



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Interação Fluido/Estrutura em Ambiente *Offshore*

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

Daniel Alexandre Simões de Oliveira

Orientadores

Aldina Maria da Cruz Santiago

Maria Constança Simões Rigueiro

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Fevereiro, 2016

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer de uma forma general às pessoas que me acompanharam durante o meu percurso académico, sem as quais teria sido difícil chegar a esta fase.

De uma forma especial, quero agradecer às minhas orientadoras, Professora Doutora Aldina Santiago e Professora Doutora Maria Constança Rigueiro, pela oportunidade, pelo apoio e pelo tempo disponibilizado durante a realização desta dissertação na área das estruturas *offshore*. Também agradecer ao Professor Doutor Nuno Simões que foi quem me despertou o interesse para esta área, mostrando-se sempre disponível para ajudar.

Agradecer aos meus amigos que me acompanharam ao longo desta jornada que de uma maneira ou de outra sempre me apoiaram, tornando-a inesquecível.

Por ultimo, mas tão ou mais importante, agradecer à minha família, em especial aos meus Pais, Irmã e Avós. Sem eles todas estas oportunidades teriam sido impossíveis. Obrigado por me terem guiado nesta direção e sei que, qualquer que seja o futuro, estarão sempre por perto para me apoiar.

RESUMO

Sendo a exploração petrolífera *offshore* uma área de relevo mundial e o principal motor económico de muitos países, a escassez de estudos nesta área em Portugal bem como as recentes sondagens, onde foram apresentadas novas localizações de jazidas de petróleo e gás natural no território nacional, motivaram à realização desta dissertação. As ações dinâmicas não lineares presentes em ambiente *offshore* (ações hidrodinâmicas, sísmicas e do vento) tornam-se determinantes na tomada de decisões desde a fase de dimensionamento de plataformas *offshore* até ao seu desmantelamento. Nestas estruturas, de grandes dimensões e com grandes especificidades, é de esperar um afastamento entre a realidade dos fenómenos e os resultados obtidos por métodos de cálculo regulamentares, sendo por vezes necessário o recurso a modelos experimentais. Contudo, nos últimos anos, o potencial da modelação do fluido pelo método da dinâmica computacional de fluídos (CFD) aumentou exponencialmente, permitindo a reprodução (com um grau de fiabilidade elevado) dos fenómenos físicos e/ou físico-químicos de fluídos que apresentem escoamento. Esta é uma alternativa indiscutivelmente menos dispendiosa em custos e tempo de modelação.

Esta dissertação desenvolveu-se no âmbito do *Sub-Cluster: Oil and Gas* da unidade de investigação ISISE, tendo em vista o estudo uma situação de Interação Fluido/Estrutura (FSI) em ambiente *Offshore*. Uma plataforma petrolífera *offshore* do tipo *jacket* foi submetida às ações das ondas e das correntes. Os objetivos principais desta dissertação foram aprender a modelar ações hidrodinâmicas num *software* de modelação CFD e aplicar esses conhecimentos num estudo do comportamento estrutural recorrendo à co-simulação com o ABAQUS. Para tal, fez-se uso das capacidades distintas de dois *software* de modelação numérica procedendo-se à co-simulação dinâmica unidirecional:

- O fluido foi modelado no programa STAR-CCM+, possibilitando introduzir neste as características das ações ambientais.
- A estrutura foi modelada no programa estrutural de elementos finitos ABAQUS.
- Os modelos foram acoplados através do SIMULIA Co-simulation Engine, responsável pela transferência das pressões e das tensões de corte provocadas pela ação do fluido sobre a estrutura.

Palavras-Chave: STAR-CCM+; Dinâmica de Fluídos Computacional (CFD); ABAQUS; Interação Fluido-Estrutura; Estruturas *Offshore*; Ações Hidrodinâmicas

ABSTRACT

The increasing use of oil, enlarged its exploration to offshore environmental. The deposits found appeared very deep, leading to the need to build stable structures to aid its extraction. However, environmental conditions on offshore structures exhibit dynamic, non-linear and unpredictable behavior. It makes the analysis of these structures one of the most demanding tasks of structural engineering. The most recent and powerful method to analyse this type of fluid-structure interaction is with a numerical software with the capability to use the Computational Fluid Dynamics (CFD) modelling. Compared with the experimental method, this one takes advantage on reducing the construction costs of the model and on reducing the consuming time in the analyses.

This study was developed in the Sub-Cluster: Oil and Gas of the Research Unit ISISE. In this study, a one-way coupled fluid-structure interaction (FSI) between ocean waves, ocean currents and a jacket offshore platform structure was modeled. The main objectives of this study were: i) investigate the recent capabilities of CFD's software (STAR-CCM+) to model hydrodynamic loads; ii) to understand how to carry out a co-simulation with ABAQUS; iii) and to demonstrate how it can be used in the design and optimization stages. This problem was divided in two parts: a structural model and a volume of fluid (VOF) based on hydrodynamics models. To synchronize data between these two models, an interface was defined. The structure was modeled in ABAQUS with a 3D Finite Element (FE) model with the aim to determine the deformation caused by the hydrodynamics loads. The environmental conditions were modeled in STAR-CCM+, using a Computational Fluid Dynamics (CFD) model.

Keywords: STAR-CCM+; Computational Fluid Dynamics (CFD); ABAQUS; Fluid-Structure Interaction (FSI); Offshore Structures; Hydrodynamic Loads

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Evolução da indústria petrolífera	3
1.3. Tipo de estruturas <i>offshore</i>	4
1.3.1. Plataformas apoiadas ao fundo do mar	5
1.3.2. Plataformas flutuantes	7
1.4. Motivação, alvo e objetivo do trabalho	9
1.5. Estrutura da Dissertação	12
2. ESTADO DA ARTE	14
2.1. Introdução	14
2.2. <i>Fluid Structure Interaction</i> , FSI	14
2.2.1. Métodos de modelação numérica de problemas FSI	15
2.2.2. Aproximação particionada: Tipos de co-simulação dinâmica.....	16
2.3. <i>Computational Fluid Dynamics</i> , CFD	18
2.4. Comparação dos métodos de análise de plataformas <i>offshore</i>	19
2.5. Estudos de problemas FSI <i>offshore</i> com simulações numéricas	21
3. ACÇÕES – ONDAS E CORRENTES OCEÂNICAS	26
3.1. Introdução	26
3.2. Ondas oceânicas.....	27
3.2.1. Definição.....	27
3.2.2. Formação e propagação	27
3.2.3. Métodos de simulação do comportamento marítimo.....	30
3.2.4. Teorias de ondas	31
3.3. Correntes oceânicas	34
4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO PROBLEMA ESTUDADO	35
4.1. Introdução	35
4.2. Identificação da geometria, topologia e materiais da estrutura estudada	35
4.3. Modelação da geometria da estrutura (CAD 3D) no INVENTOR.....	36
4.4. Modulação do comportamento do fluido no STAR-CCM+	37
4.4.1. Introdução	37
4.4.2. Interface do programa.....	38
4.4.3. Definição da geometria do tanque de ondas numérico	39

4.4.4. Construção da topologia da simulação	40
4.4.5. Modelos Físicos	41
4.4.6. Quantificação e modelação das ações hidrodinâmicas	42
4.4.7. Definição das condições de fronteira	44
4.4.8. Geração da Malha	45
4.4.9. Definição do <i>time-step</i> , do tempo de análise e do número de iterações	48
4.4.10. Configuração da co-simulação	49
4.4.11. Preparação da análise gráfica	49
4.4.12. Obtenção das condições iniciais	50
4.5. Modelação do comportamento da estrutura no ABAQUS	51
4.5.1. Geometria e propriedades do material	51
4.5.2. Condições de apoio, cargas e tipo de análise	51
4.5.3. Malha	53
4.5.4. Configuração da co-simulação	54
5. ANÁLISE DE RESULTADOS	55
5.1. Introdução	55
5.2. Verificação da convergência dos resultados	55
5.3. Verificação do método de exportação faseada das ações hidrodinâmicas	57
5.4. Análise da variação da velocidade do escoamento com a profundidade	59
5.5. Análise evolutiva no tempo dos resultados da co-simulação	59
5.5.1. Justificação dos instantes analisados	59
5.5.2. Resposta da estrutura às tensões de cortes	60
5.5.3. Resposta da estrutura às pressões	64
5.5.4. Utilização dos resultados no processo de dimensionamento/otimização	66
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	67
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
8. ANEXOS	72

ABREVIATURAS

API – American Petroleum Institute

BP – British Petroleum

CAD – Computer Aided Design

CFD – Computational Fluid Dynamics

CSM – Computational Solid Mechanics

DEC-UC – Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra

DNV – Det Norske Veritas

DO – Diamond Offshore

DPGS – Dynamic Position Global System

FE – Finite Element

FEM – Finite Element Method

FPS – Floating Production Systems

FSI – Fluid-Structure Interaction

FVM – Finite Volume Method

GE – General Electric

ISO – International Organizations for Standardization

PBM – Part Based Meshing

PIB – Produto Interno Bruto

RBM – Region Based Meshing

SBMO – SBM Offshore

TLP – Tension Leg Platform

VIM – Vortex-Induced Motion

VOF – Volume of Fluid

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A análise, dimensionamento e construção das estruturas *offshore* distinguem-se das estruturas implantadas *onshore*. Uma das principais diferenças são as ações a que se encontram sujeitas. Em estruturas *offshore*, as ações são essencialmente dinâmicas, não lineares e imprevisíveis, de natureza ambiental, as quais impõem um comportamento altamente dinâmico e de complexa análise: ação do vento, ações hidrodinâmicas e ações sísmicas.

No que se refere aos apoios, as estruturas *offshore* podem ser flutuantes ou fixas, e neste último caso, podem atingir profundidades na ordem dos 400 m. Pensando no propósito da sua utilização, suporte da maquinaria necessária para a exploração e armazenamento de petróleo e gás natural, há necessidade de uma estrutura totalmente estável. No que se refere a este aspeto, é necessário ter em atenção as condições de segurança relacionadas com as operações recorrentes neste tipo de estrutura, que podem conduzir a acidentes com grande impacto quer a nível ambiental, humano e económico. No entanto este tipo de ações acidentais não serão aqui abordadas.

A área *offshore* encontra-se toda ela regulamentada desde o estudo do local de instalação até às operações de desmantelamento. Com se verifica pela hierarquização apresentada na Figura 1.1, as empresas do sector são as principais contribuidoras para a revisão das normas através do desenvolvimento de especificações de acordo com as necessidades técnicas dos seus projetos [1].

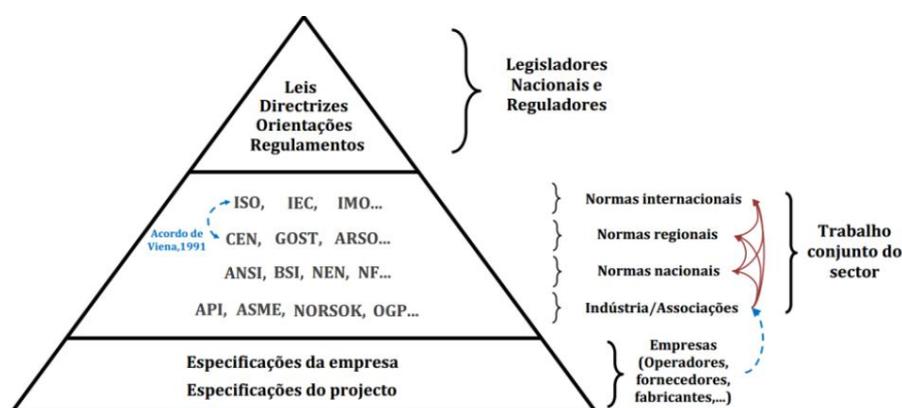


Figura 1.1 - Hierarquização dos organismos envolvidos na produção de normas [1].

As normas identificam as ações a ter em conta no dimensionamento deste tipo de estruturas. Entre estas encontram-se as ações hidrodinâmicas, consideradas as mais complexas e por isso as mais estudadas na área de *offshore*. As normas fornecem um conjunto de fórmulas empíricas para quantificar estas ações. O facto de apresentarem carácter não linear, no tempo e no espaço, a simulação é complexa. As normas existentes tornam-se conservativas dado que são feitas muitas simplificações e muitas generalizações ao longo de todo o processo. Como exemplo, numa estrutura *jacket* de grandes dimensões, a regulamentação traduz a influência de cada elemento ao bloqueio da corrente de acordo com a função que este desempenha na estrutura, não tendo em conta nem a posição nem as dimensões destes. Os fenómenos físicos que ali se registam apresentam um elevado grau de incerteza devido à complexidade do problema. Já na norma ISO 19900 é referido a necessidade da realização de testes em modelos/protótipos para analisar o caso particular da estrutura em estudo. Até recentemente, apenas eram utilizados modelos experimentais recorrendo à utilização de modelos à escala real e/ou reduzida em tanques de ondas, que, apesar de toda a regulamentação para o dimensionamento, não deixam de ser um método de tentativa-erro. Este facto torna o processo de otimização numa solução morosa, pouco económica e limitada no ponto de vista da análise do comportamento do fluido e da estrutura. Por outro lado estes métodos ainda são muito suscetíveis a erros de extrapolação dos resultados para a escala real, da interação onda-corrente, do confinamento do fluido, da simulação real da turbulência, do perfil de velocidades, etc. [2].

Apesar da introdução do método da Dinâmica de Fluidos Computacionais (CFD) no campo aeroespacial nos anos 70, a exigência computacional dos problemas da área marítima e *offshore* só permitiram a sua utilização nos últimos anos. Inicialmente foi apenas utilizado para compreender as razões das falhas estruturais observadas. Contudo, com a evolução computacional conseguiu-se aplicá-lo desde a fase de dimensionamento e prever a resposta estrutural em diferentes condições ambientais [3]. Atualmente este método de análise permite estudar, com elevado grau de fiabilidade, a ação do fluido na estrutura, os fenómenos na zona envolvente e ainda o comportamento da estrutura. Os *softwares* que integram esta capacidade assumem-se como fortes complementos aos modelos experimentais.

Anterior à análise CFD, o comportamento das estruturas é estudado numericamente através da análise da Mecânica de Sólidos Computacional (CSM) aplicando o método de elementos finitos (FEM). Existem inúmeros *softwares* que integram esta capacidade de modelação, destacando-se a utilização do ABAQUS [4] no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (DEC-UC).

Estas duas potencialidades numéricas podem acoplar-se para o estudo de Interações Fluido-Estrutura (FSI), permitindo a partilha dos resultados através das faces de contacto fluido-estrutura, a chamada interface. Este foi a metodologia utilizada no trabalho aqui apresentado.

1.2. Evolução da indústria petrolífera

O petróleo é um recurso natural não renovável, não havendo uma única teoria explicativa da sua formação. A teoria mais aceite no mundo científico explica a sua formação a partir da deposição de restos orgânicos de seres vivos, no fundo de lagos e mares, ao longo de milhares de anos. Estes foram sendo cobertos por sedimentos transformando-se em rochas sedimentares, que quando sujeitas a processos metamórficos de profundidade, calor e pressões elevadas, sofrem transformações físicas e químicas que levam à sua migração para zonas mais profundas até encontrarem uma barreira física, camada impermeável. Criam-se assim as chamadas jazidas ou também conhecidas como poços [5].

O primeiro poço de petróleo foi um poço *onshore* perfurado em 1859, ato registado em nome de *Edwin Laurentine Drake*, numa cidade da Pensilvânia, EUA. Desde aí registou-se um aumento exponencial do uso de petróleo, passando de uma produção anual de 2 mil barris para 10 milhões em apenas 15 anos [6].

Tendo em conta o processo de formação, a presença de poços na crosta oceânica era assumida como uma verdade absoluta devido às altas pressões ali registadas. Os meios para a realização duma perfuração *offshore* demoraram a surgir sendo que, só em 1896 foi realizada a primeira exploração *offshore* num cais da Califórnia a cerca de 10 m de profundidade. Nesta exploração foi utilizada uma estrutura em forma de passadiço, sobre postes de madeira, para se afastar da costa e apoiar o equipamento necessário. A partir desta data os estudos e experiências na área *offshore* foram intensificados, estando registada a primeira perfuração *offshore*, realmente afastada da costa Luisiana (aproximadamente 17 km) em 1947. Os equipamentos de perfuração aqui utilizados já se assemelhavam aos dos dias de hoje, bem como as próprias estruturas que viam o aço substituir a madeira [1].

As estruturas apoiadas ao fundo do mar foram melhoradas durante as décadas seguintes, chegando a atingir o máximo de 534 m de profundidade, plataforma *ChevronTexaco's Petronius* instalada em 1998 no Golfo do México [7]. Com o progressivo aumento da profundidade a que eram encontrados os poços, as estruturas fixas tornaram-se inviáveis a nível económico, construtivo e de transporte. Surgiram assim as primeiras adaptações de navios a plataformas dando origem às primeiras plataformas flutuantes. A profundidade máxima de

exploração é atualmente de 2450 m e foi registada pela plataforma Perdido da Shell, sendo considerada a mais alta do mundo [8]. A Figura 1.2 indica que a produção *offshore* ocupa cerca de 35% da produção mundial, com tendência a crescer, principalmente em águas profundas, ao passo que a *onshore* apresenta uma tendência de estagnação [1].

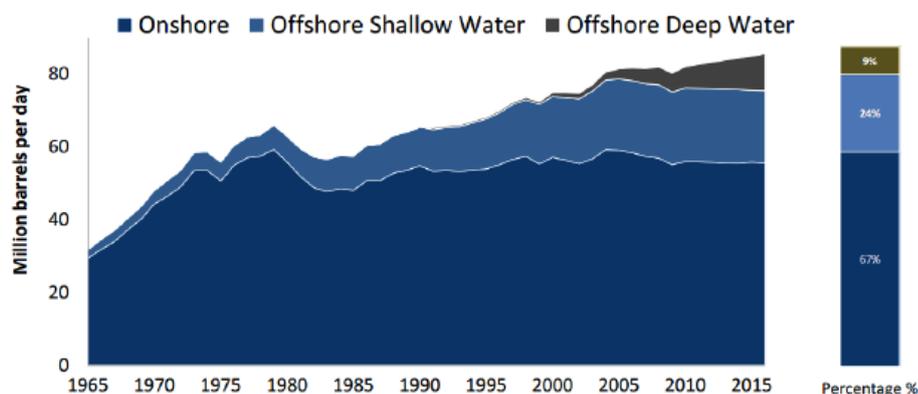


Figura 1.2 - Produção mundial de petróleo por dia (*Offshore vs Onshore*) [1].

1.3. Tipo de estruturas *offshore*

A necessidade comanda o progresso e, esta área não é exceção. Atualmente existem 9 tipos diferentes de plataformas, as quais se podem agrupar em dois grandes grupos de acordo com o tipo de suporte. O primeiro grupo de plataformas a surgir foram as apoiadas no fundo do mar (Figura 1.3 - 1 a 3), podendo diferenciarem-se em fixas e complacentes. O segundo engloba as plataformas flutuantes (Figura 1.3 - 4 a 9), estas podem também ser divididas em quatro tipos: semi-submersíveis, FPS (*Floating Production Systems*), TLP (*Tension Leg Platform*) e SPAR [9]. Estima-se que existam cerca de 7850 plataformas *offshore* ao largo de mais de 53 países [10].

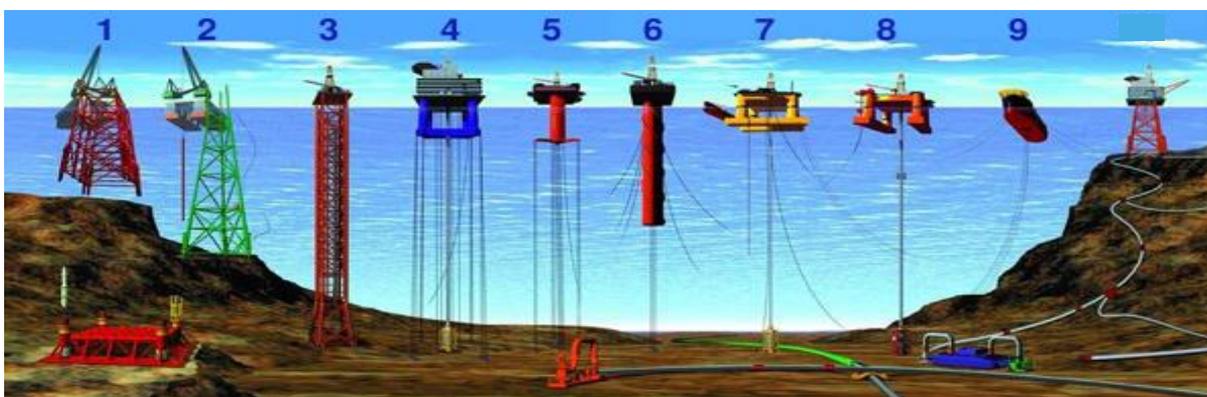


Figura 1.3 – Tipos de plataformas *offshore* – 1,2) *Jacket*; 3) *Compliant tower*; 4,5) TLP; 6) SPAR; 7,8) Semi-submersíveis; 9) FPS [9].

De seguida apresentam-se mais detalhadamente cada tipo de plataforma com o objetivo de identificar a importância da análise das ações hidrodinâmicas para os dois grupos.

1.3.1. Plataformas apoiadas ao fundo do mar

Hoje em dia são utilizadas quatro tipos de plataformas apoiadas ao fundo do mar: as do tipo *jacket*, as de gravidade, as autoelevatórias (*jack-ups*) e as complacentes.

As plataformas do tipo *jacket* (Figura 1.4) foram o primeiro tipo de estruturas a ser utilizadas, sendo ainda a mais comum na exploração *offshore*. Estas estruturas são constituídas por elementos metálicos tubulares, divididas verticalmente em duas zonas distintas: o convés (*deck*) – estrutura de suporte à maquinaria de perfuração e produção; a torre (*jacket*) – estrutura que apresenta um sistema treliçado tridimensional com uma base de 4 a 8 montantes sobre a qual assenta o *deck*. A fixação ao solo é feita por meio de estacas que integram a estrutura da *jacket*. A configuração estrutural faz com que apresentem um comportamento rígido, a frequência natural é superior à mais alta frequência de excitação da onda característica [1]. São plataformas de baixo custo e podem ser utilizadas até profundidades na ordem dos 400 m [10].



Figura 1.4 – Plataforma do tipo *Jacket* [11]

As plataformas de gravidade (Figura 1.5), como o próprio nome indica, servem-se do seu peso próprio para se manterem apoiadas ao fundo do mar, assegurando a sua estabilidade. Ao contrário das *jacket*, a estrutura é toda em betão armado. Dividem-se em três zonas: convés, sistema de colunas (podendo variar o seu número) e base, a qual se serve de um sistema de cápsulas de vácuo para se fixar ao solo. São usadas para profundidades até 400 m [10]. O facto de ser uma estrutura de betão, mais robusta que a *jacket*, os esforços aí existentes também são maiores.



