

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM MONTAGEM INDUSTRIAL

FERNANDO RODRIGUES GONZALEZ

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL À
CONVERSÃO DE JAQUETAS DE PLATAFORMAS DE PETRÓLEO
DESCOMISSIONADAS EM RECIFES ARTIFICIAIS

Niterói, RJ

2020

FERNANDO RODRIGUES GONZALEZ

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL À
CONVERSÃO DE JAQUETAS DE PLATAFORMAS DE PETRÓLEO
DESCOMISSIONADAS EM RECIFES ARTIFICIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Montagem Industrial. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Orientador:

Prof. Dr. Roger Matsumoto Moreira

Niterói, RJ

2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

G643a Gonzalez, Fernando Rodrigues
APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL À
CONVERSÃO DE JAQUETAS DE PLATAFORMAS DE PETRÓLEO
DESCOMISSIONADAS EM RECIFES ARTIFICIAIS / Fernando Rodrigues
Gonzalez ; Roger Matsumoto Moreira, orientador. Niterói, 2020.
82 f. : il.

Dissertação (mestrado profissional)-Universidade Federal
Fluminense, Niterói, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PMI.2020.mp.04591495639>

1. Fluidodinâmica computacional. 2. Descomissionamento. 3.
Recife artificial. 4. Produção intelectual. I. Moreira,
Roger Matsumoto, orientador. II. Universidade Federal
Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD -

FERNANDO RODRIGUES GONZALEZ

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL À
CONVERSÃO DE JAQUETAS DE PLATAFORMAS DE PETRÓLEO
DESCOMISSIONADAS EM RECIFES ARTIFICIAIS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em
Montagem Industrial da Universidade Federal
Fluminense, como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre. Área de concentração: Montagem
Industrial.

Aprovada em 27 de agosto de 2020.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Ph.D. Roger Matsumoto Moreira - Orientador - Presidente
Universidade Federal Fluminense (UFF)



Prof. Dr. Fernando Benedicto Mainier
Universidade Federal Fluminense (UFF)

Prof. Dr. Julio Tomás Aquije Chacaltana
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Niterói, RJ

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
JULIO TOMAS AQUIJE CHACALTANA - SIAPE 1305073
Departamento de Engenharia Ambiental - DEA/CT
Em 10/09/2020 às 09:15

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/62050?tipoArquivo=O>

À Heli Aparecida e Gonzalo, mais do que pais,
meus grandes professores.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, prof. Roger Matsumoto Moreira não apenas pelos seus valiosos conhecimentos na área de mecânica dos fluidos, mas também por ter tido a confiança e a atenciosidade necessárias.

À minha amada e dedicada esposa, Luciana, que não apenas soube compreender minhas ausências como também foi fundamental para a conclusão deste grande projeto, possibilitando que eu dedicasse o tempo necessário aos estudos.

Aos meus sogros Paulo Eduardo e Francisca que sempre cuidaram das minhas filhas para que eu pudesse estar presente à universidade.

Às minhas pequenas filhas gêmeas, Maria Cecília e Nicole que, no alto de seus cinco anos de idade, me ensinaram muito sobre a vida.

Aos funcionários da Escola de Engenharia, em especial aos técnicos do LTM e aos funcionários do departamento e da coordenação do Mestrado Profissional em Montagem Industrial.

Aos colegas de trabalho, João Luís Batista da Silva, Daniel Fonseca de Carvalho, Eduardo Stein Soares Dutra, Eduardo Hilzendeger Marcon e Milene França pelo incentivo e pelos excelentes comentários.

A todos os amigos do Programa de Mestrado Profissional em Montagem Industrial da UFF pelo companheirismo e momentos de descontração.

RESUMO

Vários autores desenvolveram estudos sobre os efeitos hidrodinâmicos em estruturas destinadas à composição de recifes artificiais. Porém, estudos utilizando a geometria de uma jaqueta de plataforma fixa descomissionada para a avaliação de geração de escoamento ascendente (ressurgência local) e recirculação não são encontrados em pesquisas bibliográficas. O presente estudo consiste na aplicação de técnicas de fluidodinâmica computacional para o estudo do fluxo de corrente marítima em torno de jaquetas desmontadas e afundadas para fins de conversão em recifes artificiais. São analisadas treze situações, sendo as cinco primeiras associadas ao tombamento da estrutura após o corte próximo ao fundo do mar variando-se o ângulo de incidência ao escoamento, outras quatro representando o corte e desmonte em duas seções dispostas lado a lado variando-se o espaçamento entre elas e mais quatro representando o desmonte em três seções afundadas lado a lado também sendo testadas em situações de espaçamentos diferentes. Para todos estes casos, é mantida uma coluna de água livre de 55m. O software ANSYS FLUENT® 19.0 R3 é empregado com o modelo de turbulência $k-\epsilon$ (*kappa-epsilon*) no regime estacionário. Após a seleção do modelo de turbulência a partir da comparação com dados experimentais fornecidos pela literatura, diversas simulações são conduzidas e os resultados são comparados entre si. Objetiva-se verificar para quais casos as regiões de ressurgência local, ou seja, onde a componente de velocidade vertical atinge valores maiores ou iguais a 10% da magnitude da velocidade de fluxo livre, são mais significativos, sem aumentar as regiões de recirculação e pontos de estagnação. Observa-se que o desmembramento da jaqueta com o posicionamento das partes em sequência crescente no sentido da correnteza predominante é favorável à geração de ressurgência local. Em qualquer dos casos, o efeito de ressurgência predomina sobre o de recirculação.

Palavras-chave: descomissionamento, recifes artificiais, fluidodinâmica computacional, plataformas de petróleo.

ABSTRACT

Several authors have developed studies about the hydrodynamic effects in structures designated for the composition of artificial reefs. However, studies using the geometry of a decommissioned fixed jacket-type platform for evaluation of the local upwelling and recirculating flow generation are not found in bibliographic research. This study consists in the application of computational fluid dynamics techniques for the study of the sea current flow around disassembled and sunk jackets in the seabed for the purpose of conversion for artificial reefs. Thirteen situations are analyzed, the first five being associated with the toppling of the structure after cutting close to the seabed and varying the flow incidence angle, another four representing the cut and dismount in two sections arranged side by side, varying the spacing between them and four more representing the disassembling of three sunken sections side by side also being tested in different spacing situations. For all these cases, a 55m free water column is maintained. The software ANSYS FLUENT® 19.0 R3 is used with the $k-\varepsilon$ (*kappa-epsilon*) turbulence model on steady state. After selecting the turbulence model from the comparison with experimental data provided by the literature, several simulations are conducted, and the results are compared with each other. The objective is to check where local upwelling regions - that is, where the vertical velocity component reaches values greater or equal to 10% of the magnitude of the free flow velocity - are more significant, without increasing the recirculating regions and stagnation points. It is observed that the dismemberment of the jacket with the positioning of the parts in an increasing sequence in the direction of the predominant current is favorable to the generation of local upwelling. In either case, the upwelling effect predominates over that of recirculation.

Keywords: decommissioning, artificial reefs, computational fluid dynamics, oil rigs.

SUMÁRIO

FOLHA DE ROSTO, p. 1

FOLHA DE APROVAÇÃO, p.3

DEDICATÓRIA, p. 5

AGRADECIMENTOS, p. 6

RESUMO, p. 7

ABSTRACT, p. 8

LISTA DE ILUSTRAÇÕES, p. 11

LISTA DE TABELAS, p. 15

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS, p. 16

1. INTRODUÇÃO, p. 19

1.1. OBJETIVOS, p. 24

1.2. SUMÁRIO, p. 24

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, p. 25

2.1. DESCOMISSIONAMENTO OFFSHORE E RECIFES ARTIFICIAIS (RAs), p. 25

2.2. RELAÇÃO DOS RECIFES ARTIFICIAIS COM A HIDRODINÂMICA, p. 28

2.3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS APLICADAS A RECIFES ARTIFICIAIS, p. 30

3. MODELAGENS MATEMÁTICA E NUMÉRICA, p. 32

3.1. VISÃO GERAL DO PROBLEMA, p. 32

3.1.1. Arranjo Geral e Condições de Contorno, p. 34

3.2. ESTIMATIVA DAS VELOCIDADES DE CORRENTE MARINHA, p. 36

3.3. INFLUÊNCIA DAS ONDAS, p. 37

3.4. MODELAGEM MATEMÁTICA, p. 39

3.4.1. Equações de Conservação de Massa e *Momentum*, p. 39

3.4.2.	Comparação com Dados Experimentais para Determinação do Modelo de Turbulência, p. 41
3.4.3.	Modelo de turbulência pelo método $k-\varepsilon$ (<i>kappa-epsilon</i>) padrão, p. 45
3.4.4.	Modelo Numérico por Método de Volumes Finitos (MVF), p. 46
3.4.5.	Algoritmos numéricos para a solução dos campos de velocidade e pressão, p. 47
3.4.5.1.	SIMPLE (Semi-Implicit Method for Linked Equations), p. 47
3.4.5.2.	SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Linked Equations - Consistent), p. 47
3.5.	SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DOS MODELOS DE JAQUETAS CONVERTIDAS EM RAs, p. 48
3.5.1.	Determinação das dimensões do domínio, p. 49
3.5.2.	Parâmetros Iniciais do escoamento Turbulento, p. 49
3.5.3.	Rugosidades do Solo Marinho e da Superfície da Jaqueta, p. 50
3.5.4.	Penetração da Estrutura no Solo Marinho, p. 51
3.5.5.	Construção da Malha, p. 52
3.5.5.1.	Teste de Sensibilidade de Malha, p. 55
3.5.6.	Simulações em Diferentes Condições de Corte e Afundamento, p. 58
3.5.7.	Resultados Obtidos nas Simulações, p. 59
4.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, p. 66
5.	CONCLUSÃO, p. 69
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS, p. 71
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, p. 72
7.	APÊNDICES, p. 76

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 Típica jaqueta de plataforma fixa de Petróleo, f. 20
- Figura 2 Distribuição das plataformas do tipo jaquetas pela costa brasileira, f. 21
- Figura 3 Proporção de plataformas do tipo jaquetas por lâmina d'água, f. 21
- Figura 4 Ilustrações dos trabalhos de simulação hidrodinâmica realizados em RAs por: (a) MENDONÇA *et al.* (2011); (b) AHMED *et al.* (2016), (c) LIU *et al.* (2012), (d) LIU *et al.* (2013), (e) MIAO & XIE (2007), (f) ZHENG *et al.* (2015), f. 23
- Figura 5 Método de desmontagem parcial de uma jaqueta de plataforma de petróleo, f. 26
- Figura 6 Método de tombamento de uma jaqueta de plataforma para conversão em RA, f. 26
- Figura 7 Fluxo teórico da corrente predominante em torno do navio naufragado Biscayne. U_o é a velocidade do escoamento antes de encontrar a embarcação, X é a distância da popa, com $X=0$ localizado no extremo da embarcação, L é o comprimento do navio, HP e LP indicam as regiões de alta e baixa pressão, respectivamente, f. 28
- Figura 8 Efeito provocado pelas regiões de ressurgência (*upwelling*) em um RA, f. 29
- Figura 9 Representação da plataforma tombada no leito marinho, em vista lateral (a) e vista superior (b), f. 33
- Figura 10 Representação da plataforma cortada em duas partes, f. 33
- Figura 11 Representação da plataforma cortada em três partes, f. 33
- Figura 12 Principais características hidrodinâmicas para estudo da eficácia dos RAs, no caso da jaqueta tombada a 180° com relação ao escoamento, f. 34
- Figura 13 Características de contorno de forma a simular o ambiente marinho, f. 35
- Figura 14 Representação teórica das ondas aquáticas Típica jaqueta de plataforma fixa de Petróleo, f. 38
- Figura 15 Principais características do escoamento para estudo da eficácia dos RAs, com base no modelo geométrico desenvolvido por Liu *et al.* (2012), f. 43
- Figura 16 Construção do domínio semelhante à LIU *et al.* (2012), f. 43
- Figura 17 Desvios obtidos com relação ao experimento de LIU *et al.* (2012), f. 44

- Figura 18 Perfis de velocidade obtidos em: (a) presente simulação, (b) experimento conduzido por LIU *et al.* (2012) e (c) simulação numérica conduzida pelos autores, f. 45
- Figura 19 Representação de um volume de controle bidimensional para ilustrar a discretização de uma equação de transporte escalar, f. 46
- Figura 20 Algoritmo de solução numérica SIMPLE para acoplamento velocidade e pressão., f. 47
- Figura 21 Algoritmo de solução numérica *SIMPLEC* para acoplamento velocidade-pressão., f. 48
- Figura 22 Dimensões do domínio para a jaqueta, f. 49
- Figura 23 Jaqueta deitada no leito com reprodução de penetração de metade do diâmetro da tubulação das pernas da jaqueta, f. 51
- Figura 24 Malha do tipo estruturada, f. 52
- Figura 25 Malha do tipo não estruturada, f. 52
- Figura 26 Formação da camada limite em uma placa plana em escoamento laminar, f. 53
- Figura 27 Malha com elementos prismáticos (inflados) nas regiões próximas ao solo marinho, f. 55
- Figura 28 Pontos *P1* e *P2* para teste de sensibilidade de malha., f. 56
- Figura 29 Variação do módulo do vetor velocidade (\hat{u}) bem como suas componentes u , v e w nos pontos 1 e 2 (esquerda e direita, respectivamente) conforme o n° de elementos de malha., f. 56
- Figura 30 Variação de (a) H_{up}/H , v_{avg}/u_{∞} , V_{up}/V e V_{rec}/V , (b) tempo de simulação e (c) resíduos finais da simulação, conforme o n° de elementos de malha, f. 57
- Figura 31 Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 3 partes distadas em $0,5L_b$, f. 59
- Figura 32 Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura tombada a 180° do escoamento, f. 60
- Figura 33 Isosuperfície de contorno do volume de recirculação (em azul) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura tombada a 180° do escoamento, f. 60
- Figura 34 Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 3 partes distadas em $1,0L_b$, f. 61

- Figura 35 Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 3 partes distadas em 1,5Lb., f. 61
- Figura 36 Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 3 partes distadas em 2,0Lb., f. 61
- Figura 37 Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura tombada a 90°, f. 62
- Figura 38 Isosuperfície de contorno do volume de recirculação (em azul) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura tombada a 90°, f. 63
- Figura 39 Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 2 partes distadas em 1,5Lb., f. 63
- Figura 40 Variação de H_{UP}/H para a velocidade de 0,45m/s, f. 65
- Figura 41 Variação de v_{AVG}/u_{∞} para a velocidade de 0,45m/s, f. 65
- Figura 42 Variação de V_{UP}/V para a velocidade de 0,45m/s, f. 65
- Figura 43 Variação de V_{REC}/V para a velocidade de 0,45m/s, f. 66
- Figura 44 Jaqueta hipotética com largura da base igual 50m e lâmina $LDA=70m$ separada em 4 partes, com altura de água livre resultante igual a 55m., f. 67
- Figura 45 Mesma jaqueta hipotética com largura da base igual 50m e lâmina $LDA=70m$ tombada a 90° do escoamento, com altura de água livre resultante igual a 20m., f. 67
- Figura 46 Distribuição de velocidades com escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 3 partes distadas em 0,5Lb., f. 68
- Figura 47 Distribuição de velocidades com escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura tombada a 180° do escoamento., f. 68
- Figura 48 Dimensões da jaqueta modelada, f. 76
- Figura 49 Localizações das Boias Meteoceanográficas, f. 77
- Figura 50 Dados de velocidade de corrente na Boia Meteoceanográfica Fortaleza, f. 78
- Figura 51 Dados de velocidade de corrente na Boia Meteoceanográfica Recife, f. 78
- Figura 52 Dados de velocidade de corrente na Boia Meteoceanográfica Porto Seguro, f. 79
- Figura 53 Dados de velocidade de corrente na Boia Meteoceanográfica Vitória, f. 79
- Figura 54 Dados de velocidade de corrente na Boia Meteoceanográfica Itaoca, f. 80

Figura 55 Dados de velocidade de corrente na Boia Meteoceanográfica Cabo Frio, f. 80

Figura 56 Dados de velocidade de corrente na Boia Meteoceanográfica Santos, f. 81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Velocidades médias* obtidas nas diversas regiões do Brasil, f. 36

TABELA 2 – Comprimentos de onda mais frequentes nas regiões da costa brasileira, f. 38

TABELA 3 – Referências escolhidas para comparação com dados experimentais, f. 42

TABELA 4 – Valores obtidos na simulação presente em comparação com LIU *et al.* (2012), f. 44

TABELA 5 – Rugosidade para solos e sedimentos marinhos (Fonte: VERITAS, 2006, p. 19), f. 50

TABELA 6 – Rugosidade para solos e sedimentos marinhos (Fonte: VERITAS, 2006, p. 19), f. 50

TABELA 7 – Valores de Δy conforme y^+ para a região próxima à parede na jaqueta, f. 54

TABELA 8 – Resultados obtidos para o caso 1 (tombamento da estrutura), $u_\infty = 0,45\text{m/s}$, f. 64

TABELA 9 – Resultados obtidos para o caso 2 (jaqueta cortada em 2 partes), $u_\infty = 0,45\text{m/s}$, f. 64

TABELA 10 – Resultados obtidos para o caso 3 (jaqueta cortada em 3 partes), $u_\infty = 0,45\text{m/s}$, f. 64

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<i>ABEX</i>	<i>Abandonment Expenditure</i> (Custos com Abandono ou Descomissinoamento)
<i>CFD</i>	Fluidodinâmica Computacional, em inglês
<i>C</i>	Comprimento do Recife Artificial, no sentido do escoamento.
<i>C₁</i>	Comprimento percorrido pela água da entrada do domínio até o Recife Artificial.
<i>C₂</i>	Comprimento percorrido pela água do Recife Artificial até a saída do domínio.
<i>C_f</i>	Coefficiente de fricção.
<i>C_μ</i>	Constante do modelo k-ε.
<i>k_S</i>	Rugosidade equivalente.
<i>L</i>	Comprimento da onda do mar.
<i>L_b</i>	Largura da base da jaqueta.
<i>L_C</i>	Comprimento característico do escoamento.
<i>L_D</i>	Largura do domínio computacional.
<i>L_e</i>	Comprimento da região de vórtices, no plano $z=0$, paralelo ao escoamento.
<i>LDA</i>	Lâmina d'água (equivalente a $H_{profund}$).
<i>LDA_{livre}</i>	Lâmina d'água livre, entre a superfície e a estrutura do RA.
<i>g</i>	Aceleração devido à gravidade (9,81 m/s ²).
<i>H</i>	Altura máxima do Recife Artificial em relação ao solo marinho.
<i>H_{profund}</i>	Profundidade (equivalente a <i>LDA</i>).
<i>H_{UP}</i>	Altura da região de ressurgência em relação ao solo marinho.
<i>I_c</i>	Intensidade da Turbulência.
<i>P</i>	Pressão do fluido.
<i>RA</i>	Recife Artificial
<i>RANS</i>	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
<i>Re</i>	Número de Reynolds.
<i>RNG</i>	<i>Re-Normalization Group</i> , referente ao modelo k- ε de turbulência

S	Área projetada da geometria no plano $z=0$ (perpendicular ao escoamento).
S_{BACK}	Área da região de vórtices, no plano $z=0$, paralelo ao escoamento.
S_{UP}	Área da região de fluxo ressurgente, no plano $z=0$, paralelo ao escoamento.
<i>SIMPLE</i>	<i>Semi-Implicit Method for Linked Equations</i>
<i>SIMPLEC</i>	<i>Semi-Implicit Method for Linked Equations - Consistent</i>
<i>SST</i>	<i>Shear Stress Transport</i>
T_P	Período de pico da onda do mar.
\hat{u}	Vetor velocidade.
u	Componente do vetor velocidade na direção x .
v	Componente do vetor velocidade na direção y .
w	Componente do vetor velocidade na direção z .
v_{AVG}	Velocidade média na direção y na região de ressurgência.
v_{MAX}	Média máxima na direção y na região de ressurgência.
u_∞	Velocidade de entrada do escoamento no domínio.
u_τ	Velocidade de fricção (próxima à parede).
x	Direção do eixo cartesiano, paralelo ao sentido do escoamento.
y	Direção do eixo cartesiano que representa a profundidade do domínio.
z	Direção do eixo cartesiano na largura do domínio.
y^+	Altura adimensional próxima à parede.
V_{UP}	Volume da região de ressurgência ($v > 0,1 x u_\infty$).
V_{REC}	Volume da região de recirculação ($u < 0$).
ε	Coefficiente de dissipação da energia cinética turbulenta.
φ	Grandeza escalar genérica.
k	Energia cinética turbulenta.
μ	Viscosidade dinâmica.
μ_T	Viscosidade dinâmica turbulenta.
ρ	Massa específica.

τ_w	Tensão de cisalhamento na parede.
θ	Ângulo entre a jaqueta e a corrente predominante.
ν	Viscosidade cinemática.
ω	Taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta.

1. INTRODUÇÃO

Todo ativo de produção alcança, invariavelmente, a última etapa de seu ciclo de vida, que é o descomissionamento de suas instalações. No atual contexto, não é mais considerado aceitável o simples abandono das estruturas e equipamentos na locação sem qualquer tipo de estudo sobre os impactos socioambientais relacionados à emissão de poluentes, degradação de solos, lençóis freáticos, rios e mares, além da redução da fauna e flora.

Segundo Ruivo (2001, p. 20), desde a formulação dos primeiros regulamentos internacionais sobre o assunto nas décadas de 80 e 90, o termo “abandono” foi abolido dos textos oficiais por sugerir o descarte irresponsável de materiais. Ainda segundo este autor, o termo “descomissionamento” passou então a ser adotado e definido como sendo “a melhor maneira de encerrar a operação ao final da vida produtiva do campo”, de forma a buscar o equilíbrio entre a viabilidade técnico-financeira e a minimização dos impactos sociais e ambientais.

Para instalações situadas longe do solo terrestre (*offshore*), muito comuns no setor de petróleo e gás natural, não é diferente. Um dos principais desafios tecnológicos (e agregadores de custos) no descomissionamento deste tipo de instalação é o deslocamento de grandes estruturas (jaquetas, *topsides*, tubulações e equipamentos submarinos) para a terra, onde o destino mais provável será o desmantelamento e a reciclagem do material de sucata.

Para reduzir a complexidade dos projetos de descomissionamento, existem algumas alternativas para o reuso de plataformas descomissionadas, incluindo a possibilidade de montagem de turbinas eólicas para geração de energia, bases militares, estações de pesquisas científicas e até conversão em hotéis para pesca recreativa (SALGADO, 2011, p. 39).

Uma das alternativas que tem se mostrado bastante vantajosa é a desmontagem e o afundamento das estruturas para a formação de Recifes Artificiais (RAs), o que reduz enormemente o custo e os impactos ambientais com o transporte marítimo até o estaleiro para reciclagem ao mesmo tempo em que favorece o enriquecimento da biologia marinha pelo fornecimento de ambientes propícios à formação de corais, algas, e abrigo de peixes e invertebrados (SILVA & MAINIER, 2008, p. 8). Também são importantes os ganhos socioeconômicos, considerando os benefícios às comunidades pesqueiras situadas nas proximidades da costa, além do incentivo ao ecoturismo e à pesca esportiva. Existem várias experiências com a criação de RAs pelo Brasil e pelo mundo, utilizando desde navios inoperantes, pneus amarrados e estruturas projetadas especificamente para esta finalidade (PADILHA & HENKES, 2012, p. 51). Segundo o *BSEE – Bureau of Safety and Environmental*

Enforcement, já em 1985, o governo americano estabeleceu as diretrizes para a criação de um programa de incentivo à conversão de plataformas de petróleo em RAs, denominado *Rigs to Reefs* (Plataformas para Recifes). Ainda de acordo com o *BSEE*, somente no ano de 2018, 532 plataformas foram transformadas em recifes artificiais na região do Golfo do México.

