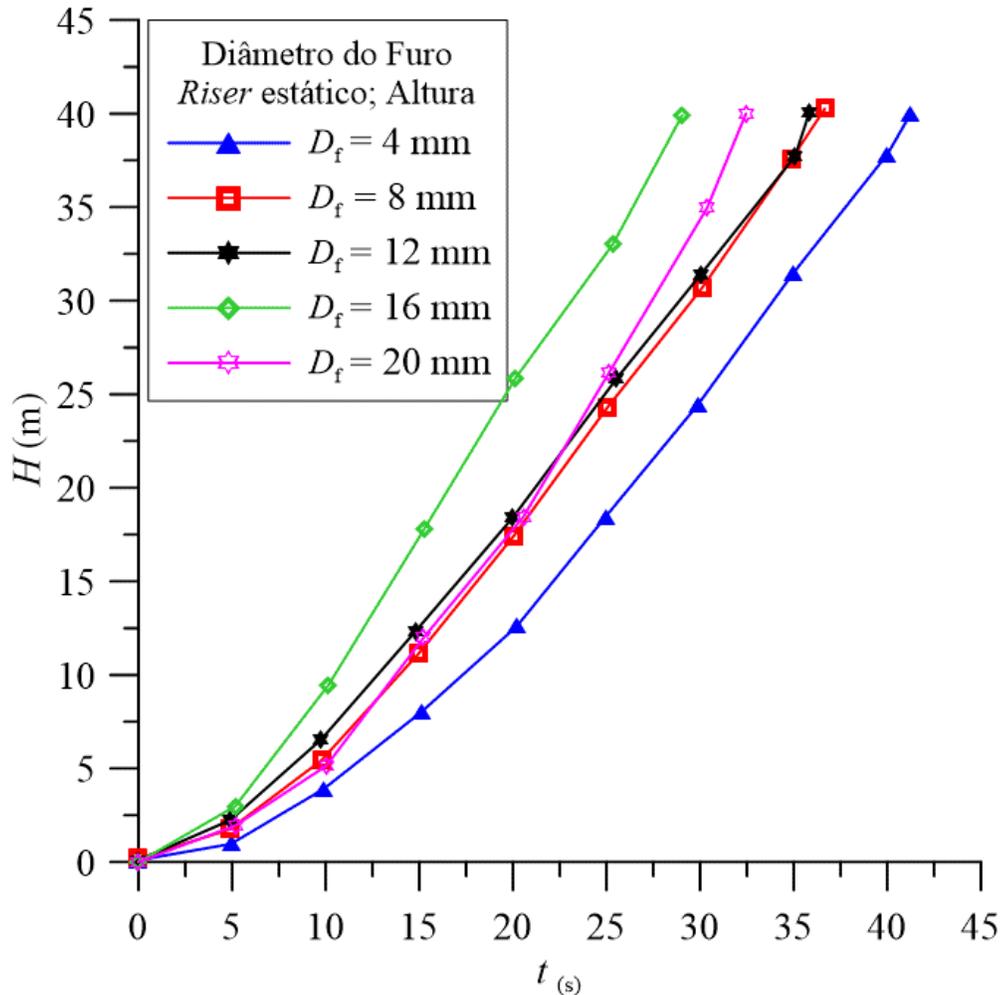


Fonte: Próprio do autor (2021).

### 4.9.3 Efeito do diâmetro do vazamento considerando o riser sob efeito estático

Para os casos em que o *riser* se encontra parado (Caso 51 ao Caso 55), pode ser observado na Figura 4.94 que, para um vazamento de 4 mm (Caso 51) de diâmetro, a pluma de óleo leva cerca de 42 s, aproximadamente, para alcançar a altura máxima de 40 m. Observa-se também que, para os diâmetros de 8 mm e 12 mm (Caso 52 e 53), as curvas ficaram bem sobrepostas, ou seja, praticamente apresentaram o mesmo comportamento (Figura 4.94). Os diâmetros maiores de fuga de óleo apresentam menor tempo de deriva até a superfície livre (Caso 54 e Caso 55).

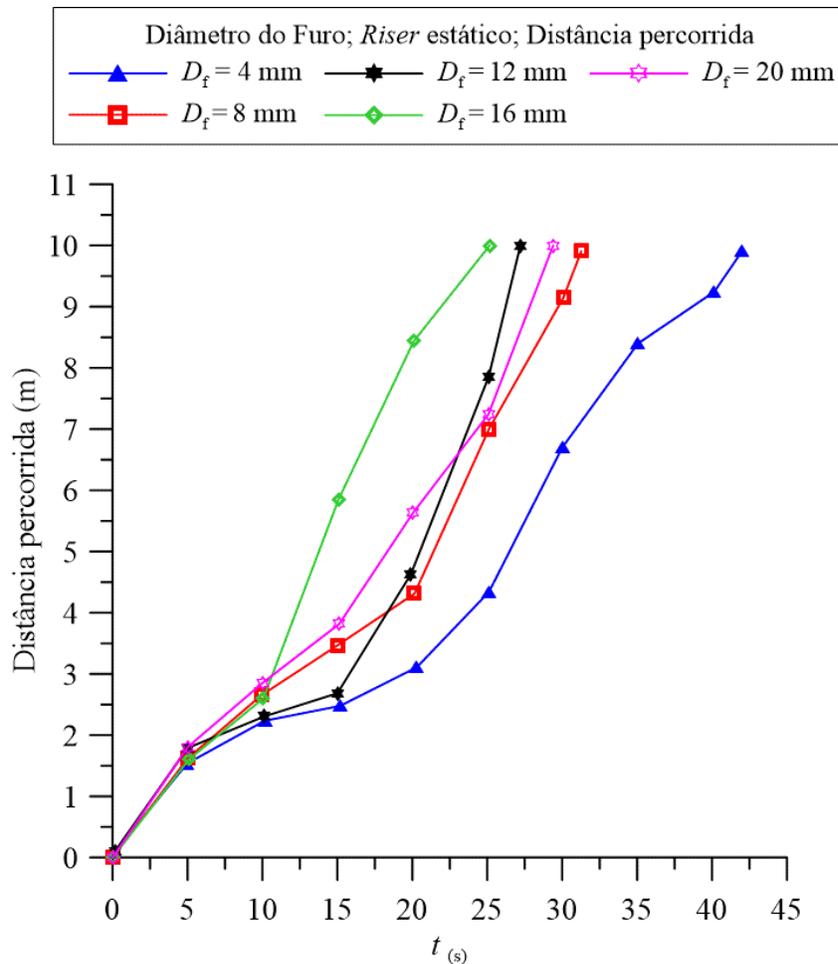
**Figura 4.94:** Efeito do diâmetro do vazamento para o *riser* estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Considerando o efeito da movimentação do *riser* para os mesmos casos anteriores e analisando a distância percorrida da pluma de óleo, pode ser observado graficamente que, para um diâmetro de 4 mm, a pluma de óleo levou mais tempo para se deslocar por uma distância de 10 m devido à fração de volume de óleo lançada no mar ser em pequena quantidade. Consequentemente, os demais valores apresentam um comportamento semelhante, exceto a curva de 16 mm (Caso 54) que apresenta uma variação no deslocamento levando cerca de 23 s para alcançar a distância máxima de 10 m de comprimento, para velocidades de propagação de correnteza de 0,1 m/s ( $Fr_0 = 0,0041$ ). De acordo com o número de Weber, as forças dominantes no escoamento são as forças de inércia e forças gravitacionais para o número de Froude (Figura 4.95).