Figura 1.5 – Plataforma de gravidade [12 e 10]

Nas plataformas *jack-up* (Figura 1.6), o *deck* é suportado por um sistema de colunas verticais, também designadas por “pernas”, as quais podem ser cilíndricas de betão armado ou treliçadas por elemento metálicos tubulares. Diferencia-se das restantes deste grupo nas operações de transporte, sendo toda montada *onshore* e depois rebocada para o local da exploração. Isto é possível devido à incorporação de flutuadores na base do *deck* e do sistema de elevação do mesmo. Depois de posicionada a plataforma, as pernas descem até atingir o fundo do mar. De seguida o *deck* é elevado até uma altura segura e fora da ação das ondas. Esta solução veio agilizar os processos de transporte, instalação e ainda possibilitar a sua realocação para explorar outro poço. É recorrente a sua utilização no Golfo do México, para explorações a uma profundidade de 160 m, contudo podem ser usadas até aos 400 m [10].

Figura 1.6 – Plataforma do tipo *Jack-up* [13 e 10]

Por fim, as plataformas complacentes apresentam uma estrutura semelhante às do tipo *jacket*, utilizando o mesmo sistema treliçado de elementos metálicos. Contudo, enquanto nas *jacket* as dimensões da base são superiores às do topo (aspeto afunilado), estas apresentam um desenvolvimento vertical regular e estreita. Esta característica confere-lhes maior flexibilidade, frequência natural de vibração inferior à menor da excitação das ondas, suportando as forças laterais através de deflexões [10]. Tornam-se assim mais viáveis que as fixas, tanto a nível

econômico como construtivo, para profundidades superiores a 450 m mas limitadas aos 900 m [1].

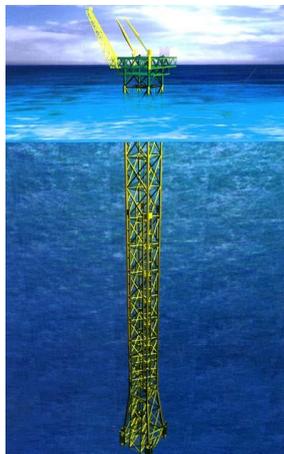


Figura 1.7 – Plataforma do tipo *Compliant Tower* [14]

1.3.2. Plataformas flutuantes

Com a descoberta de poços de petróleo *offshore* a profundidades superiores a 1000 m, as plataformas apoiadas ao fundo do mar tornaram-se soluções inexequíveis dando início ao desenvolvimento das plataformas flutuantes.

A utilização de plataformas semi-submersíveis (Figura 1.8), teoricamente, não é limitada pela altura da lâmina de água. A sua utilização mais recorrente verifica-se ao largo da costa brasileira para profundidades acima dos 200 m. Para as manter e estabilizar fora de água é utilizado um conjunto de colunas apoiadas em flutuadores submarinos. Esta solução atribui à plataforma mobilidade total, sendo montada na íntegra “*onshore*” e depois transportada com auxílio de reboque ou de forma independente através de propulsores. A utilização de condutas flexíveis (*risers*) para transporte dos fluídos desde o poço até à plataforma, face às rígidas utilizadas nas plataformas fixas, atribuem-lhes maior liberdade de movimentos. Ainda assim é necessário limitar estes movimentos horizontalmente. As primeiras plataformas deste tipo utilizavam um sistema de ancoragem (até 150 m de profundidade) porém, mais recentemente, vêem-se substituídos por sistemas DPGS (*Dynamic Position Global System*) [10 e 15].



Figura 1.8 – Plataforma semi-submersível [10 e 14]

As plataformas do tipo FPS (Figura 1.9), muitas das vezes conhecidas como navios, foram inicialmente concebidas utilizando cascos de navios petroleiros desativados [14]. São plataformas de grande porte, apresentam capacidade de produzir, processar e/ou armazenar petróleo e gás natural, ganhando independência para atuar em campos muito afastados da costa. Como nas plataformas semi-submersíveis também já é utilizado o sistema DPGS. Apresentam maior dificuldade de atuação devido ao maior impacto da ação das ondas. Recentemente foram construídas plataformas deste tipo com geometria circular. Conceito que vem aumentar a estabilidade, assegurando-a em condições ambientes mais extremas, com custos de produção mais reduzidos [15].



Figura 1.9 – Plataforma FPS [14].

As plataformas TLP (Figura 1.10) assemelham-se às semi-submersíveis no que diz respeito à estrutura. Porém, não utilizam o sistema de ancoragem tradicional mas sim um sistema de tirantes fixos ao fundo do mar através de estacas. Os tirantes estão sempre tracionados tendo em conta que os flutuadores são dimensionados para que a impulsão seja muito superior ao peso próprio da estrutura. Obtém-se uma estrutura com comportamento mais estável, reduzindo drasticamente o movimento vertical em função da superfície do mar. Com este método a

segurança de extração aumenta, facilitando o controlo do fluxo dos recursos, assemelhando-se a uma plataforma fixa [14 e 15].



Figura 1.10 – Plataforma Mars (TLP) [16]

As SPAR são plataformas de baixo custo, concebidas para operar em águas profundas funcionando como uma boia. Existem três variantes (Figura 1.11): SPAR *Buoy*; *Truss* SPAR e *Cell* SPAR. Diferenciam-se na estrutura do casco [14]. Este apresenta-se 90% submerso, de grandes dimensões (200m), atribuindo à plataforma uma grande inércia. A resposta às ações das ondas, da corrente e do vento é drasticamente reduzida. Ao contrário das plataformas TLP, podem utilizar *risers* rígidos com um sistema de ancoragem tradicional. Esta elevada estabilidade também é conseguida por a plataforma ter o centro de gravidade abaixo do centro de carena (centro geométrico da parte submersa) [14 e 17].

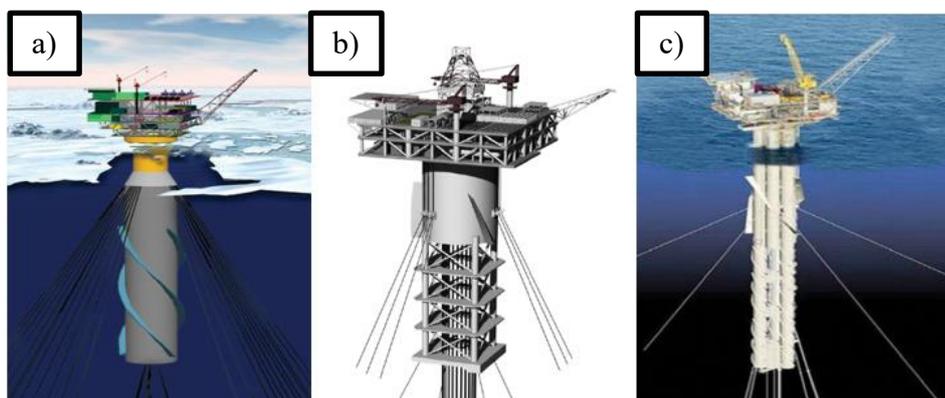


Figura 1.11 – Tipos de plataformas SPAR: a) SPAR *Buoy*; b) *Truss* SPAR; c) *Cell* SPAR [18]

1.4. Motivação, alvo e objetivo do trabalho

Como é de conhecimento comum, cada vez mais são feitas fortes apostas na área dos recursos renováveis para se afirmarem como uma alternativa ao uso do petróleo. Contudo, este não é

apenas utilizado para a produção de combustíveis. É utilizado nas mais diversas áreas: produção de plásticos (garrafas de água, computadores, telemóveis, etc.); integra a composição dos mais diversos medicamentos (benzeno – derivado do petróleo); produção de tecidos sintéticos (roupas, carpetes, cortinas, etc.); produção de cosméticos (óleos, perfumes, cremes, etc.); produtos de limpeza; no pavimento das estradas rodoviárias, onde se estima a existência de cerca de 18 milhões de km; e até mesmo na produção de alimentos (corantes, conservantes, pesticidas, fertilizantes, etc.) [18].

Realidade difícil de imaginar contudo, até serem encontradas alternativas rentáveis, o petróleo vai continuar a dominar o mercado. Face a isto, é necessário continuar a realizar sondagens, principalmente em ambiente *offshore*, em busca por novos poços para dar resposta à procura.

Relativamente à situação de Portugal, no início do ano 2015, foi apresentado um estudo de prospeção pela empresa IONIQ *Resources* que, informou a descoberta de 6 novas localizações de jazidas de petróleo avaliadas em 43 mil milhões de euros brutos, 25% do Produto Interno Bruto (PIB) [19]. Apesar da dimensão do mercado mundial ser mais do que suficiente para despertar o interesse em aprofundar conhecimentos na área, este estudo veio dar mais força a nível nacional. Recentemente virada para o mercado *offshore* está também a produção das energias renováveis que, procuram neste ambiente um aumento da produção e da eficácia do processo. Apesar de a energia das ondas e das marés estar incluída neste mercado *offshore*, é a energia eólica que pelo potencial eólico ser mais elevado, com menor turbulência e com maior disponibilidade de áreas para instalação que *onshore*, viu também nas soluções das plataformas petrolíferas uma boa solução para suportar a estrutura das turbinas [20].

Esta dissertação desenvolveu-se no âmbito do Sub-Cluster: *Oil and Gas* da unidade de investigação ISISE. O principal objetivo do trabalho foi estudar o comportamento estrutural de uma plataforma *offshore* fixa sob as ações hidrodinâmicas. Para esta análise utilizou-se apenas a torre da plataforma Merluza-1 (Figura 1.12), uma estrutura do tipo *jacket*, instalada na Bacia da Santos, São Paulo, Brasil [21]. O facto de não terem sido fornecidas as condições ambientais utilizadas no seu dimensionamento, fez com que se realizasse este estudo para numa localização fictícia, onde as características das ações de dimensionamento se encontravam bem definidas nos regulamentos. O Golfo do México (97° SW to 95.0° W) foi a zona escolhida, numa localização à mesma profundidade da real (134 m).

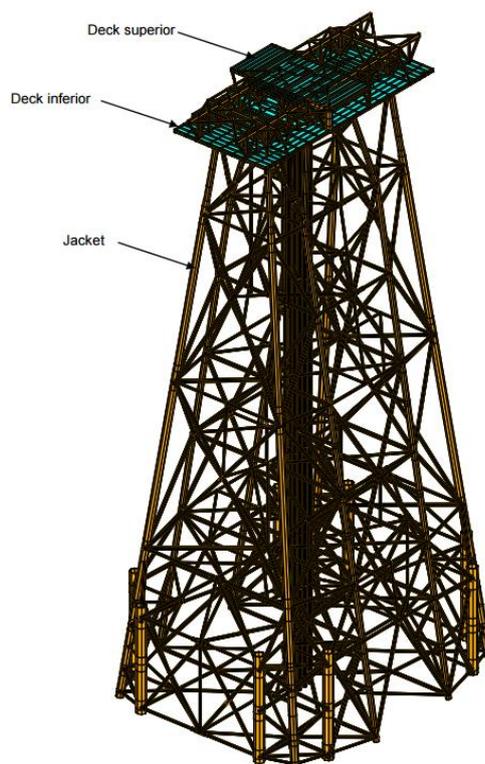


Figura 1.12 – Esquema estrutural da plataforma Merluza-1 [21]

A plataforma estudada (Figura 1.12) tem aproximadamente 150 metros de altura e é constituída por elementos metálicos tubulares [21]. Estas seções são utilizadas nas plataformas *offshore* devido à versatilidade de resistência às várias forças, apresentando: boas propriedades hidrodinâmicas; boa relação fluabilidade-peso; boa resistência à pressão hidrostática; propriedades uniformes em toda a secção; não apresenta encurvadura às forças de torção e boa capacidade resistente última [22].

Para o estudo da FSI recorreu-se à simulação do fenómeno por modelação numérica do fluido e da estrutura. As ações das ondas e das correntes foram modeladas no *software* STAR-CCM+ [23], através de modelos hidrodinâmicos utilizando o método CFD. Para o estudo da estrutura utilizaram-se as capacidades do ABAQUS [4], modelando-a com elementos finitos (FE) através de elementos do tipo casca 3D. A interação fluido-estrutura realizou-se recorrendo à co-simulação unidirecional implícita (secção 2.2.2) dos dois *softwares*, através do SIMULIA Co-simulation Engine. O estudo foi realizado durante um intervalo de tempo de 7.20 s.

Esta dissertação teve como objetivos:

- Apresentar a recente introdução do método CFD na área *offshore*, conhecer o seu papel, as suas capacidades e limitações no estudo/dimensionamento das estruturas *offshore*;

- Aprender a modelar condições ambientais marítimas num *software* de modelação de fluídos (STAR-CCM+);
- Aprender a realizar uma co-simulação para estudar um problema FSI.
- Aplicar os conhecimentos adquiridos para realizar a análise estrutural de uma plataforma *offshore* sujeita às ações hidrodinâmicas.

1.5. Estrutura da Dissertação

Com o intuito de promover uma clara e objetiva leitura e compreensão do trabalho realizado, a presente dissertação foi dividida em 6 capítulos principais.

No capítulo 1 - INTRODUÇÃO começou-se por fazer o enquadramento do tema abordado. Fez-se uma breve análise da evolução da exploração petrolífera na vertente *offshore* e apresentaram-se os diferentes tipos de plataformas utilizadas na área.

No capítulo 2 – ESTADO DA ARTE pretendeu-se:

- Introduzir os conceitos de FSI e CFD, enumerando algumas áreas em que são aplicados;
- Identificar os diversos métodos utilizados para estudar o comportamento das plataformas *offshore*. Explicar o papel, as capacidades e as limitações de cada um destes métodos no dimensionamento, otimização e análise deste tipo de estruturas.
- Identificar e analisar os *softwares* comerciais de modelação de fluidos mais usados na área *offshore*;
- Analisar os estudos já desenvolvidos relacionados com o aqui apresentado, com o objetivo de conhecer o estado atual do conhecimento na área;

No capítulo 3 – AÇÕES enumeraram-se as ações que têm influência no comportamento das plataformas segundo a norma ISO 19900. Aprofundaram-se os conhecimentos sobre as ações hidrodinâmicas (ondas, marés e correntes), fazendo uma breve análise do comportamento, apresentando as diferentes teorias de onda, e da interação com estruturas.

O capítulo 4 – MODELAÇÃO NUMÉRICA DO PROBLEMA ESTUDADO diz respeito à modelação numérica do fluído e da estrutura. Este encontra-se dividido em três grandes temas: apresentação da geometria e características da estrutura; modelação do fluído e modelação da estrutura. Na modelação do fluído iniciou-se com uma introdução ao *software* de cálculo automático STAR-CCM+; de seguida apresentaram-se os passos da modelação desde a definição da geometria, quantificação das ações (através da norma API 2INT-MET) até à obtenção das condições iniciais do escoamento para a co-simulação com o ABAQUS. No

último capítulo descreveram-se os passos da modelação da estrutura e da análise no ABAQUS; finalizando-o com a preparação do modelo para a co-simulação com o STAR-CCM+.

O capítulo 5 - RESULTADOS teve como objetivo analisar os resultados da co-simulação, associando o comportamento estrutural obtido com as ações hidrodinâmicas aplicadas na estrutura.

Para finalizar, no capítulo 6 – CONCLUSÕES são feitas as conclusões do estudo bem como apresentados os possíveis trabalhos futuros no seguimento deste.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Introdução

Uma vez já enquadrado o tema no capítulo anterior, pretendeu-se aqui perceber o que são problemas de interação fluido-estrutura (FSI) e que métodos são utilizados para o seu estudo (aplicados a problemas *offshore*). No estudo do problema aqui apresentado recorreu-se ao método de análise numérica. Assim procurou-se dar mais relevância a este, fazendo uma breve referência aos estudos, autores e *softwares* que têm vindo a contribuir para a evolução do conhecimento nesta área. A utilização deste último tem vindo a demonstrar grande interesse nas mais diversas áreas da ciência. Contudo, o facto de só nos últimos anos ter sido introduzido no ramo *offshore* merece e vai continuar a merecer uma grande dedicação de estudos.

2.2. *Fluid Structure Interaction*, FSI

FSI é um campo de estudos que tem como objetivo avaliar o comportamento do conjunto escoamento de fluidos/estrutura. Esta análise apresenta grande complexidade devido à sua multidisciplinaridade e forte não linearidade (quer do fluido, quer da estrutura). Este tipo de problemas surgem nas mais diversas áreas da ciência e da engenharia [24].

A primeira técnica utilizada no estudo destes problemas foi a experimental, método de tentativa-erro [24]. Os modelos eram construídos à escala reduzida sujeitando-os a ações semelhantes às que iriam estar durante o seu ciclo de vida. Facilmente se percebe as grandes limitações e inconvenientes deste método: nada económico, moroso e grande incerteza nas medições e observações.

Graças à revolução científica, o desenvolvimento de equações matemáticas, para traduzir os fenómenos físicos observados, mereceu um intenso volume de estudos. Deu-se um novo rumo ao estudo de problemas FSI, podendo prever analiticamente o comportamento do conjunto através de modelos de equações. À medida que estes modelos eram otimizados surgiam estruturas maiores, mais altas e otimizadas. Exemplo de sucesso é o caso da Torre Eiffel (1889) a qual foi analisada e otimizada por este método. Por outro lado, o colapso da Ponte Tacoma Narrows (1940), devido a fenómenos de ressonância, é um exemplo onde não foi dada importância aos efeitos da FSI. Este acontecimento foi alvo de muitos estudos, tendo sido um

dos principais propulsores do desenvolvimento e otimização dos métodos de análise das interações fluido-estrutura [25].

Os problemas FSI podem ser classificados em duas categorias: problemas de fraco acoplamento e problemas de forte acoplamento. Os primeiros são caracterizados por a resposta da estrutura ao longo do tempo de estudo não ser influenciada pelo escoamento na envolvente. Como no exemplo já mencionado da Torre Eiffel, esta foi inicialmente dimensionada sem ter em conta a ação do vento e, só posteriormente, é que foi sujeita a testes experimentais para verificar a resistência a este tipo de ações. As simulações são feitas num só sentido (fluido-estrutura), abrangendo a maioria dos casos da engenharia. Nos problemas de forte acoplamento, a estrutura é dimensionada tendo em conta as ações que nela vão atuar, havendo uma dependência direta entre a resposta da estrutura e a ação, as simulações ocorrem nos dois sentidos (fluido-estrutura-fluido). Com a tendência de criar estruturas mais resistentes, esbeltas e com novos materiais, é dada maior relevância a este último método [25]. Entre um leque de aplicações bastante alargado encontram-se: o dimensionamento de plataformas *offshore*, de pontes e edifícios com geometria complexa; dimensionamento de aeronaves; estudo de estruturas membranares (ex: *air bags*); estudo de válvulas artificiais para o coração; etc..

Hoje em dia, com o aparecimento dos “supercomputadores”, é já possível estudar interações com elevado grau de complexidade por via de simulações numéricas. As limitações apresentadas anteriormente pelos modelos baseados em métodos empíricos, soluções analíticas e modelos experimentais foram ultrapassadas [25].

2.2.1. Métodos de modelação numérica de problemas FSI

Hoje é possível simular numericamente interações complexas fluido-estrutura através de dois métodos distintos: aproximação monolítica e aproximação particionada (Figura 2.1). No primeiro método, o fluido e a estrutura são modelados em conjunto, num só sistema de equações (um único algoritmo). É de esperar uma melhor aproximação da realidade. Contudo, é necessário obter um algoritmo específico para cada problema multidisciplinar, o que é um grande obstáculo à sua utilização. Por outro lado, a aproximação fracionada torna o processo capaz de resolver qualquer tipo de interação, o fluido e a estrutura são modelados de forma independente, isto é, dois modelos de equações numéricas separadas (dois algoritmos). Neste método, os resultados de cada modelo são partilhados através da interface [24].

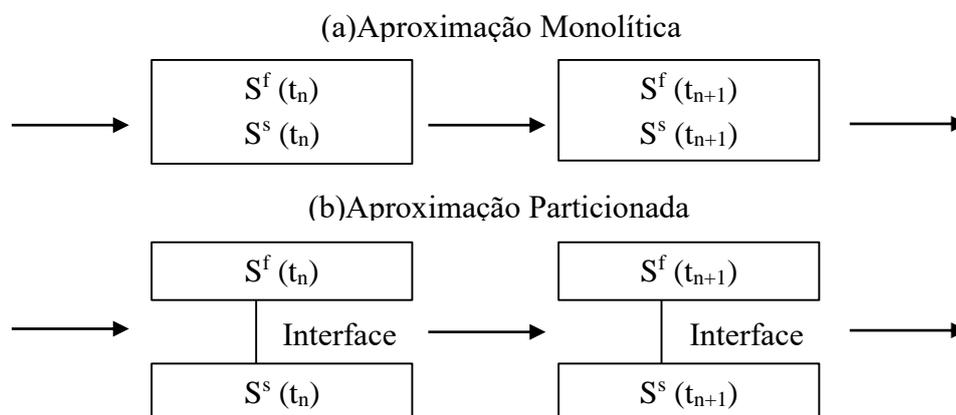


Figura 2.1 - Esquema dos tipos de simulação FSI: a) aproximação monolítica; b) aproximação particionada, onde S^f e S^s representam o modelo do fluido e da estrutura, respectivamente [24].

O ideal seria desenvolver um único algoritmo que conseguisse resolver qualquer tipo de problemas FSI. Hoje, a opção passa por otimizar os algoritmos já desenvolvidos (CFD e FEM), utilizar o método da aproximação particionada e, assim, diminuir a distância entre a simulação e a realidade dos fenômenos. Esta opção dá uma maior liberdade para a criação, otimização e análise de estruturas e é a opção utilizada neste trabalho.

2.2.2. Aproximação particionada: Tipos de co-simulação dinâmica

Os problemas mecânicos FSI modelados por aproximação particionada podem ser analisados por dois métodos distintos: método unidirecional ou método bidirecional. Quando se trata de uma co-simulação unidirecional (Figura 2.2) significa que a transferência de resultados dá-se num único sentido, as pressões calculadas no modelo CFD são aplicadas sobre a superfície de contacto do modelo FEM. Este método é utilizado no estudo de interações onde as deformações da estrutura não são significativas quando comparadas com as alterações que estas provocam no escoamento do fluido. Assim, no modelo CFD a estrutura é considerada rígida. Neste método considera-se que a transferência ocorre de forma explícita (numa única iteração por *time-step*) sendo o acoplamento dos algoritmos CFD e FEM considerado fraco [23 e 26].

No método bidirecional a transferência de resultados ocorre nos dois sentidos. Esta transferência (pressões-deformações) pode ocorrer de forma explícita (fraco acoplamento) ou de forma implícita (forte acoplamento). Numa co-simulação bidirecional explícita os modelos são resolvidos separadamente, em cada *time-step*. Assim, a partilha dos resultados (deformações e pressões) é feita unicamente no instante t_n , numa única iteração, sendo os resultados (de cada modelo) obtidos no instante t_{n+1} dependentes apenas dos resultados do

instante t_n . Isto significa que a convergência dos resultados não é considerada, iniciando diretamente um novo *time-step*.