No Brasil, o assunto descomissionamento de plataformas *offshore* vem ganhando vulto desde os últimos anos. Há uma grande quantidade de campos operados, em grande parte, pela Petrobras, mas também por outras operadoras que estão atingindo o amadurecimento e a provável inviabilidade da continuidade exploratória. Atualmente são mantidas, em operação, inúmeras plataformas do tipo fixas, geralmente suportadas por estruturas metálicas treliçadas denominadas jaquetas. Várias destas unidades iniciaram sua operação há mais de 30 anos e, provavelmente, muitas delas deverão ser desativadas nos próximos anos. A Figura 1 mostra uma típica plataforma fixa do tipo jaqueta utilizada em águas rasas.

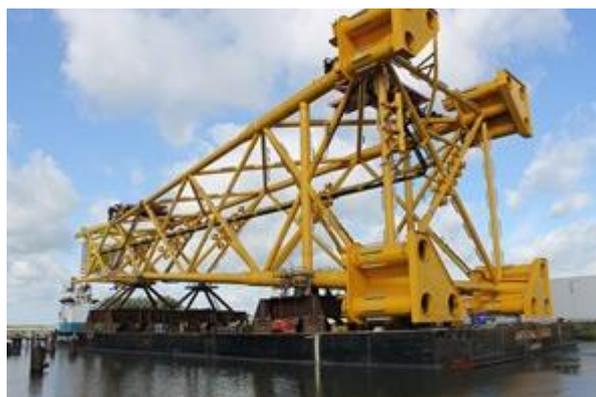


Figura 1: Típica jaqueta de plataforma fixa de Petróleo

Fonte: <https://www.worldoil.com/news/2017/6/26/oseberg-vestflanken-2-platform-jacket-set-sail>, Acesso em 13/05/2019

No gráfico da Figura 2, elaborado a partir dos dados fornecido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), observa-se a quantidade e a localização das plataformas de petróleo do tipo fixas ao longo da costa brasileira, mostrando que estas estão sendo utilizadas desde bacias localizadas na região de Santos até o Ceará, com alta predominância na região Nordeste. A Figura 3, baseada na mesma fonte, permite concluir que a maior parte destas jaquetas estão situadas em lâminas d'água que vão de 0 a 40 metros.

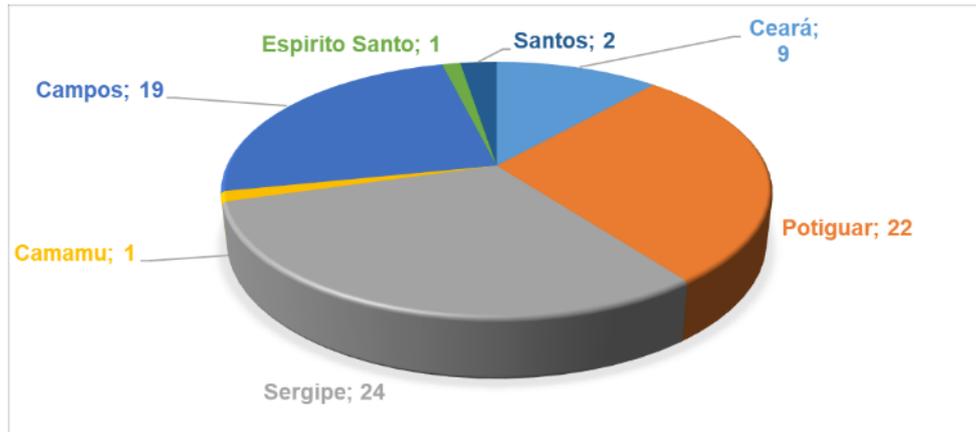


Figura 2: Distribuição das plataformas do tipo jaquetas pela costa brasileira

Fonte: Site da ANP, Acesso em 17/11/2019

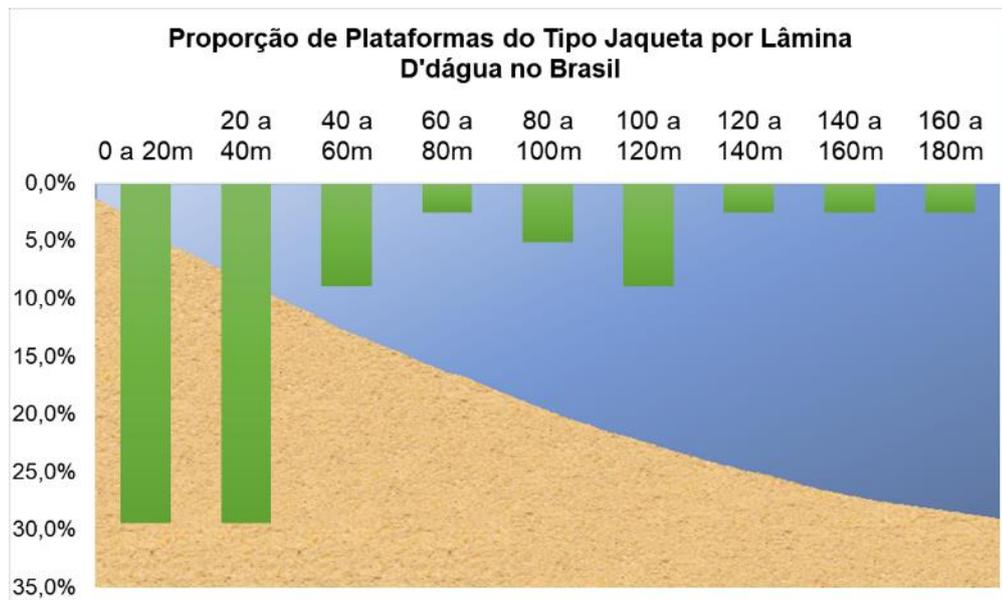


Figura 3: Proporção de plataformas do tipo jaquetas por lâmina d'água

Fonte: Site da ANP, Acesso em 17/11/2019

A possibilidade de transformar parte destas estruturas em RAs reduziria significativamente os custos com *ABEX* (*Abandonment Expenditure*), além de favorecer comunidades locais e o ecossistema marinho. Existem, porém, vários pontos críticos para a determinação de áreas possíveis para o afundamento de uma jaqueta e o sucesso do RA do ponto de vista socioambiental (KAISER, 2006, p. 4). Um dos fatores que podem inviabilizar um projeto de conversão de uma jaqueta em RA está relacionado às características oceanográficas locais (ondas, marés, correntes, temperatura, salinidade, concentração de oxigênio dissolvido, etc.). Dependendo destas condições, o crescimento da biota e da população

de peixes pode não ocorrer da maneira esperada e o que parecia vantajoso, financeira, social e ambientalmente, passa a ser um mero descarte de estruturas.

Para que um projeto de RA prossiga em território brasileiro, é necessária a devida liberação pelo órgão ambiental conforme estabelecido na Instrução Normativa IBAMA nº 17, de 21 de julho de 2019 (que substitui a IN IBAMA 22/2009). Sem o devido planejamento e a elaboração de estudos detalhados, é comum a adoção de critérios excessivamente conservadores, o que acaba por excluir várias plataformas da possibilidade de conversão em recifes. Assim, o estudo da interação entre o escoamento e a estrutura da jaqueta afundada, no sentido de avaliar o perfil de velocidades, buscando a ampliação das zonas de ressurgência localizadas e redução do efeito de recirculação ganha importância nestes projetos. A otimização destas características hidrodinâmicas pode contribuir com a eficiência do RA, traduzida como sendo um rápido crescimento da biodiversidade agregada, além do aproveitamento máximo da área superficial exposta ao ambiente marinho como substrato para a fixação de organismos e grande potencial de atração de peixes (KIM, 2015 e LINDBERG, SEAMAN & ZIMMERMAN, 2011). Em pesquisa à bibliografia disponível nos repositórios nacionais e internacionais, são encontradas várias simulações hidrodinâmicas de RAs em sólidos com formatos específicos realizados por MENDONÇA *et al.* (2011), AHMED *et al.*, (2016), LIU *et al.*, (2012), LIU *et al.*, (2013), MIAO & XIE (2007), ZHENG *et al.*, (2015). Ilustrações dos trabalhos realizados por estes autores podem ser respectivamente observadas nas Figuras 4a, 4b, 4c, 4d, 4e e 4f a seguir:

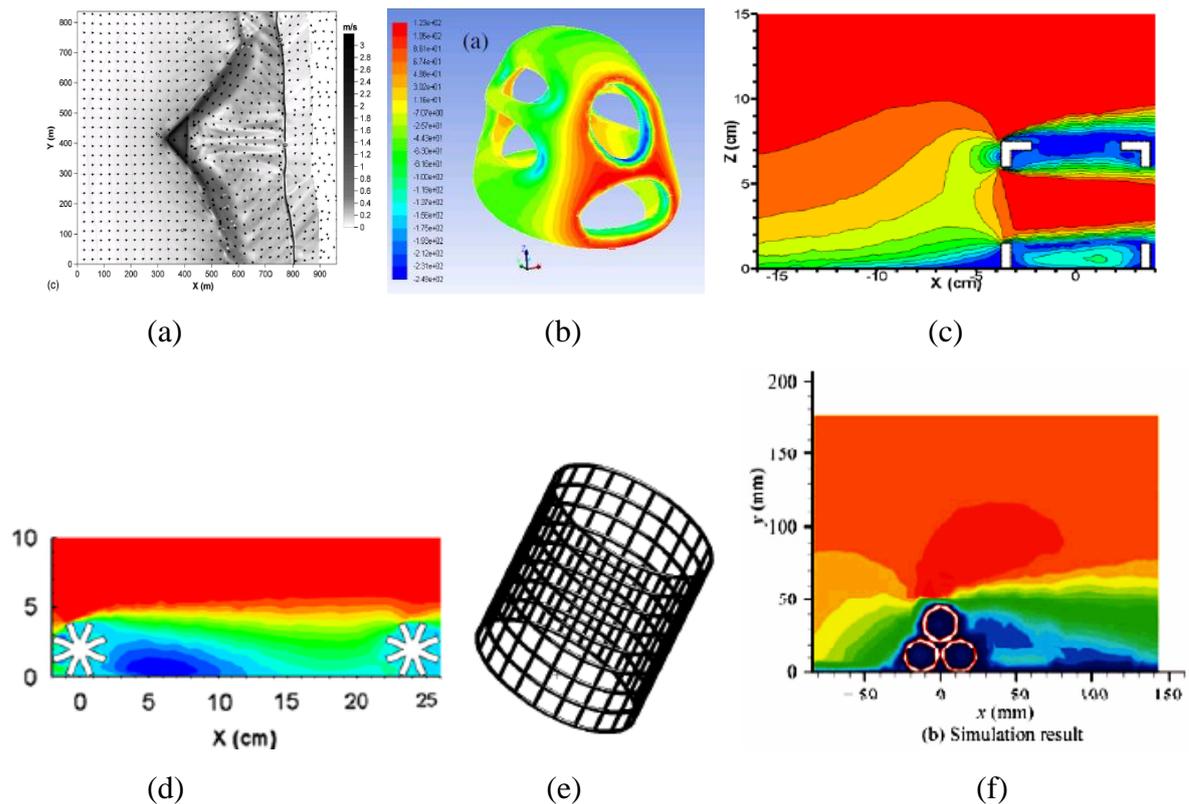


Figura 4: Ilustrações dos trabalhos de simulação hidrodinâmica realizados em RAs por: (a) MENDONÇA *et al.* (2011); (b) AHMED *et al.* (2016), (c) LIU *et al.* (2012), (d) LIU *et al.* (2013), (e) MIAO & XIE (2007), (f) ZHENG *et al.* (2015)

Durante as pesquisas realizadas neste trabalho, não se encontra nenhum estudo sobre fluidodinâmica utilizando a geometria de uma jaqueta convertida em RA. Desta forma, surge a principal motivação para a realização deste projeto.

Espera-se que os resultados obtidos possam auxiliar a indústria na realização de projetos de conversão de jaquetas em RAs, reduzindo parte das incertezas nos projetos de descomissionamento, observando as particularidades de cada caso. A possível ampliação do número de plataformas elegíveis à conversão em RAs, bem como a possibilidade de torná-las mais eficientes na produção de biodiversidade por meio do estudo das características também potencializa benefícios para um número maior de comunidades costeiras cuja atividade econômica está intimamente ligada à obtenção de pescados, podendo também aprimorar o ecoturismo aquático e a prática de pesca desportiva.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é analisar o perfil hidrodinâmico gerado pela interação fluido-estrutura em uma jaqueta de plataforma fixa hipotética convertida em recife artificial (RA) utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional, por meio de uma análise comparativa entre diversas formas de corte e afundamento. Busca-se a configuração que produz a maior região de ressurgência localizada, em termos de altura e volume relativos, além da velocidade vertical média, características importantes para a eficiência do RA na produção de biomassa e atração de fauna marinha.

Os recifes artificiais oriundos de jaquetas descomissionadas são estudados apenas sob o aspecto da interação fluido-estrutura, não tratando outros fatores igualmente importantes, tais como: materiais, integridade estrutural, temperatura, turbidez e salinidade da água, presença de nutrientes, impactos socioeconômicos, custos e outros pontos de decisão que integram o pacote de estudos necessários para a implantação de um RA. Também não são estudados, neste trabalho, aspectos técnicos relacionadas ao corte, desmontagem, içamento e transporte de estruturas *offshore*, apesar destes serem fatores decisórios igualmente importantes.

1.2. SUMÁRIO

Este trabalho inicia-se pela revisão bibliográfica (Capítulo 2) sobre descomissionamento na área de óleo & gás *offshore*, a utilização de recifes artificiais e a relação entre a eficácia destes com os perfis do escoamento da corrente marinha interagindo com a estrutura, traduzindo-se no aumento da biodiversidade local (peixes, comunidade bentônica e algas calcárias). Também é realizada pesquisa, na literatura nacional e internacional, de exemplos de simulações semelhantes para entendimento sobre quais as equações governantes e condições de contorno devem ser adotadas, bem como o grau de similaridade entre os resultados numéricos e experimentais.

No Capítulo 3, faz-se uma descrição geral do problema e do modelo matemático para solução numérica. Para a determinação do modelo de turbulência mais adequado (entre *RNG k- ϵ* , *k- ϵ* padrão, *k- ω* padrão ou *SST*), são executadas simulações computacionais com geometria idêntica à de artigo mais relevante encontrado na literatura, buscando-se obter resultados próximos aos obtidos experimentalmente pelos seus autores.

Em seguida, no item 3.2, são pesquisadas as características das correntes marítimas da costa brasileira com a finalidade de obter as velocidades predominantes em regiões distintas do país (Nordeste, Bacia de Campos e Espírito Santo). É também avaliada a influência das ondas sobre o modelo.

Enfim, de posse de todas estas informações, constrói-se o domínio computacional e executam-se simulações fluidodinâmicas em uma geometria construída a partir de dimensões hipotéticas baseadas em jaquetas reais utilizada em águas rasas (ver APÊNDICE). O software utilizado é o ANSYS FLUENT® 2019 R3 e o modelo geométrico é variado de forma a simular diferentes formas de desmontagem e afundamento da jaqueta.

No Capítulo 4, é feita uma discussão dos resultados, comparando as diversas formas de corte, posicionamento e afundamento da estrutura da jaqueta, com as conclusões principais e recomendações de trabalhos futuros sendo consolidadas no Capítulo 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DESCOMISSIONAMENTO OFFSHORE E RECIFES ARTIFICIAIS (RAs)

No início dos anos 2000, Ruivo (2001, p. 22) estudou os aspectos relacionados a custos e fatores ambientais no cenário internacional e brasileiro apontando, já naquela época, para a proximidade do amadurecimento dos poços em produção e a necessidade de se planejar estratégias para a redução dos impactos financeiros sem degradar o meio ambiente e as comunidades costeiras. O autor cita alternativas para a destinação das estruturas descomissionadas, entre elas a remoção parcial ou o tombamento no local para a formação de RAs. Desenhos esquemáticos podem ser vistos na Figura 5 e na Figura 6.

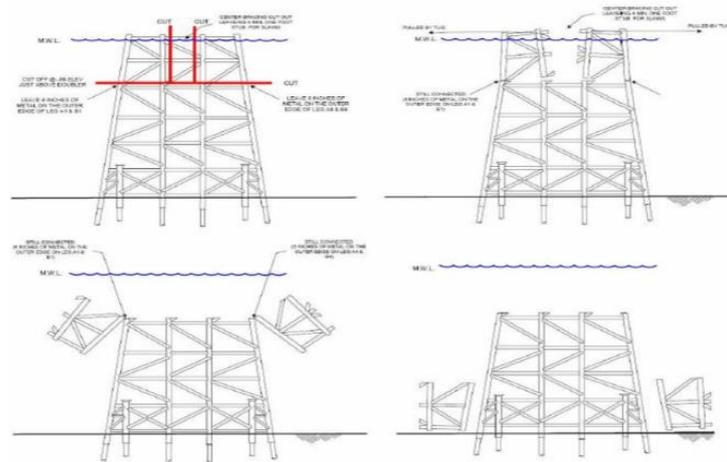


Figura 5: Método de desmontagem parcial de uma jaqueta de plataforma de petróleo
 Fonte: TWACHTMAN SNYDER & BYRD, 2000, p.10 *apud* SALGADO, 2011, p. 69

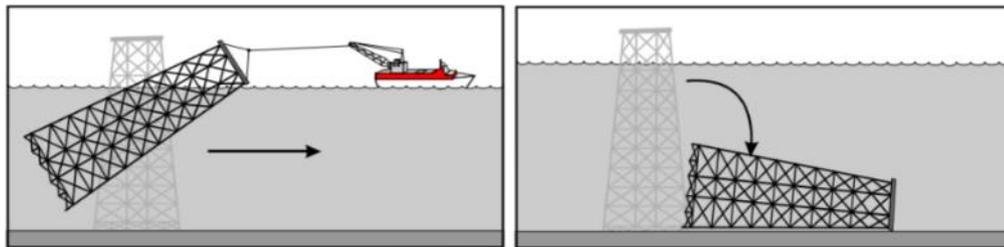


Figura 6: Método de tombamento de uma jaqueta de plataforma para conversão em RA
 Fonte: DAUTERIVE, 2000, p.10 *apud* SALGADO, 2011, p.70

Silva & Mainier (2008, p. 9 e 12) desenvolveram uma extensa pesquisa bibliográfica do cenário nacional e internacional sobre o assunto descomissionamento sob uma abordagem ambiental com o objetivo de promover uma avaliação crítica e apresentar as principais tendências em relação a este assunto. Os autores citam o planejamento do processo como a principal chave para a execução segura, ambientalmente consciente e eficiente de um descomissionamento, também citando a criação de RAs como uma alternativa interessante.

Bastos (2005) apresentou um estudo de caso de implantação de RA pela empresa Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) em convênio com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), localizado da Cidade de Rio das Ostras (Bacia de Campos) mostrando a efetividade deste sistema do ponto de vista socioambiental. O autor sugeriu que fosse criada uma regulamentação específica no Brasil, o que de fato veio a acontecer em 2009, quando a Governo Federal emitiu a Instrução Normativa IBAMA Nº 22, de 10 de Julho de 2009, dispondo sobre o licenciamento ambiental para instalação de recifes artificiais no mar territorial na zona econômica exclusiva brasileira. No presente, essa IN está revogada pela IN IBAMA

Nº 17, de 21 de junho de 2019, porém não está dispensada a necessidade de liberação do projeto de RA junto ao órgão regulamentador.

O trabalho desenvolvido por Bastos (2005), bem como a pesquisa elaborada por Padilha & Henkes (2012) também demonstraram que a utilização de RAs, além de promover um aumento na biodiversidade e favorecer comunidades de pescadores artesanais, também inibe a chamada “pesca de arrastão”, uma vez que as estruturas dos RAs tendem a reter as redes utilizadas nesta técnica. Exceto quando liberada pelos órgãos ambientais, esta modalidade de pesca prejudica os ecossistemas marinhos por ser de natureza predatória, causando não somente a redução brusca das espécies pescáveis como também outros componentes da fauna e flora marinha.

Um conceito importante que tem sido grande fonte de discussões e polêmicas é sobre o real efeito de um recife artificial no ecossistema marinho, podendo ser este de produção de biomassa (desejável, pois acarreta o aumento da biodiversidade) ou apenas de agregação. Neste último caso, o RA poderá fazer com que as espécies, até então bem distribuídas pela região, apenas passem a se concentrar no local do RA, podendo causar sobrepesca e a consequente redução da quantidade de seres marinhos, gerando um efeito de redução da biodiversidade total (CASTANHARI, TOMÁS & ELLIFF, 2012, p. 318). Entretanto, muitos autores afirmam que a implantação de RAs, quando bem planejada e corretamente projetada, torna-se mais um aliado do que um antagonista em prol das questões ecológicas e sociais (PADILHA & HENKES, 2012, p. 67).

Sammarco (2013) fez um estudo amostral utilizando ROV (*Remoted Operated Vehicle*) para verificar a efetividade dos RAs convertidos a partir de jaquetas descomissionadas pelo programa *Rigs-to-Reefs* no Golfo do México (EUA). O autor comparou cinco jaquetas tombadas com duas que permaneceram em pé, trazendo algumas conclusões importantes:

- Apesar da grande variação na configuração das espécies encontradas, não foi observada uma variação na quantidade total de organismos presentes nas plataformas tombadas em comparação com as que permaneceram em pé;
- A maior ou menor abundância de corais, em número de organismos, varia conforme a espécie que está sendo analisada. Cada espécie reagiu de forma diferente ao processo de desmontagem e tombamento;
- De uma forma geral, observa-se maior concentração de corais em profundidades maiores (~75 m) para as plataformas que permaneceram em pé do que nas que foram tombadas;

- O autor infere que a movimentação da plataforma no momento do tombamento e/ou movimentação para outro local provocou distúrbios nas espécies preexistentes, mudando completamente a configuração dos organismos. Uma das hipóteses levantadas pelo autor é que os mais frágeis se deterioraram durante a movimentação da estrutura.

2.2. RELAÇÃO DOS RECIFES ARTIFICIAIS COM A HIDRODINÂMICA

Vários aspectos do projeto de um RA são relevantes para a execução de uma empreitada deste tipo, porém o foco deste estudo encontra-se na relação dos aspectos hidrodinâmicos e o sucesso de sua implantação sob o ponto de vista do aumento da biomassa (peixes, crustáceos, corais, algas calcárias e comunidade bentônica).

Um dos trabalhos mais completos sobre este assunto foi desenvolvido por Baynes & Szmant (1989), onde as autoras desenvolveram uma pesquisa de campo determinando os efeitos das correntes marítimas nas comunidades bentônicas de um recife artificial situado na costa da Flórida, EUA. O caso em estudo foi o de um naufrágio planejado da embarcação Biscayne, já fora de uso, a uma profundidade de 20m. As autoras fizeram uma comparação do navio, afundado em um ângulo de 35° em relação à corrente predominante, como se ele fosse um aerofólio em situação de estol, ou seja, com perda de sustentação devido ao ângulo de ataque excessivo e a formação de regiões de turbilhonamento (ver Figura 7).

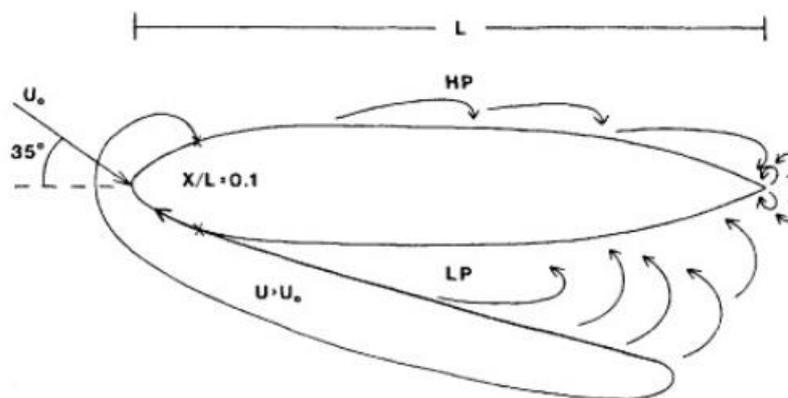


Figura 7: Fluxo teórico da corrente predominante em torno do navio naufragado Biscayne. U_0 é a velocidade do escoamento antes de encontrar a embarcação, X é a distância da popa, com $X=0$ localizado no extremo da embarcação, L é o comprimento do navio, HP e LP indicam as regiões de alta e baixa pressão, respectivamente

Fonte: BAYNES & SZMANT (1989, p. 559).