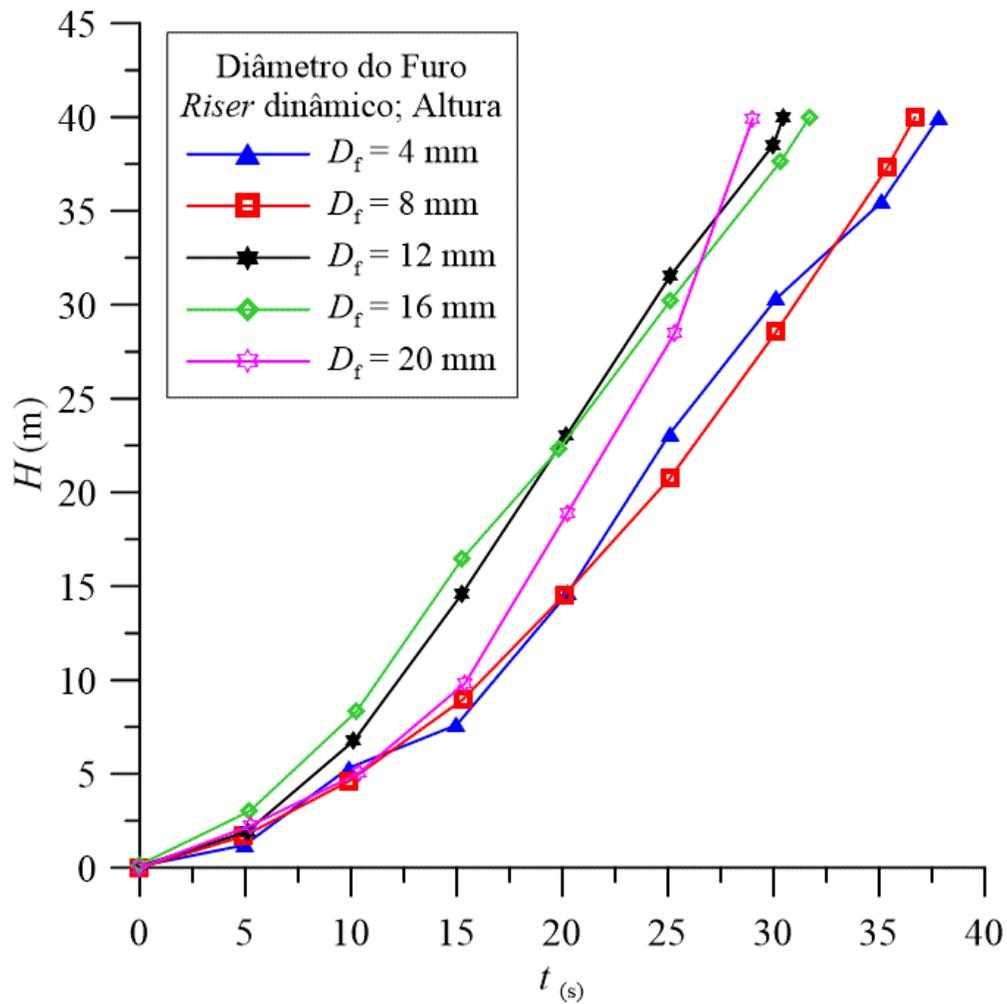
**Figura 4.95:** Efeito do diâmetro do vazamento para o *riser* estático - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Analisando agora o efeito da movimentação do *riser* sob diferentes diâmetros de vazamento (Caso 56 ao Caso 60) pode ser mencionado que, nos casos de diâmetro maiores de furo, não houve tanta influência na altura da pluma de óleo onde as curvas são apresentadas sobrepostas, em um tempo praticamente igual de percurso da fração de volume de óleo até a superfície livre (Figura 4.96). Para os demais diâmetros de 12, 16, 20 mm (Caso 58 ao Caso 60), pouca discrepância é observada no processo de deriva do óleo até a superfície. Para um diâmetro de vazamento de 20 mm (Caso 60), a pluma de óleo se deslocou com uma pequena variação em um menor tempo, com 0,1 m/s de velocidade de correnteza ( $Fr_0 = 0,0041$ ), Figura 4.96.