Em comparação, numa co-simulação bidirecional implícita (Figura 2.3) a transferência dos resultados é realizada diversas vezes (inúmeras iterações) durante um *time-step* (t_n a t_{n+1}). Este método torna-se bastante preciso uma vez que só é iniciado um novo *time-step* quando é atingida a convergência do conjunto (fluido-estrutura), ou imposto um número máximo de iterações. Contudo, os modelos continuam a ser resolvidos de forma independente. Este método é bastante utilizado em problemas onde as deformações das estruturas causam grandes alterações no escoamento do fluido, que por sua vez se traduz em grandes variações do campo das pressões que atuam sobre a estrutura [23 e 26].

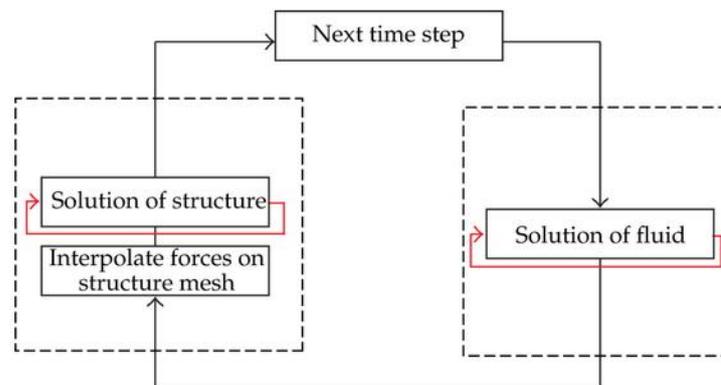


Figura 2.2 – Diagrama do processo cíclico do método de co-simulação unidirecional [26]

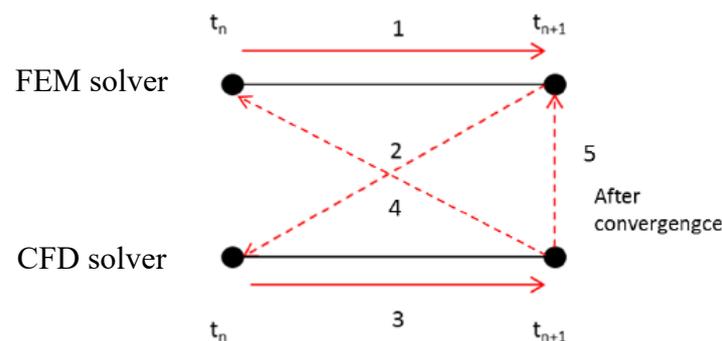


Figura 2.3 – Diagrama do processo do método de co-simulação bidirecional implícita em cada *time-step* [25]

Tanto no método unidirecional como no bidirecional, caso a malha da superfície de contacto da estrutura tenha sido gerada individualmente para cada modelo, os nós das malhas de ambos não

são coincidentes, sendo necessário interpolar as forças da malha do modelo CFD para a malha do modelo FEM, e das deformações no sentido FEM para CFD [25].

Comparando os três métodos consegue-se facilmente perceber que através de uma co-simulação unidirecional se obtém uma solução final mais rapidamente (transferência num só sentido e numa única iteração) do que na bidirecional, e que apenas compensa a sua utilização em situações onde a estrutura pode ser considerada rígida. Uma co-simulação bidirecional torna-se mais realista, mas exige maior poder computacional que a unidirecional, tornando-se também mais morosa. Entre a bidirecional explícita e implícita, conclui-se que a diferença reside na exigência computacional. O processo iterativo utilizado no esquema implícito requer uma maior exigência computacional que a transferência direta utilizada no esquema explícito. Com isto, para obter soluções muito próximas das interações, no esquema explícito é necessário utilizar um *time-step* muito reduzido, diminuindo as probabilidades de divergência, enquanto no esquema implícito pode-se definir um *time-step* superior [23, 25 e 26].

Sempre que seja possível optar por um dos três métodos, é aconselhada a utilização da co-simulação bidirecional implícita, uma vez que os resultados são sempre mais realistas.

No estudo aqui apresentado recorreu-se à co-simulação unidirecional (explícita) dos modelos. Esta escolha foi feita com base na configuração estrutural das plataformas do tipo jacket, onde ao contrário das plataformas complacentes, são dimensionadas de forma a apresentarem um comportamento rígido - deformações reduzidas (secção 1.3.1). Assim, com as deformações que possam surgir, não são esperadas alterações significativas no escoamento do fluido, para que se façam sentir a nível do comportamento estrutural.

2.3. Computational Fluid Dynamics, CFD

Os estudos da dinâmica de fluidos surgiram no início do século XVII, onde os problemas eram abordados experimentalmente. Durante os séculos XVIII e XIX estes foram utilizados para o desenvolvimento progressivo de modelos teóricos que simulavam o comportamento dos fluidos. O aumento da complexidade dos problemas tornou a sua modelação e resolução, por estes modelos, demasiado morosa e limitada [27].

Com base nos conhecimentos adquiridos com as abordagens teóricas e experimentais, desenvolveram-se diversos algoritmos numéricos para simular o escoamento dos fluidos. Daqui surgiu o método CFD, considerado como uma terceira abordagem nestes estudos que, através

dos princípios da conservação da massa (equação da continuidade), da conservação da energia (equação da energia) e da segunda lei de Newton (equação de movimento) constrói um sistema de equações completo para simular os fenômenos físicos. Desde o seu aparecimento as apostas no desenvolvimento/melhoramento de *softwares* de modelação CFD têm sido cada vez mais fortes. Estes são cada vez mais detalhados, estáveis e com capacidade de resolver problemas de maior dimensão e em escala real. Não tem como objetivo substituir as outras duas abordagens mas sim complementá-las [27].

Inicialmente esta ferramenta foi utilizada exclusivamente para o estudo do comportamento do fluido (em 2D e mais recentemente em 3D (Figura 2.4)). O mais recente método de volumes finitos (*Finite Volume Method*, FVM) veio permitir a modelação do volume do fluido através de elementos tridimensionais, conseguindo diminuir a utilização da memória computacional e aumentar a velocidade de cálculo, aumentando assim a potencialidade da modelação CFD [28].

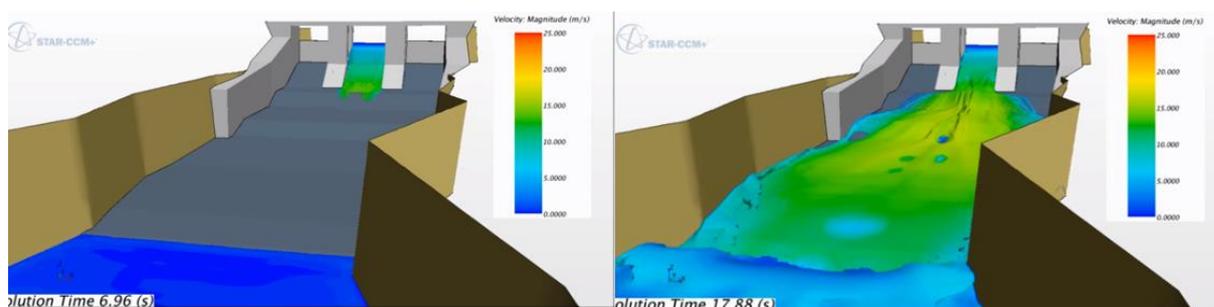


Figura 2.4 – Exemplo da simulação CFD 3D: escoamento de água numa barragem [29]

2.4. Comparação dos métodos de análise de plataformas *offshore*

O processo de otimização, quer na fase de dimensionamento quer já em situação de operação, não pode ser realizado recorrendo apenas a um método de análise. De seguida são enumerados e comparados três tipos de métodos: testes experimentais em modelos, medições na plataforma *offshore* já instalada e simulações numéricas. Cada um apresenta vantagens e desvantagens que quando usados em conjunto, complementam-se (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Prós/contras e comparação dos métodos de análise [30]

Método	Prós	Contras
Modelo de escala reduzida	<p>Razoável previsão das ações (e da resposta global do movimento) nas estruturas <i>offshore</i>;</p> <p>Geração de resultados para a validação dos modelos numéricos;</p> <p>Proporciona a verificação da viabilidade da estrutura ou operação;</p> <p>Modelação completa das leis físicas, condições ambientais bem definidas podendo gerar condições marítimas extremas.</p>	<p>Elasticidade e resposta estrutural simplificada por razões práticas, e não explicam o porquê dos acontecimentos quando os fenómenos não podem ser descritos;</p> <p>Efeito de escala pode afetar a reprodução real dos fenómenos;</p> <p>Análise/quantificação do comportamento do fluido limitado ao número de pontos onde são feitas as medições;</p> <p>Espaço físico de grandes dimensões.</p>
Medições <i>offshore</i> na estrutura à escala real	<p>Comportamento real do protótipo;</p> <p>Permite analisar a fiabilidade dos resultados previsto no modelo de escala e na simulação numérico;</p> <p>Pode ser usado para auxiliar as tomadas de decisão durante as operações presentes.</p>	<p>Não consegue dar previsões para a fase de projeto, apenas dá o feedback durante o tempo de vida da estrutura;</p> <p>As medições podem sofrer interferências devido aos trabalhos em execução na estrutura</p> <p>Número limitado de medições por causa dos custos e de aspetos práticos (não se podem fazer medições em zonas críticas de trabalhos).</p>
Simulação numérica	<p>Permite a modelação detalhada da resposta estrutural da estrutura:</p> <p>Auxilia a compreensão do comportamento das ações hidrodinâmicas complexas;</p> <p>Permite uma rápida previsão/verificação do comportamento da estrutura em diferentes condições ambientais/operacionais e a investigação da sensibilidade dos mais diversos parâmetros;</p> <p>Definir as condições críticas para os testes em modelos de escala reduzida bem como definir as respostas e as ações das estruturas como parte das respostas baseadas nos métodos de dimensionamento apresentados nas normas;</p> <p>Capacidade de análise e de visualização praticamente ilimitada. Possibilidade mostrar aspetos que não são fáceis de medir/visualizar nos outros dois métodos;</p> <p>Capazes de modelar cenários de acidente e as suas consequências, bem como estudar a fadiga.</p>	<p>Os outros métodos podem apresentar comportamentos físicos inesperados enquanto nos modelos numéricos apenas são apresentados comportamentos esperados uma vez que são resultado das leis físicas usadas na modelação, já conhecidas e descritas. Tal não garante que o que (não) acontece na simulação numérica (não) aconteça na realidade;</p> <p>Necessitam do auxílio dos outros dois métodos para validar a modelação;</p> <p>As simulações são complexas o que exige uma definição dos parâmetros bastante precisa. Também necessitam de grande capacidade computacional.</p>

Pode-se concluir que a análise por simulação numérica do modelo, apesar de ainda recente, apresenta-se como um forte método de análise, em contínua otimização.

2.5. Estudos de problemas FSI *offshore* com simulações numéricas

Como foi referido anteriormente, só recentemente se iniciou a utilização de *softwares* comerciais de simulação numérica na área *offshore*. Tal deveu-se à complexidade de modelar as condições ambientais ali encontradas. A modelação das ondas foi um dos principais desafios, merecendo um vasto leque de estudos. Foram desenvolvidos diferentes métodos de geração e propagação de ondas, comparando os resultados com os obtidos experimentalmente, tendo como objetivo validar este método de simulação.

William Finnegan e Jamie Goggins [31] listaram um conjunto de estudos que tiveram em vista a análise de problemas da área *offshore*, com diferentes métodos de numéricos, diferentes *softwares*, diferentes métodos de geração de ondas e com a integração da análise da interação fluido-estrutura (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Estudos analisados sobre geração de ondas e interação onda-estrutura [31].

Reference	Numerical method	Commercial software package	Reg/Irr waves	Wave generation method	Nonlinear waves	Wave–structure interaction
Kim et al. [1]	FDM	–	Reg, Irr	Flap-type wavemaker	✓	–
Boo [2]	HOBEM	–	Reg, Irr	Numerical	✓	✓
Turnbull et al. [3]	FEM	–	Reg	Numerical	✓	✓
Koo and Kim [4]	BEM	–	Reg	Numerical	✓	✓
Park et al. [5]	FVM	–	Reg, Irr	Numerical	✓	✓
Wu and Hu [6]	FEM	–	Reg, Irr	Piston-type wavemaker	✓	✓
Hadzic et al. [7]	–	Comet	–	Numerical	✓	✓
Sriram et al. [8]	FEM	–	Reg, Irr	Piston-type wavemaker	✓	–
Ning and Teng [9]	HOBEM	–	Reg, Irr	Numerical	✓	–
Agamloh et al. [10]	–	Comet	Reg, Irr	Piston-type wavemaker	✓	✓
Lal and Elangovan [11]	FVM	ANSYS CFX	Reg	Flap-type wavemaker	–	–
Ning et al. [12]	HOBEM	–	Reg	Numerical	✓	–
Liang et al. [13]	FVM	FLUENT	Irr	Piston-type wavemaker	✓	–
Elangovan [14]	FVM	ANSYS CFX	Irr	Flap-type wavemaker	–	–
Yan and Lui [15]	HOBEM	–	Reg	Numerical	✓	✓
Finnegan and Goggins [16]	FVM	ANSYS CFX	Reg	Flap-type wavemaker	–	✓
Yu and Li [17]	FVM	STAR-CCM+	Reg	Numerical	–	✓
Present study	FVM	ANSYS CFX	Irr	Numerical	–	✓

BEM: boundary element method, FDM: finite difference method, FEM: finite element method, FVM: finite volume method, HOBEM: higher-order boundary element method, Irr: irregular waves studied, Reg: regular waves studied.

O programa STAR-CCM+ é um dos mais utilizados na modelação de escoamento de fluidos. Exemplo disso é a sua utilização pelas empresas do sector: *Chevron, Atknis, British Petroleum (BP), General Electric (GE), Petrobras, TOTAL S.A, Subsea7, Diamond Offshore (DO), Technip, SBM Offshore (SBMO)*, entre outras. Este *software* apresenta ferramentas de modelação bastante avançadas e práticas, tornando-se acessíveis aos utilizadores do dia-a-dia. Nos últimos anos tem sido feita uma atualização regular deste *software*, demonstrando a grande dedicação e empenho em se manter atualizados.

Este *software* foi utilizado para estudar o comportamento dinâmico de duas plataformas *offshore* flutuantes (Figura 2.5) (TLP (Região do Sudeste da Ásia) e SPAR (Golfo do México)) quando expostas à ação das correntes marítimas locais. Aqui focaram-se no estudo dos movimentos induzidos pelos vórtices ali criados (*Vortex-Induced Motion*, VIM), concluindo que os resultados se aproximaram dos obtidos experimentalmente [32 e 33].

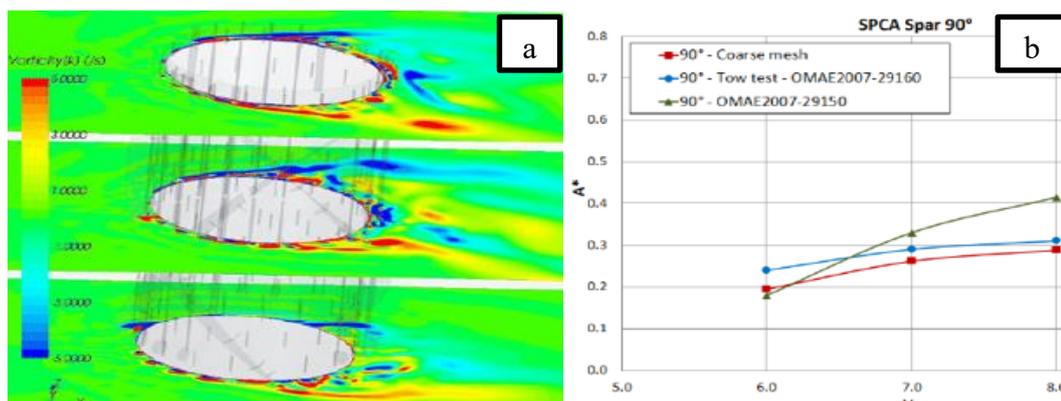


Figura 2.5 – a) Contorno dos Vórtice provocados pela ação da corrente na plataforma SPAR; b) comparação dos resultados da simulação numérica com os experimentais [33].

Também a empresa *Technip* realizou um conjunto de estudos no STAR-CCM+, em plataformas *offshore* flutuantes [34]. Foram analisados casos como: subida de ondas em condições extremas para o *deck* duma plataforma SPAR; análises *ringing*, isto é, fenómeno que se experiencia quando são geradas respostas de amplitudes consideráveis devido à aproximação do período de ressonância; análise do sistema de ancoragem (cabos) de plataformas TLP; e a simulação do movimento de plataformas semi-submersíveis (Figura 2.6 e Figura 2.7). Neste documento afirma-se que os resultados obtidos nas simulações CFD tomam valores muito próximos dos experimentais (Figura 2.6.f). De realçar que as estruturas foram consideradas como rígidas, focando-se apenas no estudo do movimento oscilatório e nas pressões exercidas sobre as superfícies de contacto.

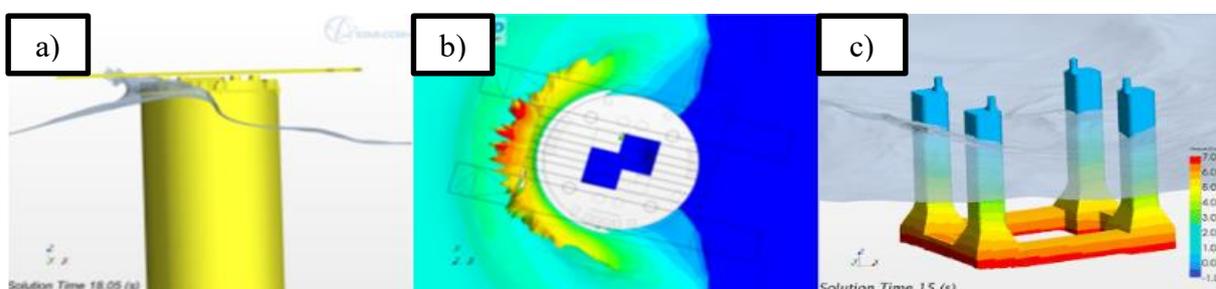


Figura 2.6 – a),b) plataforma SPAR sujeita a condições extremas; c) análise *ringing* numa plataforma gravítica [35]

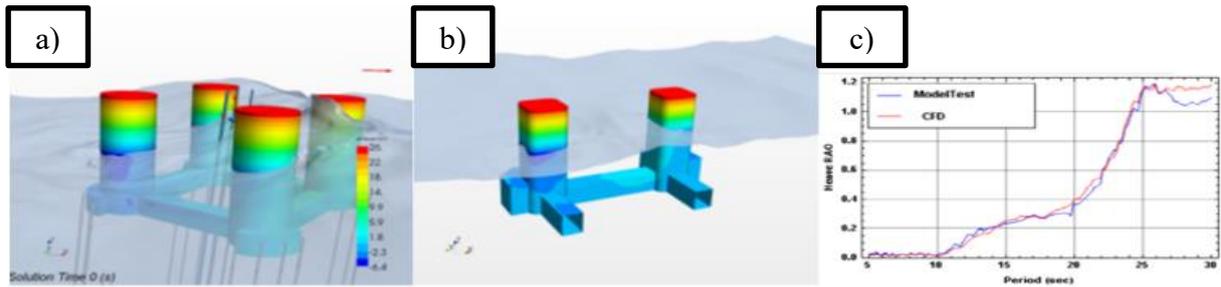


Figura 2.7 - d) Sistema de ancoragem de uma plataforma TLP; e) estudo do movimento de uma plataforma semi-submersível; f) comparação de resultados CFD vs *Model Test* [35].

A *Chevron* em parceria com a *CD-Adapco*, analisou as deformações em duas vigas do *deck* de uma plataforma *offshore* fixa, provocadas pela ocorrência de uma forte tempestade (Figura 2.8). Este problema FSI foi estudado através de uma co-simulação unidirecional explícita utilizando o ABAQUS e o STAR-CCM+ (Figura 2.9). As deformações de 46 cm na viga A e 18 cm na B (Figura 2.10) obtidas na simulação aproximam-se bastante bem das deformações reais medidas no local: 43 cm (viga A) e 40 cm (viga B). Os resultados confirmaram o potencial deste método, justificando a discrepância da deformação da viga B com a transferência do campo de pressões durante o intervalo de tempo mais desfavorável para a viga A [35].



Figura 2.8 – Deformações provocadas pela tempestade no *deck* da plataforma [35].

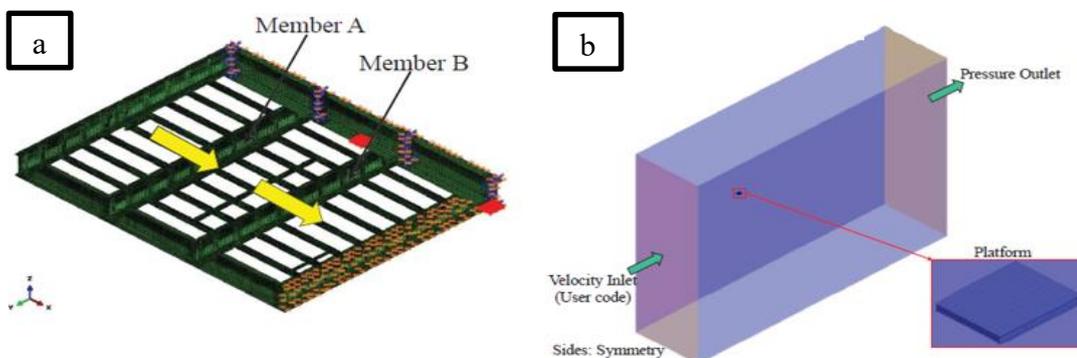


Figura 2.9 – a) Modelo FE: *deck* da plataforma (ABAQUS); b) modelo CFD: domínio do fluido e modelo da estrutura (STAR-CCM+) [35].