Estas autoras concluíram que a biodiversidade é função da velocidade das correntes marinhas, onde velocidades maiores promovem uma renovação dos nutrientes e evita a sedimentação (prejudicial à colonização dos organismos). Porém há um limite da velocidade, em torno de 50cm/s, para o qual as larvas tornam-se incapazes de se fixar ao substrato. Elas também recomendam que se tente maximizar o escoamento laminar, pois foi verificada uma redução da biomassa em locais com recirculação excessiva, devido à tendência ao acúmulo de sedimentos.

Um fenômeno frequentemente relacionado ao aumento da eficiência dos RAs em termos de aumento da biomassa é a geração de correntes ascendentes, também denominadas de afloramentos ou ressurgências. Segundo SVERDRUP *et al.* (1942, p. 246) e Ito (2011, p. 246), dentre outros vários autores, estas correntes de ressurgência promovem a redistribuição dos nutrientes acumulados do fundo marinho para regiões superiores, trazendo impactos positivos à biodiversidade. Ito (2011) apresentou os mecanismos que explicam este fenômeno, conforme a Figura 8.

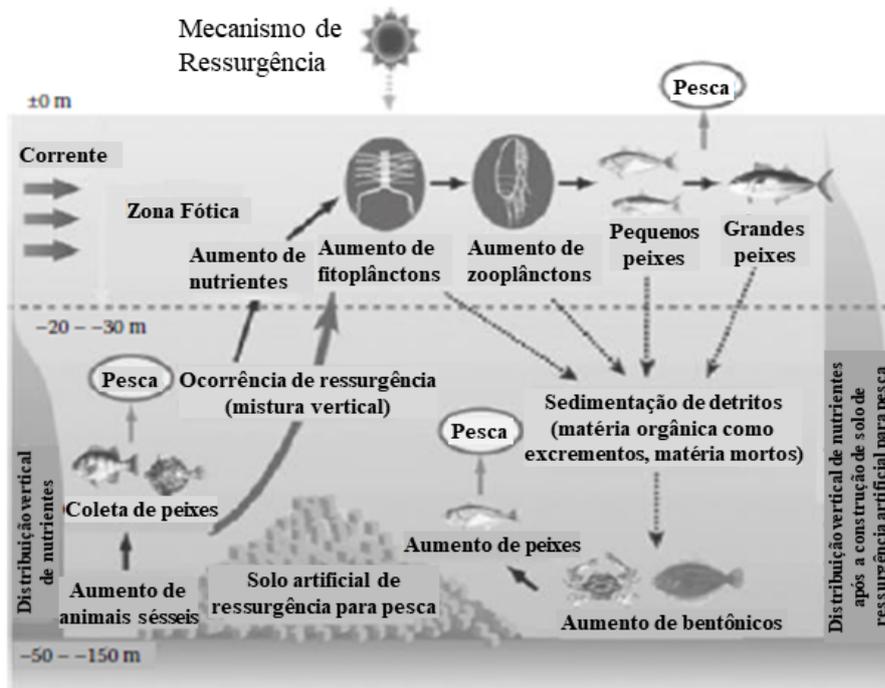


Figura 8: Efeito provocado pelas regiões de ressurgência (*upwelling*) em um RA

Fonte: adaptado de ITO (2011, p. 246)

Embora o fenômeno denominado ressurgência seja tratado, na literatura sobre oceanografia, como um fenômeno macroecológico gerado pela dinâmica de correntes frias e quentes, ou também causado pelas ações do vento (formação de espirais de Ekman) entre outros fenômenos (TRUJILLO & THURMAN, 2011, p. 205), alguns autores também consideram como relevante o efeito de ressurgências locais ao redor dos Recifes Artificiais. Lindberg, Seaman & Zimmerman (2011, p. 29), ao reunir as melhores práticas sobre a implantação de RAs no estado da Flórida, discorreram sobre este efeito:

“As estruturas dos recifes alteram as correntes de maneira diferente em águas mais profundas. À medida que a corrente flui nas superfícies verticais de recife, ela vira para cima, criando afloramentos e redemoinhos. Este fluxo ascendente se mistura com a água de fundo rica em nutrientes com camadas superficiais menos ricas, mas mais biologicamente ativas[...].”

Liu *et al.* (2013) definiram que a ressurgência local é considerada significativa em regiões onde é verificada a relação $v/u_{\infty} \geq 0,1$, ou seja, a velocidade vertical (v) atinge valores de, no mínimo, 10% da velocidade da corrente marinha distante (u_{∞}).

Nakamura (1985, p. 3) também tratou da relação entre as ondulações provocadas pela presença do RA (denominadas *lee waves*) e a atração de peixes ósseos, que sentem as variações de pressão e velocidade pelas suas linhas laterais. Estas ondulações estariam associadas às correntes de ressurgência localizadas citadas nas referências anteriores.

Desta feita, o conceito do termo “ressurgência” aplicado neste estudo é utilizado no contexto dos efeitos localizados provocado pela interação fluido-estrutura, não concernindo ao fenômeno macroecológico classicamente estudado pela disciplina de oceanografia.

2.3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS APLICADAS A RECIFES ARTIFICIAIS

No início dos anos 2000, surgiram os primeiros trabalhos de fluidodinâmica computacional, ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*) voltados para a aquicultura. Huggins, Piedrahita & Rumsey (2005) simularam o processo de deposição de sedimentos nos canais de circulação de água em fazendas de criação de peixes, obtendo bons resultados para o projeto de grades e defletores de fluxo.

Mais especificamente sobre os recifes artificiais, Miao & Xie (2007) demonstraram, via CFD, a relação entre a profundidade e a força hidrodinâmica atuando em um RA em formato cilíndrico aramado. Os autores concluíram que a força hidrodinâmica aumenta sensivelmente

para situações nas quais a razão entre a profundidade e a altura do RA ($H_{profund}/H$) é igual ou menor que 4.

Jiang *et al.* (2010) conduziram testes experimentais em bancada para modelos de RAs em formatos cúbicos ocos com furos circulares e traçaram comparativos entre os valores das forças e velocidades obtidas numericamente utilizando o software ANSYS FLUENT. Os resultados apresentaram desvios entre 2,3% a 11,2% para a força hidrodinâmica e entre 1,3% a 15,8% para a velocidade em comparação com os resultados experimentais, comprovando a viabilidade do uso de simulações numéricas para a estimativa destas variáveis em projetos de RAs.

A confirmação da proximidade entre os resultados obtidos experimentalmente e as simulações numéricas também foi verificada por Liu *et al.* (2012), Liu *et al.* (2013) e Zheng *et al.* (2015). No primeiro trabalho citado, além da confirmação prática dos valores simulados utilizando o ANSYS FLUENT, os autores também determinaram a razão ótima entre $H/H_{profund}$, em termos de maximização da ressurgência local e comprimento da região de vórtices, obtendo o valor de 0,2 para esta relação. Já no segundo trabalho, os mesmos autores utilizaram modelos de RAs em formato de estrela postos sozinhos ou combinados em arranjos de dois corpos iguais, testando os efeitos do aumento da distância entre eles bem como o arranjo da dupla no solo marinho. Zheng *et al.* (2015) propuseram algo bastante similar, porém desta vez com modelos de RAs de três tubos em arranjos dois a dois. Novamente, conduziram testes experimentais em bancada para a confirmação dos resultados, obtendo desvios menores que 10%. Todos estes trabalhos focavam na ampliação da ressurgência local e no prolongamento da região de vórtices.

Com uma abordagem ligeiramente diferente, Ahmed *et al.* (2016) simularam formatos diferenciados de RAs considerando as condições de mar da Malásia. Os autores compararam o tradicional formato de cubo oco vazado com um modelo similar a um capacete de ciclista, elegendo este último como sendo mais eficiente por promover baixo coeficiente de arrasto e, portanto, menos zonas de estagnação e alta pressão. Os autores sugerem que estas características seriam favoráveis para o abrigo de peixes.

Além da função de enriquecimento da biodiversidade, RAs também podem ser utilizados para outras finalidades, como proteção costeira e otimização das ondas em benefício da prática de surfe. Considerando este segundo caso, Mendonça *et al.* (2011) propuseram um modelo de simulação computacional para determinar as melhores configurações de RAs a serem construídos com o intuito de melhorar a qualidade das ondas surfáveis na praia de Leirosa (Portugal). No Brasil, Piccolli (2008) realizou estudo sobre ondas monocromáticas em um RA multifuncional na Baía do Espírito Santo (ES).

Observa-se que nenhum trabalho foi encontrado, nem na bibliografia nacional nem na internacional estudada, que utilizasse a geometria de uma jaqueta ou qualquer outra estrutura de plataforma de óleo e gás para simulação fluidodinâmica com vistas à conversão em RAs.

3. MODELAGENS MATEMÁTICA E NUMÉRICA

3.1. VISÃO GERAL DO PROBLEMA

O problema abordado consiste no estudo de uma estrutura de jaqueta tipicamente utilizada para a exploração de petróleo em águas rasas, desmontada e afundada para a conversão em recife artificial (conforme dimensões em APÊNDICES). Treze formas de desmontagem da jaqueta são estudadas, sendo as cinco primeiras caracterizadas pelo simples tombamento após o corte rente ao solo marinho, porém em direções variadas em relação ao escoamento predominante incidente (ângulo θ , formado entre o eixo da vertical e o escoamento predominante, é variado em 180° , 135° , 90° , 45° e 0°). As próximas quatro formas são representações do corte a 60% da altura em relação ao solo marinho e desmontagem em duas partes, com o posicionamento lado a lado em diferentes distâncias de separação: $0,5 L_b$, $1,0 L_b$, $1,5 L_b$ e $2,0 L_b$, onde L_b é a largura da base da jaqueta. Os demais quatro casos referem-se à execução de dois cortes gerando uma separação em três seções também igualmente espaçadas em $0,5 L_b$, $1,0 L_b$, $1,5 L_b$ e $2,0 L_b$. Em todos os três casos, respeita-se o limite imposto pelo item 3.6 do Regulamento A.672(16) da *IMO (International Maritime Organization)*, que recomenda a manutenção de uma coluna d'água livre de, no mínimo, 55 metros para os casos de manutenção de estruturas descomissionadas no fundo marinho, assim evitando impactar a navegabilidade local. Todos estes casos estão representados nas Figuras 8, 9 e 10, respectivamente.

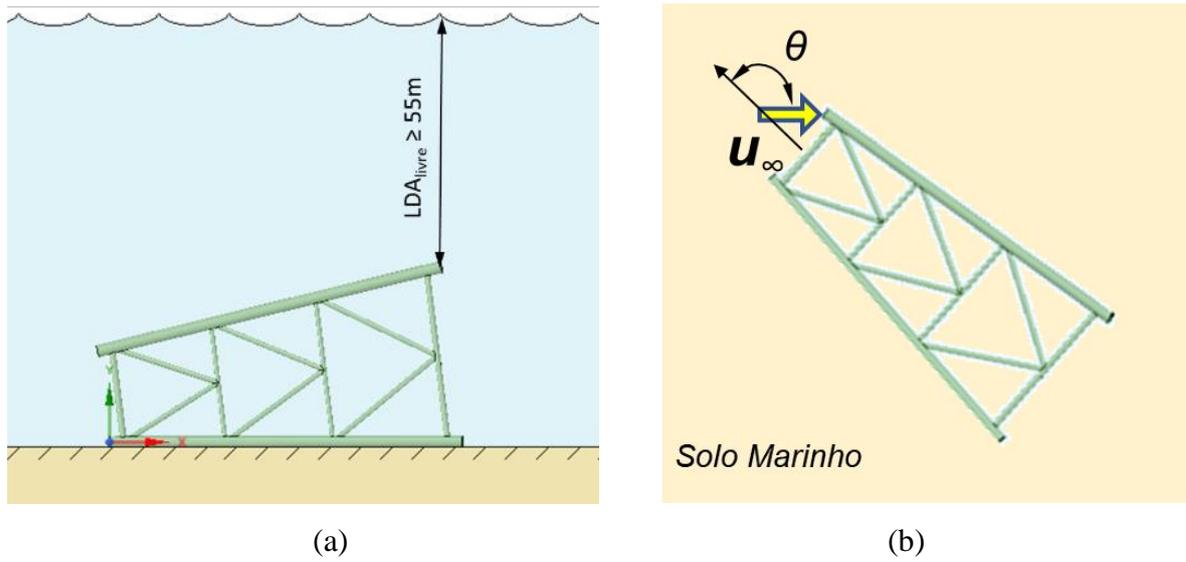


Figura 9: Representação da plataforma tombada no leito marinho, em vista lateral (a) e vista superior (b)

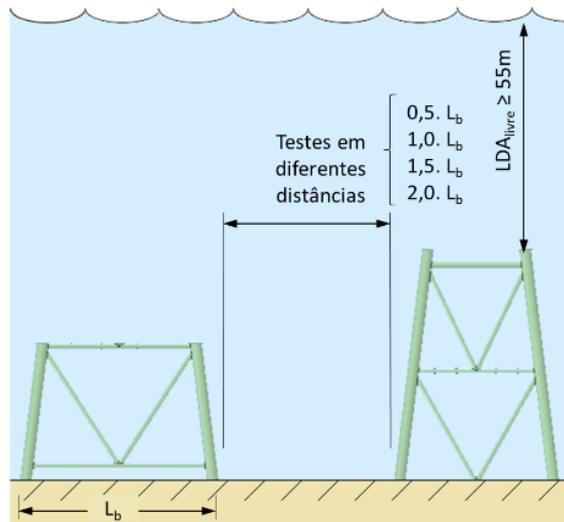


Figura 10: Representação da plataforma cortada em duas partes

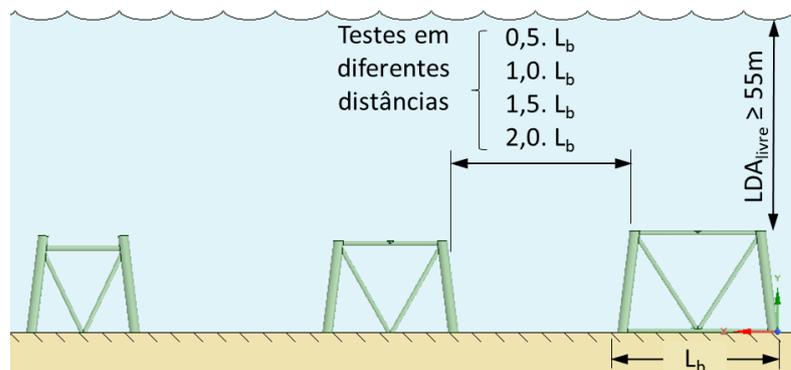


Figura 11: Representação da plataforma cortada em três partes

Objetiva-se avaliar a formação de regiões de ressurgência e recirculação locais formadas ao redor destas estruturas, buscando maximizar a primeira e reduzir a segunda, dentre as diversas formas de corte e afundamento. As principais características hidrodinâmicas escolhidas como relevantes para este estudo são observadas na Figura 12: o volume em verde representa a região onde há ressurgência ($V_{UP} \rightarrow v > 0, I \times u_{\infty}$) e o azul representa a região onde há recirculação ($V_{REC} \rightarrow u < 0$).

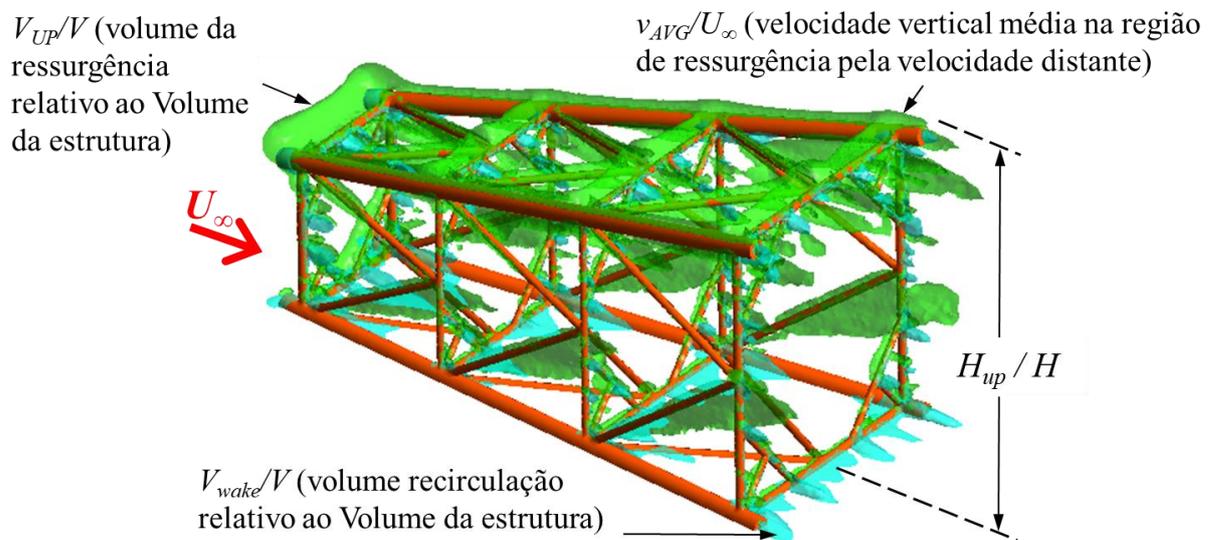


Figura 12: Principais características hidrodinâmicas para estudo da eficácia dos RAs, no caso da jaqueta tombada a 180° com relação ao escoamento

3.1.1. Arranjo Geral e Condições de Contorno

Para simular condições representativas do fundo do mar, constrói-se um domínio do tipo paralelepípedo com as seguintes condições de contorno:

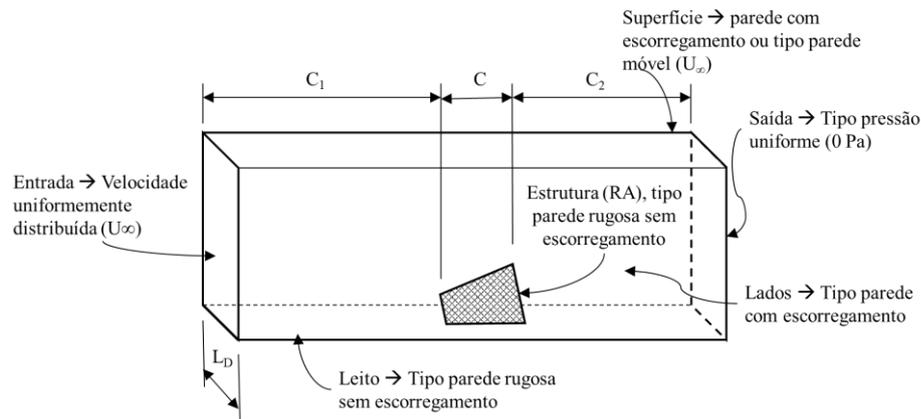


Figura 13: Características de contorno de forma a simular o ambiente marinho

onde L_D é a largura do domínio, C é o comprimento da jaqueta e C_1 e C_2 são as distâncias entrada-jaqueta e jaqueta saída, respectivamente.

Entendendo que o ambiente marinho é virtualmente infinito, as superfícies laterais são consideradas como sendo totalmente lisas (sem efeitos viscosos ou rugosidade). Com a finalidade de simplificar o modelo, considera-se que não há influência da superfície na estrutura da jaqueta, não havendo a necessidade de simulação da interface ar-água e geração de ondas (ver item 3.3, no qual a hipótese de não influência das ondas é confirmada). Assim, a superfície também é modelada como uma parede totalmente lisa.

A superfície de entrada é do tipo velocidade constante (*velocity inlet*), enquanto a face de saída é do tipo pressão manométrica nula e constante (*pressure outlet*). Desprezam-se os efeitos de variação de pressão conforme a profundidade, por considerar o fluido incompressível nestas condições. Desprezam-se os efeitos gravitacionais, por se tratar de um escoamento predominantemente horizontal sem efeitos de flutuabilidade.

Também é considerado o domínio como sendo de profundidade constante, uma vez que o objetivo é verificar apenas a interação do escoamento com a estrutura da jaqueta, sem a preocupação com possíveis variações do relevo submarino.

Outra simplificação imposta é a aplicação do regime estacionário, ou seja, não dependente do tempo, entendendo como sendo suficiente em uma análise meramente comparativa. Em um problema real, o regime transiente deve ser considerado, dada a complexidade do ambiente marinho.

3.2. ESTIMATIVA DAS VELOCIDADES DE CORRENTE MARINHA

Para a determinação das velocidades das correntes marinhas, faz-se um estudo sobre as correntes brasileiras em diferentes regiões utilizando informações provenientes das boias meteorológicas disponíveis na página eletrônica do programa PNBOIA da Marinha do Brasil na internet (ver APÊNDICE B: DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES DE CORRENTE MARINHA). Utilizando apenas os dados obtidos nas profundidades de 10,5 a 13 metros e após o tratamento das informações, incluindo a exclusão de dados espúrios segundo os critérios de qualidade estabelecidos pela própria Marinha, determinam-se as velocidades médias nas direções predominantes para as regiões da costa brasileira onde existem plataformas do tipo fixas, conforme distribuição mostrada no Capítulo 1, Figura 2. Estes dados encontram-se na TABELA 1, a seguir:

TABELA 1 – Velocidades médias* obtidas nas diversas regiões do Brasil

Localização da Boia	Direção Predominante	Velocidade Média da Corrente (m/s)	Série Histórica (Período de Operação da Boia)
Fortaleza (CE)	Oeste (W)	0,42	18/11/2016 a 16/05/2018
Recife (PE)	Norte (N)	0,37	21/09/2012 a 08/04/2016
Porto Seguro (BA)	Leste (E)	0,28	06/07/2012 a 27/01/2017
Vitória (ES)	Sudoeste (SW)	0,33	13/10/2015 a 23/07/2017
Itaoca (RJ)	Sul (S)	0,64 **	04/12/2018 a 14/03/2019
Cabo Frio (RJ)	Noroeste (NW)	0,28	20/07/2016 a 31/10/2018
Santos (SP)	Sudoeste (SW)	0,42	12/04/2011 a 10/08/2018

Fonte: Sítio do PNBOIA, Marinha do Brasil. Acesso em 17/11/2019

Obs.: * média obtida na Direção Predominante a uma profundidade entre 10,5 e 13m.

** a boia de Itaoca faz medições de velocidade a uma profundidade de 0,5m.

Observando-se os dados da TABELA 1, verifica-se que as velocidades de corrente variam entre 0,28 e 0,64m/s. Determina-se a característica do escoamento nesta faixa de velocidades por meio da análise do número de Reynolds, dado pela seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} L_c}{\mu} \quad (1)$$

onde:

ρ = massa específica da água do mar a 20°C = 1025kg/m³

U_{∞} = velocidade de referência do escoamento (m/s)

L_c = comprimento característico (m)

μ = viscosidade dinâmica da água do mar a 20°C = 1,09 x 10⁻³ N.s/m²

Adota-se como comprimento característico (L_c) a altura da estrutura que forma o RA, como estabelecido nas referências bibliográficas (ex.: ZHENG, 2015). No caso da jaqueta tombada, a altura do RA é igual à largura da base (L_b), ou seja, 12,5 metros. Desta forma, o número de Reynolds para 0,28m/s é igual a 3,3 x 10⁶, já caracterizando um escoamento turbulento plenamente desenvolvido, ou seja, acima de 10⁶ (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007, p. 47). Para a velocidade de 0,64m/s, Re assume o valor de 7,5 x 10⁶, ou seja, o escoamento também apresenta as mesmas características. Desta forma, por se tratar de uma análise meramente comparativa, adota-se apenas o valor médio entre a máxima e a mínima velocidade encontrada ao longo da costa brasileira (0,45m/s), assumindo que os efeitos serão similares em qualquer velocidade de corrente que se encontre dentro desta faixa.