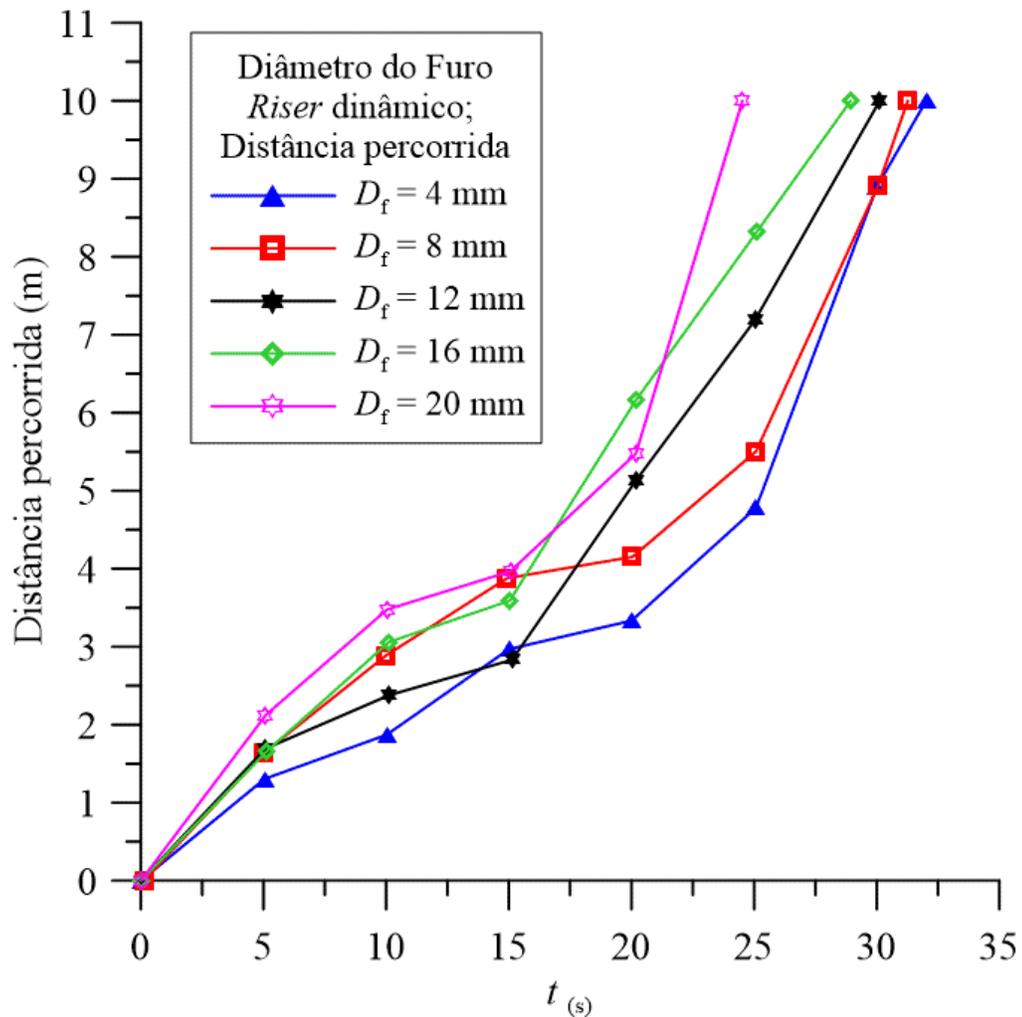
**Figura 4.96:** Efeito do diâmetro do vazamento para o *riser* dinâmico - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Para uma distância percorrida da pluma de óleo é observada uma certa proporcionalidade nos tempos de deriva até a superfície livre em função do diâmetro do furo. Quanto menor o diâmetro do vazamento de óleo, maior é o tempo de disseminação horizontalmente da pluma de óleo. O tempo máximo de distância percorrida foi de 32 s e o mínimo de 23 s. Para valores de diâmetros de furo de 4 mm e 8 mm, ambas alcançam a distância máxima (10 m) de comprimento com o mesmo tempo de propagação e mesma velocidade de correnteza, 0,1 m/s ( $Fr_0 = 0,0041$ ) (Figura 4.97).

**Figura 4.97:** Efeito do diâmetro do vazamento para o *riser* dinâmico - distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s

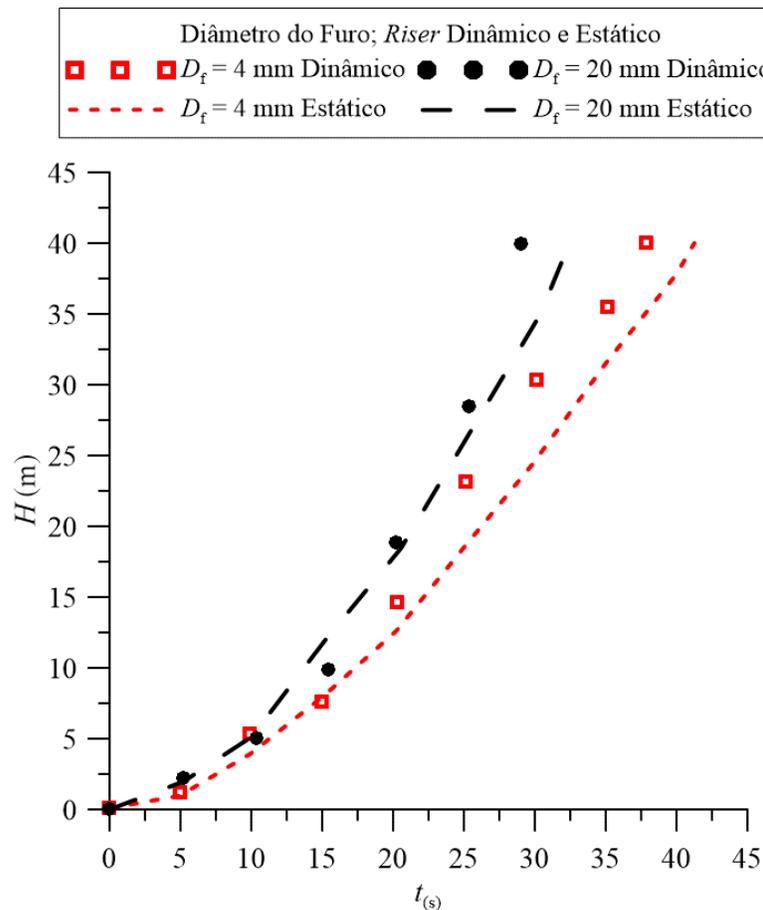


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.9.4 Efeito do comportamento estático e dinâmico do riser sobre a pluma de óleo em diferentes diâmetros de vazamento

Graficamente, pode ser observado a altura crescente das gotículas de óleo durante todo o processo de flutuação em diferentes diâmetros de vazamento. O gráfico indica que, para esse efeito, a altura aumenta linearmente com o tempo, com possibilidade de mencionar também que, para o caso de maior diâmetro de vazamento, 20 mm (Caso 55 e Caso 60), ocorre uma maior inclinação da curva de acordo com o *riser* dinâmico e estático (Figura 4.98). Para um diâmetro de 4 mm (Caso 51 e Caso 56), as curvas apresentam uma certa discrepância entre o efeito dinâmico e estático, mostrando que para esses dois efeitos, a pluma de óleo alcança uma altura máxima de 40 m em menos de 40 s (Figura 4.98).