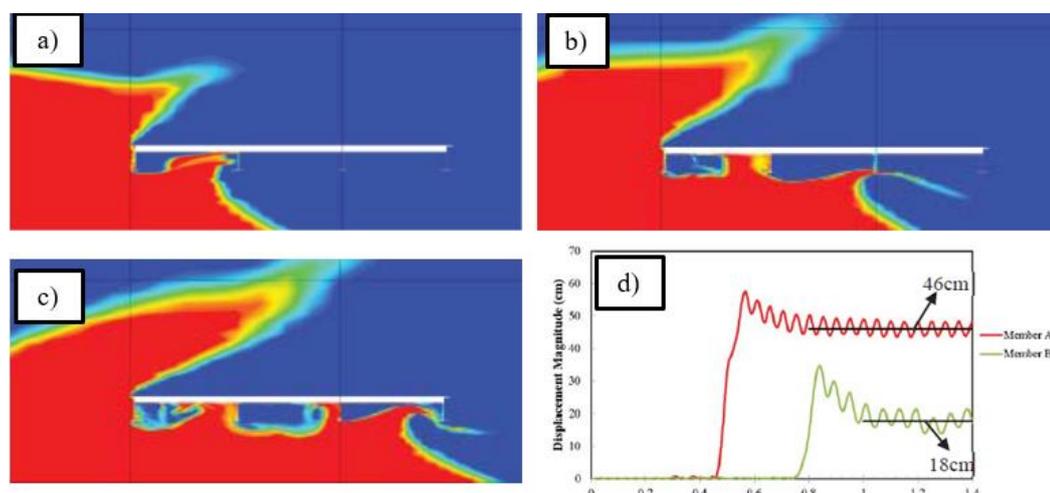


Figura 2.10 – a), b) e c) Volume da fração de água em tempos diferentes: 0.5 s, 0.75 s e 1.0 s; d) resultados das deformações em função do tempo [35].

Na revista *Dynamics* 39 [3] são apresentadas outras referências a estudos de problemas FSI, onde se utilizou a co-simulação bidirecional implícita com o ABAQUS (Figura 2.11): Impacto de um navio com peças de gelo e ação de ondas e correntes numa plataforma SPAR e numa plataforma navio (FPS).

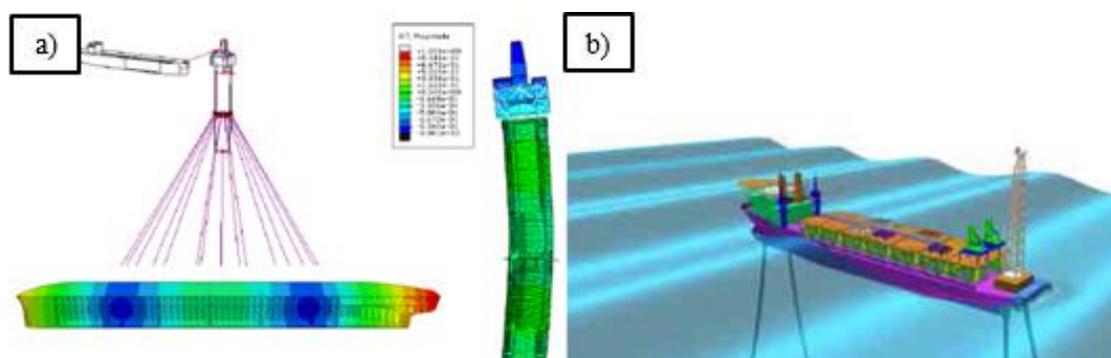


Figura 2.11 - Exemplos da co-simulação STAR-CCM+-ABAQUS: a) plataforma SPAR; b) plataforma navio (FPS) [3].

Na temática do trabalho aqui apresentado, refira-se o estudo desenvolvido por *Santo* e seus coautores em 2014 [36]. Neste estudo as capacidades de modelação CFD do *software* OpenFOAM foram utilizadas para modelar um tanque de ondas numérico 3D com o objetivo de reproduzir os resultados experimentais obtidos por *Allender e Petrauskas*. Estes últimos analisaram a influência de uma plataforma *jacket* no escoamento do fluido (as ações hidrodinâmicas) num tanque de ondas. No estudo do modelo CFD, a geometria da *jacket* foi simplificada numa torre porosa com dimensões semelhantes à *Merluza-1* (60 m x 60 m x 155 m),

também situada no Golfo do México a uma profundidade de 135 m. De forma a obter resultados não influenciados pela geometria do tanque numérico, isto é, fazendo com que as ondas não fossem refletidas nas “paredes”, modelaram-se tanques com comprimentos longitudinais distintos e com diferentes posicionamentos da estrutura em relação à zona da geração das ondas. A solução geométrica utilizada na análise teve um comprimento de 2000 m, largura de 480 m e 185 m de altura, com a estrutura afastada de 500 m da zona de geração de ondas (Figura 2.12). Adicionalmente à escolha da geometria do tanque, foram ainda modeladas zonas de relaxamento junto às faces *Inlet* e *Outlet* para diminuir ao máximo a reflexão das ondas nestas. Mais uma vez os resultados da simulação numérica apresentaram-se bastante próximos dos experimentais (Figura 2.13) [36]. A geometria do tanque numérico adotada para o estudo aqui desenvolvido teve como base este estudo de 2014.

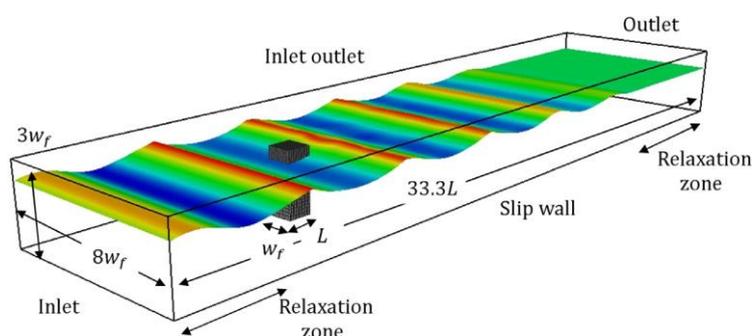


Figura 2.12 - *Layout* do tanque de ondas numérico modelado no OpenFOAM [36].

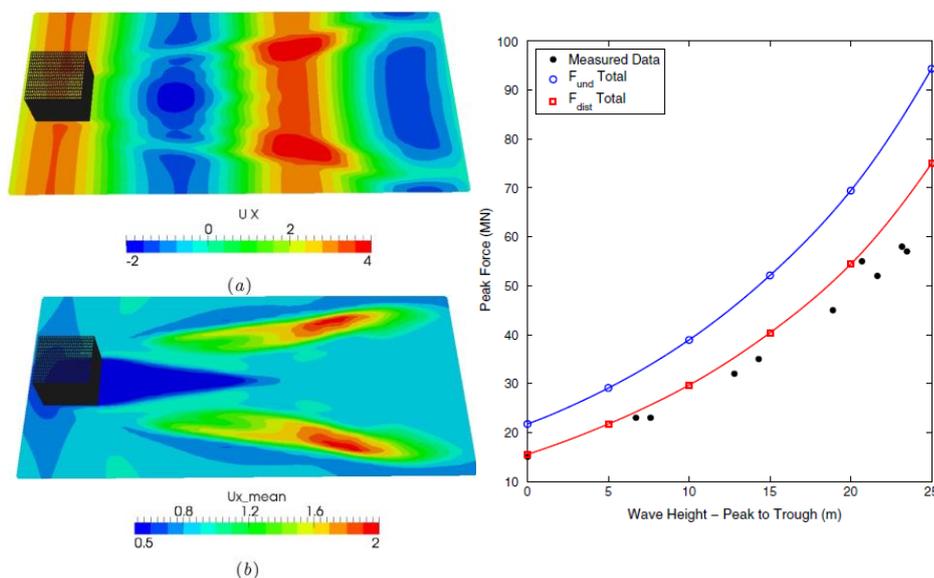


Figura 2.13 – (a) e (b) Resultados da velocidade do escoamento do fluido, obtido através da simulação CFD; (c) Comparação com os resultados do modelo experimental [36].

3. ACÇÕES – ONDAS E CORRENTES OCEÂNICAS

3.1. Introdução

No dimensionamento de qualquer tipo de estrutura é necessário identificar e quantificar as ações a que esta irá estar sujeita durante o seu tempo de vida. As estruturas *offshore* encontram-se sujeitas a ações características devido à sua localização, o que torna necessário perceber a sua origem e modo de atuação. Podemos então, dividi-las em quatro tipos: ações permanentes, variáveis, ambientais e acidentais. Definem-se como ações permanentes o peso próprio da estrutura e a maquinaria necessária para auxiliar a exploração do petróleo [37].

As ações variáveis referem-se às forças exercidas durante a sua instalação (variação de pressão, oscilação, etc.) e às forças exercidas durante o uso normal da estrutura (número de trabalhadores, peso de material armazenado, fluido e gás, temperatura, presença de helicóptero, etc.) [37].

Como ações ambientais consideram-se a ação do vento, do mar (ondas, correntes e efeito das marés), sismos, crescimento marinho, bem como a ação da neve e do gelo (zonas específicas). Sendo a ação de natureza ambiental, defini-las, de forma a aproximar a sua ação o mais possível da realidade, torna-se de certa forma um processo complexo e incerto. Tratam-se de ações não lineares quer no tempo quer no espaço, sendo necessário recorrer a registos históricos para tentar prever o seu comportamento durante a instalação, funcionamento e desmantelamento da estrutura.

Neste estudo focou-se a atenção nas ações hidrodinâmicas em zona *offshore*. Estas ações centram-se no estudo do movimento da água que provem essencialmente de duas fontes: i) correntes provocadas pelas marés e pela influência térmica local, e ii) movimento oscilatório das ondas provocado geralmente pelo vento [38]. Foram analisados os processos de formação e propagação das ondas, os tipos de ondas, as características, as teorias de ondas e as correntes. Após compreendidas, foram quantificadas as ações hidrodinâmicas utilizadas neste estudo.

3.2. Ondas oceânicas

3.2.1. Definição

No que se refere à origem existem dois tipos de ondas: ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas. As ondas oceânicas são classificadas como ondas mecânicas, uma vez que são produzidas por uma perturbação num meio natural [39]. Assim como todos os tipos de ondas, estas são definidas através dos seguintes parâmetros: período (T), altura da crista (h_c), altura da cova (h_t), altura da onda ($H = h_c + h_t$) e altura da lâmina de água (d ou h), representados na Figura 3.1.

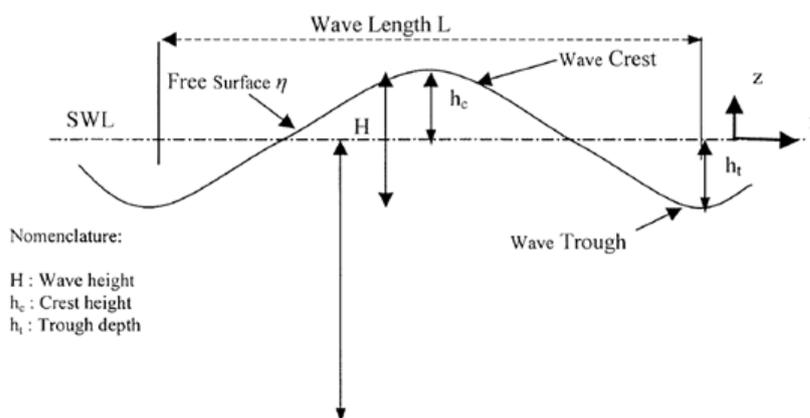


Figura 3.1 – Parâmetros das ondas oceânicas [40].

3.2.2. Formação e propagação

As ondas oceânicas são geralmente geradas pela ação do vento que exerce forças de pressão e fricção sobre a superfície da água que perturba o seu equilíbrio. Como foi referido anteriormente, o facto de tratar-se de uma ação não-linear no espaço e no tempo, velocidade variável, faz com que o fluxo de transferência de energia para água também não seja constante. A ação da gravidade faz com que o equilíbrio seja restabelecido. A repetição cíclica deste fenómeno conduz ao “crescimento” e propagação das ondas (Figura 3.2) [41].

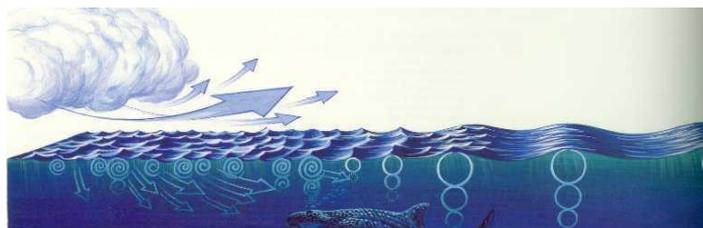


Figura 3.2 – Formação das ondas devido à ação do vento sobre a superfície da água [37].

A aleatoriedade deste fenómeno leva à formação de ondas com diferentes altura, comprimentos, períodos e direções. Existem duas designações para os conjuntos de ondas de acordo com o local de formação: vaga – gerada numa área onde os ventos são mais intenso (*fetch*) (Figura 3.3); ondulação – formam-se nas restantes zonas, onde as intensidades dos ventos são inferiores [37].

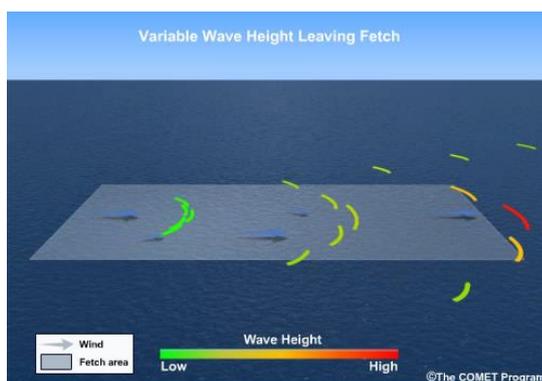


Figura 3.3 – Zona de vento intenso onde se formam ondas com diferentes características [37].

A propagação das ondas é realizada através da propagação da energia entre partículas por contacto. Assim, estas não se deslocam grandes distâncias, antes pelo contrário, descrevem um movimento orbital em que voltam “sempre” à posição inicial, resultado da combinação de ondas longitudinais e transversais (Figura 3.4) [37]. Durante um ciclo, a velocidade de uma partícula nunca apresenta nem a mesma direção nem o mesmo sentido de atuação, compreendendo-se a simplificação dos métodos teóricos na tentativa de traduzir a ação das ondas sobre as estruturas.

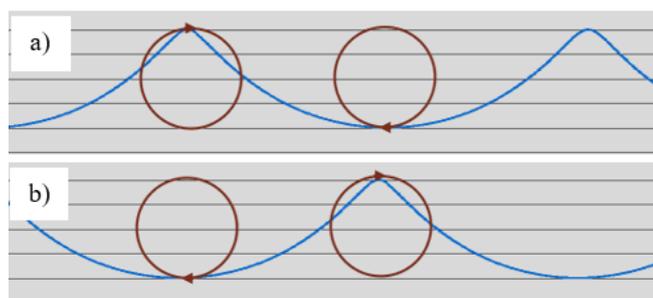


Figura 3.4 – Movimento de duas partículas da superfície da água quando uma onda passa [41].

Sendo uma ação causada pela ação do vento na superfície da água, são as partículas da superfície que, apresentando maior quantidade de energia, descrevem um movimento orbital com maior raio. Durante a transferência de energia entre as partículas, parte desta é dissipada, explicando a diminuição em profundidade do raio orbital dos movimentos, acabando por desaparecer. À profundidade a que isto acontece designa-se como a base da onda e é

normalmente considerada como metade do comprimento da onda ($L/2$). A geometria da órbitra é também influenciada pelo fundo oceânico, isto é, em águas profundas a trajetória considera-se circular dado que a altura da lâmina de água é superior à altura em que se encontra a base da onda, costuma-se dizer que a onda não “sente” o fundo do mar. Quando se aproxima de zonas mais baixas e a base da onda é superior à profundidade, esta “sente” o fundo do mar e o movimento orbital vê-se restringido, a trajetória sofre achatamento e passa a ser elíptica. Esta alteração propaga-se até à superfície provocando a diminuição do comprimento de onda, forçando o empolamento da onda e tornando a crista torna-se mais angulosa (Figura 3.5). Pelas características da onda consegue-se estimar a profundidade do local [37].

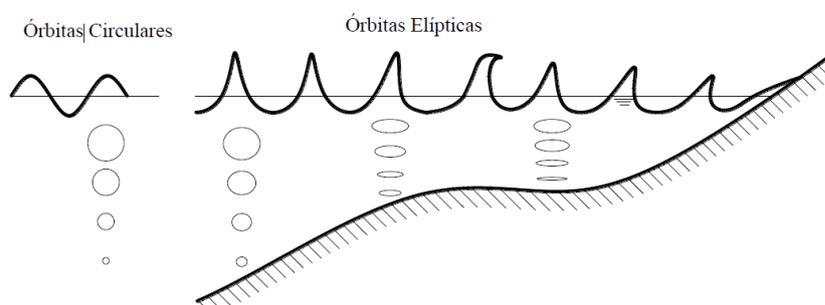


Figura 3.5 – Propagação de agitação em direção à costa. Esboço do movimento orbital das partículas [37].

Devido ao fenómeno anteriormente descrito, o mar é dividido em três zonas (Figura 3.6): águas profundas (*deep water*); zona de transição e águas rasas (*shallow water*) [37].

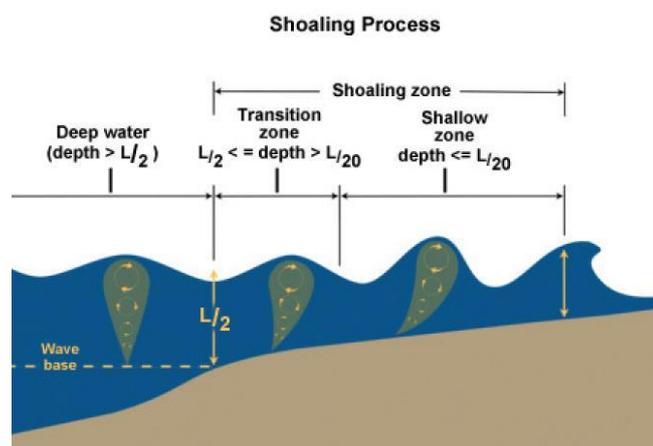


Figura 3.6 – Divisão do mar em zonas em função do comprimento da onda [37].

Para além da aproximação à costa, as características das ondas podem ainda sofrer alterações devido a mudanças bruscas de profundidade (desfiladeiros/cumeeiras), por fenómenos de refração, de difração e de reflexão. Os fenómenos de refração acontecem na aproximação da

zona costeira pelo que são importantes apenas para o dimensionamento/estudo de obras ali instaladas. Por outro lado os fenómenos de difração acontecem em todo o tipo de obras/estruturas marítimas pelo que para o caso das plataformas *offshore* devem ter-se em conta. Quando existe uma obstrução que impede a propagação da onda na sua direção de propagação inicial, uma parte da onda curva em torno do objeto (difração da onda) e a outra parte é refletida [37], tal como exemplificado na Figura 3.7.

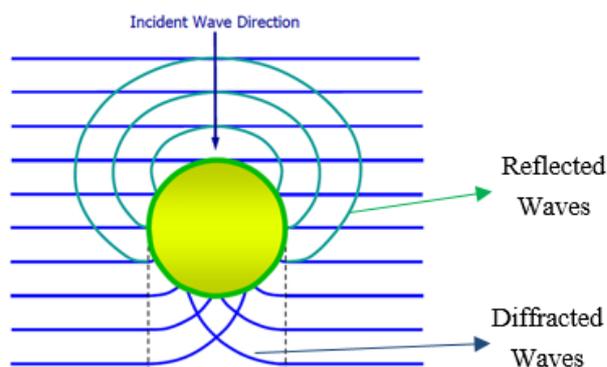


Figura 3.7 – Fenómenos de difração e reflexão das ondas quando se propagam na direção de um obstáculo cilíndrico [42].

É importante referir que as ondas não são todas causadas pela ação do vento. Também podem ter como origem as tempestades, Tsunamis e marés astronómicas e meteorológicas. Em relação às marés, estas não provocam só ondas mas também são as principais responsáveis pela subida e descida do nível da água (em períodos de proximamente 12 horas) e ainda pelas correntes de larga-escala com velocidades elevadas [37].

3.2.3. Métodos de simulação do comportamento marítimo

O comportamento do mar pode ser simulado usando dois métodos distintos: método da onda singular e método do estado marítimo completamente desenvolvido. Ambos utilizam os resultados das observações com base nas probabilidades de ocorrência. O primeiro método consiste na simplificação do carácter irregular e aleatório numa única onda regular. É um método muito utilizado no dimensionamento de estruturas *offshore*, em que através de uma análise simplificada se procura maximizar a resposta estrutural simulando condições extremas. As propriedades destas ondas regulares são traduzidas através das teorias das ondas (secção 3.2.4). O segundo método, como o próprio nome indica, consiste na tradução real das observações através de uma onda irregular. Não se consegue definir as características da onda como nas regulares, por não apresentarem regularidade temporal dos parâmetros da altura e período. Estas ondas são traduzidas por espectros de densidade energética. Não sendo aplicáveis

as teorias de ondas, são feitas aproximações por fórmulas derivadas das observações, sendo assim de natureza empírica. No dimensionamento *offshore* existem diversas fórmulas espectrais que através do ajustamento dos parâmetros tentam-se aproximar das mais diversas condições marítimas. As mais utilizadas são as apresentadas no modelo de *Pierson-Moskowitz* e no modelo *JONSWAP*, tendo sido este último desenvolvido com base no primeiro através de observações no Mar do Norte [37]. *Chakrabarti* [43] apresenta no Quadro 2.3 o domínio de aplicação de cada um dos modelos em função da localização e das condições ambientais em que se pretende analisar a estrutura.

Location	Operational	Survival
Gulf of Mexico	P-M	P-M or JONSWAP
North Sea	JONSWAP	JONSWAP
Northern North Sea	JONSWAP	JONSWAP
Offshore Brazil	P-M	P-M or JONSWAP
Western Australia	P-M	P-M
Offshore Newfoundland	P-M	P-M or JONSWAP
West Africa	P-M	P-M

Quadro 2.3 – Domínio de aplicação de cada um dos modelos espectrais [43].

Ainda de referir a possibilidade da sobreposição de ondas regulares (diferentes amplitudes, comprimentos de onda, fases e direções) para obter um espectro de densidade energética mais irregular, aproximando-se das condições reais [37].

O *software* STAR-CCM+ integra a possibilidade de utilizar qualquer um destes métodos, apresentando uma capacidade de sobreposição de 180 ondas regulares com propriedades diferentes [23].

3.2.4. Teorias de ondas

Desde o início do século XIX foram desenvolvidas diversas teorias de ondas regulares para descrever a cinemática das partículas da água [39]. As hipóteses ainda hoje aplicadas na sua representação são: teoria de onda linear ou de *Airy*, teoria de *Stokes*, teoria de onda *Cnoidal*, teoria de onda solitária e teoria de função *Stream* (Figura 3.8) [10].

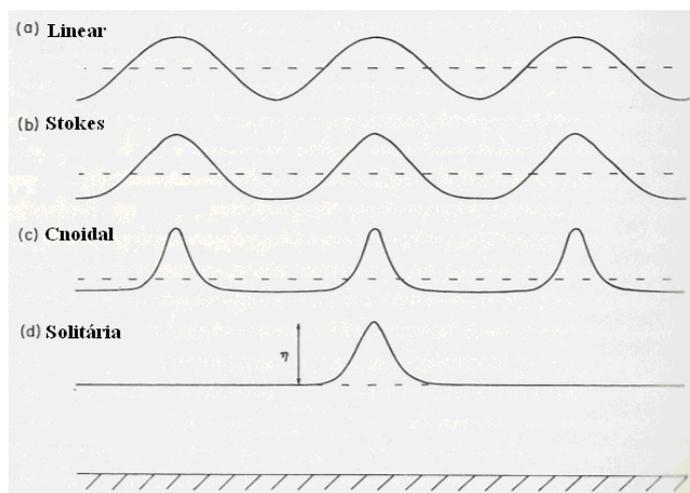


Figura 3.8 – Representação da evolução da superfície das diferentes teorias de ondas [10].