Ressalta-se que a maior profundidade na qual as boias do programa PNBOIA conseguem obter dados está entre 10,5 e 13 metros. Bastante afastada, desta forma, do solo marinho, visto que estas boias se situam em lâminas d'água de 200m. Assim, admite-se que o perfil próximo ao fundo e a formação da camada limite serão determinados numericamente durante a simulação e a velocidade, na superfície de entrada, pode ser atribuída como uniformemente distribuída. Entende-se que a adoção desta hipótese não prejudica a finalidade comparativa deste trabalho e simplifica a construção do modelo.

3.3. INFLUÊNCIA DAS ONDAS

Por meio do mesmo banco de dados metoceanográficos fornecidos pelo PNBOIA, é possível extrair os períodos de pico (T_p) das ondas do mar em cada uma das regiões analisadas.

Para os dados considerados válidos, conforme os critérios estabelecidos pela própria Marinha, calcula-se o valor do comprimento de onda (L) que, de acordo com Sorensen (1993, p. 13), é determinado pela seguinte equação, para profundidades maiores do que $L/2$:

$$L = \frac{g T_P^2}{2 \pi} \quad (2)$$

Aplica-se a equação (2) para a obtenção dos seguintes valores para $L/2$:

TABELA 2 – Comprimentos de onda mais frequentes nas regiões da costa brasileira

Localização da Boia	Faixa de Períodos (T_p) mais frequentes	Faixa de Compr. de onda (L) mais frequentes	$L/2$ médio
Fortaleza (CE)	6,2 ~ 7,2s	60 ~ 80m	35m
Recife (PE)	7,2 ~ 8,0s	80 ~ 100m	45m
Porto Seguro (BA)	6,2 ~ 7,2s	100 ~ 120m	55m
Vitória (ES)	6,2 ~ 8,0s	60 ~ 100m	40m
Itaoca (RJ)	6,2 ~ 7,2s	60 ~ 80m	35m
Cabo Frio (RJ)	6,2 ~ 7,2s	60 ~ 80m	35m
Santos (SP)	7,2 ~ 8,0s	80 ~ 100m	45m

Observa-se, pela TABELA 2, que o valor máximo de $L/2$ predominante chega a 55m em alguns casos, mas, em sua maioria, não ultrapassa os 35m. Sorensen (1993, p. 13) define que as profundidades (d) maiores do que $L/2$ são regiões de ondas profundas, onde o diâmetro da órbita da partícula em movimento ondulatório tende a zero próximo ao fundo. Sendo assim, nestas regiões, a influência do efeito das ondas superficiais é praticamente nulo.

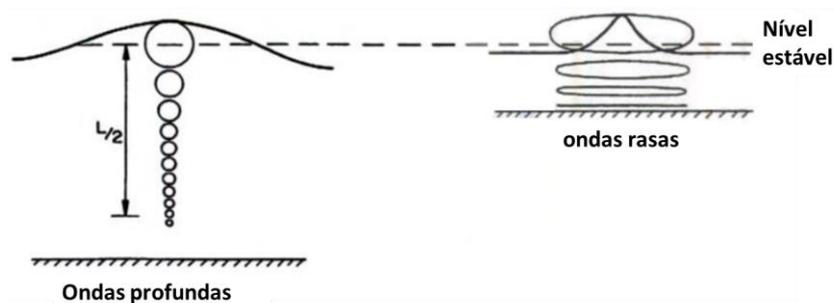


Figura 14: Representação teórica das ondas aquáticas

Fonte: adaptado de Sorensen (1993, p. 16)

No domínio definido para as simulações numéricas, o nível de água livre entre a estrutura do RA e a superfície é sempre maior que 55 metros. Considera-se então que o efeito das ondas será praticamente nulo.

Cabe observar que, mesmo se a superfície de água livre fosse menor, os resultados deste estudo não ficariam invalidados, uma vez que se trata de uma análise comparativa. Porém, recomenda-se considerar o efeito de ondas rasas em situações de profundidades menores para a obtenção de outros parâmetros, tais como força hidrodinâmica atuante na estrutura e coeficientes de arrasto.

3.4. MODELAGEM MATEMÁTICA

3.4.1. Equações de Conservação de Massa e *Momentum*

De acordo com Versteeg & Malalasekera (2007, p. 12), as equações governantes (em notação vetorial, onde i representa o sistema tridimensional de eixos ortogonais) a serem consideradas para um fluido newtoniano incompressível são as seguintes:

- Equação da continuidade (conservação da massa):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

Nesta equação, u_i representa as componentes do campo de velocidades nas direções x , y e z , respectivamente.

- Equações gerais de Navier-Stokes (conservação da quantidade de movimento, ou *momentum*):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (4)$$

Nesta equação, a variável ν é a viscosidade cinemática e f é o termo fonte, representado pelo vetor $(0,0,-g)$. Este termo é desprezado pois os efeitos gravitacionais são

irrelevantes neste caso. A variação da velocidade com o tempo também é retirada da equação, devido ao problema ser tratado como sendo de natureza estacionária.

Como demonstrado no item 3.2, trata-se de um escoamento de natureza turbulenta, de acordo com o número de Reynolds obtido. As equações de conservação do *momentum*, no modelo turbulento, podem ser representadas pelo método da Aproximação de Reynolds das equações de Navier-Stokes, também denominado modelo RANS. Neste modelo, os campos de velocidade e pressão podem ser representados por valores médios acrescidos das componentes flutuantes, conforme as equações mostradas a seguir:

$$u_i(x_i, t) = \bar{u}_i(x_i) + u'_i(x_i, t) \quad (5)$$

$$P(x_i, t) = \bar{P}(x_i) + P'(x_i, t) \quad (6)$$

As variáveis com barras representam os termos médios e as variáveis com apóstrofo representam os termos flutuantes. A hipótese de Reynolds permite que as equações de Navier-Stokes sejam reescritas da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (7)$$

O último termo da equação acima é chamado de tensor de Reynolds e introduz a parcela flutuante ao conjunto de equações de conservação do *momentum*.

Os termos flutuantes podem ser relacionados aos termos médios pela hipótese de Boussinesq:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

onde μ_T é a viscosidade dinâmica turbulenta.

Para solucionar as equações acima, é necessária a aplicação de modelos de turbulência específicos. Os mais comumente utilizados nos pacotes de *CFD* são:

- *k-ε (kappa-epsilon)*: adiciona mais duas equações e duas variáveis: k , que é a energia cinética turbulenta (em m^2/s^2) e ε , que é a dissipação da energia cinética

turbulenta (em m^3/s^3). As constantes associadas às equações deste modelo podem ser do tipo padrão ou do grupo renormalizado (do inglês, *RNG*), conforme Yakhot (1992);

- *k- ω* (*kappa-ômega*): no lugar de ε , utiliza a variável ω , que é a taxa de dissipação específica (em s^{-1});
- *SST* (*Shear Stress Transport*): desenvolvido por Menter (1992), utiliza o acoplamento dos modelos *k- ω* (*kappa-ômega*) e *k- ε* (*kappa-epsilon*), destinando o primeiro às regiões interiores à camada limite e o segundo para o escoamento livre.

No item a seguir, faz-se uma comparação com modelo experimental obtido na literatura para a determinação do melhor modelo de turbulência a ser adotado.

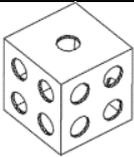
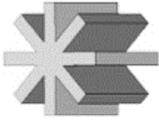
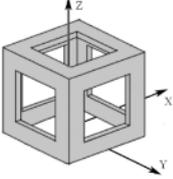
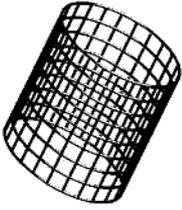
3.4.2. Comparação com Dados Experimentais para Determinação do Modelo de Turbulência

Considerando as referências encontradas abarcando simulação numérica fluidodinâmica em recifes artificiais, toma-se uma decisão baseada em três critérios: (a) existência ou não de dados experimentais (critério excludente); (b) características do escoamento para estudo da eficácia do RA – preferência aos trabalhos relacionados à análise do escoamento ressurgente e vorticidade e (c) similaridade geométrica.

Pelo critério ‘a’, excluem-se da lista os estudos de Ahmed *et al.* (2016), Mendonça *et al.* (2012), Kim (2014) e Kim (2015) pois estes não possuem dados experimentais para comprovação da acurácia. Restam os artigos de JIANG *et al.* (2010), LIU *et al.* (2013), LIU *et al.* (2012), MIAO & XIE, (2006) e ZHENG *et al.* (2015).

Pela Tabela 3, observa-se que apenas os artigos de Liu (2012), Liu (20013) e Zheng (2015) atendem o critério ‘b’, pois são os únicos que apresentam estudos das características do escoamento relevantes, ou seja, a formação de regiões de ressurgência e recirculação.

TABELA 3 – Referências escolhidas para comparação com dados experimentais

Artigo	(a) geometria do RA	(b) características estudadas / finalidade
JIANG <i>et al.</i> (2010)		Força hidrodinâmica (F) para RAs com finalidades gerais.
LIU <i>et al.</i> (2013)		Altura da região de ressurgência (H_{UP}), comprimento da região de região de vórtices (L_e), velocidade média vertical (v_{AVG}).
LIU <i>et al.</i> (2012)		Altura e área projetada da região de fluxo ressurgente (H_{UP} e S_{UP}), comprimento da região de vórtices (L_e), Velocidade média vertical (v_{AVG}).
MIAO & XIE (2006)		Força hidrodinâmica (F).
ZHENG <i>et al.</i> (2015)		Altura e área projetada da região de fluxo ressurgente (H_{UP} e S_{UP}), área projetada da região de vórtices (S_{BACK}), velocidade máxima vertical (v_{MAX}).

Opta-se então pelo artigo de Liu *et al.* (2012) pelo melhor enquadramento ao critério ‘c’, relacionado à similaridade geométrica, pois o cubo oco aproxima-se melhor da jaqueta, que também é vazada em seu interior. Na Figura 15, estão ilustradas as principais características estudadas neste artigo: S_{UP} (área da região de ressurgência), S_{BACK} (área da região de vórtices), L_e (comprimento da região de vórtices), além da velocidade média na região de ressurgência.

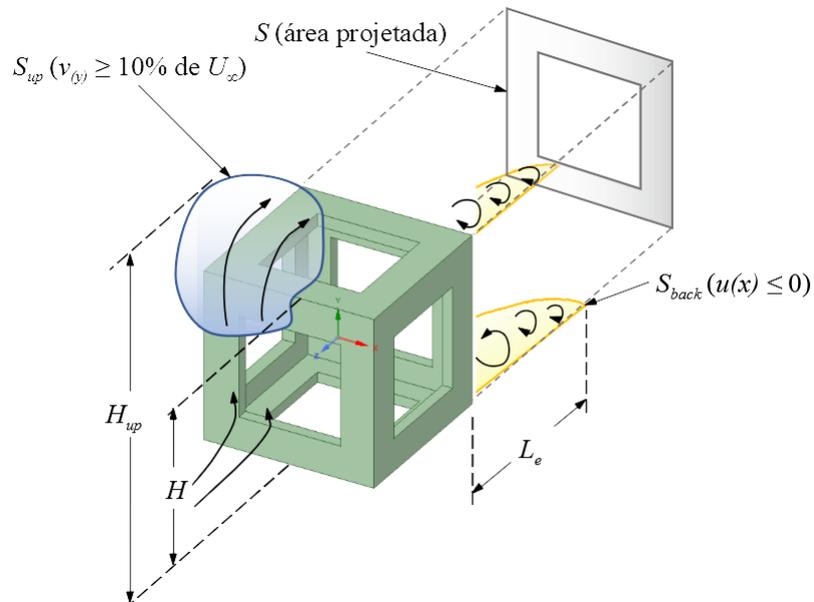


Figura 15: Principais características do escoamento para estudo da eficácia dos RAs, com base no modelo geométrico desenvolvido por Liu *et al.* (2012)

Os autores executam suas simulações considerando o regime como transiente (dependente do tempo), utilizando o modelo *RNG k-ε*, algoritmo de acoplamento *SIMPLEC* e critério de convergência definido no atingimento de valores residuais abaixo de $1,0 \times 10^{-3}$. No entanto, para a simulação presente, assume-se a hipótese de regime estacionário, ou seja, não dependente do tempo.

Constrói-se um domínio com dimensões equivalentes ao do experimento conduzido pelos autores, conforme Figura 16:

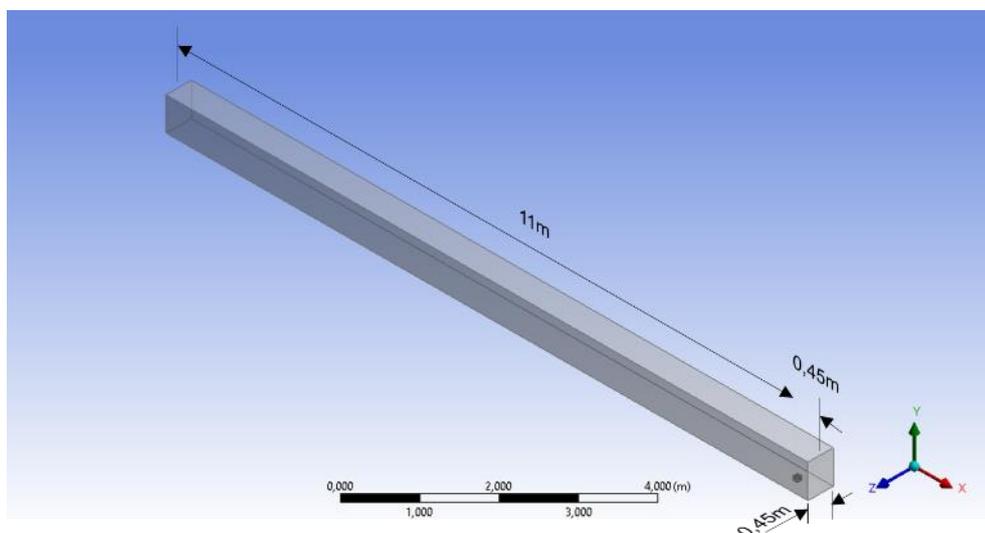


Figura 16: Construção do domínio semelhante à LIU *et al.* (2012)

Diferentes modelos de turbulência são testados: *RNG k-ε*, *k-ε* padrão, *k-ω* padrão e *SST* (*Shear Stress Transport*), obtendo-se os resultados de H_{UP}/H , S_{UP}/S , v_{AVG} e S_{BACK}/S contidos na Tabela a seguir:

TABELA 4 – Valores obtidos na simulação presente em comparação com LIU *et al.* (2012)

Artigo	H_{UP}/H	S_{up}/S	v_{avg} (m/s)	L_E/H	
Experimento LIU <i>et al.</i> (2012)	1,760	0,910	0,0260	0,470	
Simulação LIU <i>et al.</i> (2012)	1,700	0,970	0,0270	0,550	
Simulação presente	<i>RNG k-ε</i>	1,654	0,888	0,0189	0,653
	<i>k-ε</i> padrão	1,595	0,746	0,0183	0,496
	<i>k-ω</i> padrão	1,553	0,624	0,0170	1,052
	<i>SST</i>	1,571	0,685	0,0180	0,659

Os desvios obtidos na simulação presente com relação aos resultados experimentais dos autores são plotados na Figura 17 a seguir:

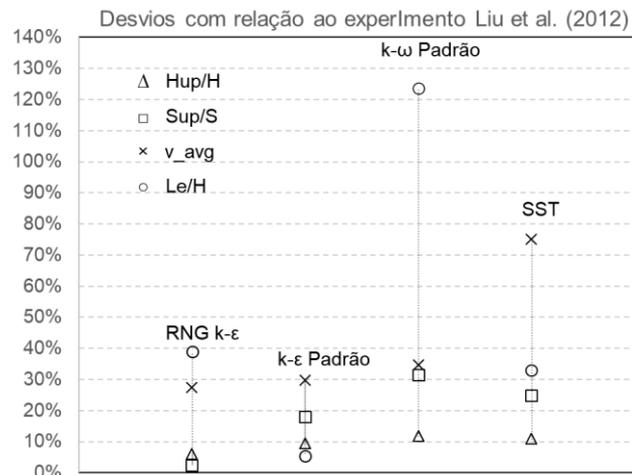


Figura 17: Desvios obtidos com relação ao experimento de LIU *et al.* (2012)

Observa-se uma menor produção de desvios pela utilização do modelo *k-ε* padrão. Na geometria representando a jaqueta em escala real, com números de Reynolds bem mais elevados, os resultados tendem a ser ainda mais favoráveis para este modelo, uma vez que os efeitos na região de camada-limite tendem a ser menos significativos.

Na Figura 18 a seguir, observa-se o perfil de velocidades obtido na presente simulação em comparação com os resultados experimentais e numéricos de LIU *et al.* (2012):

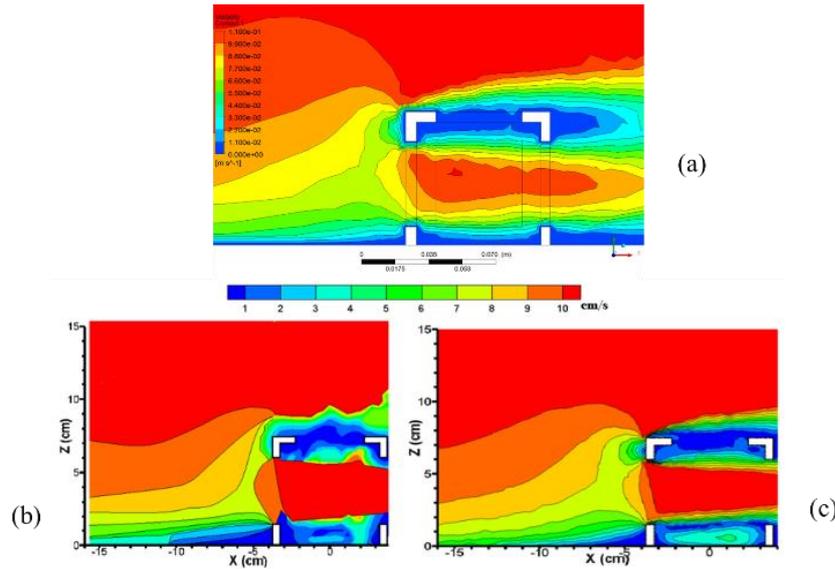


Figura 18: Perfis de velocidade obtidos em: (a) presente simulação, (b) experimento conduzido por LIU *et al.* (2012) e (c) simulação numérica conduzida pelos autores

3.4.3. Modelo de turbulência pelo método k - ε ($kappa$ - $epsilon$) padrão

Conforme Versteeg & Malalasekera (2007, p. 68), as duas equações principais do modelo k - ε padrão são:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \bar{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + 2\mu_T \mathbf{E}_{ij} \cdot \mathbf{E}_{ij} - \rho \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \bar{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_T \mathbf{E}_{ij} \cdot \mathbf{E}_{ij} - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

onde \mathbf{E}_{ij} é o tensor tensão: $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$.

Estas duas equações são fechadas pela relação entre a viscosidade dinâmica turbulenta e as variáveis k e ε :

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

As constantes no modelo k - ε padrão assumem os valores experimentais conhecidos na literatura: $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_\mu = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ e $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ (Versteeg & Malalasekera, 2007, p. 71).

3.4.4. Modelo Numérico por Método de Volumes Finitos (MVF)

De acordo com Versteeg & Malalasekera (2007, p. 85), o MVF consiste na divisão do domínio em um número finito de volumes de controle para a aplicação das equações em cada um deles. Esta técnica permite converter equações de transporte vetoriais e contínuas em uma equação discreta que pode ser resolvida numericamente de forma iterativa. O ANSYS FLUENT utiliza volumes de controle conforme a Figura 19 a seguir:

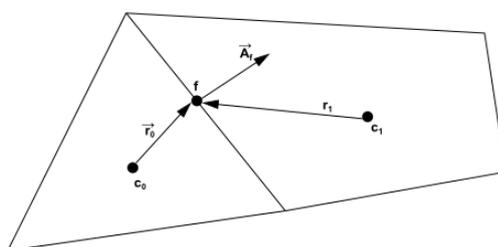


Figura 19: Representação de um volume de controle bidimensional para ilustrar a discretização de uma equação de transporte escalar

Fonte: ANSYS (2019)

Diversas equações discretizadas são montadas para cada célula formando assim uma matriz possível de ser resolvida por um algoritmo computacional. O ANSYS Fluent utiliza o método Gauss-Seidel em conjunto com o método *multigrid* algébrico para a solução do sistema de equações.

Para estabelecer a relação entre o valor da grandeza escalar φ no centro c_0 da célula e no centro c_1 da célula adjacente (conforme Figura 19), é necessário determinar seu valor na face (φ_f) para a solução dos termos convectivos. Este valor pode ser determinado por vários métodos, sendo mais comumente utilizado o esquema *upwind* de primeira ordem, no qual φ_f assume o valor de φ no centro da célula a montante do sentido do fluxo.

Se o campo de pressão fosse conhecido, bastaria calcular os campos de velocidade. No entanto, na maioria dos problemas de fluidodinâmica, a distribuição de pressão e os fluxos de massa nas faces são desconhecidos. A equação discretizada requer o valor da pressão na face entre as células, conforme ilustrado na Figura 19, sendo necessário um esquema de interpolação para calcular os valores de face da pressão a partir dos valores das células. Os mais populares algoritmos de solução numérica para o acoplamento dos campos de velocidade e pressão são o

SIMPLE (Semi-Implicit Method for Linked Equations) e o *SIMPLEC* (Semi-Implicit Method for Linked Equations – Consistent).

3.4.5. Algoritmos numéricos para a solução dos campos de velocidade e pressão

3.4.5.1. SIMPLE (Semi-Implicit Method for Linked Equations)

Proposto originalmente por Patankar & Spalding (1972), é bastante utilizado para a determinação de campos de velocidade e pressão. De acordo com Versteeg & Malalasekera (2007, p. 147), o algoritmo *SIMPLE* segue a sequência de etapas a seguir, onde ϕ representa uma grandeza escalar genérica do escoamento:

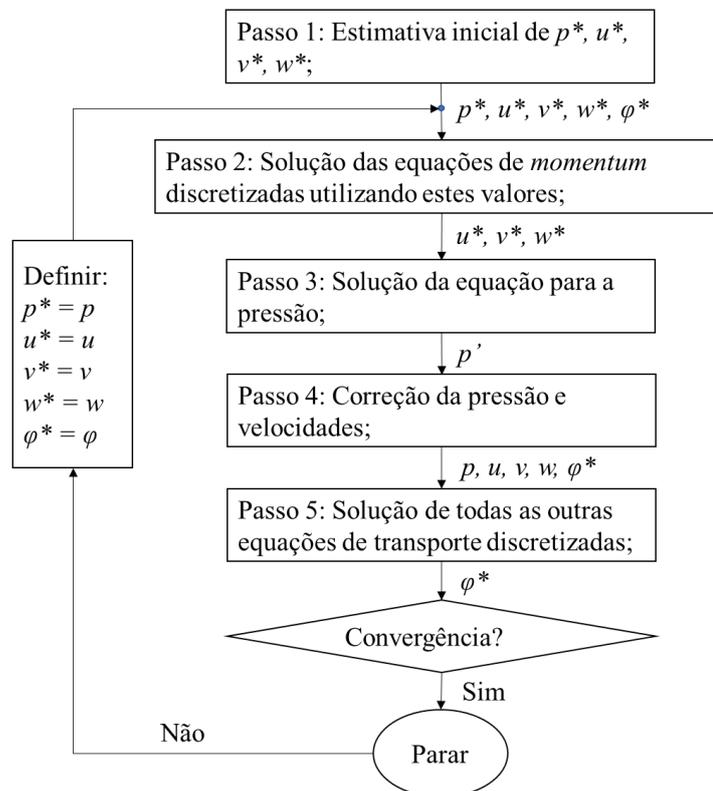


Figura 20: Algoritmo de solução numérica SIMPLE para acoplamento velocidade e pressão.