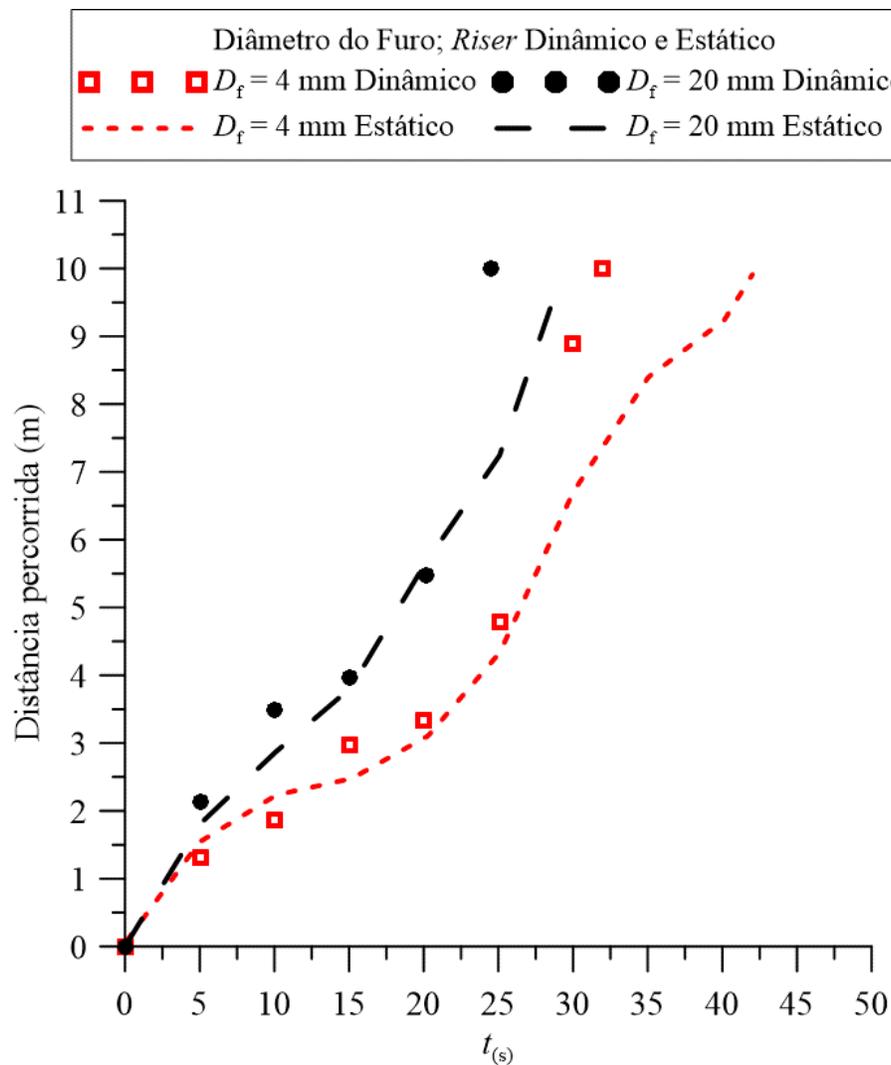
**Figura 4.98:** Efeito da velocidade de vazamento do óleo para o *riser* dinâmico e estático - altura da pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Analisando agora o mesmo efeito do diâmetro de vazamento para uma distância percorrida no tempo, é observado que para o menor diâmetro de vazamento de 4 mm (Caso 56), a diferença no tempo de espalhamento do óleo à jusante é o maior em comparação ao efeito dinâmico. O efeito dinâmico tem grande influência no processo de disseminação de óleo em direção a saída da correnteza. Para diâmetros maiores, 20 mm (Caso 60), quanto maior for o diâmetro do furo, menor o tempo de espalhamento do óleo à jusante, tanto para o efeito dinâmico quanto para o efeito estático, vide Figura 4.99.

**Figura 4.99:** Efeito da taxa de vazamento do óleo para o *riser* dinâmico e estático distância percorrida pela pluma de óleo; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s