Cada teoria tem o seu campo de aplicação, isto é, em função da altura da onda (H), do período da onda (T) e da altura da lâmina de água média (h) é escolhida a teoria que melhor representa o comportamento real da onda. Existem três parâmetros adimensionais que delimitam a zona de aplicação de cada uma das teorias [10]:

$$\text{Parâmetro de tamanho de onda: } S = 2\pi \frac{H}{gT^2}$$

$$\text{Parâmetro de profundidade: } \mu = 2\pi \frac{h}{gT^2}$$

$$\text{Número de Ursell: } U_R = \frac{HL^2}{h^3} = \frac{S}{\mu^3}$$

Na década de 60, *Le Mehaute* estabeleceu graficamente os limites com o auxílio destes parâmetros (Figura 3.9). Pode-se verificar que para a mesma situação podem ser usadas várias teorias e ainda que é feita a divisão em relação à rebentação. Isto é, quando a amplitude da onda atinge a altura crítica, a energia da onda transforma-se em energia cinética turbulenta e acaba por rebentar. Nenhuma das teorias simples consegue reproduzir este comportamento, sendo necessário utilizar a teoria da onda solitária [10].

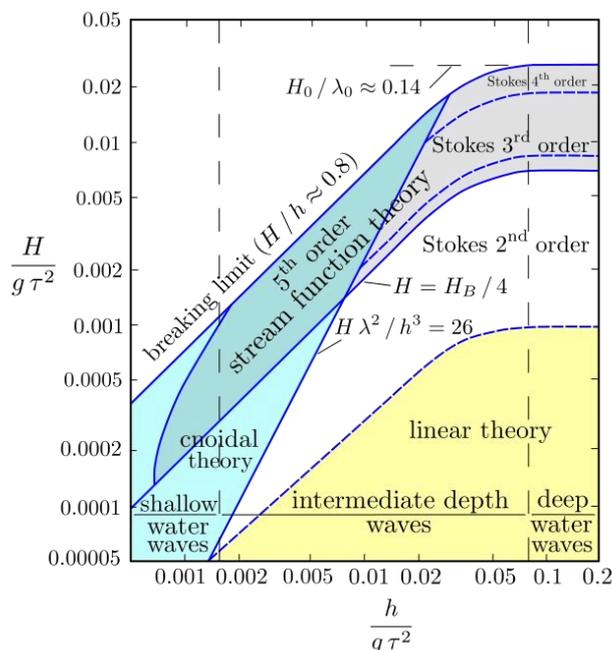


Figura 3.9 - Ábaco de aplicabilidade das diferentes teorias de onda [37]

Quando as ondas apresentam uma amplitude muito pequena ($\frac{H}{L} \ll 1$ ou $\frac{H}{h} \ll 1$), a teoria de Airy apresenta a melhor descrição dos fenómenos. Esta trata a onda como linear, isto é, o movimento é perfeitamente sinusoidal, os movimentos orbitais são circulares. Estes parâmetros são diretamente proporcionais ao carácter não-linear das ondas. À medida que estes parâmetros aumentam também a não linearidade do comportamento das ondas aumenta nestas condições. A teoria de *Airy* não conseguia reproduzir as características das ondas, o que propulsionou uma enumera lista de proposta para com reformulações da teoria. As mais notáveis incluem os seguintes trabalhos: *Stokes*, no desenvolvimento de uma série de *Fourier* que se demonstra válida desde a primeira até à quinta ordem; *Dean*, no desenvolvimento da teoria de função *Stream*; e o desenvolvimento da teoria de onda *Cnoidal* [10, 37, 38 e 44].

A teoria de 2ª ordem de *Stokes* fornece duas componentes para a cinemática da onda, a primeira com a frequência da onda e a segunda com duas vezes a frequência da onda. O facto de a contribuição da componente de 2ª ordem ser inferior à de 1ª ordem, torna o perfil das ondas não-linear, a crista aumenta e a cava reduz. O mesmo processo é repetido para as restantes ordens, acrescenta-se uma componente da ordem correspondente em cada [43].

Para a modelação de ondas de 5ª ordem, o *software* STAR-CCM+ integra uma aproximação desenvolvida por *Fenton* (em 1985), onde acrescentou as componentes da corrente e do fluxo de massa à teoria de *Stokes* de 5ª ordem [23]. O perfil e a velocidade da onda passam assim a

depender não só da profundidade, da altura da onda e do período (ou do comprimento) da onda, mas também da corrente [45]. Facilmente se percebe que com a introdução destas novas componentes a reprodução torna-se mais real.

Para aprofundar os conhecimentos neste subtema propõe-se a leitura do livro de *Chakrabarti* [43], que é uma referência bibliográfica bastante interessante e completa.

3.3. Correntes oceânicas

Os efeitos das correntes são importantes considerar nas fases de dimensionamento, construção e operação das estruturas *offshore*. Estas podem alterar tanto a velocidade como a direção das partículas de água essencialmente à superfície. Podem até alterar significativamente as características das ondas (altura, período e forma) [44].

As principais fontes de geração de correntes são a ação do vento, das marés e da circulação do oceano. Assim como nas ondas, a intensidade destas varia com a localização e com a profundidade [10]. É recomendável efetuar medições no local para conhecer o perfil de velocidades da corrente; caso não seja possível pode recorrer-se a leis simplificadas, tal como indicado na norma DNV [44]. Nesta norma são apresentadas expressões simplificadas (considerando a corrente unidirecional) para o cálculo da velocidade da corrente de acordo com a sua origem. No caso das correntes geradas pelo vento verifica-se que, para zonas de águas rasas, só atuam até uma profundidade de 50 m e as das marés apresentam uma tendência para valores iguais a zero quando a profundidade tende para infinito. Já nas zonas de águas profundas a expressão altera, mas indica que existem diversos fatores que a limitam: clima oceanográfico do local; distribuição vertical da densidade; fluxo de água do local e ainda que pode variar de estação para estação, tornando-as muito complexas.

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO PROBLEMA ESTUDADO

4.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se a modelação numérica de um problema FSI utilizando modelos à escala real. Inicia-se o capítulo com a apresentação do esquema estrutural e das características dos materiais da torre da plataforma *offshore* em estudo, seguido da modelação 3D da geometria no *software* Autodesk INVENTOR. Após esta primeira fase, inicia-se a modelação CFD do domínio do fluido no STAR-CCM+ (tanque de ondas numérico) integrando as ações hidrodinâmicas e por fim a modelação FEM da estrutura no ABAQUS.

4.2. Identificação da geometria, topologia e materiais da estrutura estudada

A estrutura *offshore* aqui estudada é designada por Merluza-1, está atualmente instalada no campo submarino de *Merluza*, a uma profundidade de 134 m, a 180 km a sudoeste da cidade de Santos, na Bacia de Santos, no litoral do Estado de São Paulo, Brasil [21]. Como foi explicado na secção 1.4, o estudo aqui desenvolvido foi realizado para uma localização fictícia no Golfo do México à mesma profundidade.

Esta plataforma é totalmente metálica e divide-se em três partes: fundações (com um sistema de estacas), *jacket* (sistema treliçado com cerca de 150 m de altura) e convés (com uma área total de 1915 m²). Para o corrente estudo foi apenas considerada a *jacket*; desprezou-se a interação solo-estrutura com o intuito de simplificar o estudo, mas reconhecendo que esta tem grande influência no comportamento dinâmico global da estrutura. Todos os elementos tubulares são em aço estrutural A500 grau B ($f_y = 315$ MPa; $f_u = 400$ MPa); considerando ainda os seguintes valores: módulo de elasticidade de 2.05×10^5 MPa, coeficiente de *Poisson* de 0.30 e massa específica de 7850 kg/m³. Para a construção do modelo utilizaram-se os desenhos do projeto estrutural apresentado por Bruno Rimola [21], onde foram utilizados os seguintes elementos tubulares (Figura 4.1):

- Mangas das estacas – $D = 2134$ mm, $esp. = 55$ mm
- *Legs* principais: $D = 1676$ mm, $esp. = 32$ mm;
- *Legs* secundárias: $D = 1219$ mm, $esp. = 25$ mm
- Contraventamentos: $D = 800$ mm, $esp. = 25$ mm;
- Restantes elementos: $D = 650$ mm, $esp. = 19$ mm.

Sendo D o diâmetro externo do tubo e $esp.$ a sua espessura.



Figura 4.1 - Representação das características geométricas dos elementos da *jacket*: mangas das estacas (verde); *legs* principais (amarelo); *legs* secundárias (vermelho); contraventamentos (branco); restantes elementos estruturais (azul).

4.3. Modelação da geometria da estrutura (CAD 3D) no INVENTOR

Para construir o modelo 3D da *jacket* fez-se uso das capacidades de modelação CAD 3D do *software* Autodesk INVENTOR [46]. Paralelamente, considerou-se a possibilidade de utilização do *software* SolidWorks, sendo o seu concorrente direto no mercado atual. Os dois programas apresentam interfaces bastante claras, simples e de fácil compreensão e utilização. Ambos permitem a exportação do modelo 3D para o STAR-CCM+ e ABAQUS. Contudo, a escolha foi condicionada pela existência apenas da licença de utilização da Autodesk para estudantes do DEC-UC.

Na modelação no STAR-CCM+ foi necessário subtrair o volume ocupado pela estrutura ao volume total do fluido, pelo que se construiu um modelo da *jacket* com elementos sólidos cilíndricos, não dando importância às espessuras de cada membro (Figura 4.2). No final, a partir

deste, criou-se o modelo de casca 3D para utilizar no ABAQUS, onde apenas se considerou a interface, superfície exterior da *jacket* (*esp.* = 0 m) que está em contacto com o fluido.

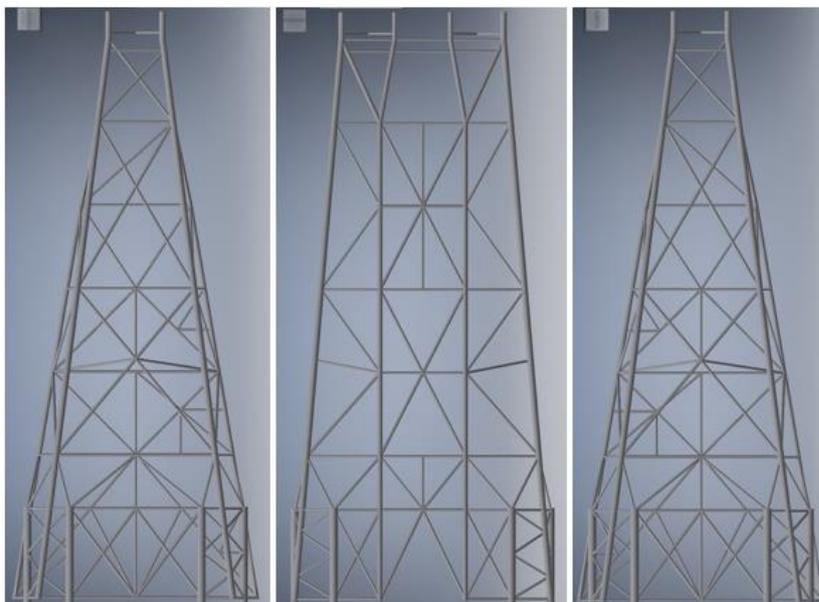


Figura 4.2 – Alçado lateral esquerdo, alçado principal e alçado lateral direito do modelo 3D da *jacket* construído no INVENTOR.

Concluídos ambos os modelos no INVENTOR, exportaram-se os modelos para o ABAQUS através de um ficheiro STEP (*.step) e para o STAR-CCM+ dum ficheiro *parasolid* (*.x_t).

4.4. Modulação do comportamento do fluido no STAR-CCM+

4.4.1. Introdução

Como foi já mencionado na secção 1.4, para o cálculo e análise das ações hidrodinâmicas sobre a estrutura foi usado o *software* comercial STAR-CCM+. Este permite a co-simulação com programas de análise estrutural, entre os quais o ABAQUS. Incorpora a potencialidade de modelar ondas marítimas regulares (lineares e não lineares - teorias de *Stokes*) e irregulares (modelos de *Pierson-Moskowitz* e de *JONSWAP*), conjugando-as com a ação das correntes marítimas [23]. Tendo em conta o objetivo do estudo, foi o *software* que se considerou mais adequado.

O comportamento do fluido foi modulado seguindo a sequência de operações apresentada no fluxograma da Figura 4.3.



Figura 4.3 – Fluxograma da sequência de operações utilizadas na modelação do fluido

4.4.2. Interface do programa

Antes de iniciar a modulação propriamente dita foi necessário compreender o seu funcionamento, dado que se tratou do primeiro contacto com programa e com a modelação CFD. Inicialmente a sua interface gráfica pareceu bastante complexa e pouco organizada. Contudo o documento de apoio ao utilizador tornou a tarefa de adaptação bastante mais simples. Nesse documento é explicado de forma clara como se encontra dividida a interface, bem como a utilidade de cada comando disponível. Para uma introdução à modelação é ainda apresentado um conjunto de tutoriais que abrange as mais diversas áreas de utilização do CFD, entre as quais a modelação das condições ambientais marítimas. Seguindo a divisão e numeração das zonas constituintes da interface do programa identificadas na Figura 4.4; pode-se explicar a interface gráfica da seguinte forma:

- Zona 1 – A barra apresentada neste conjunto agrupa os comandos gerais do programa como criar/abrir/guardar simulações, gerar malhas, correr simulações e opções de visualização;
- Zona 2 – Neste campo são apresentadas as simulações que estão abertas, uma vez que o programa permite esta situação;
- Zona 3 – Campo onde incide a maior parte do trabalho. É neste campo que se definem todos os parâmetros da modulação desde a preparação da geometria até à preparação da análise;
- Zona 4 – Informação sobre o processo que o programa está a executar no momento;
- Zona 5 – Campo complementar ao campo 3; é aqui que se definem as propriedades de cada operação selecionada em 3.
- Zona 6 – Onde se visualiza graficamente tudo o que modulado; com por exemplo: a geometria, a malha, os resultados, etc.

- Zona 7 – Apresenta todas as sub-rotinas que o programa está a executar e os resultados numéricos das mesmas.

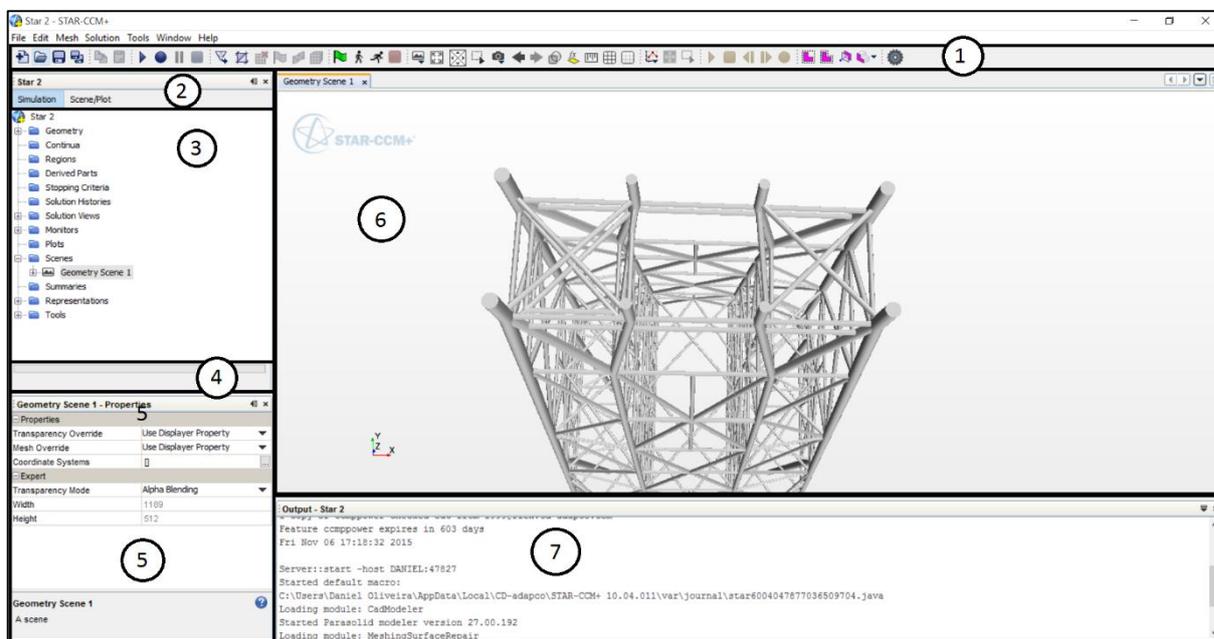


Figura 4.4 – Interface gráfica do STAR-CCM+

4.4.3. Definição da geometria do tanque de ondas numérico

Seguindo a ordem apresentada no fluxograma da Figura 4.3, iniciou-se a modelação com a importação da geometria da *jacket* através do ficheiro *parasolid* do programa (secção 4.3). De seguida fez-se a verificação da mesma através da ferramenta *repair surface*, que analisa a qualidade da geometria importada, procurando possíveis aberturas, sobreposições ou outras incoerências, dando a possibilidade de as reparar posteriormente de forma automática ou manual [23]. Após algumas correções a geometria foi validada.

Como foi referido na secção 2.5, a escolha das dimensões do tanque de ondas numérico tem influência direta na qualidade dos resultados. Assim, tendo sido validada a geometria utilizada no estudo de *Santo* e seus coautores (2014) [36], problema FSI com uma estrutura de dimensões e características da onda semelhantes às aqui utilizadas, definiu-se uma geometria com base neste (Figura 4.5).

O último passo foi subtrair o volume da estrutura ao volume do bloco para obter o volume ocupado pelos fluidos (água e ar); para tal utilizou-se a operação *Boolean – Subtract* [23].

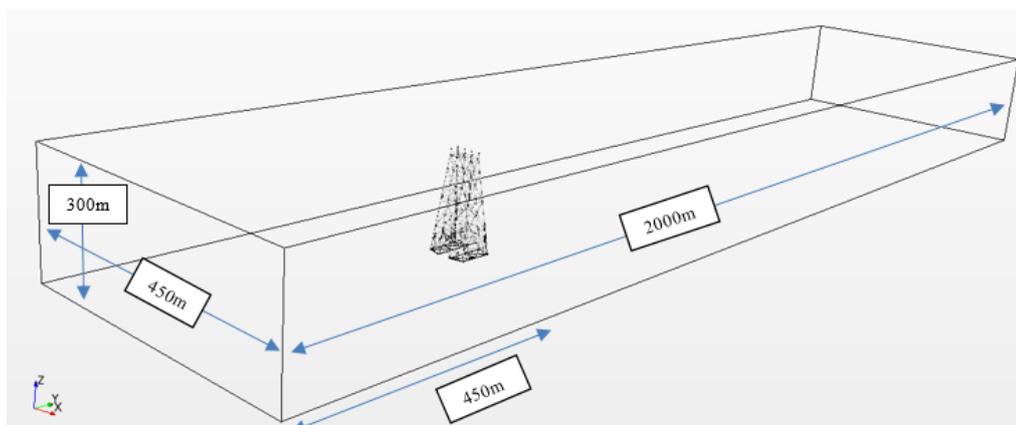


Figura 4.5 - Dimensões geométricas do modelo do tanque numérico (STAR-CCM+)

4.4.4. Construção da topologia da simulação

Definir a topologia da simulação é o processo de calibração entre a definição geométrica do problema e a definição computacional (física). A geometria é definida em termos de partes geométricas, superfícies e curvas. Já o modelo computacional define-se em termos de regiões e fronteiras [23].

O volume do fluido obtido (tanque de ondas - seção 4.5.3) foi associado a uma região que se designou por “Domínio do Fluido” e as superfícies externas e a da *jacket* foram definidas como fronteiras desta região. A estas atribuíram-se designações de acordo com a função e/ou posição na simulação: entrada e saída do fluido, solo, topo, laterais e *Jacket/FSI_INTERFACE* (Figura 4.6).

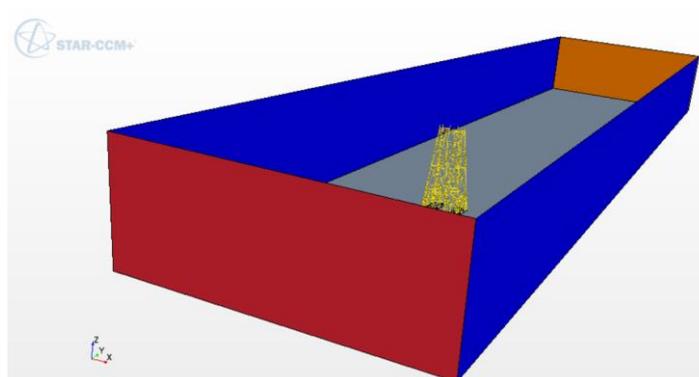


Figura 4.6 – Fronteiras do modelo do tanque: Entrada (vermelho); Saída (laranja); Laterais (azul); Jacket (amarelo); Solo (cinzento). A face do Topo encontra-se transparente com o objetivo de visualizar o interior

4.4.5. Modelos Físicos

O STAR-CCM+ contém um conjunto vasto de modelos físicos e métodos para a simulação de escoamentos de fluidos, transferência de calor, turbulência, tensão de sólidos, interação dinâmica fluido-sólido, acústica e fenómenos relacionados [23].

Tendo a região definida, escolheram-se os modelos físicos a utilizar dentro do volume. Assim que se escolhe um modelo, o *software* verifica e seleciona automaticamente todos os outros modelos que sejam necessários acoplar para que o escolhido seja aplicado. Na Quadro 4.1 são apresentados os modelos selecionados de acordo com o campo que se quis simular e na Figura 4.7 é apresentado o esquema com todos os modelos utilizados.

Uma vez que se pretendeu realizar uma co-simulação unidirecional implícita (fluido-estrutura), realizou-se uma integração no tempo implícita (processo iterativo para atingir a convergência dos resultados) através do modelo *Implicit Unsteady* (discretização de 2ª ordem), com o objetivo de obter uma melhor descrição do movimento das ondas e de utilizar um *time-step* maior (secção 2.2.2).

Quadro 4.1 - Modelos físicos selecionados para a simulação do “Domínio do Fluido”.