Fonte: adaptado de Versteeg & Malalasekera (2007, p. 147)

3.4.5.2. SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Linked Equations - Consistent)

O algoritmo *SIMPLEC*, proposto por Van Doormal e Raithby (1984) segue o mesmo exemplo dos passos do *SIMPLE*, mas com a diferença de que as equações de conservação do

momentum são manipuladas de forma a omitir termos menos importantes do que os termos omitidos nas equações do método *SIMPLE*. De acordo com Versteeg & Malalasekera (2007, p. 148), o algoritmo *SIMPLEC* segue a sequência de etapas a seguir onde φ representa uma grandeza escalar genérica do escoamento:

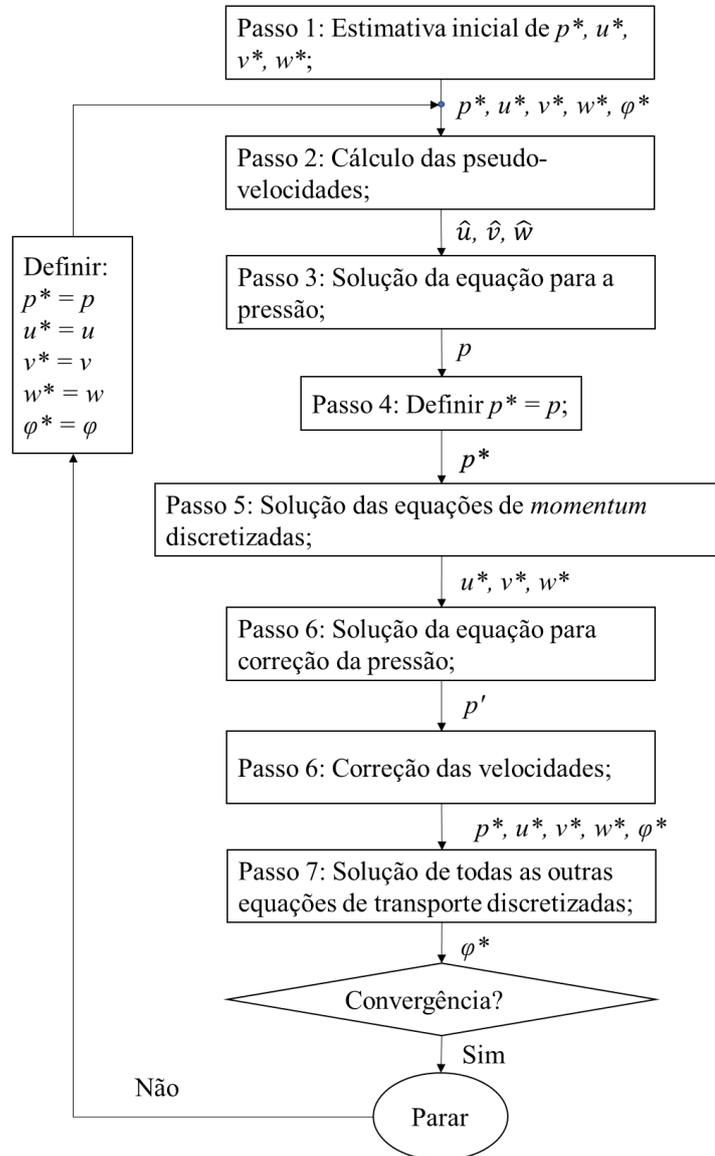


Figura 21: Algoritmo de solução numérica *SIMPLEC* para acoplamento velocidade-pressão.

Fonte: adaptado de Versteeg & Malalasekera (2007, p. 149)

3.5. SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DOS MODELOS DE JAQUETAS CONVERTIDAS EM RAs

3.5.1. Determinação das dimensões do domínio

Conforme a Figura 13 mostrada anteriormente, as distâncias C_1 , C_2 e L_D devem ser tais que garantam as condições de escoamento plenamente desenvolvido conforme o ambiente marinho, além de evitar a interferência das paredes na análise da estrutura convertida em RA. Considerando-se os desvios baixos obtidos por Zheng *et al.* (2015), utiliza-se proporções de domínio inspiradas nas dimensões aplicadas pelo referido autor, sendo: $C_1 = 5C$, $C_2 = 10C$ e $L_D = 10C$, conforme pode ser visto na Figura 22.

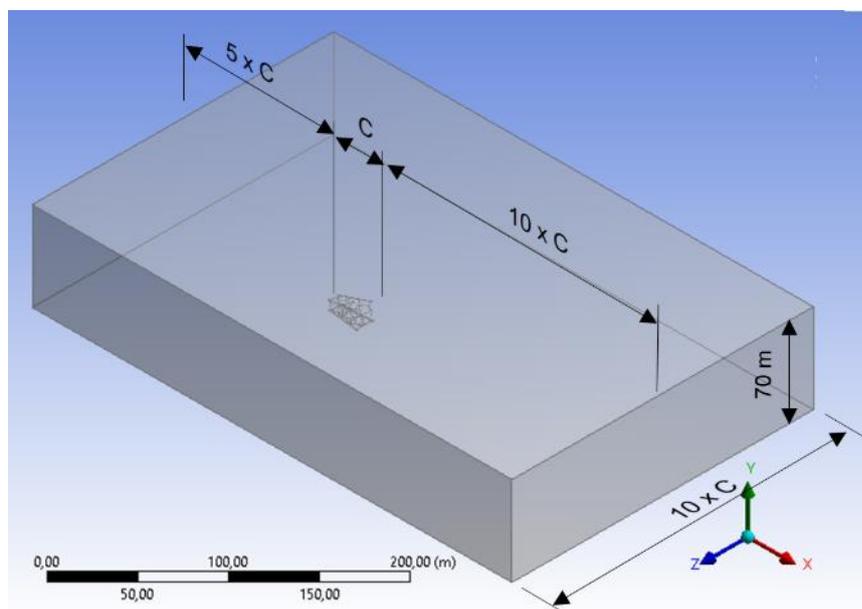


Figura 22: Dimensões do domínio para a jaqueta

3.5.2. Parâmetros Iniciais do Escoamento Turbulento

Os seguintes parâmetros são estimados para a superfície de entrada e saída do domínio:

- Intensidade da turbulência (I_c): conforme recomendação da DNV (VERITAS, 2006, p. 20), para o caso de altas rugosidades, assume-se o valor de 6,5% como valor de entrada para este parâmetro (30% de acréscimo em relação ao valor padrão de 5%);
- Taxa da Viscosidade (μ_T/μ) inicial: relação entre a viscosidade turbulenta e a viscosidade cinemática. Neste caso, é adotado o valor padrão inicialmente adotado pelo ANSYS (2019), igual a 10 (adimensional).

O valor inicial de k pode ser estimado pela equação (12), conforme ANSYS (2019). Já o valor de ε pode ser obtido pela equação (13), que é nada mais do que um rearranjo da equação (11). Estes parâmetros são então inicializados manualmente no software.

$$k = \frac{3}{2} (U_{\infty} I_C)^2 \quad (12)$$

$$\varepsilon = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\mu_T} \quad (13)$$

3.5.3. Rugosidades do Solo Marinho e da Superfície da Jaqueta

Para a determinação da rugosidade do solo marinho, utiliza-se a referência recomendada pela DNV (VERITAS, 2006, p. 19), conforme na TABELA 5:

TABELA 5 – Rugosidade para solos e sedimentos marinhos (Fonte: VERITAS, 2006, p. 19)

Tipo de Solo	Rugosidade (m)
Silte / Argila	$\approx 5 \times 10^{-6}$
Areia fina	$\approx 1 \times 10^{-5}$
Areia média	$\approx 4 \times 10^{-5}$
Areia grossa	$\approx 1 \times 10^{-4}$
Cascalho	$\approx 3 \times 10^{-4}$
Seixo	$\approx 2 \times 10^{-3}$
Pedras	$\approx 1 \times 10^{-2}$
Pedregulhos	$\approx 4 \times 10^{-2}$

Adota-se, hipoteticamente, o valor da rugosidade para areia média (0,00004m).

Para a superfície metálica incrustada da jaqueta, utiliza-se a mesma fonte bibliográfica, onde são encontrados os valores contidos na TABELA 6:

TABELA 6 – Rugosidade para solos e sedimentos marinhos (Fonte: VERITAS, 2006, p. 19)

Tipo de Material	Rugosidade (m)
Aço pintado	10^{-6}
Aço não pintado (não enferrujado)	10^{-5}
Concreto	1/300
Crescimento marinho	1/200 a 1/20

Sabe-se que as superfícies de estruturas submarinas tendem a agregar seres marinhos em sua estrutura ao longo de sua vida operacional. Como se trata de uma plataforma em situação de descomissionamento, adota-se hipoteticamente o valor mínimo de 1/200 (0,005) metros para “crescimento marinho” encontrado na TABELA 6.

O coeficiente de rugosidade, solicitado pelo *software*, representa o grau de heterogeneidade (distribuição) das partículas rugosas pela superfície. Por se tratar de um caso hipotético, no qual não é conhecida a real heterogeneidade, tanto para o solo marinho quanto para o corpo da jaqueta, adota-se então o valor inicialmente atribuído pelo software, equivalente a 0,5, representando uma suposta homogeneidade na distribuição das partículas rugosas nestas duas superfícies.

3.5.4. Penetração da Estrutura no Solo Marinho

Posiciona-se a jaqueta no domínio de forma a representar alguma penetração da estrutura no solo marinho, conforme pode ser observado na Figura 23. Como isto depende de uma série de fatores tais como composição do solo marinho e massa da estrutura, arbitra-se uma penetração equivalente à metade do diâmetro da tubulação da perna da jaqueta, para o caso da estrutura inteira tombada (0,425m).

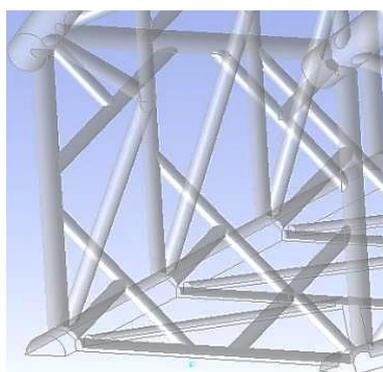


Figura 23: Jaqueta deitada no leito com reprodução de penetração de metade do diâmetro da tubulação das pernas da jaqueta

3.5.5. Construção da Malha

Além da definição das dimensões corretas do domínio, deve-se estruturar a malha que subdivide o domínio computacional nos volumes de controle de modo a estabelecer a melhor convergência dos cálculos numéricos sem, no entanto, sobrecarregar o recurso computacional. No caso de geometrias complexas, a literatura recomenda o uso de malhas não estruturadas. A diferença entre malhas estruturadas e não estruturadas pode ser observada nas duas figuras a seguir:

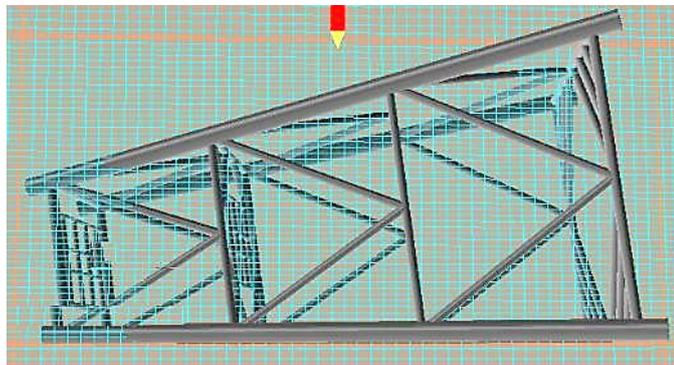


Figura 24: Malha do tipo estruturada

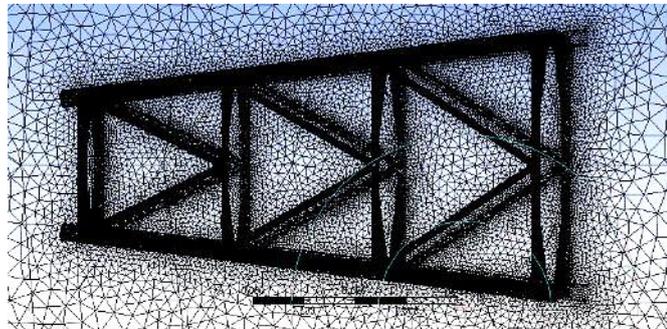


Figura 25: Malha do tipo não estruturada

Como se observa na Figura 24, uma malha estruturada não acompanha a geometria do elemento sólido, ao contrário da malha não estruturada, que se adapta às suas curvaturas. O uso deste tipo de malha é recomendado para geometrias mais complexas (MALISKA & VASCONCELLOS, 2000) pois permite refinamentos locais sem onerar excessivamente o recurso computacional. Formatos tetraédricos dos elementos de malha tem o uso bastante popularizado em simulações tridimensionais pela facilidade de adaptação em relação a outros formatos alternativos (paralelepípedos ou prismáticos).

Uma malha não estruturada pode ser refinada conforme o grau de proximidade a uma superfície ou de forma a garantir que o ângulo entre os elementos não ultrapasse um valor preestabelecido, de forma a não desfigurar a suavidade do sólido em superfícies curvas.

Um fator importante para o refinamento da malha em simulações computacionais fluidodinâmicas é o tamanho mínimo dos elementos próximos às superfícies sem escorregamento. Nestas regiões, segundo Schlichting & Gersten (1976, p. 25), ocorre o efeito da camada limite, no qual a velocidade no contato tende a zero devido à absoluta predominância dos efeitos viscosos do fluido, como pode ser observado na Figura 26 a seguir:

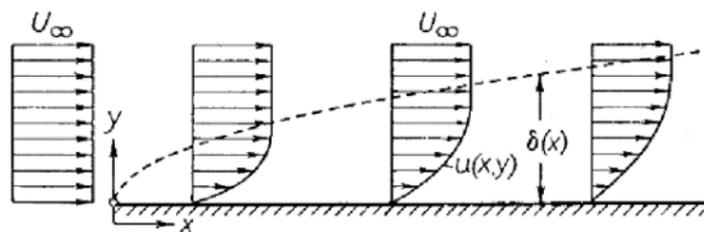


Figura 26: Formação da camada limite em uma placa plana em escoamento laminar

Fonte: SCHLICHTING & GERSTEN (1976, p. 25)

De acordo com Pope (2001) a camada limite em regime turbulento possui diversas subcamadas nas quais o domínio do efeito da viscosidade vai se reduzindo conforme o afastamento (Δy) da parede. Pode-se então calcular o afastamento Δy do centroide do elemento de malha até a região de parede, de acordo com a equação (14) (POPE, 2001, pg. 264-281):

$$\Delta y = \frac{y^+ v}{u_\tau} \quad (14)$$

onde y^+ é o afastamento adimensional da parede e u_τ é a velocidade de fricção, dada por:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (15)$$

onde τ_w é a tensão cisalhante na parede:

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U_\infty^2 \quad (16)$$

O coeficiente de fricção (C_f) pode ser obtido a partir da relação estabelecida por Schlichting & Gersten (1976, p. 654) para o escoamento turbulento em uma placa plana rugosa:

$$C_f = \left[1,89 + 1,62 \log \left(\frac{l}{k_s} \right) \right]^{-2,5} \quad (17)$$

onde k_s é a rugosidade equivalente (que é adotada conforme Tabelas 5 e 6) e l é o comprimento da placa ou da região percorrida pelo fluido.

Calculando-se o valor de Δy , deve-se utilizar o dobro deste valor para definir o tamanho mínimo do elemento de malha no contato com a superfície rugosa, considerando que Δy representa a distância da parede (solo) até o seu centroide.

De acordo com Pope (2001), para valores de y^+ acima de 30 o comportamento matemático da distribuição de velocidades assume a lei logarítmica. Para $y^+ > 50$, os efeitos viscosos tornam-se praticamente nulos e até 1000 considera-se a região como sendo de sobreposição.

Considerando as dimensões da jaqueta, utilizando as equações acima, chega-se aos valores mostrados na Tabela a seguir:

TABELA 7 – Valores de Δy conforme y^+ para a região próxima à parede na jaqueta

y^+	Δy Jaqueta (m)
1	0,000063
50	0,003978
500	0,039782
1000	0,079564

Como o valor de Re é relativamente alto e não há predomínio dos efeitos de viscosidade próximos à parede, adotam-se valores de y^+ na faixa 500 ~ 1000, de forma a garantir que os elementos próximos às regiões de camada-limite comportem-se dentro de uma mesma lei matemática logarítmica.

O tamanho dos elementos próximos a regiões de parede é variado de 0,04m a 0,08m no teste de independência de malha, conforme a seguir. Em regiões distantes, no qual o

escoamento praticamente não é perturbado, impõe-se um tamanho de elemento 100 vezes maior que o da região de parede, com um fator de crescimento gradual igual a 1,2.

Na região próxima ao solo marinho, porém, o refinamento de elementos tetraédricos geraria um número muito grande de elementos de malha em regiões distantes do foco de perturbação do escoamento. Como também é necessário capturar os efeitos de camada limite nesta região sem aumentar excessivamente o número de elementos, a melhor estratégia é a utilização de prismas triangulares (inflados), conforme mostrado na Figura 27.

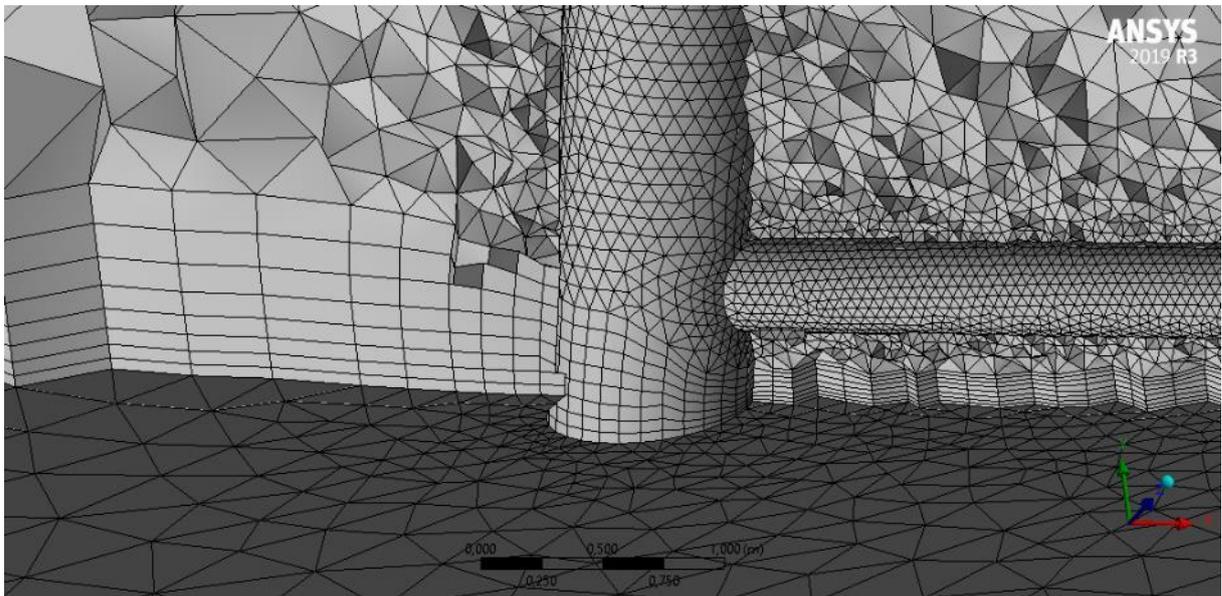


Figura 27: Malha com elementos prismáticos (inflados) nas regiões próximas ao solo marinho

3.5.5.1. Teste de Sensibilidade de Malha

Busca-se estabelecer um número de elementos de malha tal que produza resultados pouco diferentes aos modelos com mais elementos, mas com um custo computacional viável, considerando uma máquina com processador i7, HD do tipo SSD e 16MB de memória RAM. Para isso, um mesmo modelo (jaqueta alinhada a 180° , conforme Figura 9) é simulado diversas vezes variando-se o número dos nós e, proporcionalmente, o número de elementos de malha entre 4,5 e 12 milhões de elementos ($4,47$, $5,39$, $6,76$, $8,93$ e $12,23 \times 10^6$ elementos, respectivamente). Utiliza-se o modelo de regime permanente, com 1.000 iterações (para o qual é verificada uma tendência de estabilização dos valores residuais), algoritmo *SIMPLEC* (referência ao artigo de Liu *et al.*, 2012 e comparação experimental realizada anteriormente),

velocidade de entrada igual a 0,45m/s e demais parâmetros ajustados conforme descrito anteriormente.

Dois pontos ($P1$ e $P2$) de controle são considerados para a avaliação dos valores de velocidade, conforme Figura 28. Estes pontos foram escolhidos após observação, em simulações preliminares, de regiões onde coexistem efeitos de ressurgência e recirculação.

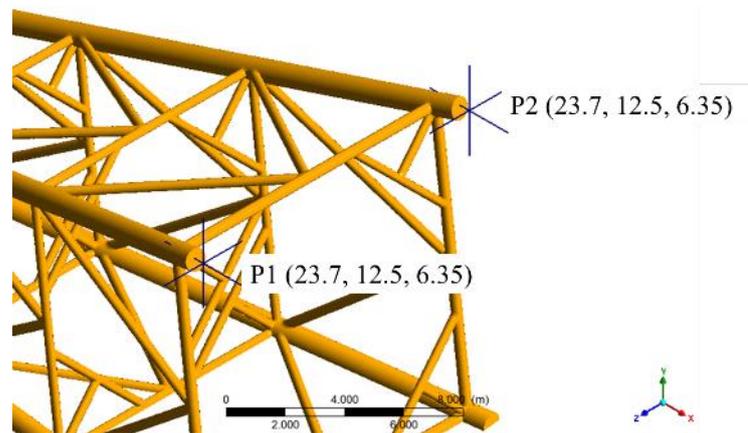


Figura 28: Pontos $P1$ e $P2$ para teste de sensibilidade de malha.

Verifica-se, pela Figura 29, o comportamento do módulo do vetor velocidade e seus componentes nestes dois pontos, permitindo concluir que há variações significativas quando a malha é muito grosseira. Entretanto, as regiões de recirculação ($u < 0$) e ressurgência ($v > 0,1 \times u_\infty$) permanecem igualmente caracterizadas em todas as configurações de malha.

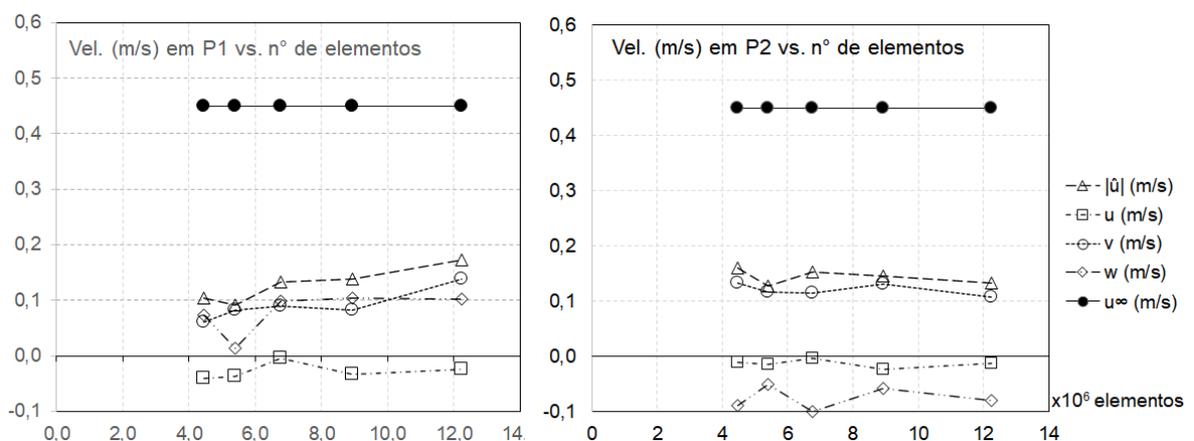


Figura 29: Variação do módulo do vetor velocidade (\hat{u}) bem como suas componentes u , v e w nos pontos 1 e 2 (esquerda e direita, respectivamente) conforme o n° de elementos de malha.