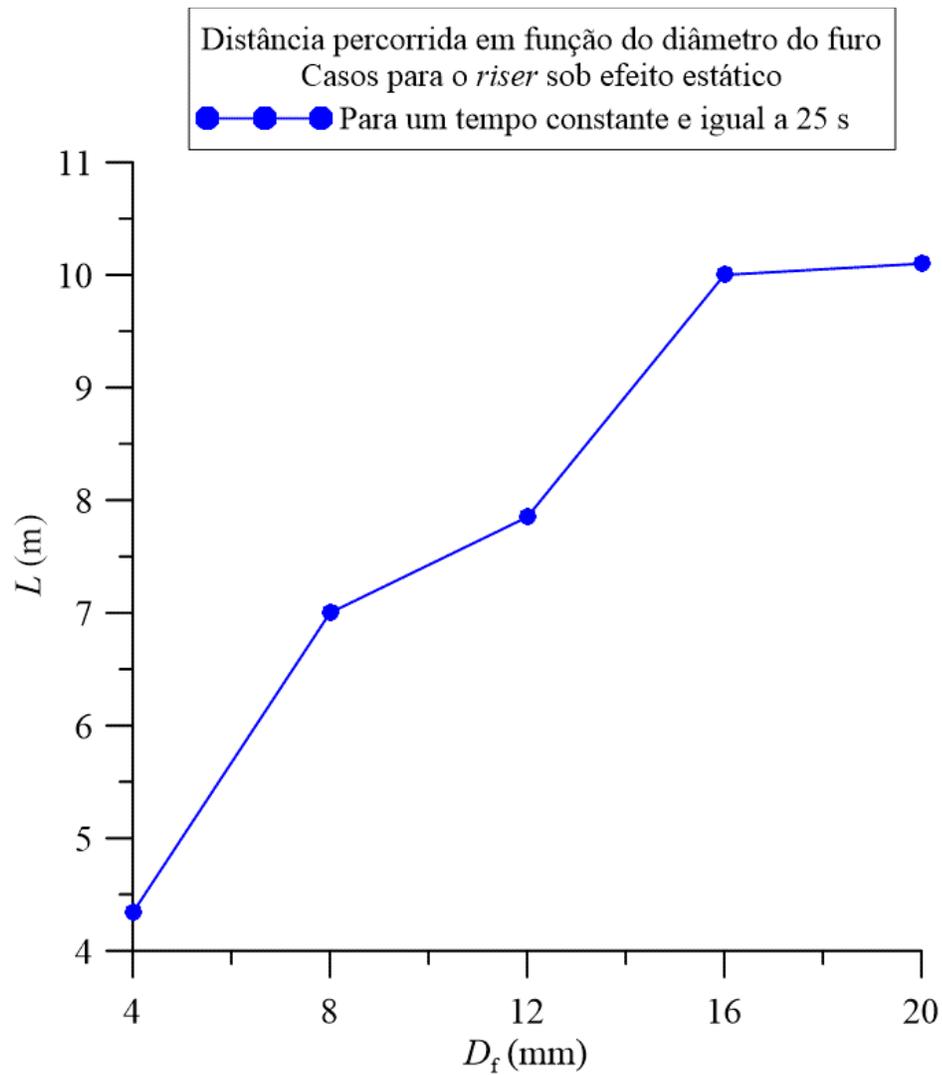


Fonte: Próprio do autor (2021).

#### 4.9.5 Efeito da distância percorrida da pluma de óleo em função do diâmetro de vazamento

Analisando o diâmetro do furo em função da distância percorrida da pluma de óleo, considerou-se um tempo constante de 25 s, onde é observado que, quanto maior for o diâmetro da fuga de óleo, maior é a distância percorrida pela fração de volume de óleo, considerando todos os casos estáticos (Caso 51 ao Caso 55). Para um diâmetro de 16 mm e 20 mm, observa-se um certo comportamento constante na curva de disseminação da pluma de óleo, com velocidade de correnteza de 0,1 m/s ( $Fr_0 = 0,0041$ ) (Figura 4.100).

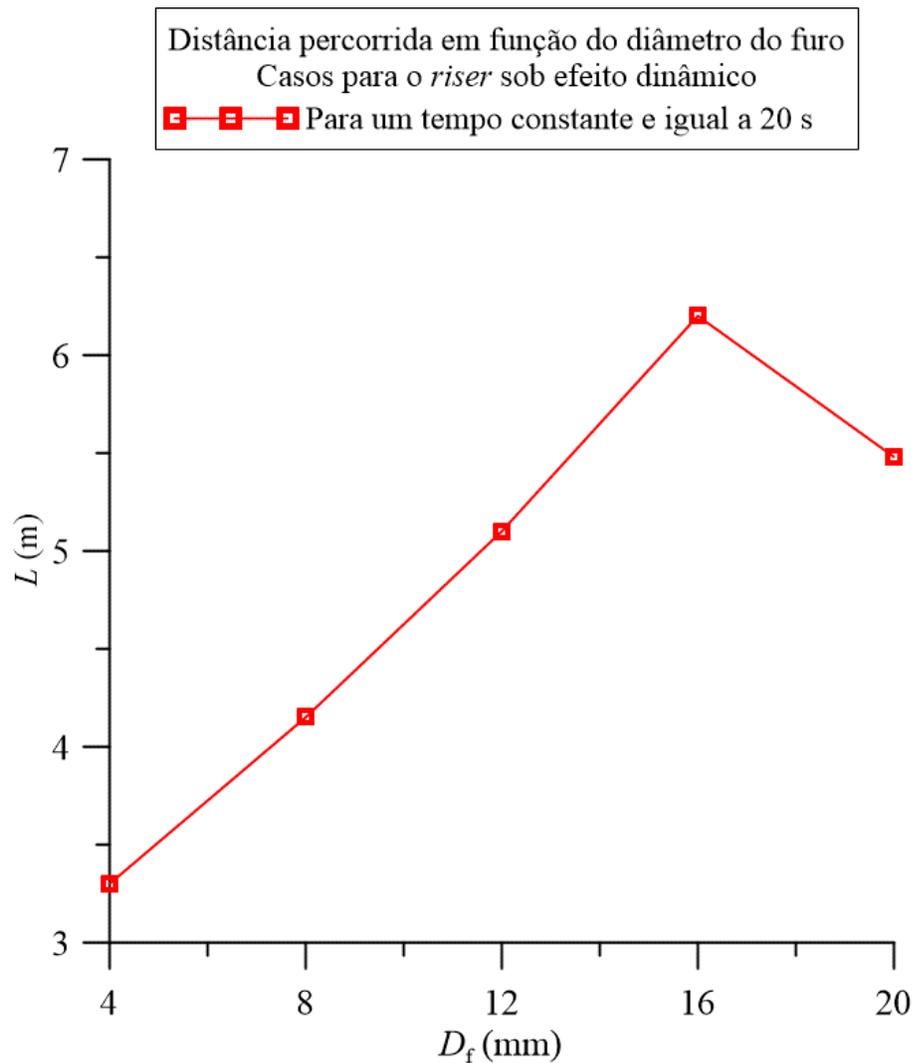
**Figura 4.100:** Efeito da distância percorrida em função do diâmetro do furo - casos estáticos, para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

Avaliando agora a distância percorrida pela pluma de óleo, em função do diâmetro do furo, considerando o *riser* em movimento (Caso 56 ao Caso 60), observa-se que, para um diâmetro de 4, 8, 12 e 16 mm (Casos 56, 57, 58, 59) o gráfico apresenta um comportamento crescente de 11,32 cm, confirmando a distância percorrida pela pluma de óleo, de acordo com o tamanho do diâmetro do vazamento. Em seguida, é apresentado um comportamento decrescente no processo de disseminação para um caso em que o diâmetro do furo é de 20 mm, chegando a alcançar uma distância de apenas 5,5 m de comprimento de dispersão do óleo no sentido do fluxo de água (Figura 4.101).

**Figura 4.101:** Efeito da distância percorrida em função do diâmetro do furo - casos dinâmicos; para uma velocidade da correnteza de 0,1 m/s



Fonte: Próprio do autor (2021).