Simulação	Modelo
Espaço	<i>Three Dimensional</i>
Tempo	<i>Implicit Unsteady</i>
Material	<i>Eulerian Multiphase</i>
Modelo Multifásico	<i>Volume of Fluid (VOF)</i>
Regime de viscosidade	<i>Turbulent</i>
Modelo de regime turbulento	<i>K-Epsilon Turbulence</i>
Gravidade	<i>Gravity</i>
Ondas e Correntes	<i>VOF Waves</i>
Co-simulação	<i>Co-Simulation ABAQUS</i>

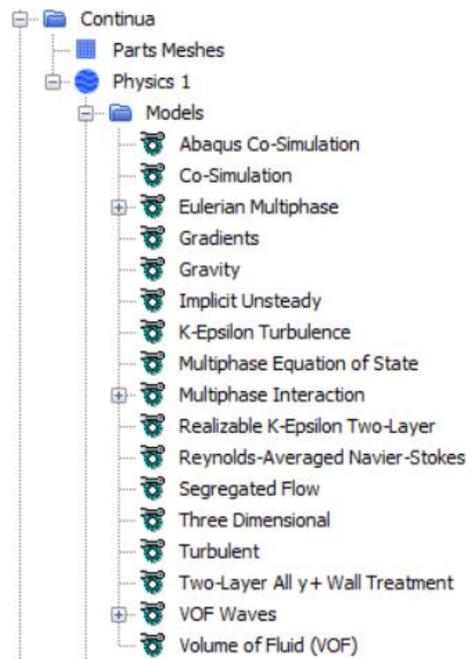


Figura 4.7 – Modelos físicos ativados para a modelação numérica do fluido

Após selecionados os modelos físicos foi necessário defini-los. Iniciou-se pela definição das propriedades dos materiais/fluidos (Figura 4.8): água – líquido com densidade constante (997.551 kg/m^3); ar – gás com densidade constante (1.18415 kg/m^3).

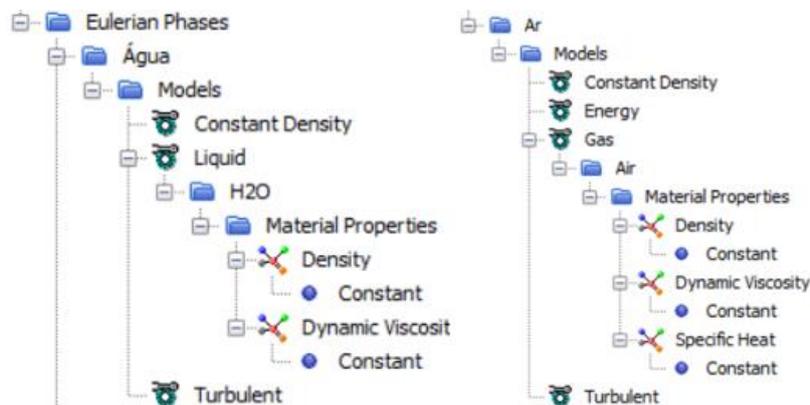


Figura 4.8 – Definição dos materiais/fluidos que ocupam a região.

4.4.6. Quantificação e modelação das ações hidrodinâmicas

Uma vez compreendidas as ações e conhecidos os métodos de simulação das condições marítimas, foram definidos os métodos a utilizar e as características de cada ação. Neste estudo optou-se pela utilização do método da onda singular uma vez que, o objetivo principal foi estudar as deformações máximas causadas na estrutura da *jacket*.

Como não foi possível conhecer as características das ações do local em que se encontra instalada (Bacia de Santos), decidiu-se simular uma situação fictícia. Foram então utilizadas as características da onda de dimensionamento e da corrente apresentadas na norma da API [47] para a zona ocidental do Golfo do México (97° SW to 95.0° W). Esta norma apresenta os valores a utilizar para cada localização e situação. Para estruturas deste tipo, o dimensionamento é feito para um período de retorno de 100 anos, utilizando assim uma onda com 23.1 m de altura com um período de 13.6 s (Quadro 4.2). Para a corrente optou-se por utilizar um valor intermédio aos apresentados, fixando-a em 1.5m/s.

Quadro 4.2 - Características das ações a utilizar para a zona do Golfo do México (97° SW a 95.0° W) [47].

Return Period (Years)	10	25	50	100	200	1000	2000	10000
Waves, WD >= 1000 m								
Significant Wave Height (m)	6.8	9.8	11.3	13.1	13.7	16.4	17.0	19.0
Maximum Wave Height (m)				23.1	24.2	28.9	30.1	33.6
Maximum Crest Elevation (m)	8.0	11.4	13.1	15.2	16.0	18.9	19.6	21.7
Peak Spectral Period (s)	12.2	13.8	14.4	15.1	15.3	16.7	17.1	18.0
Period of Maximum Wave (s)				13.6	13.8	15.1	15.4	16.2

De seguida, calcularam-se os parâmetros adimensionais da onda e através do ábaco da Figura 3.9; concluiu-se que a Teoria de 5ª ordem de Stokes é a que melhor a traduz.

Após as características definidas, modelaram-se numericamente as ações das ondas e da corrente com a Teoria de 5ª ordem de Stokes através do modelo *VOF Waves*. Introduziu-se a altura da lâmina de água (134 m) e definiu-se a direção perpendicular à estrutura como a direção de propagação da onda. Introduziram-se também os parâmetros característicos da onda: a altura (23 m) e o período (13.6 s). A esta acrescentou-se a ação da corrente, com a mesma direção de propagação das ondas, com velocidade de 1.5 m/s (Figura 4.9). De notar que o programa também dispõe da opção de conjugar estas ações em simultâneo com a ação do vento.

Utilizaram-se como valores de referência 9.81 m/s^2 para a aceleração da gravidade e 101325.0 Pa (1atm) para a pressão.

FifthOrderVofWave 1	
Point On Water Level	[0.0, 2000.0, 134.0] m
Vertical Direction	[0.0, 0.0, 1.0]
Advancing Direction	[0.0, 1.0, 0.0]
Current	[0.0, 1.5, 0.0] m/s
Wind	[0.0, 0.0, 0.0] m/s
Additional Velocity	[0.0, 0.0, 0.0] m/s
Wave Height	23.0 m
Water Depth	134.0 m
Specification Type	Wave Period
First Wave Front Setting	<input checked="" type="checkbox"/>
Light Fluid Density	1.18415 kg/m ³
Heavy Fluid Density	997.561 kg/m ³
Wave Period Specification	
Wave Period	13.6 s

Figura 4.9 – Características do fluido (onda e da corrente).

4.4.7. Definição das condições de fronteira

Depois identificadas geometricamente as fronteiras do domínio do fluido, atribuíram-se as condições físicas a cada uma delas. As fronteiras “Solo” e “*Jacket*” foram definidas como *Wall*, paredes neste caso sem rugosidade, deixando todas as características geradas automaticamente inalteráveis; as fronteiras “Entrada” e “Topo” caracterizaram-se como *Velocity Inlet*, entrada do fluido, onde se alteraram as condições e valores físicos apresentadas na Figura 4.10; a fronteira “Saída” foi definida como *Pressure Outlet*, saída de pressão (fluidos). Tendo em conta que se pretendeu reduzir ao máximo a reflexão das ondas nesta fronteira, ativou-se a opção *VOFWave Damping* e modelou-se uma zona de relaxamento com 1000 m de comprimento (desde a “Saída”), dissipando assim a energia das ondas. Foram ainda feitas as alterações indicadas na Figura 4.10. Já as “Laterais”, dado que o fluido se propaga na direção paralela a estas e encontrando-se suficientemente afastadas para que a reflexão das ondas não tenha influência sobre a ação real na estrutura, foram modeladas como *symmetry plane*, planos simétricos.

The image shows a screenshot of a software interface with a table of settings. The table has three columns: Node, Property, and Setting. The 'Entrada' label is on the left, and the 'Saída' label is on the right, both with brackets indicating the scope of the settings. The table content is as follows:

Node	Property	Setting
Physics Conditions		
↳ Velocity Specification	Method	Components
Physics Values		
↳ Velocity	Method	Field Function
↳ Field Function	Vector Function	Velocity of Head Wave
↳ Volume Fraction	Method	Composite
↳ Composite > Water	Method	Field Function
↳ Field Function	Scalar Function	Volume Fraction of Heavy Fluid of Head Wave
↳ Composite > Air	Method	Field Function
↳ Field Function	Scalar Function	Volume Fraction of Light Fluid of Head Wave

Figura 4.10 – Alterações nas definições das condições de fronteira da “Entrada” e da “Saída”.

4.4.8. Geração da Malha

Sendo este um fator bastante influente na qualidade dos resultados, dedicou-se especial atenção à escolha do método e à definição das características geométricas da malha. Optou-se por um modelo que apresentasse uma solução otimizada, reduzindo o número total de células mas assegurando a qualidade da malha dos resultados.

Com o auxílio dos tutoriais de modelação de problemas de interação estrutura/ações ambientais *offshore* (apresentados em [23]) e nos estudos dos artigos analisados no capítulo 2, optou-se por gerar a malha para a região (*Region Based Meshing, RBM*) e não de forma independente para cada uma das partes geométricas (*Parts Based Meshing, PBM*). Deste modo obteve-se uma solução mais uniforme [23].

Para as superfícies utilizou-se o modelo *Surface Remesher*. Este consegue melhorar a qualidade das superfícies otimizando as soluções geradas pelos modelos de geração de malhas de volumes. No modelo é possível definir o tamanho alvo, máximo e mínimo dos elementos da malha das superfícies, bem como refiná-la nas zonas curvas, com base na curvatura dos elementos e na proximidade de outras superfícies. Permite ainda criar superfícies de controlo, isto é, zonas em que se pode definir uma malha com características geométricas distintas do resto do modelo; método utilizado quando se pretende dar mais ou menos importância aos resultados no local [23].

Para o volume utilizou-se o modelo *Trimmer Mesher*, modela o volume através de elementos hexaédricos. A solução obtida por este modelo apresenta qualidade elevada, tanto para problemas simples como para complexos. Um conjunto de atributos são aqui combinados num único modelo: gera uma malha predominantemente hexaédrica com o mínimo de células assimétricas; refina a malha de acordo com o tamanho dos elementos das superfícies de fronteira bem como noutras zonas de controlo (volumes e/ou superfícies) e não afeta a qualidade das malhas das superfícies, adaptando-se a estas. É um método bastante utilizado na modelação das ondas, a divisão é feita em camadas uniformes (vertical e horizontal) o que permite uma boa captação da elevação da superfície [23].

Foi ainda selecionado um modelo opcional designado por *Prism Layer Mesher*. Este modelo gera camadas de células prismáticas ortogonais na envolvente das superfícies, melhorando a precisão da solução do fluido no contacto com as barreiras. Em fluidos turbulentos, é também utilizado com o intuito de evitar problemas de convergência dos resultados [23].

Apresentados os modelos, identificaram-se as zonas de controlo onde as propriedades geométricas da malha tiveram de ser ajustadas ao estudo. De acordo com os objetivos do estudo aqui apresentado, a principal zona de controlo foi a superfície da interface (*jacket*), na qual se definiram elementos com um tamanho alvo (e máximo) de 0.15 m. De seguida criou-se um volume de controlo para captar a elevação da superfície da onda, tendo em conta a altura da lâmina de água, a altura da onda e o posicionamento longitudinal da *jacket*. Assim, definiu-se a zona entre os 120 m e os 150 m de altura, com um comprimento longitudinal de 550 m (desde a “Entrada”) e em toda a largura do tanque (450 m). De acordo com o documento de apoio do STAR-CCM+ [23], para captar um perfil sem distorção, a geometria da malha deve ser obtida de acordo com a altura da onda (H) e o comprimento de onda ($\lambda = 338$ m, obtido automaticamente no programa). Para tal, é recomendado aplicar as seguintes expressões:

- Comprimento horizontal das células = $\frac{\lambda}{n}$, n - número de células, sendo recomendado $n = 80$
- Altura das células = $\frac{H}{m}$, m - número de células, sendo recomendado $m = 40$

Utilizando os valores recomendados obteve-se um comprimento horizontal (longitudinal e transversal) aproximado de 3.5 m e uma altura de 0.5 m, os quais se utilizaram na definição da geometria anisotrópica da malha para este volume. De forma a obter uma evolução da malha regular, entre os volumes de controlo, nos volumes de controlo que se seguem foram utilizadas soluções proporcionais.

Ao volume confinado entre os 0 m e os 120 m de altura desde a “Entrada” até aos 550 m de comprimento longitudinal atribuiu-se uma malha anisotrópica com 14 m de comprimento horizontal e 20 m de altura.

De seguida foi definido um volume de controlo na zona envolvente à *jacket*, centrado com a geometria da *jacket*, com 200 m de largura e 200 m de comprimento e com desenvolvimento vertical dos 0 m aos 120 m. Ao volume atribuiu-se uma malha também ela anisotrópica com 3.5 m de comprimento longitudinal e transversal e uma altura de 5 m. Pretendeu-se com isto criar uma dinâmica de refinamento vertical da malha na aproximação à *jacket* devido à variação da pressão em profundidade.

Como foi mencionado na secção 4.4.3, uma das técnicas para diminuir ao máximo a reflexão das ondas na “Saída” passou por aumentar o comprimento longitudinal do tanque e criar uma zona de relaxamento. Juntamente com esta, o aumento das dimensões das células volumétricas da malha faz com que a dissipação de energia das ondas aumente, atingindo a “Saída” com velocidades próximas de zero. Tendo ainda em conta que não existe ação do vento, utilizou-se uma malha com elementos com 50 m de comprimento horizontal e 50 m de altura para todo o volume restante.

Em relação ao modelo *Prism Layer Mesher*, definiram-se duas camadas prismáticas na aproximação à *jacket*, com um comprimento total de 0.25 m.

Definidos todos os parâmetros gerou-se a malha para o volume da região, a qual se apresentou com 8 132 809 células volumétricas, 24 986 662 superfícies e 9 322 945 nós. (Figura 4.11). A esta malha atribuiu-se o modelo de movimento estacionário dado que se realizou uma co-simulação unidirecional, isto é, a geometria da malha manteve-se inalterada ao longo do estudo já que não se importaram as deformações calculadas no ABAQUS.

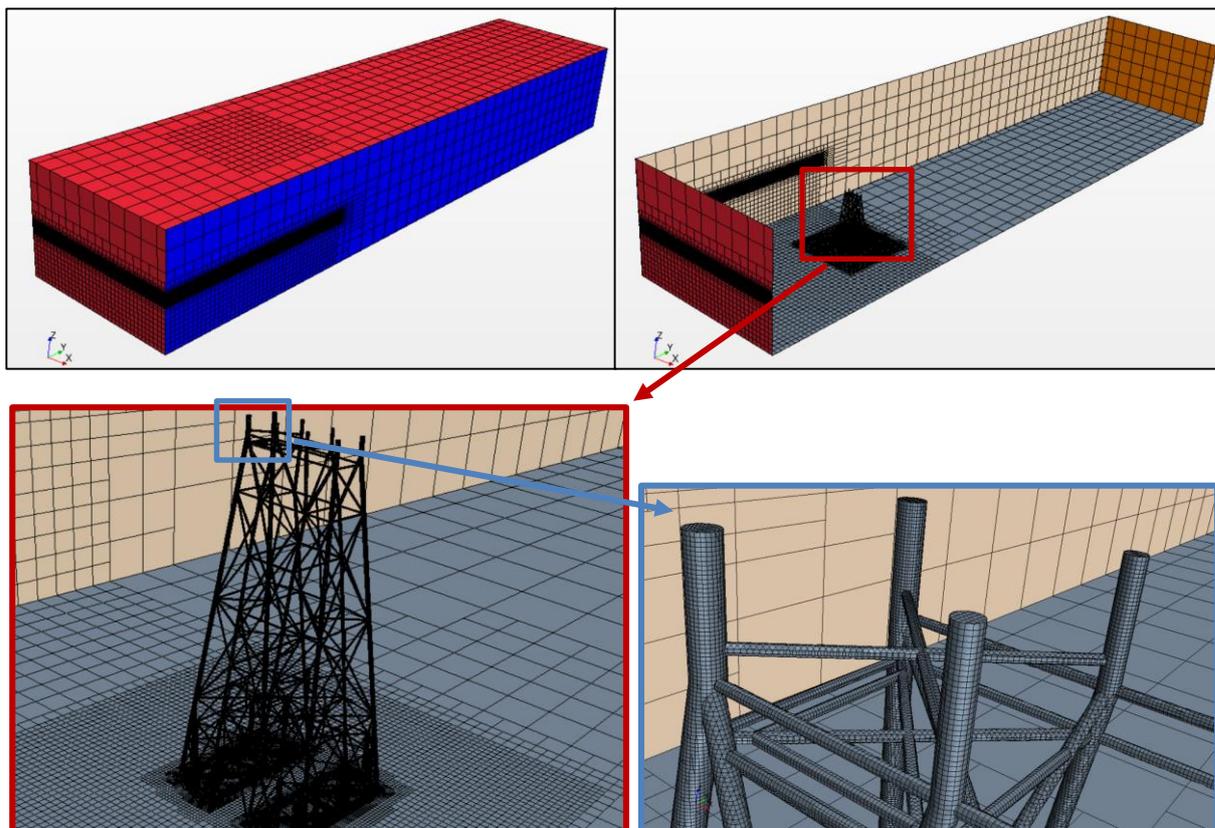


Figura 4.11 – Pormenorização da malha do modelo CFD

4.4.9. Definição do *time-step*, do tempo de análise e do número de iterações

Tendo também influência na qualidade e na velocidade de convergência, foi aconselhado obter o valor do *time-step* pela expressão:

- $Time\text{-}step = T \div (2.4 \times n) = 13.6 \div (2.4 \times 96) \approx 0.06 \text{ s}$, onde “T” é o período da onda e “n” o número de células utilizadas num comprimento de onda.

O *time-step* calculado foi de 0.06 s. Tendo em conta que se pretendeu estudar aproximadamente meio ciclo da onda definiu-se um período de estudo de 7.20 s, onde se realizaram 5 iterações por cada *time-step*. Como já foi referido anteriormente em, a limitação do número de iterações é diretamente proporcional à qualidade dos resultados. Contudo, no estudo aqui apresentado 5 iterações revelaram-se suficientes para obter um grau de convergência satisfatório.

4.4.10. Configuração da co-simulação

O programa STAR-CCM+ funciona como plataforma principal da co-simulação, sendo o intervalo de tempo do estudo e todos os restantes processos geridos por este. Isto significa que a simulação no ABAQUS só é ativada quando o STAR-CCM+ o indica, ficando este a trabalhar em segundo plano.

Conhecidos todos os parâmetros, iniciou-se a configuração da co-simulação no STAR-CCM+. Iniciou-se pela identificação da localização do ficheiro *input* do modelo do ABAQUS, seguida da identificação da fronteira do modelo CFD correspondente à interface (*jacket*). Os campos das pressões e das tensões de corte sobre a interface foram definidos como as quantidades a exportar para o ABAQUS em cada *time-step* da co-simulação. Para a co-simulação foi utilizado o mesmo *time-step* da simulação do modelo CFD: 0.06 s.

Foi ainda aqui definida uma técnica de estabilização da co-simulação, com o objetivo de evitar uma resposta errada no modelo FEM devido à exportação instantânea dos resultados. A exportação dos resultados realizou-se de forma faseada durante um intervalo de tempo inicial de 0.5 s (Figura 4.12)

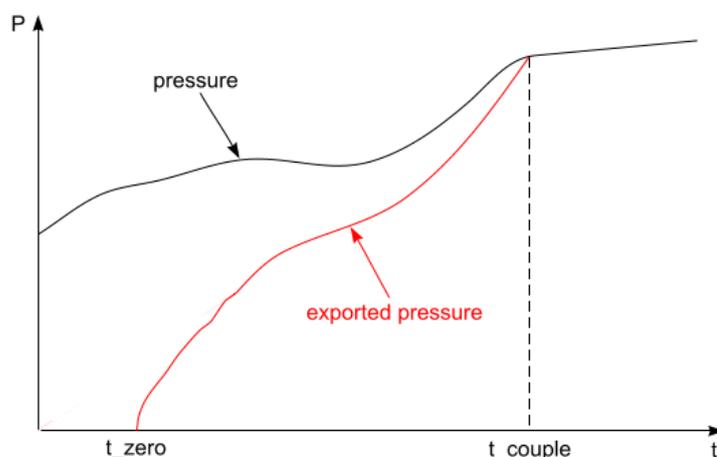


Figura 4.12 – Método de exportação faseada das pressões e das tensões de corte do modelo CFD para o modelo FEM [23].

4.4.11. Preparação da análise gráfica

Para a análise gráfica dos resultados no STAR-CCM+, criaram-se quatro cenários de visualização: um com a visualização escalar da velocidade instantânea da onda à superfície ao longo do tanque; outro com a visualização escalar da velocidade do fluido na zona envolvente

da estrutura, num plano a uma altura de 100 m, para perceber a influência da estrutura na dispersão do fluido; um terceiro cenário escalar com o mapa de pressões e outro com o mapa de tensões de corte aplicados na estrutura e ainda um último cenário com a visualização lateral da subida da onda pela estrutura. A cada cenário foi tirado um *screenshot* por *time-step* para analisar a dinâmica da ação.

Os parâmetros mencionados em 4.4.11 foram novamente monitorizados durante a co-simulação com o intuito perceber o grau e a velocidade de convergência dos cálculos. Com o auxílio de um ponto flutuante introduzido à superfície do volume de água na proximidade da estrutura (400 m da “Entrada”), funcionando como uma boia, monitorizou-se a evolução vertical do perfil da onda ao longo do tempo do estudo.

4.4.12. Obtenção das condições iniciais

As condições iniciais do escoamento do fluido para a co-simulação foram obtidas através da simulação do modelo CFD de forma independente, desativando o modelo de co-simulação com o ABAQUS. Esta simulação foi realizada durante um intervalo de tempo de 7 s, com um *time-step* de 0.07 e 5 iterações por *time-step*. Obteve-se a solução do escoamento apresentada na Figura 4.13, que pela análise da Figura 4.14 se verificou que as variáveis características do escoamento (momentos, turbulência e equação da continuidade) convergiram rapidamente com oscilações, dos resultados entre as iterações finais de cada *time-step*, na ordem de grandeza de $10^{-1}/10^{-2}$ (*residuals*).

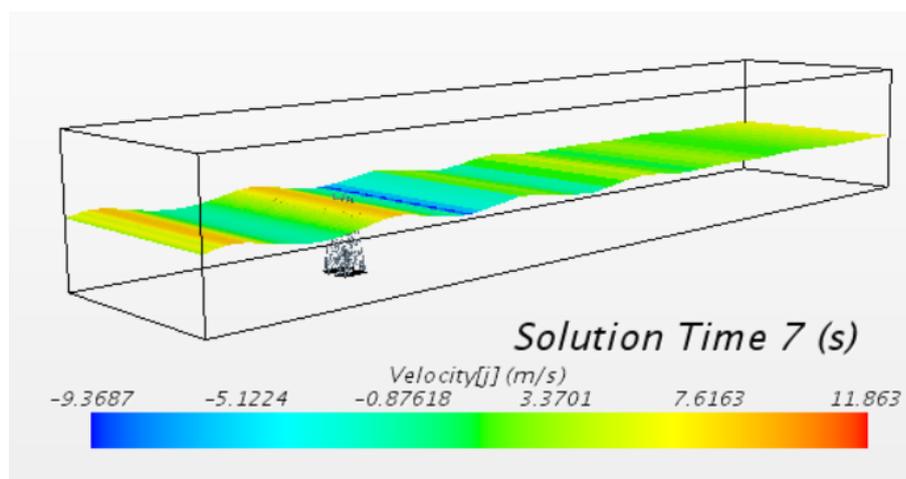


Figura 4.13 – Representação da solução da simulação das condições iniciais aos 7s no tanque de ondas numérico do modelo CFD.