Com relação às principais características estudadas, nota-se uma variação dos volumes de ressurgência e recirculação abaixo de 9×10^6 . Quando o número de elementos se eleva acima disso, a variação das características é pequena. Porém o tempo de simulação aumenta significativamente, como pode ser visto na Figura 30. Os valores residuais finais (após 1000 iterações) também tendem à estabilização a partir de 9×10^6 elementos, permitindo concluir que pouco ganho será obtido com o refinamento da malha.

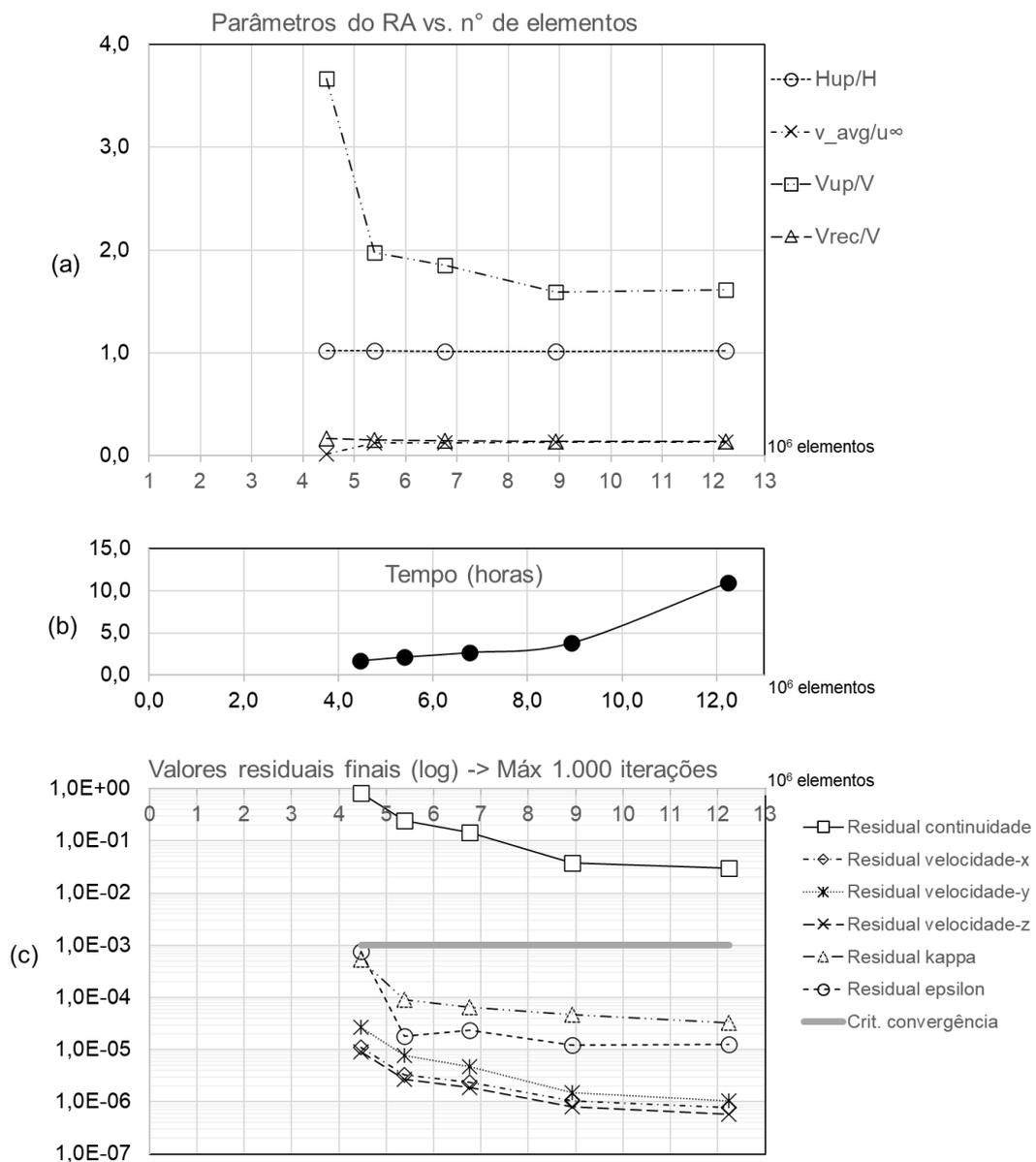


Figura 30: Variação de (a) H_{up}/H , v_{avg}/u_{∞} , V_{up}/V e V_{rec}/V , (b) tempo de simulação e (c) resíduos finais da simulação, conforme o n° de elementos de malha

Para a manutenção do número de elementos de malha próximo à faixa de 9×10^6 , adota-se o seguinte padrão para todas as condições de simulação:

- Elementos tetraédricos;
- Menor tamanho do elemento de malha em superfícies curvas = 0,05m;
- Maior tamanho do elemento de malha no escoamento distante = 5m;
- Fator de crescimento dos elementos de malha = 1,2;
- Elementos inflados na face representando o solo marinho com altura da primeira camada de 0,05m, 8 camadas e fator de crescimento = 1,2.

3.5.6. Simulações em Diferentes Condições de Corte e Afundamento

Simulam-se diversos modos de corte e afundamento da jaqueta mantendo as dimensões do domínio e o mesmo número aproximado de malhas, totalizando treze casos, conforme a seguir:

Caso 1.a) Jaqueta Cortada na Base e Deitada em ângulo $\theta=180^\circ$ à u_∞ ;

Caso 1.b) Jaqueta Cortada na Base e Deitada em ângulo $\theta=135^\circ$ à u_∞ ;

Caso 1.c) Jaqueta Cortada na Base e Deitada em ângulo $\theta=90^\circ$ à u_∞ ;

Caso 1.d) Jaqueta Cortada na Base e Deitada em ângulo $\theta=45^\circ$ à u_∞ ;

Caso 1.e) Jaqueta Cortada na Base e Deitada em ângulo $\theta=0^\circ$ à u_∞ ;

Caso 2.a) Jaqueta cortada a 60% da altura e com as partes distadas em $0,5Lb$;

Caso 2.b) Jaqueta cortada a 60% da altura e com as partes distadas em $1,0Lb$;

Caso 2.c) Jaqueta cortada a 60% da altura e com as partes distadas em $1,5Lb$;

Caso 2.d) Jaqueta cortada a 60% da altura e com as partes distadas em $2,0Lb$;

Caso 3.a) Jaqueta cortada em três partes e com as partes distadas em $0,5Lb$;

Caso 3.b) Jaqueta cortada em três partes e com as partes distadas em $1,0Lb$;

Caso 3.c) Jaqueta cortada em três partes e com as partes distadas em $1,5Lb$;

Caso 3.d) Jaqueta cortada em três partes e com as partes distadas em $2,0Lb$;

De forma prática, o conjunto de casos de 1.a a 1.e representa o corte em região rente ao solo marinho e o posterior tombamento da estrutura. A direção de tombamento seria definida de acordo com a direção predominante da corrente marinha nas proximidades do solo. Já o conjunto de casos de 3.a a 3.d representa a execução de apenas um corte da estrutura acima de

60% da altura total com o deslocamento da parte superior da estrutura feita por uma embarcação guindaste que posicionaria a estrutura na distância desejada. E o conjunto de casos de 2.a a 2.d representa a execução de dois cortes em três seções com o posterior deslocamento das estruturas por embarcação guindaste e o afundamento nas localizações desejadas.

Avalia-se a variação das relações entre a altura relativa da região de ressurgência pela altura total (H_{UP} / H), a velocidade média vertical relativa (v_{AVG} / u_{∞}), o volume relativo da região de ressurgência local (V_{UP} / V) e o volume da região de recirculação (V_{REC} / V).

Utilizando as condições definidas anteriormente, com um número de 1.000 iterações e algoritmo de acoplamento *SIMPLEC*, são finalmente obtidos os resultados apresentados no item a seguir.

3.5.7. Resultados Obtidos nas Simulações

Verifica-se que as regiões de ressurgência se apresentam significativamente mais volumosas para a situação de fatiamento em três partes próximas. Já o menor volume relativo de ressurgência é observado na jaqueta tombada a 180° em relação ao escoamento. Com relação à altura, no caso da jaqueta cortada em 3 partes, a ressurgência atinge um máximo de 10,07m em relação ao fundo marinho, contra 13,37m da jaqueta tombada a 180° . Porém, deve-se considerar que a altura total do RA formado pela separação em 3 partes é de 8,73m contra 12,82m no caso da jaqueta tombada. No próximo capítulo, serão discutidas as vantagens do conjunto do RA ser mais baixo. Estes dados podem ser observados nas Figuras 31 e 32 a seguir.

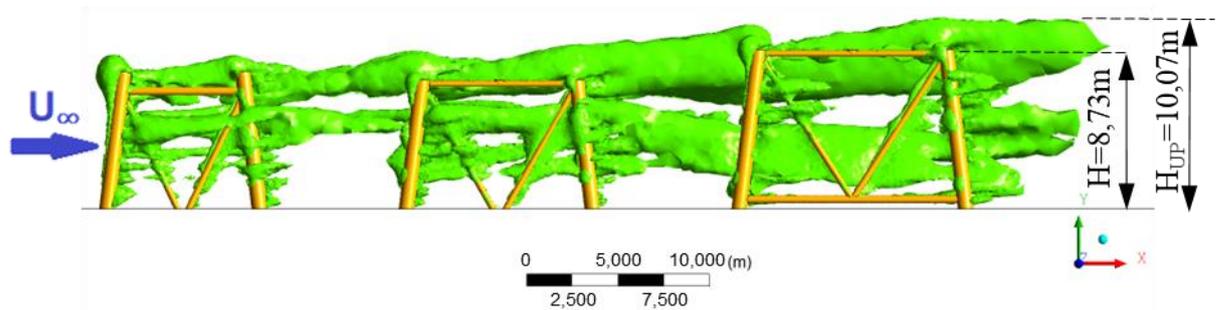


Figura 31: Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 3 partes distadas em $0,5L_b$

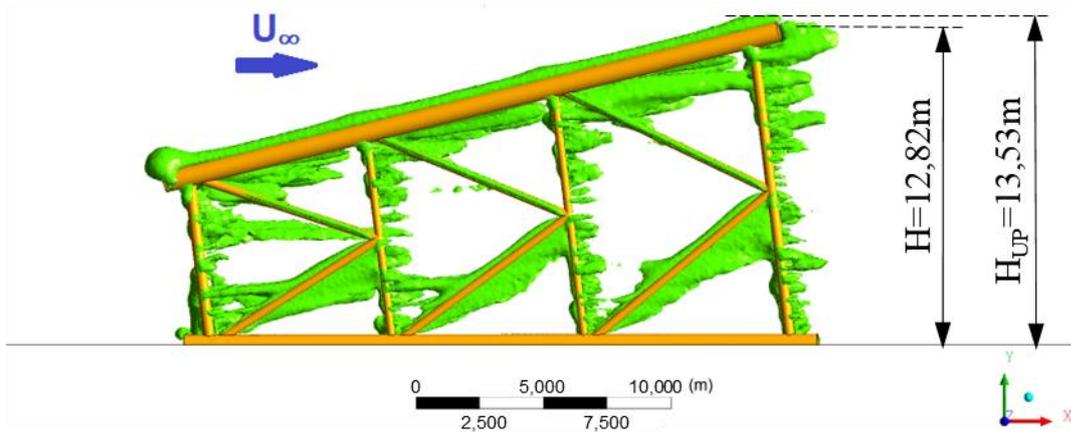


Figura 32: Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a $0,45\text{m/s}$ passando pela estrutura tombada a 180° do escoamento

A condição de corte e afundamento em três seções próximas também provoca recirculação pouco volumosa em relação às demais condições, gerando menos pontos de estagnação, como pode ser visto na Figura 33.

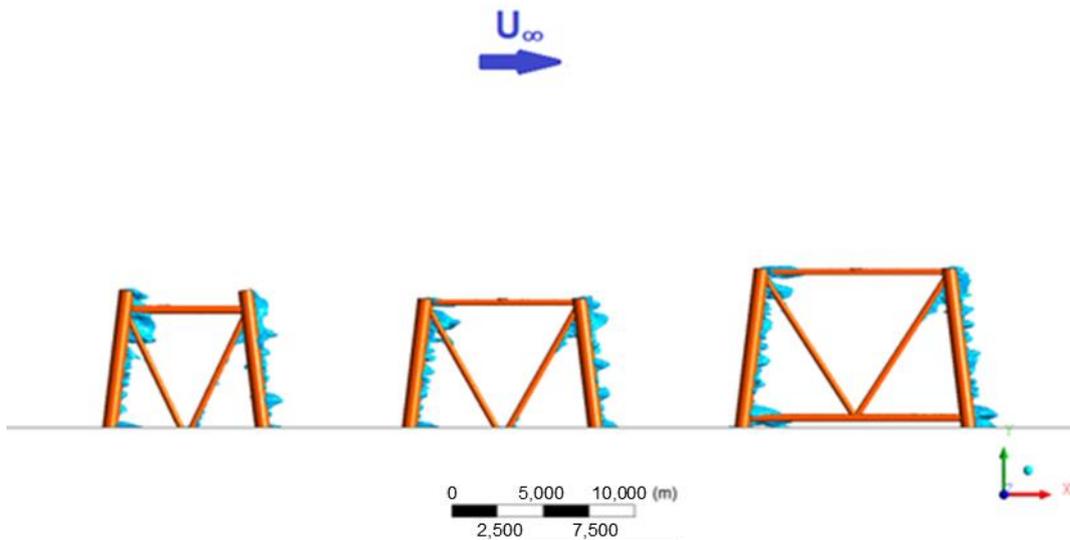


Figura 33: Isosuperfície de contorno do volume de recirculação (em azul) gerado pelo escoamento a $0,45\text{m/s}$ passando pela estrutura tombada a 180° do escoamento

Observa-se, porém, que o aumento da separação entre as seções da jaqueta faz com que as características do escoamento se alterem, reduzindo sensivelmente os volumes de ressurgência, como pode ser observado nas Figuras 34 a 36 a seguir.

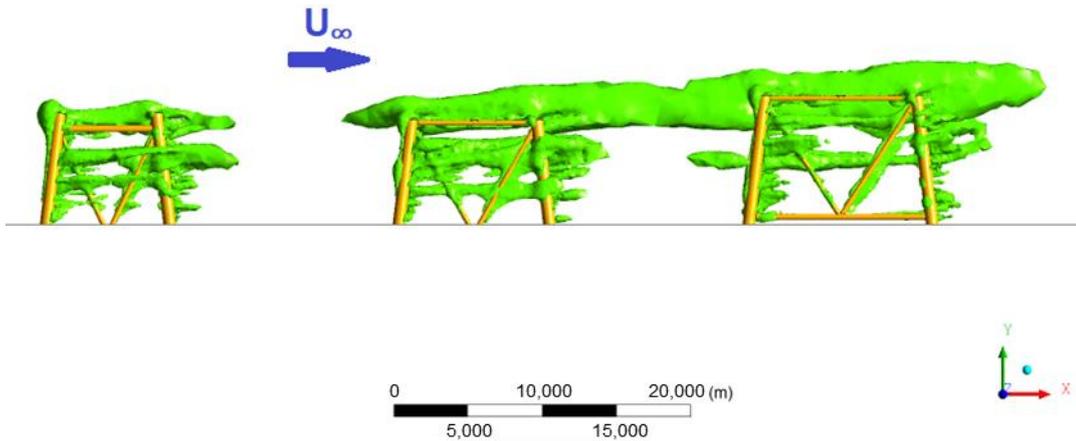


Figura 34: Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 3 partes distadas em $1,0Lb$.

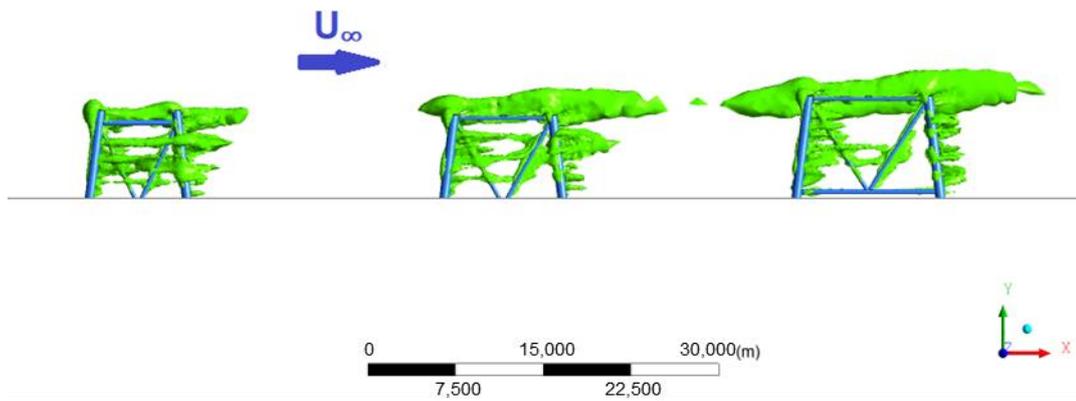


Figura 35: Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 3 partes distadas em $1,5Lb$.

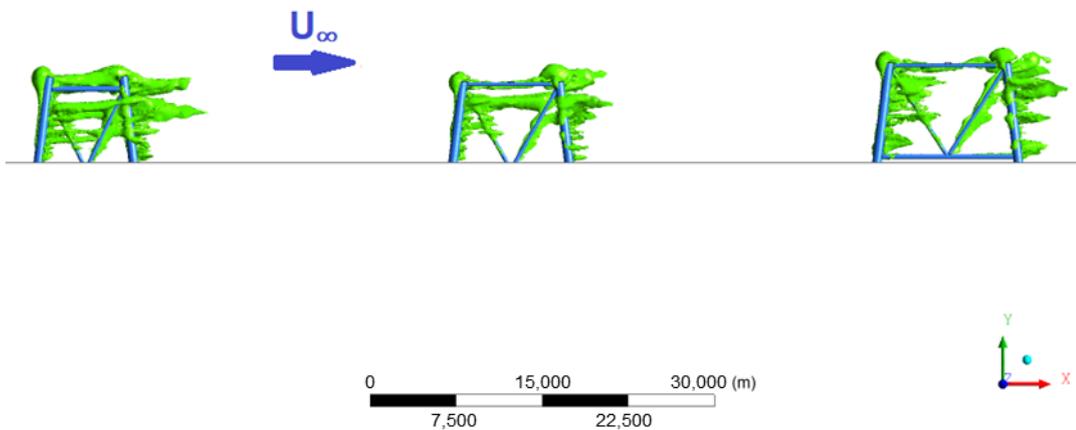


Figura 36: Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 3 partes distadas em $2,0Lb$.

Uma alternativa que apresenta bons resultados, caso o tombamento total da estrutura seja inevitável, é a execução em um ângulo de 90° com relação ao escoamento predominante. Nesta condição, a região de ressurgência é mais volumosa do que no tombamento alinhado à correnteza, apesar de relativamente baixa em relação à altura alcançada. Com relação ao volume da região de recirculação, porém, esta condição traz o resultado menos favorável de todos, pois potencializa a formação de pontos de estagnação localizadas principalmente na proximidade ao solo marinho. A velocidade vertical média também atinge seu maior valor no tombamento da jaqueta também a 90° da corrente predominante. As figuras a seguir mostram as respectivas isosuperfícies:

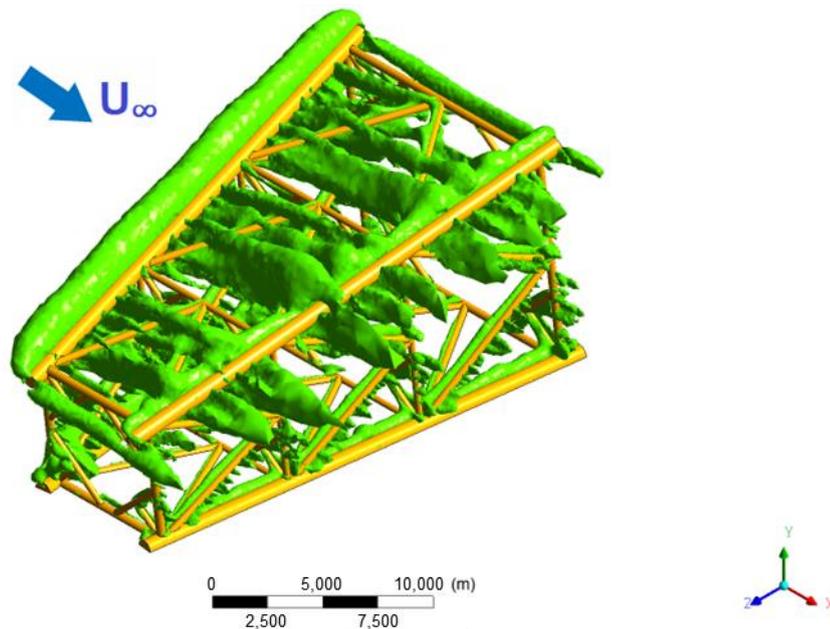


Figura 37: Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a $0,45\text{m/s}$ passando pela estrutura tombada a 90°

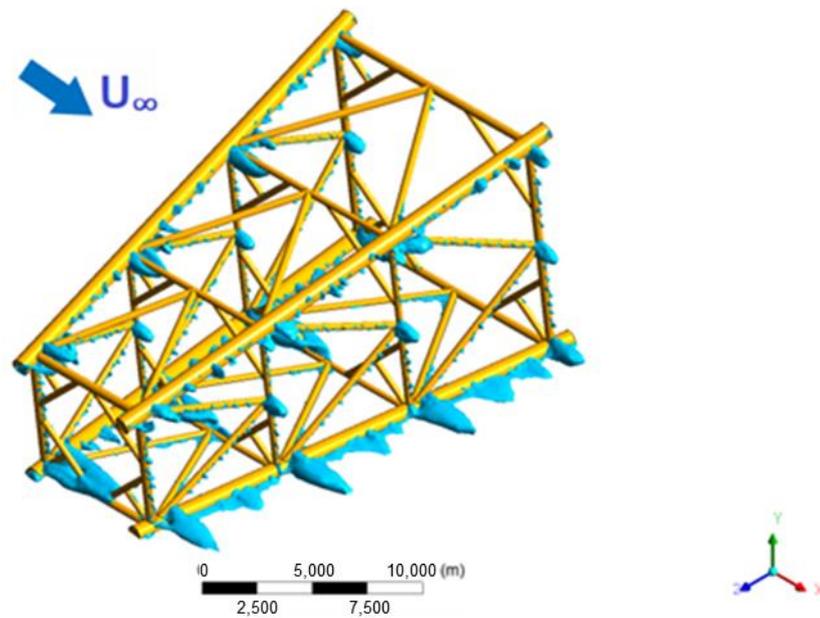


Figura 38: Isosuperfície de contorno do volume de recirculação (em azul) gerado pelo escoamento a $0,45\text{m/s}$ passando pela estrutura tombada a 90°

A estratégia de separar a estrutura em duas partes não se apresenta vantajosa em relação às demais, tendendo a formar volumes de ressurgência e recirculação com dimensões intermediárias. Além disso, o conjunto RA apresenta a maior altura entre todas as alternativas estudadas ($12,82\text{m}$). A Figura 39 mostra a melhor condição para a separação em duas partes, distadas em $1,5L_b$:

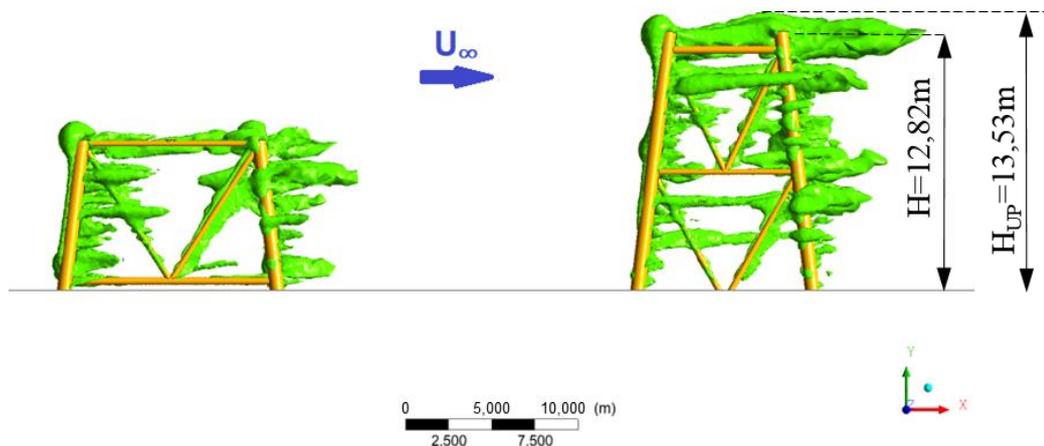


Figura 39: Isosuperfície de contorno do volume de ressurgência (em verde) gerado pelo escoamento a $0,45\text{m/s}$ passando pela estrutura cortada em 2 partes distadas em $1,5L_b$.