# Capítulo 5

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

### 5.1 CONCLUSÕES

Com base nos modelos adotados e resultados obtidos foi possível estudar a dispersão do vazamento de petróleo a partir de um *riser* submerso submetido à ações dinâmicas e estáticas. Diante disto pode-se concluir que:

- Uma pequena contribuição para a ciência é o fato de ter explorado a movimentação do *riser* em comparação com outros autores. Onde, no presente trabalho, o fato de estar utilizando um *riser* em movimento da esquerda para a direita no sentido horizontal, favorece não só uma dispersão maior do óleo, mas também a quebra do jato em uma altura menor a distância percorrida das gotículas de óleo para o *riser* em movimento e estático, indicando qual seria a contribuição do trabalho;
- O modelo matemático proposto para analisar a dispersão de petróleo a partir de vazamento em *riser* submerso se mostrou coerente com dados experimentais;
- Foi possível avaliar o efeito da dispersão de petróleo sob efeito dinâmico e estático;
- Foi possível avaliar a dispersão da pluma de óleo com base em dados de velocidade de correnteza, densidade do óleo e da água, viscosidade do óleo, velocidade de vazamento de óleo e diâmetro do furo;
- Para o efeito da velocidade de correnteza, foi possível observar que para altas velocidades de correnteza, considerando o *riser* em movimento, o óleo alcança a altura máxima (40 m) em 45 s, levando cerca de 57 s para casos com o *riser* na posição estática;
- Em relação à distância percorrida, quanto menor for a velocidade de correnteza, menor a distância percorrida da pluma de óleo para todos os tempos de simulação adotados;

- Para a velocidade de correnteza pode ser afirmado que, quanto menor a velocidade de corrente, maior é a dispersão da pluma de óleo à jusante do escoamento;
- Em relação às propriedades dos fluidos, observou-se que, com base na densidade do óleo para os efeitos dinâmicos e estáticos, quanto menor for a densidade do óleo, maior a dispersão das partículas no sentido vertical em direção a superfície livre, uma vez que para baixas densidades do óleo, as forças atuantes nas partículas de óleo causam maior dispersão dele no oceano;
- De acordo com as velocidades de correnteza adotadas e, com base no número de Froude, o escoamento é tido como subcrítico, sendo as perturbações deslocadas à montante e à jusante do escoamento;
- Para os efeitos dinâmicos e estáticos em relação à densidade do óleo, considerando o *riser* estático, o óleo apresenta maior dispersão no sentido à montante e à jusante do escoamento;
- Quanto à diferentes viscosidades do óleo, notou-se que para um efeito dinâmico do *riser* as gotículas de óleo apresentam uma maior dispersão em comparação ao *riser* estático;
- Em relação à distância percorrida pelo óleo lançado na correnteza, para o *riser* sob efeito estático, observou-se que maior foi a distância percorrida pelas partículas de óleo em comparação ao *riser* submetido a movimentos;
- Em relação ao efeito da velocidade de vazamento, naturalmente, quanto maior for a velocidade com que o óleo adentra no mar, maior a fração de volume de óleo na correnteza;
- Para o caso em que foi considerada uma velocidade alta de vazamento (5 m/s), a pluma de óleo não mostrou tanta discrepância no tempo de deriva no que diz respeito aos efeitos dinâmicos e estáticos do *riser*. Para baixas velocidades de vazamento, maior o tempo de deriva da pluma de óleo na altura e na distância percorrida;
- Para o efeito do diâmetro de vazamento, percebeu-se que a altura da pluma de óleo aumenta linearmente com o tempo e a quantidade de óleo lançada em alto mar é maior

para maiores diâmetros de vazamento. Sob efeito dinâmico do *riser*, a pluma levou mais tempo para alcançar a superfície livre;

- Para menores valores de densidade da água do mar, menor foi o tempo de dispersão do óleo até a superfície livre, tanto para o efeito dinâmico quanto estático do *riser*. Porém, para maiores valores de densidade, os efeitos dinâmicos apresentaram pouca discrepância em relação aos outros valores de densidade;
- Ao analisar o campo vetorial da dispersão do óleo na água, bem como a direção das partículas de óleo na coluna de água, para os efeitos dinâmicos e estáticos, observou-se que o efeito dinâmico apresenta grandes variações, no sentido do fluxo da corrente em torno do *riser* formando vórtices próximo a região do orifício de vazamento.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, é possível citar:

- Analisar simulações, com movimentos oscilatórios horizontais impostos a seção do *riser*, para averiguar os efeitos da aceleração. Pode-se considerar um movimento harmônico simples, caracterizado por amplitude ( $A$ ) e frequência ( $w$ );
- Avaliar o efeito de onda e propagação de onda;
- Analisar a dispersão do óleo oriunda de vazamento em lâminas d'água mais profundas;
- Analisar o comportamento da dispersão do petróleo em um domínio tridimensional (3D);
- Analisar efeitos de temperatura sobre a dispersão do óleo no oceano;
- Estudar o efeito da posição do orifício de vazamento sobre a dispersão do óleo;
- Analisar o efeito de barreiras de superfície para conter o óleo vazado oriundo de vazamento em *risers* estáticos e dinâmicos.

## REFERÊNCIAS

---

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP, 2001. Disponível em: [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br). Acesso em: 04 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP, 2012. Disponível em: [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br). Acesso em: 04 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP, 2019. Disponível em: <https://www.go.br/anp/pt-br>. 04 mar. 2022.

ANSYS, **FLUENT-Theory Manual Guide**, 2020.

ASSINE, M. L.; CORRÊA, F. S.; CHANG, H. K. Migração de depocentos na Bacia de Santos: importância na exploração de hidrocarbonetos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, p. 111-127, junho, 2008.

BOUÇAS, M. H. Confiabilidade de Sistemas de Barreiras de Segurança em Poços de Petróleo pelo Método de Monte Carlo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

EL PAIS. **Manchas de óleo chega aos corais da baía de Todos os Santos**, na Bahia. Disponível em: <https://url.gratis/7vnm52>. Acesso em: 04 mar. 2022.

BBC BRASIL. **Danos do óleo no litoral do Nordeste vão durar décadas, dizem oceanógrafos**. 21 de Outubro de 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-50131560>. Acesso em: 10 dez. 2019.

BRANDVIK, P.J.; JOHANSEN, Ø., et al. Droplet breakup in subsurface oil releases-part 1: experimental study of droplet breakup and effectiveness of dispersant injection. **Mar Pollut Bull**, Trondheim, Noruega, v. 73, p. 319-326, 2013. Disponível em: <https://abre.ai/d5pP>. Acesso em: 04 mar. 2022.