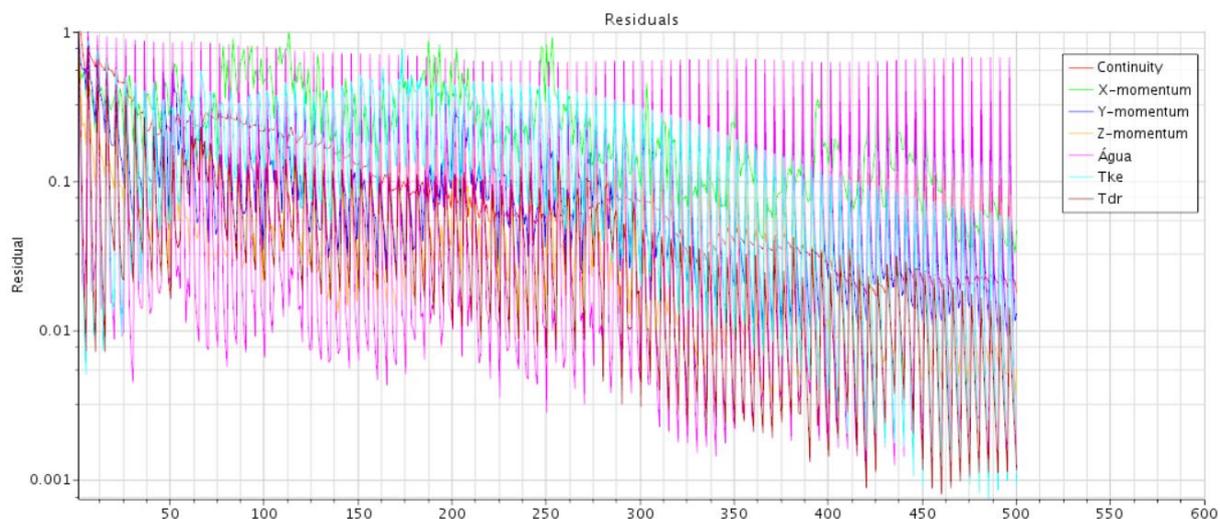


Figura 4.14 - Monitorização dos parâmetros do escoamento na obtenção das condições iniciais (iteração-*residuals*).

A contagem do tempo foi reiniciada e repuseram-se as condições definidas para a co-simulação.

4.5. Modelação do comportamento da estrutura no ABAQUS

4.5.1. Geometria e propriedades do material

Começou-se por importar a geometria da *jacket*, modelada no programa INVENTOR, como um único elemento finito do tipo casca (*shell*), modelado num espaço 3D deformável. De seguida, definiu-se o material da estrutura com as propriedades do aço apresentado em 4.2, considerando-o com comportamento elástico homogéneo.

4.5.2. Condições de apoio, cargas e tipo de análise

Rimola (2010) [21], utilizando a mesma estrutura do presente estudo, realizou uma análise de vibração livre (através do FEM), comparando a variação da resposta dinâmica da estrutura em função do tipo de modelação da interação solo-estrutura. Para tal modelou 3 casos distintos: i) considerou a *jacket* como encastrada na base; ii) modelou o conjunto de estacas equivalentes encastradas na base, através de elementos do tipo barra (ou viga) com o mesmo comprimento, onde as propriedades geométricas destas foram obtidas através de uma análise estática da fundação e iii) modelou as estacas com as propriedades reais e simulou a rigidez do solo recorrendo a um sistema de molas horizontais (discretizando-as em trechos de 1 m), tendo por

base no perfil geotécnico. Para o estudo comparativo analisou as frequências naturais de cada um dos casos, onde obteve os resultados do Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Frequências Naturais da jacket [21]

Caso de estudo	Frequências Naturais (Hz)		Modos de Vibração	
i)	f_{01}	0.92	Modo 1	Modos de vibração com predominância da <i>jacket</i>
	f_{02}	0.94	Modo 2	
	f_{03}	1.52	Modo 3	
ii)	f_{01}	0.64	Modo 1	Modos de vibração com predominância da <i>jacket</i>
	f_{02}	0.66	Modo 2	
	f_{03}	0.87	Modo 3	
iii)	f_{01}	0.67	Modo 1	Modos de vibração com predominância da <i>jacket</i>
	f_{02}	0.71	Modo 2	
	f_{03}	1.20	Modo 3	

Como era esperado, as frequências do modelo i) foram superiores aos restantes, sendo este facto explicado pelo aumento de rigidez da estrutura devido ao encastramento. O modelo do caso ii) apresentou as frequências mais baixas devido às estacas terem sido apenas encastradas na base, não restringindo os deslocamentos laterais ao longo do seu comprimento (aumento de flexibilidade traduzido numa diminuição da rigidez). Por sua vez, no modelo iii) a estrutura não se apresentou tão rígida como no modelo i) nem tão flexível como no modelo ii), sendo a interação solo-estrutura traduzida de forma mais realista.

Contudo, no estudo aqui desenvolvido decidiu-se simplificar a interação solo-estrutura modelando-a através do encastramento da base (Figura 4.15). Esta decisão foi tomada com base no objetivo principal do estudo, onde, nesta fase, se pretendeu compreender a potencialidade da co-simulação dos modelos CFD e FEM para aplicar nas fases de dimensionamento, otimização e verificação da segurança das estruturas quando sujeitas às ações de origem ambiental.

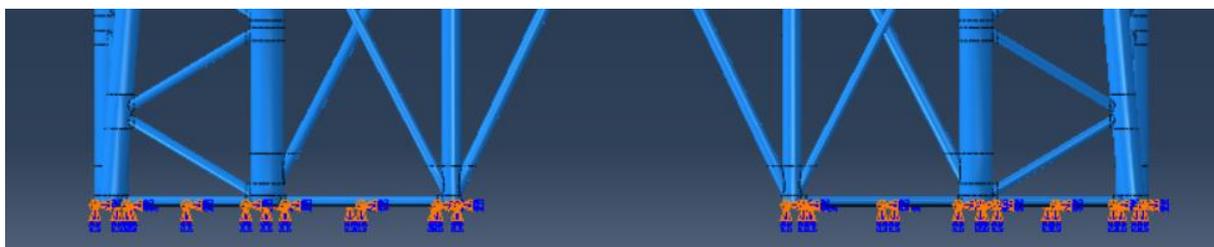


Figura 4.15 – Modelação no ABAQUS - Condições de apoio da estrutura (encastramento)

Tendo como objetivo analisar o comportamento dinâmico da *jacket* sob as ações hidrodinâmicas através de uma co-simulação com o modelo CFD, foi necessário selecionar um tipo de análise dinâmica. Assim como no modelo CFD, no modelo FEM optou-se por realizar uma simulação com integração do tempo implícita (convergência dos resultados obtida através de um processo iterativo). O facto de as estruturas de aço apresentarem uma esbelteza elevada pode fazer com que as deformações afetem as solicitações gerando momentos adicionais (efeitos de segunda ordem). Contudo, na análise aqui desenvolvida desprezaram-se estes efeitos dado que o principal objetivo do estudo foi perceber a resposta da estrutura às ações hidrodinâmicas e não dimensioná-la. De acordo com os valores definidos no modelo CFD (secção 4.4), considerou-se o mesmo intervalo de tempo a estudar (7.20 s) e o mesmo *time-step* (0.06 s).

Relativamente às ações, teve-se em conta a ação do peso-próprio dos elementos, considerando a aceleração da gravidade 9.81 m/s^2 e as cargas induzidas pelas ações hidrodinâmicas na estrutura, importadas da simulação do modelo CFD.

4.5.3. Malha

Na análise efetuada neste trabalho não se pretendeu apenas obter resultados para os esforços e deslocamentos, mas sim conseguir aproximá-los o mais possível da realidade. Para atingir este objetivo foi importante definir uma malha de elementos finitos regular e o menos distorcida possível. O facto de se tratar de uma estrutura complexa, com muitas interseções de elementos, veio dificultar a geração da malha. Numa primeira tentativa obteve-se uma malha completamente irregular e com elementos com um grau de distorção elevado, não havendo distinção entre os elementos das interseções e dos tubos (Figura 4.16.a). De seguida foi feita essa distinção, dividindo os elementos das ligações. Com este passo intermédio, verificou-se uma melhoria bastante acentuada na regularidade da malha com os elementos a apresentarem-se com um grau de distorção bastante reduzido (Figura 4.16.b).

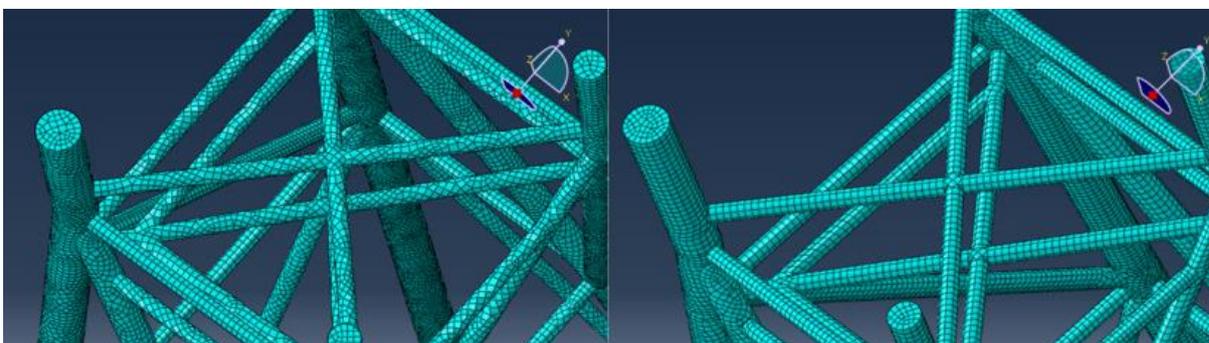


Figura 4.16 – Geração da malha estrutural: a) malha irregular e distorcida; b) malha final

Foram utilizados elementos lineares predominantemente quadrados de largura igual a 25 cm. Obteve-se uma malha composta por 359 827 elementos e 359 103 nós.

4.5.4. Configuração da co-simulação

Assim como no modelo do STAR-CCM+, foi necessário identificar a superfície de contacto do fluido com a estrutura (interface), a qual se designou por “FSI_INTERFACE”.

A configuração da co-simulação do ABAQUS com outro *software* só é possível realizar manualmente, pelo que foi necessário primeiramente traduzir o modelo para um ficheiro *input*. Neste ficheiro indicou-se que a análise dinâmica implícita iria ser realizada em conjunto com um *software* externo (co-simulação com o STAR-CCM+) através da seguinte linha de código:

```
*CO-SIMULATION, NAME=JACKET, PROGRAM=MULTIPHYSICS
```

Dada esta informação, o ABAQUS necessita de saber quais as quantidades a importar (e exportar, caso se trate de uma co-simulação bidirecional) e onde as tem de aplicar. Este passo é introduzido pelas seguintes linhas de código:

```
*CO-SIMULATION REGION, TYPE=SURFACE, IMPORT  
ASSEMBLY_FSI_INTERFACE, CF
```

Estas linhas do código indicam que se pretendeu importar os resultados de uma superfície aplicá-los sobre a superfície “FSI_INTERFACE” do modelo do ABAQUS. A última linha é finalizada com a especificação dos resultados a importar que neste caso se trata de todas as componentes de cargas pontuais e momentos concentrados (CF) provocados pelos campos das pressões e das tensões de corte.

No Anexo 1 é apresentado o ficheiro *input* do modelo FEM final, configurado para a co-simulação com o STAR-CCM+.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados da co-simulação dos modelos CFD (STAR-CCM+) e FEM (ABAQUS). Importante lembrar que o estudo aqui desenvolvido não teve como finalidade dimensionar a os elementos da *jacket* da plataforma *offshore*. O objetivo foi compreender o método da co-simulação de programas no estudo de problemas FSI aplicados à área da Mecânica Estrutural de Engenharia Civil. Assim, a análise incidiu sobre o comportamento estrutural da *jacket*, associando os resultados obtidos durante o intervalo estudado com os resultados do modelo CFD. De realçar ainda que os resultados do comportamento da estrutura podem divergir da realidade, devido à simplificação dos reforços nas zonas de ligação dos tubos da estrutura e da interação solo-estrutura.

A simulação da interação unidirecional fluido-estrutura durante 7.20 s teve uma duração de análise real de 17 h tendo sido realizada computador portátil com o seguinte *hardware*:

- Processador Intel® Core™ i7-4720HQ – 2.60 GHz
- Memória RAM de 16 GB

5.2. Verificação da convergência dos resultados

Durante o intervalo de tempo do estudo foram analisados 120 instantes de tempo nos dois modelos. No ABAQUS verificou-se que em todos os incrementos de tempo, o equilíbrio da resposta dos sistemas de equações das forças e dos momentos se mostraram lineares na primeira iteração (Figura 5.1), querendo isto dizer que o *time-step* se mostrou bem definido, verificando a convergência dos resultados. No STAR-CCM+ a convergência dos resultados foi analisada pela monitorização dos momentos nas três direções, da turbulência e da equação da continuidade durante o intervalo de tempo estudado. Através dos resultados da Figura 5.2 verifica-se que na primeira iteração de cada *time-step* ocorreu um pico (resultante da mudança de *time-step*) e que nas iterações seguintes os resultados das variáveis convergiram rapidamente, apresentando oscilações na ordem dos 10^{-2} . A única exceção ao anteriormente descrito verificou-se na variável da continuidade, que se manteve a rondar o valor 0.35 nos *residuals*. Isto significa que os resultados convergiram mas a uma velocidade inferior. Os

resultados mostram-se satisfatórios para a análise pretendida contudo, caso se desejasse aumentar o grau de convergência poder-se-ia aumentar o número de iterações por *time-step*.

```

CONVERGENCE CHECKS FOR EQUILIBRIUM ITERATION 1

AVERAGE FORCE                2.545E+04    TIME AVG. FORCE            2.749E+04
LARGEST RESIDUAL FORCE        4.715E-06    AT NODE                   2443    DOF 2
  INSTANCE: JACKET-1
LARGEST INCREMENT OF DISP.   5.476E-02    AT NODE                   341907   DOF 1
  INSTANCE: JACKET-1
LARGEST CORRECTION TO DISP.  -1.242E-02    AT NODE                   273016   DOF 3
  INSTANCE: JACKET-1
  THE FORCE EQUILIBRIUM RESPONSE WAS LINEAR IN THIS INCREMENT

AVERAGE MOMENT                506.        TIME AVG. MOMENT          571.
LARGEST RESIDUAL MOMENT      2.447E-08    AT NODE                   197625   DOF 5
  INSTANCE: JACKET-1
LARGEST INCREMENT OF ROTATION 4.699E-03    AT NODE                   355434   DOF 5
  INSTANCE: JACKET-1
LARGEST CORRECTION TO ROTATION -2.169E-03    AT NODE                   343001   DOF 5
  INSTANCE: JACKET-1
  THE MOMENT EQUILIBRIUM RESPONSE WAS LINEAR IN THIS INCREMENT

ITERATION SUMMARY FOR THE INCREMENT: 1 TOTAL ITERATIONS, OF WHICH
0 ARE SEVERE DISCONTINUITY ITERATIONS AND 1 ARE EQUILIBRIUM ITERATIONS.

TIME INCREMENT COMPLETED 6.000E-02, FRACTION OF STEP COMPLETED 0.975
STEP TIME COMPLETED 7.02, TOTAL TIME COMPLETED 7.02
TARGET TIME FOR NEXT COUPLING STEP 0.7080000E+01
    
```

Figura 5.1 – Verificação da convergência dos resultados do modelo FEM na 1ª iteração do 117º incremento de tempo utilizando o *time-step* de 0.06 s.

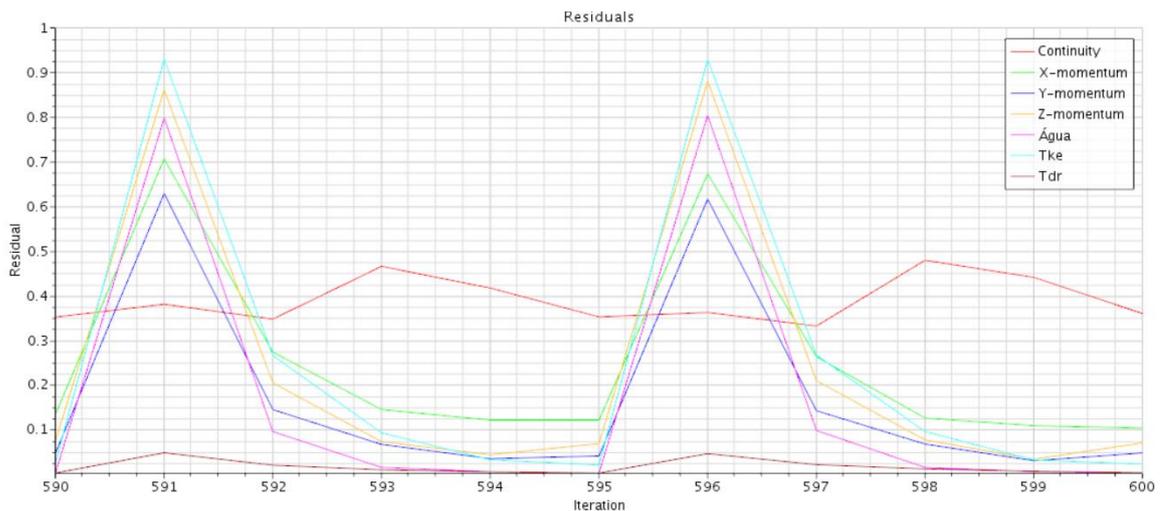


Figura 5.2 - Monitorização da convergência dos resultados dos últimos dois *time-steps* da co-simulação no modelo CFD.

5.3. Verificação do método de exportação faseada das ações hidrodinâmicas

Confirmada a convergência dos modelos pretende-se aqui verificar o funcionamento do método da exportação faseada dos resultados do modelo CFD para o modelo FEM (secção 4.4.10). Para tal analisaram-se os resultados em 3 instantes de tempo pertencentes ao intervalo de tempo em que foi aplicado (0.18 s, 0.36 s e 0.54 s). Uma vez que os instantes são bastante próximos, a variação da altura da lâmina de água, das pressões e das tensões de corte calculadas no STAR-CCM+ mostraram-se praticamente nulas, apenas são apresentados os resultados para o instante 0.18 s (Figura 5.3). Com isto, caso o método não funcionasse, os resultados das tensões (critério das tensões de *von Mises*) e das deformações da estrutura no modelo do ABAQUS deveriam ser iguais nos dois instantes. Os resultados são apresentados nas Figura 5.4 e Figura 5.5 onde, utilizadas as mesmas escalas, se confirma que houve um aumento progressivo das tensões e das deformações bastante elevado, demonstrando o correto funcionamento do método.

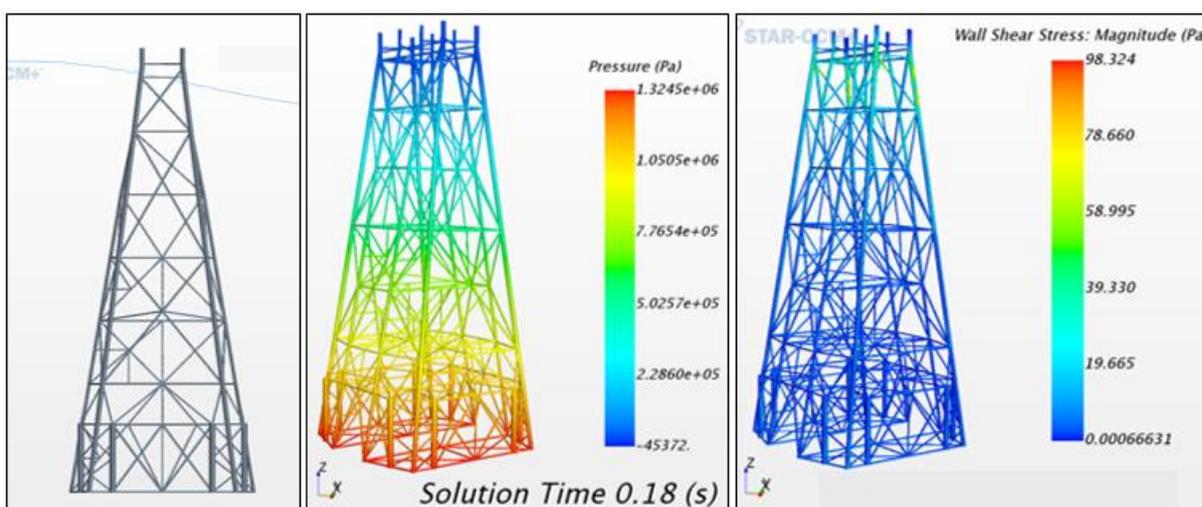


Figura 5.3 - Resultados da simulação do modelo CFD no instante 0.18 s: Vista lateral da superfície da onda na *jacket* (esq.); mapa do campo de pressões (em Pa) na *jacket* (centro); mapa do campo de tensões de corte (em Pa) na *jacket* (dir.).