Finalmente, todas as características hidrodinâmicas obtidas para cada um dos casos são reunidas nas tabelas e plotadas nos gráficos a seguir:

TABELA 8 – Resultados obtidos para o caso 1 (tombamento da estrutura), $u_\infty = 0,45\text{m/s}$

Caso estudado	1.a	1.b	1.c	1.d	1.e
Ângulo de tombamento (θ)	0°	45°	90°	135°	180°
H_{UP} / H	1,0713	1,0556	1,0553	1,0532	1,0187
v_{AVG} / u_∞	0,1322	0,1418	0,1445	0,1376	0,1314
V_{UP} / V	2,0239	2,8328	4,2877	2,6830	1,5912
V_{REC} / V	0,1418	0,1109	0,4727	0,1038	0,1385

TABELA 9 – Resultados obtidos para o caso 2 (jaqueta cortada em 2 partes), $u_\infty = 0,45\text{m/s}$

Caso estudado	2.a	2.b	2.c	2.d
Distância de separação	0,5L_b	1,0L_b	1,5L_b	2,0L_b
H_{UP} / H	1,0649	1,0655	1,0739	1,0658
v_{AVG} / u_∞	0,1242	0,1262	0,1241	0,1238
V_{UP} / V	2,9649	3,2008	3,2167	2,7207
V_{REC} / V	0,2337	0,1811	0,2261	0,2370

TABELA 10 – Resultados obtidos para o caso 3 (jaqueta cortada em 3 partes), $u_\infty = 0,45\text{m/s}$

Caso estudado	3.a	3.b	3.c	3.d
Distância de separação	0,5L_b	1,0L_b	1,5L_b	2,0L_b
H_{UP} / H	1,2032	1,2678	1,2731	1,1544
v_{AVG} / u_∞	0,1207	0,1210	0,1166	0,1234
V_{UP} / V	6,1806	5,5302	4,8023	2,3975
V_{REC} / V	0,2187	0,2260	0,2298	0,2238

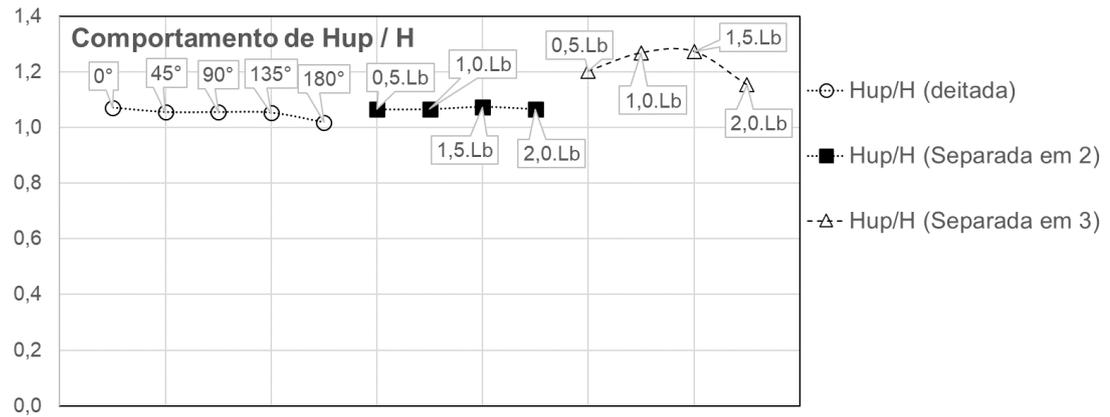


Figura 40: Variação de H_{UP} / H para a velocidade de 0,45m/s

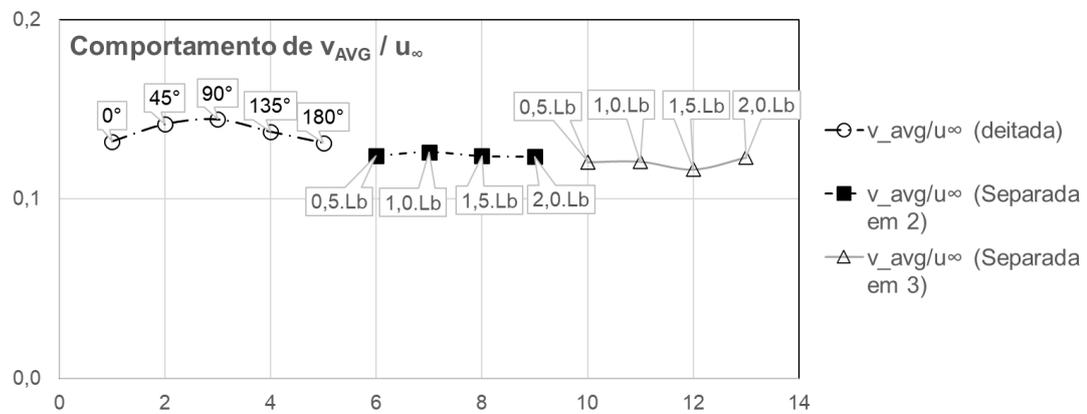


Figura 41: Variação de v_{AVG} / u_{∞} para a velocidade de 0,45m/s

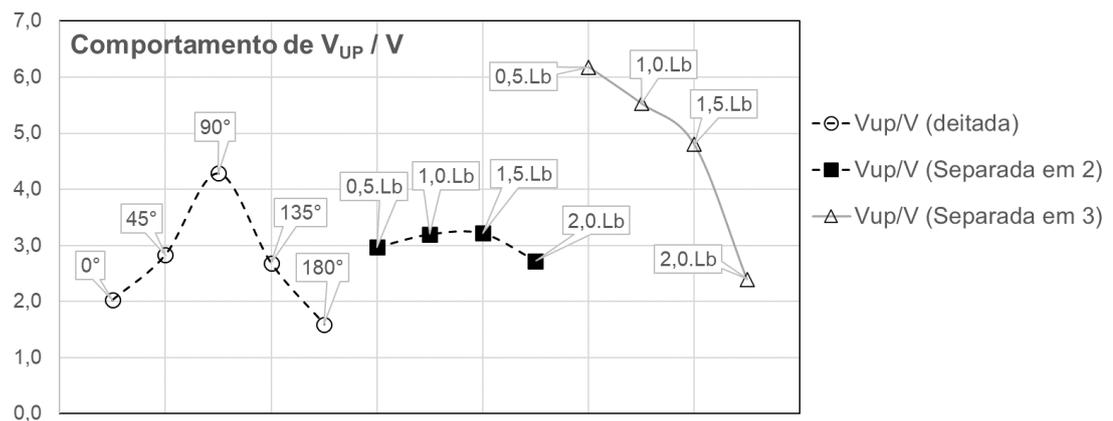


Figura 42: Variação de V_{UP} / V para a velocidade de 0,45m/s

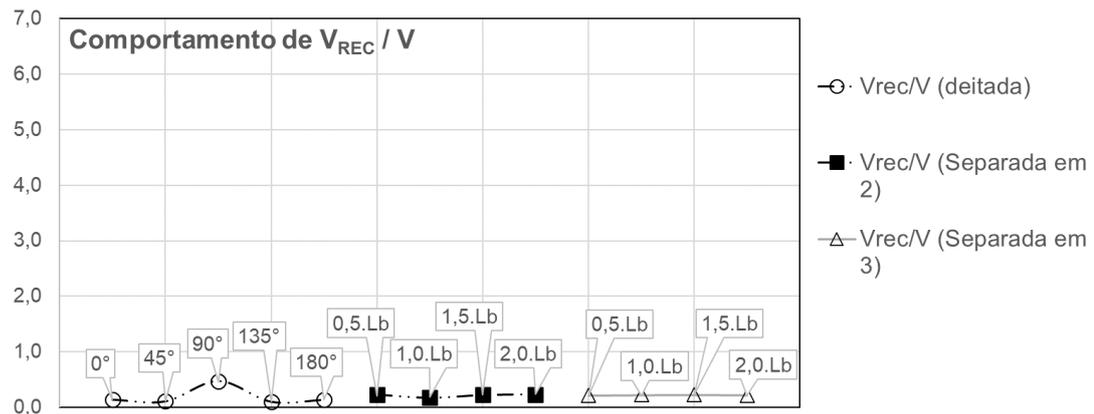


Figura 43: Variação de V_{REC}/V para a velocidade de 0,45m/s

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados mostram que a alternativa de desmontar a jaqueta em três partes e afundá-las a uma distância mais próxima entre elas é significativamente mais vantajosa em termos de geração de ressurgência localizada, sem o aumento excessivo da recirculação e geração de pontos de estagnação. Este modo de desmontagem também apresenta duas outras vantagens: (1) a altura máxima do RA acaba sendo menor, o que permite a execução deste projeto em profundidades menores sem impactar a navegação, como pode ser observado em uma jaqueta hipotética em uma lâmina d'água de 70m cortada em três partes (Figura 44) em relação à jaqueta tombada (Figura 45). Este fator pode ser decisivo, uma vez que a opção pelo tombamento pode demandar transporte da plataforma para outro local mais profundo, aumentando significativamente os custos da operação; (2) evitando-se o tombamento completo, a base da estrutura pode ser mantida no local, preservando parcialmente a biologia que já se encontra agregada (SAMMARCO, 2013, p. 21, demonstrou que durante o transporte e tombamento das jaquetas, quase sempre ocorre desagregação de espécies mais frágeis). Entretanto, o método de desmontagem em três seções pode apresentar outras dificuldades técnicas, uma vez que exige duas operações de corte ao invés de apenas uma, além da necessidade de operações de içamento, movimentação e afundamento de duas grandes estruturas. No caso da inviabilidade de desmontagem da jaqueta em partes, recomenda-se então o tombamento a 90° em relação à corrente de fundo predominante.

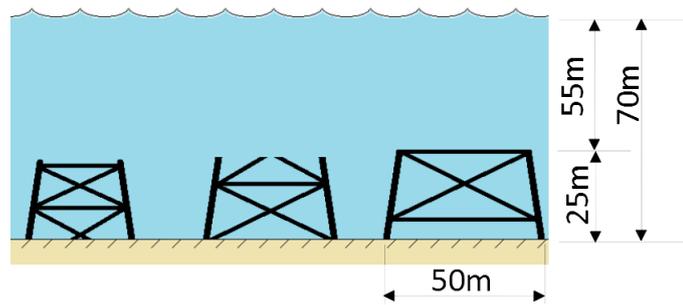


Figura 44: Jaqueta hipotética com largura da base igual 50m e lâmina $LDA=70m$ separada em 4 partes, com altura de água livre resultante igual a 55m.

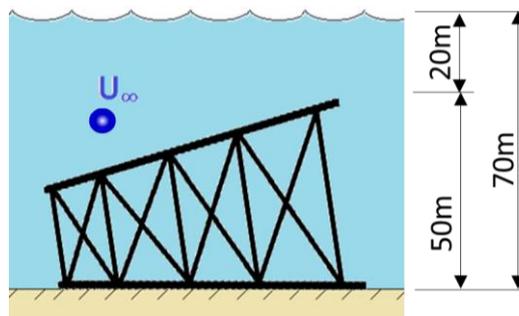


Figura 45: Mesma jaqueta hipotética com largura da base igual 50m e lâmina $LDA=70m$ tombada a 90° do escoamento, com altura de água livre resultante igual a 20m.

O modelo geométrico estudado representa um caso muito específico. Geometrias diferentes devem ser simuladas nas condições aqui apresentadas para confirmar a forma mais eficiente de desmontagem e afundamento. Porém, os resultados indicam que a disposição das estruturas em um maior número de partes dispostas lado a lado e com altura crescente tende a aumentar a região de ascendência do escoamento. A distribuição de velocidades mostrada na Figura 46 mostra como a perturbação gradativa no escoamento ocorre neste tipo de arranjo. Futuros estudos podem ser realizados em outras geometrias com o intuito de confirmar este comportamento.

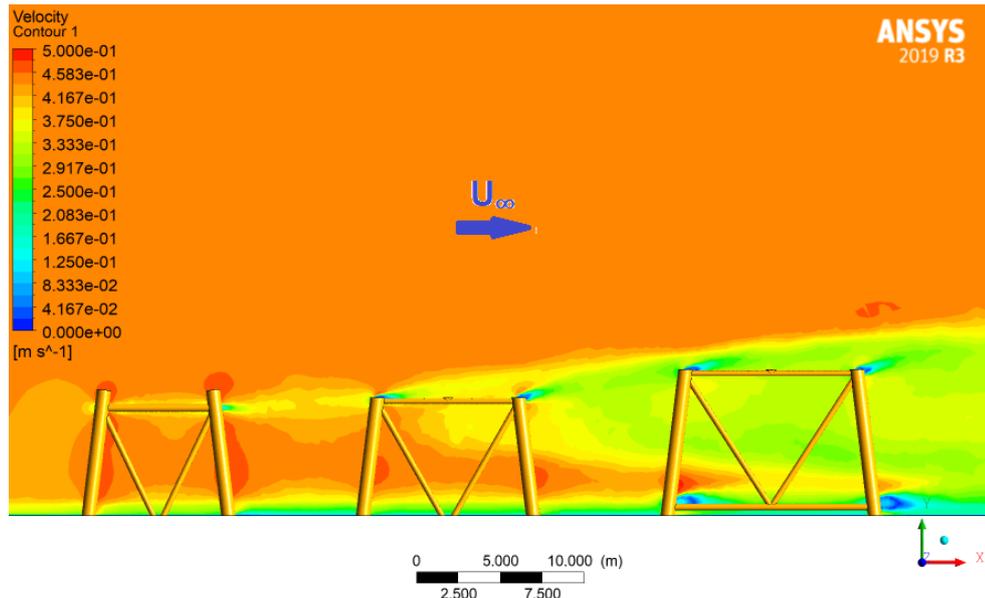


Figura 46: Distribuição de velocidades com escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura cortada em 3 partes distadas em $0,5Lb$.

É interessante observar que, na jaqueta tombada a 180° à correnteza, também há uma gradação de altura do RA. Porém, é provável que a suavidade e a continuidade da estrutura acabam reduzindo as perturbações induzidas ao escoamento, tornando menos proeminentes os efeitos de recirculação e ressurgência em relação a qualquer outro modo de corte e afundamento. Isso pode ser mais bem visualizado na Figura 47.

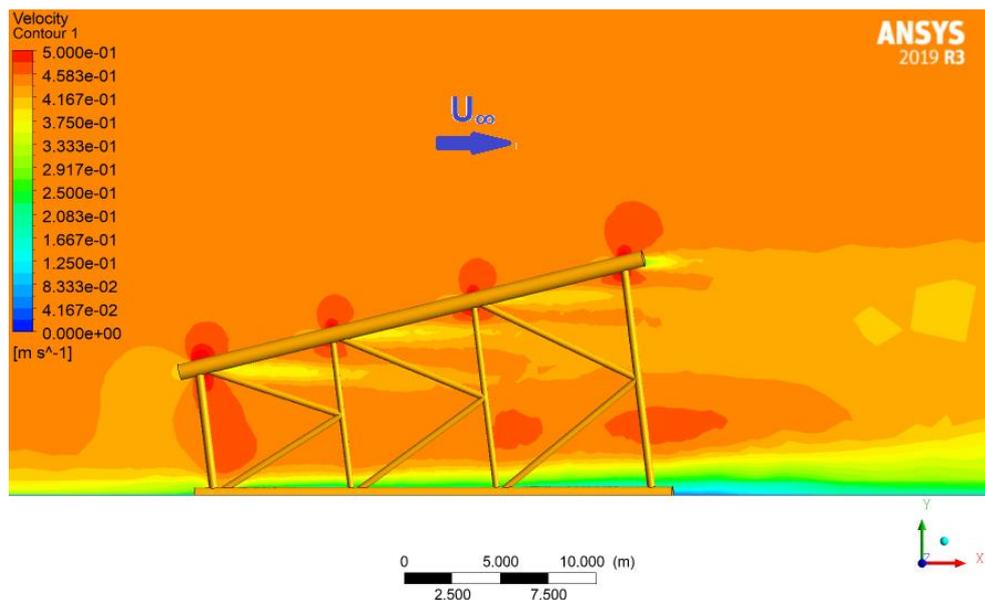


Figura 47: Distribuição de velocidades com escoamento a 0,45m/s passando pela estrutura tombada a 180° do escoamento.

Com relação ao volume relativo da região de recirculação, todos os modelos simulados apresentaram valores baixos, sendo o menor deles obtido na condição de jaqueta dividida em duas com $1,5Lb$ de distanciamento e o maior deles obtido na condição de jaqueta tombada a 90° em relação à correnteza predominante.

5. CONCLUSÃO

O aproveitamento de estruturas de jaquetas de plataformas fixas desativadas para afundamento e conversão em recifes artificiais torna-se uma alternativa atrativa às empresas exploradoras de óleo e gás, uma vez que possibilita a redução de custos com transporte e alocação de estruturas em terra, além de favorecer a recuperação da biodiversidade marinha trazendo também benefícios às comunidades pesqueiras locais. E, como a grande maioria das plataformas fixas no Brasil situa-se na região Nordeste, onde as condições de velocidade de correnteza são favoráveis (abaixo de $0,5\text{m/s}$), tem-se grande potencial de aplicação desta solução no país.

A engenharia e o planejamento de todas as atividades são fundamentais para o sucesso deste tipo de empreitada. Neste contexto, o estudo das características hidrodinâmicas ao redor da jaqueta descomissionada faz-se necessário. Como a análise experimental depende de uma infraestrutura nem sempre disponível, simulações numéricas computacionais podem produzir bons resultados, como é verificado na simulação comparada a experimentos.

Os resultados obtidos nas simulações em escala real indicam que o uso de jaquetas descomissionadas pode ser eficaz na geração de regiões de ressurgência desde que os modos de corte e afundamento sejam adequados. Porém, cabe observar que este efeito é localizado e o fenômeno de produção de biomassa devido ao aumento da circulação de nutrientes pode também ser favorecido apenas localmente, sendo ainda menos proeminente em profundidades maiores. O baixo volume de regiões das recirculações locais pode indicar que não será significativa a formação de pontos de estagnação e sedimentação.

A disposição de estruturas lado a lado com altura crescente na direção da correnteza predominante é a que apresenta os melhores resultados em termos de geração de escoamento ressurgente. Futuros projetos podem ser realizados com o intuito de verificar a associação destas estruturas com outras que estejam sendo descomissionadas.

Com relação à formação de região de recirculação, verifica-se que nos RAs convertidos de jaquetas descomissionadas tende a ser pouco significativa. Essa característica é

interessante para a eficácia do RA, pois há menos pontos de estagnação (onde a velocidade do escoamento é nula) e, conseqüentemente, menor tendência ao acúmulo de sedimentos, propiciando um melhor aproveitamento da superfície da estrutura. A única condição de afundamento da jaqueta que acaba gerando um volume de recirculação um pouco maior é o tombamento da estrutura inteira a 90° da correnteza predominante. Por outro lado, este caso apresenta uma região de ressurgência relativamente volumosa, fazendo com que esta alternativa seja recomendável apenas no caso em que fatiamento em três ou mais seções esteja impossibilitado por motivos técnicos.

Os resultados deste trabalho são apenas indicadores dos caminhos a serem trilhados no sentido de determinar a maneira mais eficaz de desmontagem e afundamento das estruturas para a conversão de uma plataforma descomissionada em um RA. De forma a evitar os efeitos deletérios ao meio ambiente, muitos outros fatores devem ser levados em conta antes do início de qualquer simulação:

- a) Quais as características do ecossistema local? As demais características oceanográficas (turbidez, temperatura, salinidade, etc.) favorecem o aumento da produção de biomassa local?
- b) Sabendo-se tais características, qual o benefício almejado com a instalação do RA (ex.: crescimento da fauna marinha, aumento da produção de pescados, etc.)?
- c) Quais são as possíveis formas de corte e afundamento da estrutura, sob o ponto de vista técnico?
- d) Quais as características do solo marinho e como garantir que não haverá movimentação das estruturas no futuro?

Somente com estas informações deve-se partir para a avaliação de possíveis cenários para a execução das simulações numéricas. Recomenda-se também a avaliação *in-loco* dos perfis de velocidade na proximidade do solo marinho.

Dado que, no presente momento, escasseiam requisitos regulatórios específicos para a execução de projetos de RAs no Brasil, a realização de simulações numéricas bem fundamentadas aumenta a chance de aprovação pelo órgão ambiental e autoridade marítima.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Futuros estudos podem ser conduzidos em regimes transientes, buscando-se obter o efeito da sedimentação sobre a superfície da jaqueta de forma mais detalhada, não apenas pela simples análise das regiões de recirculação. Pode ser interessante considerar o regime transiente e a ação de ondas, bem como da variação dos perfis de velocidade nas diversas profundidades (perfil estratificado e camada limite tridimensional). Sugere-se também a avaliação do fenômeno de arrasto e pressão hidrodinâmica locais em um cenário transiente, permitindo assim a busca pela redução das superfícies desfavoráveis à aderência de larvas e espécies microbiológicas.

Também é possível a elaboração de estudos utilizando fluidodinâmica computacional visando avaliar fenômenos erosivos no solo marinho, devido à interação entre ondas e a estrutura.

Sugere-se também a realização de estudos em canais de corrente para comparação com os dados obtidos numericamente a fim de obter uma validação experimental das conclusões aqui apresentadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Página da ANP na Internet**. Disponível em < <http://www.anp.gov.br> >. Acesso em 17 nov. 2019.

AHMED, Yasser M. *et al.* **Studying the Hydrodynamic Characteristics of New Type of Artificial Reef**. Journal of Advanced Research Design, Vol. 17, No. 1, Pages 1-13, 2016.

ANSYS, Inc. **ANSYS Fluent Theory Guide & User Guide**: Release 19.3, 2019.

BASTOS, Luciana de Figueiredo. **O Uso de Recifes Artificiais como Instrumento de Suporte à Pesca em Regiões Produtoras de Petróleo Offshore**. Niterói, 2005. 193 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) - Universidade Federal Fluminense, 2005.

BAYNES, Tracy W.; SZMANT, Alina M. Effect of current on the sessile benthic community structure of an artificial reef. **Bulletin of Marine Science**, v. 44, n. 2, p. 545-566, 1989.

BUREAU OF SAFETY AND ENVIRONMENTAL ENFORCEMENT – BSEE. **Rigs to Reefs**. Disponível em <<https://www.bsee.gov/what-we-do/environmental-focuses/rigs-to-reefs>>. Acesso em 25 mai. 2019.

CASTANHARI, G.; TOMÁS, A. R. G.; ELLIFF, C. I. Benefícios, prejuízos e considerações relevantes na utilização de sistemas de recifes artificiais e estruturas correlatas. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 12, n. 3, p. 313-322, 2012.

DAUTERIVE, Les. **Rigs-To-Reefs policy, progress, and perspective**. *sine nomine*, 2000.

HUGGINS, Dania L; PIEDRAHITA, Raul H; RUMSEY, Tom. Use of computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceway design to increase settling effectiveness. **Aquacultural Engineering**, v. 33, n. 3, p. 167-180, 2005.