BRANDVIK, P.J.; JOHANSEN, Ø., et al. Subsea dispersants injection (SSDI), effectiveness of diferente dispersant injection techniques – An experimental approach. **Marine Pollution Bulletin**, Trondheim, Noruega, v. 136, p. 385-393, 2018. Disponível em: <https://bityli.com/XEnVB>. Acesso em: 04 mar. 2022.

CHEN, H.; AN, W.; YOU, Y., et al. Numerical study of underwater fate of oil spilled from deepwater blowout. **Ocean Engineering**, Shanghai, China, v. 110, p. 227-243, 2015. Disponível em: <https://bityli.com/DCMpH>. Acesso em: 04 mar. 2022.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, CONAMA, 2001. **Resolução CONAMA N° 279, de 27 de junho de 2001.** Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0279-270601.PDF>. Acesso em: 04 mar. 2022.

ELIJAH, R.; BUFFY, M. M., *et al.* Oil source-fingerprinting in support of polarimetric radar mapping of macondo-252 oil in Gulf Coast marshes. *Mar. Pollut. Bull*, Lafayette, LA, USA, v. 85, p. 85-95, 2014.

FISHER, E. A.; BERNER, P. C. **Non-Integral Production Riser for the Green Canyon Block 29 Development.** *In: Offshore Technology Conference (OTC)*. Houston: 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (Ibama). **Manchas de óleo no litoral brasileiro.** 2019. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/index.php>. Acesso em: 04 mar. 2022.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO), 2019. **Mobilização contra manchas de óleo.** Disponível em: [icmbio.gov.br](http://icmbio.gov.br). Acesso em: 04 mar. 2022.

JIANG, M.; LI, Z.; YU, J.; YIN, H.; JIANG, Y. **A  $k-\epsilon$  Turbulence Model for Subsea Pipeline Oil Spill Numerical Simulation.** Proceedings of the Twenty-sixth). International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016. Copyright © 2016 by the International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE) ISBN 978-1-880653-88-3; ISSN 1098-6189.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. **Academic Press**, London, England. 1972.

LI, W.; LIANG, X.; LIN, J.G. Mathematical model and computer simulation for oil spill in ice waters around island based on FLUENT. **Journal of Computers**, 2013. Academy Publisher, doi:10.4304/jcp.8.4.1027-1034. Dalian, China, v. 8, n. 4, p. 1027–1034, 2013b. ©. Acesso em: 04 mar. 2022.

LI, W.; PANG, Y.; LIN, J.; LIANG, X. Computational Modeling of Submarine Oil Spill with Current and Wave by FLUENT. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, ISSN: 2040-7459; e-ISSN: 2040-7467 © Maxwell Scientific Organization. Dalian, China, Maio, 2013a.

LI, J.; NA, W.; GAO, H.; ZHAO, Y.; SUN, Y. An experimental study on oil droplet size distribution in subsurface oil releases. DOI: 10.1007/s13131-018-1258-5 <http://www.hyxb.org.cn> Acta Oceanol. Sin., Qingdao 266100, China, v. 37, n. 11, p. 88-95, 2018. Acesso em: 04 mar. 2022.

LEMOS, A. D. Curso Risers and Pipelines. **Importance of Riser and Pipeline Technology for O&G Production**, UFRJ, UNICAMP, USP, PETROBRAS, UNIVERSIDADE DE TÓQUIO, 2020.

MACIAS, I. B.; Detecção de vazamento em tubulações transportando gás. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campinas, Campinas/SP, 2004.

MARINHA DO BRASIL. **Combate ao óleo no País**. 2019. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br>. Acesso em: 04 mar. 2022.

MARTINS, J. C. Metodologia de caracterização da propagação acústica em tubulações de transporte de fluidos bifásicos gás-líquido. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de São Carlos – USP, São Carlos/SP, 2011.

MOTHÉ, C.G.; SILVA, C. Petróleo pesado e ultra-pesado – Reservas e produção mundial. **Revista TN Petróleo**, n. 57, nov/dez. 2007.

MOREIRA, G.; MAGAHLÃES, H. L. F., *et al.* Fluid Leakage in Submerged Offshore Pipeline: An Analysis of Oil Dispersion in Seawater. **Open Journal of Fluid Dynamics**, Campina Grande, Brazil, v. 10, p. 95-121. Maio de 2020. Disponível em: <https://abre.ai/d5rb>. Acesso em: 04 mar. 2022.

MOURELLE, M. M.; AGUIAR, L. L; MENEZES, I. F. M. Solicitação de Patente: “**Amortecedor Hidrodinâmico para Tubo Ascendente em Catenária**”, Petrobras, 2010.

NASPOLINI, G. F. Prevenção e resposta ao derramamento de petróleo na exploração e produção *offshore*: análise internacional e recomendações para o brasil. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

NIECKELE, A. O. Turbulência – MEC 2355. Fundamentos da Turbulência Caracterização da Turbulência, Descrição Estatística do escoamento Turbulento Modelagem e Simulação. s.d.

NISSANKA, I. D.; YAPA, D. P. Oil slicks on water surface: Breakup, coalescence, and droplet formation under breaking waves. **Marine Pollution Bulletin**, Nova Iorque, USA, v. 114, p. 480-493, 2017. Disponível em: <https://abre.ai/d5rt>. Acesso em: 04 mar. 2022.

OLIVEIRA, G. P. **Soluções analítica e numérica de risers flexíveis nas configurações de catenária e lazy-wave**. Escola Politécnica, Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Rio de Janeiro. X, 77 p.: il.; 29,7 cm, 2017.

PETROBRAS, **Bacia de Santos**. 2021. Disponível em: <https://abre.ai/d5rx>. Acesso em: 10 jun. 2021.

PETROBRAS. Metocean Database (Programa de medição de Engenharia - amarrações e CTD perfis na Área da Bacia de Santos) e Resultados de Modelagem Oceânica. **TECHNICAL SPECIFICATION**. No.: **I-ET-3A36.00-1000-941-PPC-001 Rev. D**. Project: **NORTHERN SANTOS BASIN PRE-SALT FIELDS**. CC: PT-128.01.12881. Unit: PRODUCTION SYSTEMS AND UNITS, 2018.