IBAMA, **Instrução Normativa N° 22**, de 10 de Julho de 2009. Dispõe sobre o licenciamento ambiental para instalação de recifes artificiais no Mar Territorial na Zona Econômica Exclusiva brasileiros. Diário oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, n° 58, p. 58, 25 mar. 2009, Seção 1.

IBAMA, **Instrução Normativa N° 17**, de 21 de Junho de 2019. Revoga a Instrução Normativa N° 22, de 10 de Julho de 2009. Diário oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, ed. 120, p. 43, 25 jun. 2019, Seção 1.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO), Resolução A.672(16), **Guidelines and Standards for the Removal of Offshore Installations and Structures on the Continental Shelf and in the Exclusive Economic Zone**, Londres, 1989.

ITO, Yasushi. Artificial reef function in fishing grounds off Japan. **Artificial Reefs in Fisheries Management**, p. 239-264, 2011.

JIANG, Zhaoyang *et al.* Numerical simulation and experimental study of the hydrodynamics of a modeled reef located within a current. **Chinese Journal of Oceanology and Limnology**, v. 28, n. 2, p. 267-273, 2010.

KAISER, Mark J. Offshore decommissioning cost estimation in the Gulf of Mexico. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 132, n. 3, p. 249-258, 2006.

KIM, Dongha *et al.* Wake lengths and structural responses of Korean general artificial reefs. **Ocean Engineering**, v. 92, p. 83-91, 2014.

KIM, Dongha *et al.* Flow characteristics of unit artificial reefs in 3-D placement models. **The 2015 World Congress on Advances on Civil, Environmental and Materials Research - ACEM15**, Korea, 2015.

LINDBERG, W. J.; SEAMAN, W.; ZIMMERMAN, D. **Guidelines and management practices for artificial reef siting, use, construction, and anchoring in southeast Florida**. Florida Department of Environmental Protection, 2011.

LIU, Yan *et al.* Numerical simulation and PIV study of unsteady flow around hollow cube artificial reef with free water surface. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 6, n. 4, p. 527-540, 2012.

LIU, Y. *et al.* A study of the flow field characteristics around star-shaped artificial reefs. **Journal of Fluids and Structures**, v. 39, p. 27-40, 2013.

MALISKA, Clovis R.; DE VASCONCELLOS, João Flávio V. An unstructured finite volume procedure for simulating flows with moving fronts. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 182, n. 3-4, p. 401-420, 2000.

MARINHA DO BRASIL. **Dados PNBOIA**, Disponível em <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia-mapa>>. Acesso em 17 nov. 2019.

MENDONÇA, Ana *et al.* Hydrodynamics around an artificial surfing reef at Leirosa, **Portugal**. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 138, n. 3, p. 226-235, 2011.

MENTER, Florian R. Influence of freestream values on k-omega turbulence model predictions. **AIAA journal**, v. 30, n. 6, p. 1657-1659, 1992.

MIAO, Zhen-qing; XIE, Yong-he. Effects of water-depth on hydrodynamic force of artificial reef. **Journal of Hydrodynamics**, Ser. B, v. 19, n. 3, p. 372-377, 2007.

NAKAMURA, Makoto. Evolution of artificial fishing reef concepts in Japan. **Bulletin of Marine Science**, v. 37, n. 1, p. 271-278, 1985.

PADILHA, R. A.; HENKES, J. A. A Utilização de Recifes Artificiais Marinhos Como Ferramenta de Recuperação da Fauna Marinha. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 1, n. 1, p. 41-73, 2012.

PATANKAR, S. V.; SPALDING, D.B. A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 15, p. 1787-1806, 1972.

PICCOLI, Fábio P. **Estudo numérico de ondas monocromáticas em duas praias e sobre um recife artificial multifuncional na Baía do Espírito Santo**. Vitória, 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.

POPE, Stephen B. **Turbulent flows**, Cambridge University Press, 2001.

RUIVO, F. M. **Descomissionamento de Sistemas de Produção Offshore**. Campinas, 2001. 181 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) - Universidade de Campinas, 2001.

SALGADO, Olavo Junqueira Ferreira Lopes Villela. **Descomissionamento de Estruturas Offshore**. Niterói, 2011. 82 f., Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo). Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Niterói, 2011.

SAMMARCO, Paul W. **Deepwater coral distribution and abundance on active offshore oil and gas platforms and decommissioned Rigs-to-Reefs platforms**. US Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. OCS Study BOEM, v. 217, p. 45, 2013.

SILVA, Renato Saraiva Lima; MAINIER, Fernando Benedicto. O descomissionamento aplicado às instalações offshore de produção de petróleo sob a visão crítica ambiental. In: IV Congresso Nacional em Excelência em Gestão, 2008, Rio de Janeiro. **Anais do IV CNEG**. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2008.

SCHLICHTING, Hermann; GERSTEN, Klaus, **Boundary-layer theory**. Springer, 1976.

TRUJILLO, Alan P.; THURMAN, Harold V. **Essentials of Oceanography**. 3rd Edition. Prentice Hall. 2011.

TWACHTMAN S.; BYRD, Inc. **State of Art of Removing Large Platforms Located in Deep Water-Final Report**. MMS-US Department of the Interior-Minerals Management Service, 2000.

SORENSEN, Robert M. **Basic Wave Mechanics: For Coastal and Ocean Engineers**. John Wiley & Sons, 1993.

SVERDRUP, Harald Ulrik, JOHNSON, Martin Wiggo, FLEMING, Richard H. **The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology**. Prentice Hall, 1942.

VAN DOORMAL, J. P.; RAITHBY, G. D. Upstream to elliptic problems involving fluid flow. **Computers and Fluids**, v. 2, p. 191-220, 1984.

VERITAS, Det Norske (DNV). Free spanning pipelines. **Recommended practice DNV-RPF105**, p. 1-46, 2006.

VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson Education, 2007.

WORLD OIL, Oseberg Vestflanken. **Two Platform, Jacket Set Sail**, <<https://www.worldoil.com/news/2017/6/26/oseberg-vestflanken-2-platform-jacket-set-sail>>. Acesso em 25 de maio de 2019.

YAKHOT, V. et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 4, n. 7, p. 1510-1520, 1992.

ZHENG, Y. *et al.* Numerical simulation and experimental study of the effects of disposal space on the flow field around the combined three-tube reefs. **China Ocean Engineering**, v. 29, n. 3, p. 445-458, 2015.

7. APÊNDICES

APÊNDICE A: DIMENSÕES DA JAQUETA

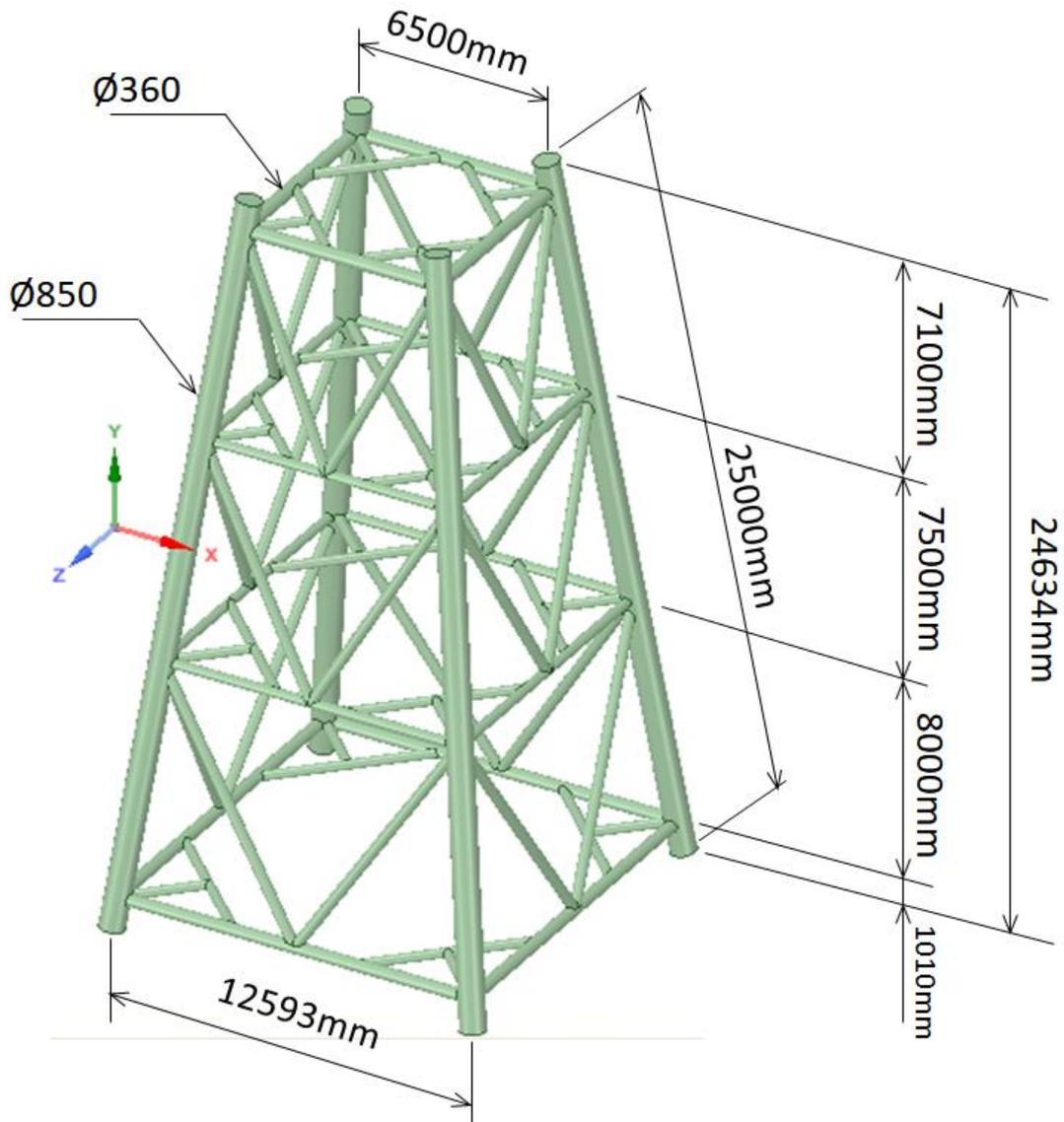


Figura 48: Dimensões da jaqueta modelada

APÊNDICE B: DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES DE CORRENTE MARINHA PELO
PROGRAMA PNBOIA

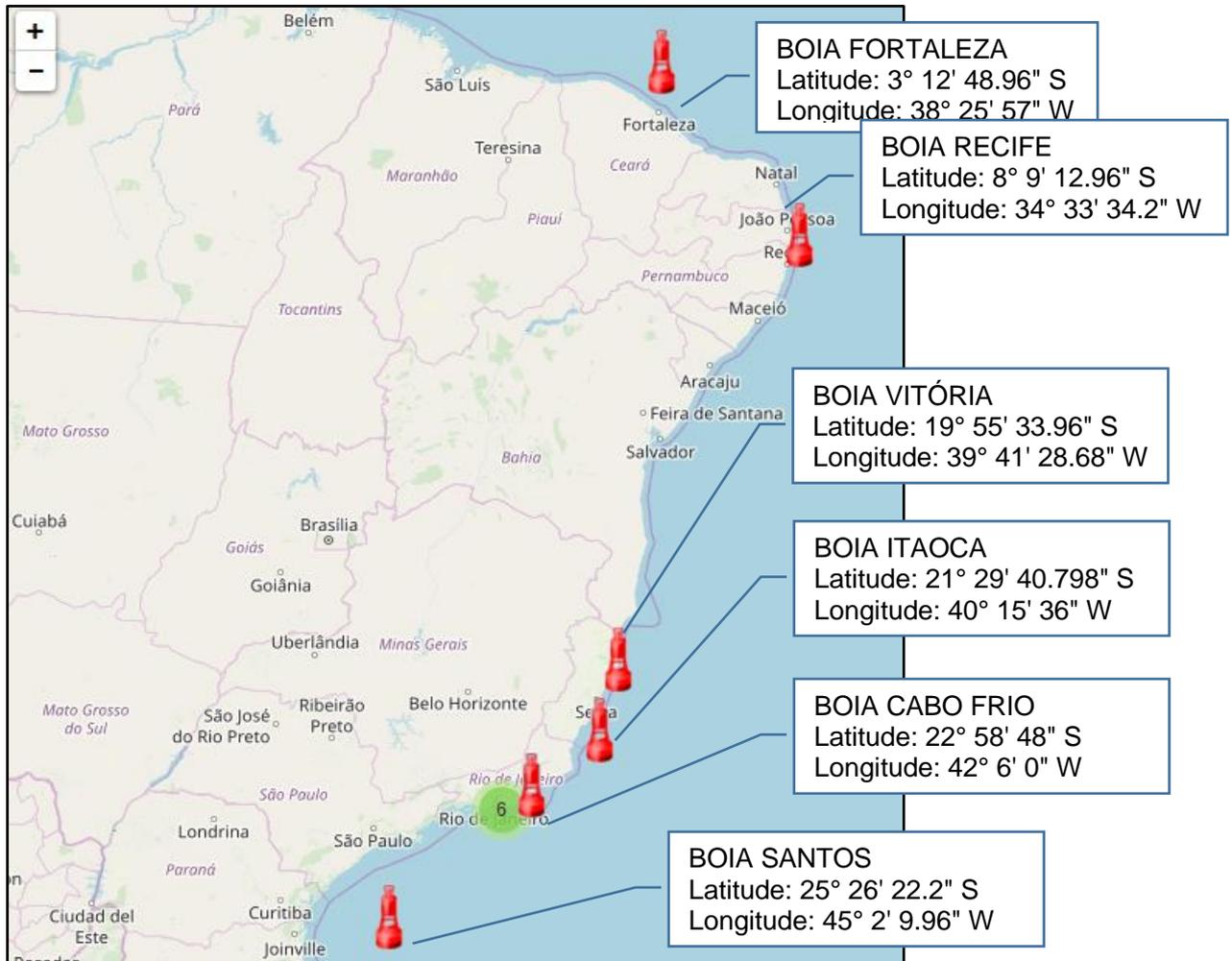


Figura 49: Localizações das Boias Meteorológicas

Fonte: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia-mapa>, Acesso em

18/01/2020

Vel. Corrente (m/s)	DIREÇÃO		BÓIA FORTALEZA (CE)					
	N	NE	E	SE	S	SE	O	NO
0.0 / 0.1	1	0	1	1	0	3	13	11
0.1 / 0.2	4	1	2	0	0	16	147	98
0.2 / 0.3	7	0	1	0	1	7	591	443
0.3 / 0.4	5	0	0	0	0	3	821	559
0.4 / 0.5	1	0	1	0	0	3	683	446
0.5 / 0.6	0	0	1	0	0	0	431	242
0.6 / 0.7	1	0	0	0	0	0	182	116
0.7 / 0.8	0	0	0	0	0	0	126	62
0.8 / 0.9	0	0	0	0	0	0	57	35
0.9 / 1.0	0	0	0	0	0	0	21	27
1.0 / 1.1	0	0	0	0	0	0	20	22
1.1 / 1.2	0	0	0	0	0	0	2	8
1.2 / 1.3	0	0	0	0	1	0	1	1
1.3 / 1.4	0	0	0	0	0	0	0	0
1.4 / 1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5 / 1.6	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6 / 1.7	0	0	0	0	0	0	0	0
1.7 / 1.8	0	0	0	0	0	0	0	0
MÉDIA	0,25	0,15	0,26	0,02	0,75	0,21	0,42	0,42

Mais Frequente ↑
Menos Frequente ↓
Direção mais frequente

Figura 50: Dados de velocidade de corrente na Boia Metroceanográfica Fortaleza

Vel. Corrente (m/s)	DIREÇÃO		BÓIA RECIFE (PB)					
	N	NE	E	SE	S	SE	O	NO
0.0 / 0.1	284	173	128	133	251	285	270	298
0.1 / 0.2	646	231	59	87	406	457	235	434
0.2 / 0.3	721	153	8	18	264	192	35	158
0.3 / 0.4	663	109	1	9	151	58	5	46
0.4 / 0.5	687	53	0	8	126	13	1	21
0.5 / 0.6	584	10	0	5	151	3	0	6
0.6 / 0.7	296	2	0	1	76	0	0	0
0.7 / 0.8	163	3	0	0	4	0	0	0
0.8 / 0.9	43	2	0	0	0	0	0	0
0.9 / 1.0	11	0	0	0	0	0	0	0
1.0 / 1.1	3	0	0	0	0	0	0	0
1.1 / 1.2	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2 / 1.3	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3 / 1.4	0	0	0	0	0	0	0	0
1.4 / 1.5	1	0	0	0	0	0	0	0
1.5 / 1.6	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6 / 1.7	0	0	0	0	0	0	0	0
1.7 / 1.8	0	0	0	0	0	0	0	0
MÉDIA	0,37	0,22	0,09	0,15	0,27	0,16	0,11	0,16

Mais Frequente ↑
Menos Frequente ↓
Direção mais frequente

Figura 51: Dados de velocidade de corrente na Boia Metroceanográfica Recife

Vel. Corrente (m/s)	DIREÇÃO		BÓIA PORTO SEGURO (BA)					
	N	NE	E	SE	S	SE	O	NO
0.0 / 0.1	191	220	371	426	211	196	189	203
0.1 / 0.2	227	358	662	673	450	211	213	312
0.2 / 0.3	148	254	594	578	250	87	64	246
0.3 / 0.4	64	116	544	318	137	13	26	155
0.4 / 0.5	29	44	376	244	50	0	6	97
0.5 / 0.6	4	7	155	101	8	0	1	41
0.6 / 0.7	8	1	57	54	5	2	0	19
0.7 / 0.8	3	0	23	5	2	0	0	4
0.8 / 0.9	1	0	2	0	0	0	0	1
0.9 / 1.0	1	0	0	0	0	1	0	0
1.0 / 1.1	0	0	0	0	0	0	1	0
1.1 / 1.2	1	1	2	1	0	0	0	0
1.2 / 1.3	1	0	0	1	0	0	0	0
1.3 / 1.4	0	0	0	2	0	0	0	0
1.4 / 1.5	1	1	0	1	0	0	0	0
1.5 / 1.6	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6 / 1.7	0	0	0	1	0	0	0	1
1.7 / 1.8	0	0	0	0	1	0	0	0
MÉDIA	0,21	0,20	0,28	0,25	0,21	0,15	0,21	0,27

Mais Frequente ↑
Menos Frequente ↓
Direção mais frequente

Figura 52: Dados de velocidade de corrente na Boia Meteorológica Porto Seguro

Vel. Corrente (m/s)	DIREÇÃO		BÓIA VITÓRIA (ES)					
	N	NE	E	SE	S	SE	O	NO
0.0 / 0.1	188	99	81	94	132	219	190	205
0.1 / 0.2	173	171	48	69	234	496	429	192
0.2 / 0.3	97	111	20	46	282	704	498	82
0.3 / 0.4	46	64	5	21	410	661	314	33
0.4 / 0.5	25	38	5	10	369	546	117	6
0.5 / 0.6	19	17	0	2	283	379	34	5
0.6 / 0.7	8	6	0	1	104	156	5	1
0.7 / 0.8	3	5	0	0	16	19	0	0
0.8 / 0.9	3	1	0	0	1	0	0	0
0.9 / 1.0	4	0	0	0	0	0	0	0
1.0 / 1.1	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1 / 1.2	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2 / 1.3	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3 / 1.4	0	0	0	0	0	0	0	0
1.4 / 1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5 / 1.6	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6 / 1.7	0	0	0	0	0	0	0	0
1.7 / 1.8	0	0	0	0	0	0	0	0
MÉDIA	0,20	0,22	0,12	0,16	0,35	0,33	0,24	0,15

Mais Frequente ↑
Menos Frequente ↓
Direção mais frequente

Figura 53: Dados de velocidade de corrente na Boia Meteorológica Vitória

Vel. Corrente (m/s)	DIREÇÃO		BÓIA ITAOCA (RJ)					
	N	NE	E	SE	S	SE	O	NO
0.0 / 0.1	65	57	20	33	16	12	22	39
0.1 / 0.2	95	120	44	35	20	21	5	36
0.2 / 0.3	13	13	21	24	26	14	1	1
0.3 / 0.4	0	0	2	17	67	12	0	0
0.4 / 0.5	0	0	0	27	137	20	1	0
0.5 / 0.6	2	0	0	15	294	34	1	0
0.6 / 0.7	1	1	0	6	274	19	0	0
0.7 / 0.8	1	0	0	0	232	23	0	0
0.8 / 0.9	0	1	0	0	141	8	0	0
0.9 / 1.0	0	0	1	0	57	0	0	1
1.0 / 1.1	0	0	0	0	10	0	1	0
1.1 / 1.2	1	1	0	0	4	0	0	0
1.2 / 1.3	0	0	0	0	4	0	0	0
1.3 / 1.4	0	0	0	0	0	0	0	0
1.4 / 1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5 / 1.6	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6 / 1.7	0	0	0	0	0	0	0	0
MÉDIA	0,14	0,14	0,17	0,27	0,63	0,46	0,14	0,11

Mais Frequente ↑
Menos Frequente ↓
Direção mais frequente

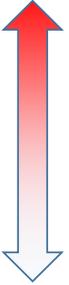
Figura 54: Dados de velocidade de corrente na Boia Meteoceanográfica Itaoaca

Vel. Corrente (m/s)	DIREÇÃO		BÓIA CABO FRIO (RJ)					
	N	NE	E	SE	S	SE	O	NO
0.0 / 0.1	229	206	158	153	173	154	180	202
0.1 / 0.2	398	330	303	283	243	341	365	462
0.2 / 0.3	324	244	308	305	199	221	337	491
0.3 / 0.4	190	144	199	162	108	111	253	303
0.4 / 0.5	82	75	74	53	38	50	140	164
0.5 / 0.6	34	34	34	25	28	22	66	93
0.6 / 0.7	20	16	12	0	9	6	23	39
0.7 / 0.8	12	6	10	0	8	1	11	19
0.8 / 0.9	3	1	3	1	3	1	2	5
0.9 / 1.0	1	0	0	0	0	0	0	9
1.0 / 1.1	0	0	0	0	0	0	0	8
1.1 / 1.2	0	0	0	0	0	0	0	12
1.2 / 1.3	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3 / 1.4	0	0	0	0	0	0	0	0
1.4 / 1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5 / 1.6	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6 / 1.7	0	0	0	0	0	0	0	0
MÉDIA	0,23	0,23	0,24	0,22	0,22	0,21	0,26	0,28

Mais Frequente ↑
Menos Frequente ↓
Direção mais frequente

Figura 55: Dados de velocidade de corrente na Boia Meteoceanográfica Cabo Frio

Vel. Corrente (m/s)	DIREÇÃO		BÓIA SANTOS (SP)					
	N	NE	E	SE	S	SE	O	NO
0.0 / 0.1	41	52	46	63	113	105	152	119
0.1 / 0.2	66	100	54	83	397	424	329	186
0.2 / 0.3	28	33	20	81	664	950	281	116
0.3 / 0.4	1	0	4	44	845	1250	165	34
0.4 / 0.5	0	0	2	26	888	1077	102	10
0.5 / 0.6	0	0	1	11	834	736	20	0
0.6 / 0.7	0	0	1	9	630	556	7	0
0.7 / 0.8	0	0	0	4	350	312	4	0
0.8 / 0.9	0	0	0	2	167	93	0	0
0.9 / 1.0	0	0	0	1	38	38	0	0
1.0 / 1.1	0	0	0	0	7	7	0	0
1.1 / 1.2	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2 / 1.3	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3 / 1.4	0	0	0	0	0	0	0	0
1.4 / 1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5 / 1.6	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6 / 1.7	0	0	0	0	0	0	0	0
MÉDIA	0,14	0,14	0,15	0,25	0,45	0,42	0,24	0,17



 Mais Frequente



 Menos Frequente

Figura 56: Dados de velocidade de corrente na Boia Meteoceanográfica Santos