PUC Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, **Tipos de Risers**. Certificação Digital N° 0621138/CA. s.d.

SALAMA, M. M.; STJERN, G., *et al.* The First Offshore Field Installation for a Composite Riser Joint. “in Offshore Technology Conference, OCT 14018, May 6-9, Houston, Texas, 2002.

SAYOL, J.M.; ORFILA, A.; SIMARRO, G.; *et al.* A Lagrangian model for tracking surface spills and Sar operations in the ocean. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.013>. Environ Model Softw, Ilhas Baleares, Espanha, n. 52, p. 74-82, 2014.

SECRETARIA NACIONAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL, 2019.

SERTA, O. B., LONGO, C. E. V., ROVERI, F. E. **Riser Systems for Deep and Ultra-Deepwaters**. *In*: Offshore Technology Conference, Houston, USA, 2001.

SOLANO, R. F. Curso *Risers* and Pipelines. **Design Issues of Subsea Pipelines**, UFRJ, UNICAMP, USP, PETROBRAS, UNIVERSIDADE DE TÓQUIO, 2020.

SOWOUD, K. M.; K.M; AL-FILFILY, A. A.; ABED, B. H. **Numerical Investigation of 2D Turbulent Flow past a Circular Cylinder at Lower Subcritical Reynolds Number**. *In*: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENGINEERING TECHNIQUES3, 3., 2020, Canada.: 2020, p. 2-12. Disponível em: [encurtador.com.br/brtzH](http://encurtador.com.br/brtzH). doi:10.1088/1757-899X/881/1/012160, Acesso em: 04 mar. 2022.

SUN, Y.; CAO, X.; LIANG, F. Investigation on underwater spreading characteristics and migrationlaw of oil leakage from damaged submarine pipelines. **Process Safety and Environmental Protection**, Qingdao 266580, China, n. 127, p. 329-347. 2019. Disponível em: <https://abre.ai/d5sr>. Acesso em: 04 mar. 2022.

YAPA, P.D., DASANAYAKA, L.K., BANDARA, U.C., NAKATA, K. A model to simulate the transport and fate of gas and hydrates released in deepwater. **J. Hydraul. Res**, Nova Iorque, USA, n. 48, v. 5, p. 559-572. 2010. Disponível em: <https://abre.ai/d5sy>. Acesso em: 04 mar. 2022.

YANG, Z.; YU, J.; LI, Z., *et al.* Application of computational fluid dynamics simulation for submarine oil spill. **Acta Oceanol. Sin.**, Tianjin, China, v. 37, n. 11, p. 104-115. 2018.

TAVARES, D. P. S. A. Fluidodinâmica da Dispersão de Óleo a partir de Vazamento em *Riser* Submarino tipo Catenária: Análise de Plumás Multifásicas. Tese (Doutorado em Engenharia

Química) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química, da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2016.

TANG, L.; MASUTANI, S M. S. Laminar to turbulent flow liquidliquid jet instability and breakup. *In: PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE*, 13., 2003, USA. Copyright © 2003 by The International Society of Offshore and Polar Engineers ISBN 1–880653-60–5 (Set); ISSN 1098–6189 (Set). USA: ISOPE, 2003. P. 317-324.

TAKAFUJI, F. C. M. Dinâmica tridimensional de *risers*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecatrônica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2010.

TECHNIP. **Flexible pipes**. Disponível em: <https://abre.ai/d5uC>. Acesso em: 26 Set. 2016.

TECHNIP. **Technologies and Products – Flexive pipe**. 2008. Disponível em: [http://technip.com/pdf/Flexible\\_Pipe.pdf](http://technip.com/pdf/Flexible_Pipe.pdf). Acesso em: 28 out. 2019.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

WANG, S.D.; SHEN, Y.M.; ZHENG, Y.H. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. **Ocean Engineering**, Dalian, China. doi:10.1016/j.oceaneng.2004.12.010, n. 32, p. 1556-1571. 2005.

ZHAO, L.; SHAFFER, F., *et al.* Underwater oil jet: Hydrodynamics and droplet size distribution. **Chemical Engineering Journal**, Pittsburg, PA 15236, USA <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.061>. n. 299, p. 292-303. 2016. Disponível em: <https://abre.ai/d5uY>. Acesso em: 04 mar. 2022.

ZHU, H.; LIN, Q. A. A CFD (computational fluid dynamic) simulation for oil leakage from damaged submarine pipeline. **Energy**, Sichuan 610500, China, v. 64, p. 887-899, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.037>. Acesso em: 04 mar. 2022.

ZHU, H.; YOU, J.; ZHAO, H. An experimental investigation of underwater spread of oil spill in a shear flow. **Marine Pollution Bulletin**, Sichuan 610500, China, n. 116, p. 156-166. 2017a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.002>. Acesso em: 04 mar. 2022.

ZHU, H.; YOU, J.; ZHAO, H. Underwater spreading and surface drifting of oil spilled from a submarine pipeline under the combined action of wave and current. **Applied Ocean Research**, Sichuan 610500, China, n. 64, p. 217-235. 2017b. Disponível em: <https://abre.ai/d5vs>. Acesso em: 04 mar. 2022.

# APÊNDICE A

## UDFs PARA PROPRIEDADES DA SOLUÇÃO

---

O Apêndice A apresenta detalhes das UDFs desenvolvidas para cálculos da solução. As UDFs foram escritas em linguagem C e foram acopladas no software ANSYS FLUENT 2020. As linhas de comandos das UDFs adotadas são mostradas abaixo:

```
// Moving grid problem - CG movement of a box */
#include "udf.h"

static real velx = 0.0;

DEFINE_CG_MOTION(box,dt,vel,omega,time,dttime)
{
    NV_S(vel, =, 0.0);
    NV_S(omega, =, 0.0);

    velx = 0.103 * sin(8 * 3.1415927 * time / 10);

    vel[0] = velx;
    // Message ("time = %f, vel[0] = %f\n", time, vel[0]);
}
*
*
*
*
*
*
*

// Moving grid problem - CG movement of a box */
#include "udf.h"

static real velx = 0.0;

DEFINE_CG_MOTION(box,dt,vel,omega,time,dttime)
{
    NV_S(vel, =, 0.0);
    NV_S(omega, =, 0.0);

    velx = 0.209 * sin(8 * 3.1415927 * time / 10);
```