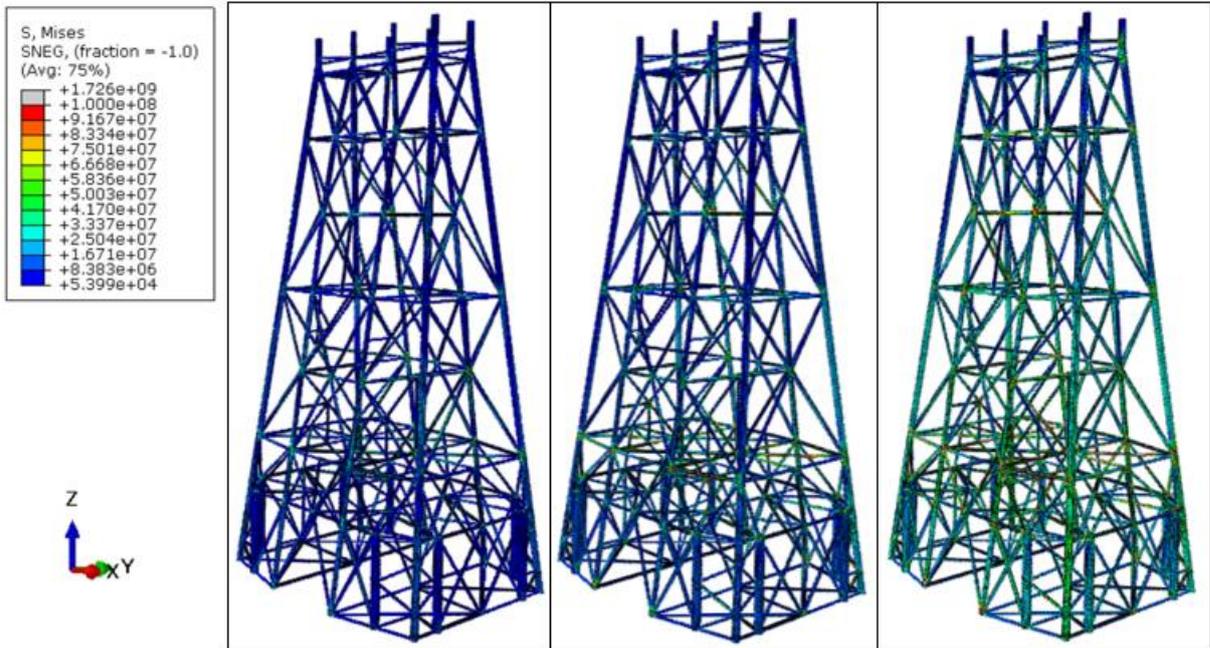


Figura 5.4 – Mapas de tensões de *von Mises* (em Pa) na estrutura da *jacket* (modelo FEM), nos instantes: 0.18 s (esq); 0.36 s (centro) e 0.54 s (dir.)

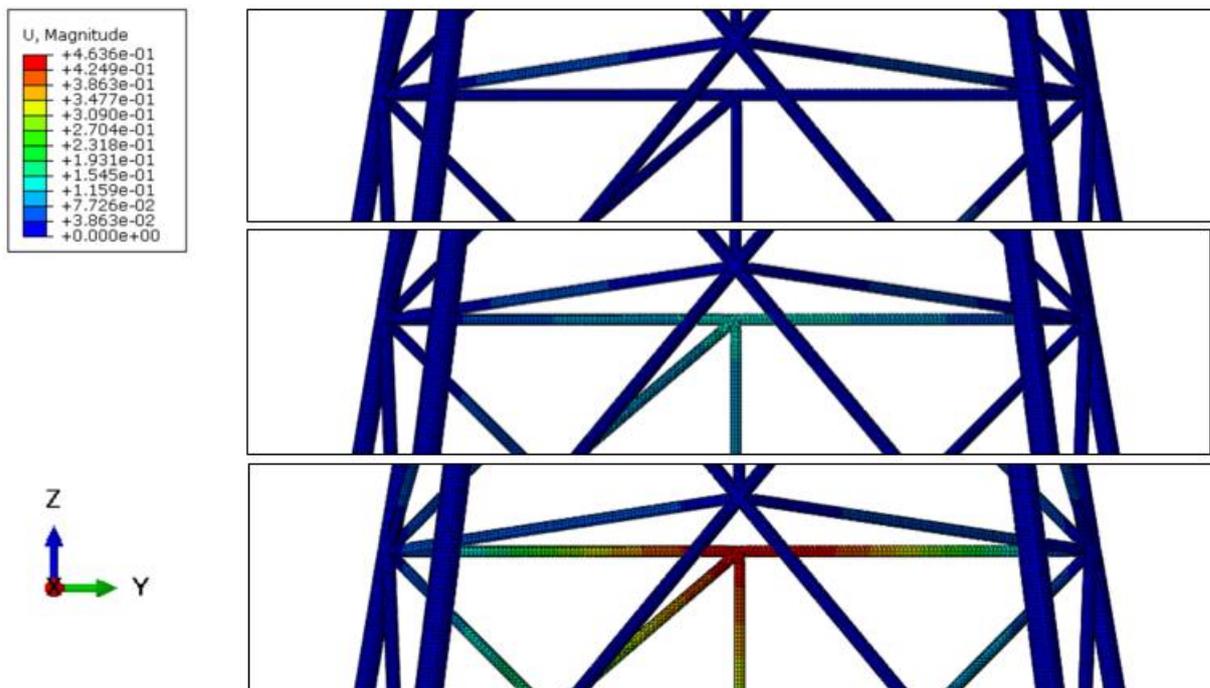


Figura 5.5 – Mapa de deformações (em m) numa interseção de tubos da *jacket* (modelo FEM), nos instantes: 0.18 s (cima); 0.36 s (centro) e 0.54 (baixo)

5.4. Análise da variação da velocidade do escoamento com a profundidade

Tomando como exemplo o resultado num instante intermédio, $t = 3.6$ s, pôde-se confirmar que a velocidade horizontal (direção y) das partículas à superfície é máxima na crista e mínima na cava (Figura 5.6.a). No mesmo plano vertical e transversal ao escoamento, a velocidade é máxima junto à superfície e diminui com a profundidade, onde apresenta valores negativos na zona da cava (a azul na Figura 5.6.b), o que também acontece à superfície caso não haja a ação da corrente (neste caso 1.5 m/s). Com a mesma figura pode-se ainda verificar a existência de fenómenos de difração das ondas no contacto com os tubos da estrutura, como foi mencionado na secção 3.2.2. Este fenómeno faz com que por detrás dos elementos da estrutura as partículas apresentem velocidades negativas (com sentido oposto ao escoamento) onde certamente a turbulência do escoamento é elevada (Figura 5.6.b). Este facto veio demonstrar a elevada dificuldade do estudo destes problemas e as grandes limitações dos métodos de dimensionamento apresentados nos regulamentos dado que são métodos generalizados a qualquer que seja a configuração geométrica da jacket.

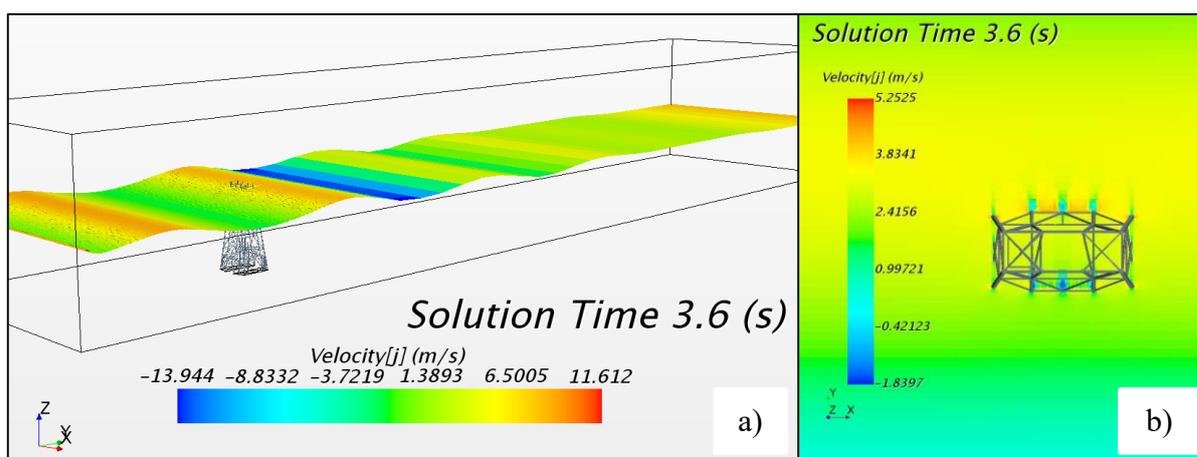


Figura 5.6 – a) Velocidade instantânea (m/s) das partículas de água no instante 4.2 s (modelo CFD): à superfície e b) num plano a 34 m de profundidade.

5.5. Análise evolutiva no tempo dos resultados da co-simulação

5.5.1. Justificação dos instantes analisados

Esta análise foi realizada seguindo um pensamento causa-efeito, isto é, associando os resultados da ação do fluido (STAR-CCM+) aos do comportamento estrutural calculado (ABAQUS). Assim, com base nos resultados da altura da onda (na zona da *jacket*) e pelo registo, na localização do ponto flutuante (secção 4.4.11), da altura da lâmina de água ao longo da

simulação, decidiu-se analisar a interação nos instantes 2.10 s, 4.20 s e 7.20 s, onde as alturas apresentadas foram 145.9 m, 140.0 m e 128.3 m, respetivamente (Figura 5.7).

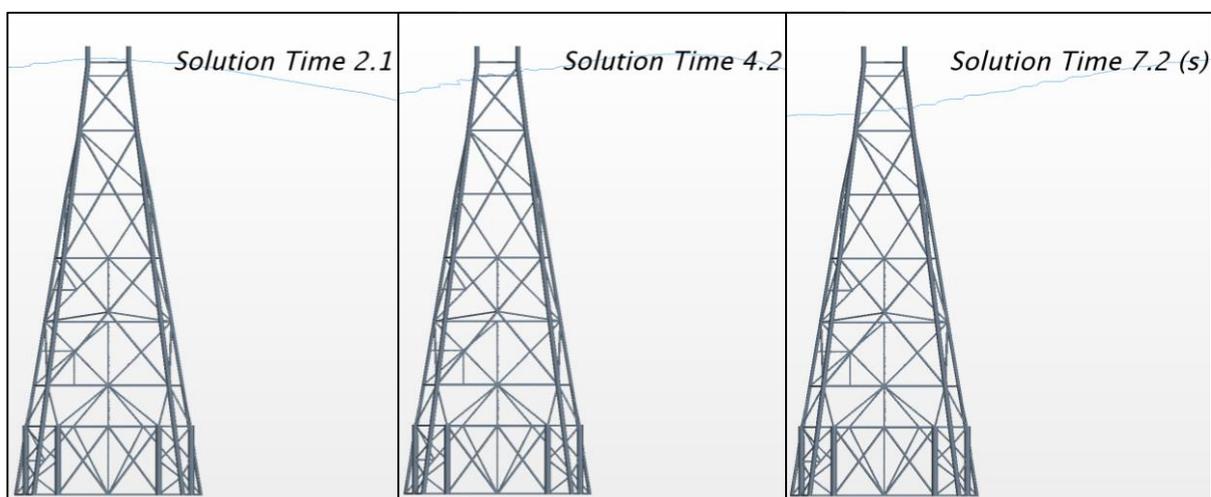


Figura 5.7 – Representação gráfica da posição da superfície da onda na zona da *jacket* nos instantes analisados (2.1 s, 4.2 s e 7.2 s).

Como se pode perceber, esta análise comparativa corresponde a um período de diminuição da altura de elevação da onda, onde os instantes analisados correspondem aos momentos em que na zona da *jacket* se registaram as alturas máxima (aos 2.1 s) e mínima (aos 7.2 s) e no momento em que a superfície da onda atuou numa zona da *jacket* com uma configuração geométrica complexa (4.2 s).

A análise e comparação dos resultados foi dividida em duas partes. Na primeira parte focou-se na análise do comportamento da estrutura devido às tensões de corte; e na segunda parte na análise das pressões e na respetiva resposta estrutural. Esta distinção foi feita tendo em conta as diferentes zonas de atuação das duas variáveis: sendo as tensões de corte, provocadas maioritariamente pela turbulência do escoamento do fluido, são máximas na proximidade da superfície da onda; enquanto as pressões são máximas em zonas profundas, compararam-se as respostas estruturais nos elementos da base.

5.5.2. Resposta da estrutura às tensões de cortes

Como foi mencionado, as tensões de corte surgiram com maior intensidade na proximidade da superfície das ondas. Este facto deveu-se à elevada turbulência do fluido, registada principalmente nas zonas envolventes dos elementos da *jacket* onde a propagação livre da onda não é permitida. Este fenómeno é diretamente proporcional à velocidade do escoamento, sendo

máximo à superfície, onde as velocidades da onda e da corrente são máximas. Os resultados da co-simulação traduziram isto mesmo (Figura 5.8). As zonas de tensões de corte máximas acompanharam o movimento vertical da superfície da onda e diminuíram de intensidade (168.99 Pa → 109.62 Pa → 58.34 Pa) proporcionalmente à diminuição da velocidade das partículas (Figura 5.9) e da complexidade da geometria da estrutura (diminuição da turbulência).

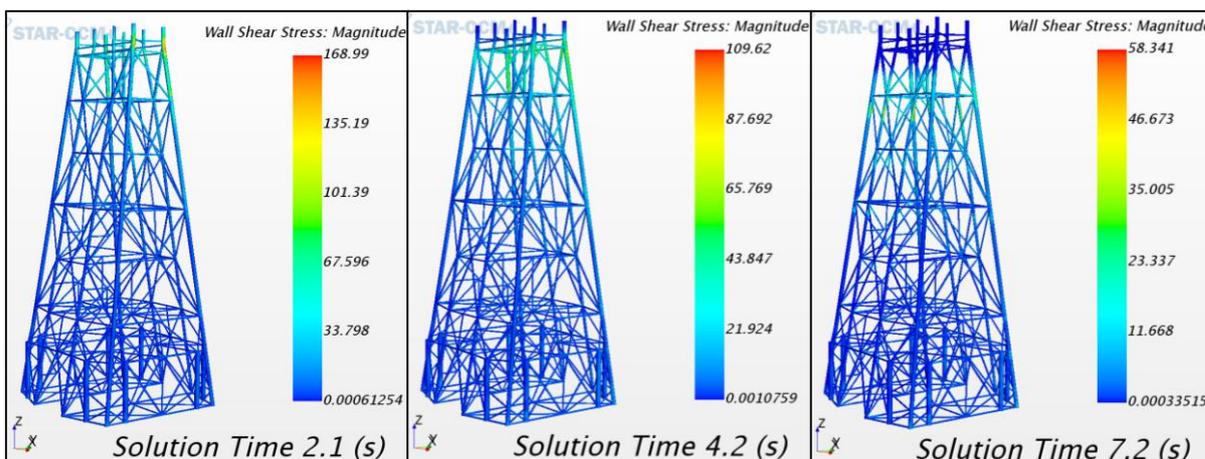


Figura 5.8 – Resultados das tensões de corte (em Pa) sobre a estrutura causadas pelas ações hidrodinâmicas (modelo CFD)

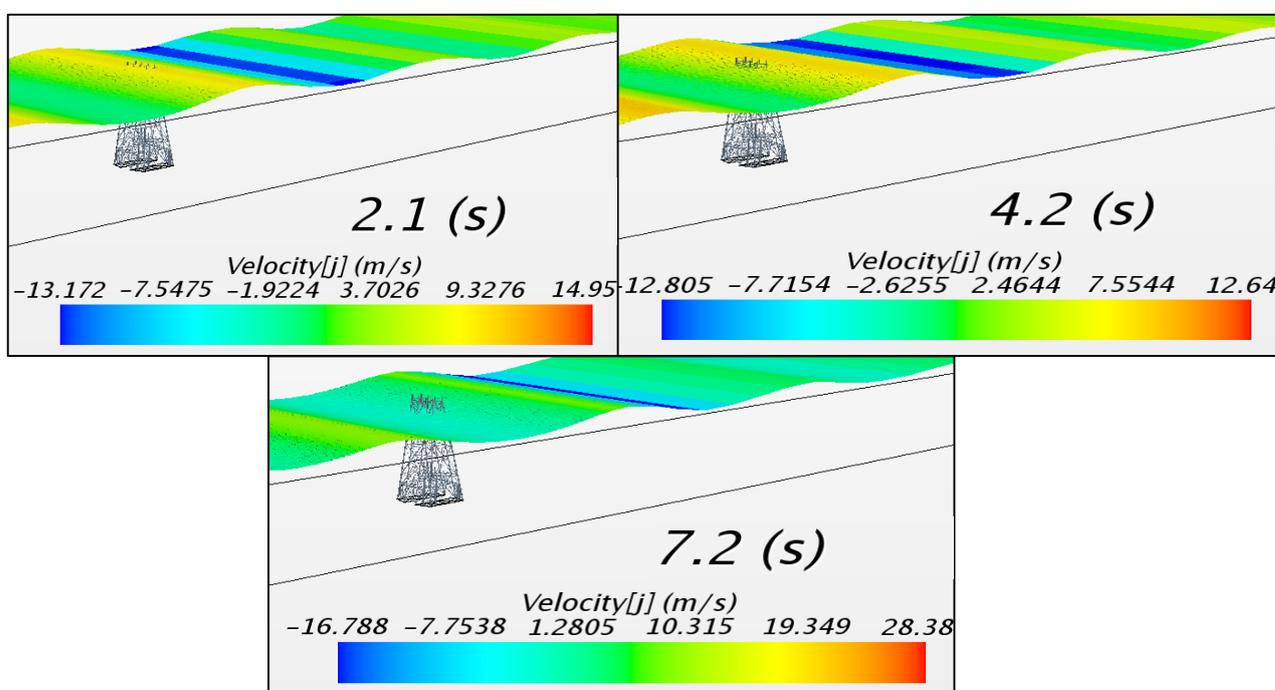


Figura 5.9 – Resultados das velocidades instantâneas (m/s) à superfície da onda.

Tendo atuado na zona mais afastada da base, e mais esbelta, era esperado que as maiores deformações globais da estrutura (maior braço produz maior momento) se registassem na zona do *deck*. Pela análise dos resultados das deformações globais da estrutura (Figura 5.10) confirmou-se o esperado e percebeu-se que esta descreve um movimento oscilatório em torno do ponto de equilíbrio. No instante 2.1 s a estrutura apresentou deformações máximas no sentido da propagação da onda (aproximadamente 18 cm), passou pela posição de equilíbrio perto dos 4.2 s e no instante 7.2 s apresentou deformações máximas no sentido contrário ao da propagação das ondas (aproximadamente 4 cm). Com o objetivo de perceber esta variação ao longo do intervalo de tempo estudado, foram analisadas as tensões de *Von Mises* e as deformações num nó do topo de uma *leg* principal da *jacket* (Figura 5.11). Este movimento foi explicado pela variação do sentido das velocidades da onda quando se passa da zona da crista para a zona da cava.

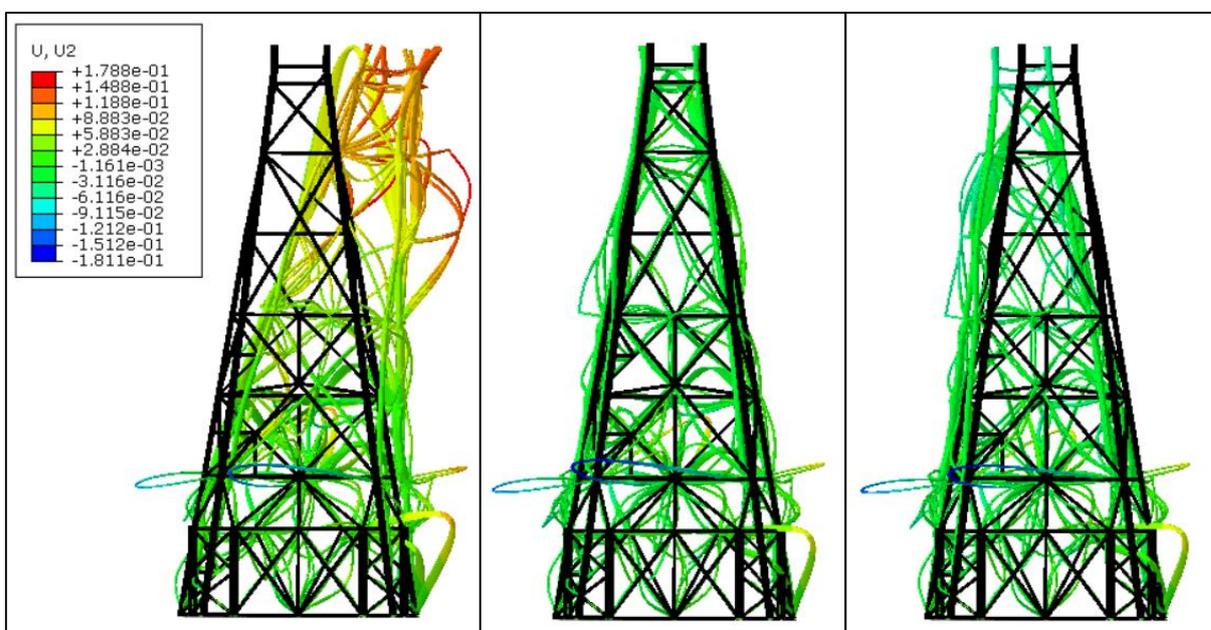


Figura 5.10 – Resultado das deformações (em m) da estrutura da *jacket* na direção *y* (direção de propagação das ondas) nos instantes: 2.1 s (esq.), 4.2 s (centro) e 7.2 s (dir.), aplicando um fator de ampliação de 200 (modelo FEM).

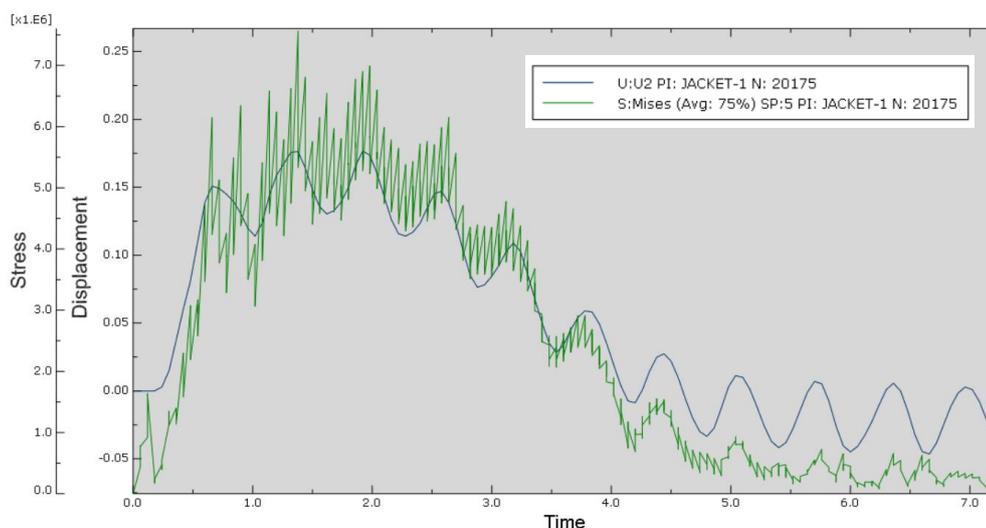


Figura 5.11 – Resultados das tensões de *Von Mises* (a verde, em Pa) e das deformações na direção y (a azul, em m) de um ponto pertencente ao topo de um *leg* principal da *jacket*.

Sendo a *jacket* uma estrutura em treliça, a transmissão dos esforços é feita no sentido barra → ligação. Assim é nas ligações que surgem as principais acumulações de tensões. Através das Figura 5.12 e Figura 5.13 verifica-se isto mesmo, sendo que à medida que a superfície da onda vai baixando (velocidade menores) as tensões vão também baixando. Comparando os resultados da ligação da zona superior, assinalada nas mesmas figuras, que se encontra submersa ao longo de todo o tempo de análise, verifica-se a seguinte evolução temporal: 139.5 MPa (2.1 s) → 48.74 MPa → 18.57 MPa.

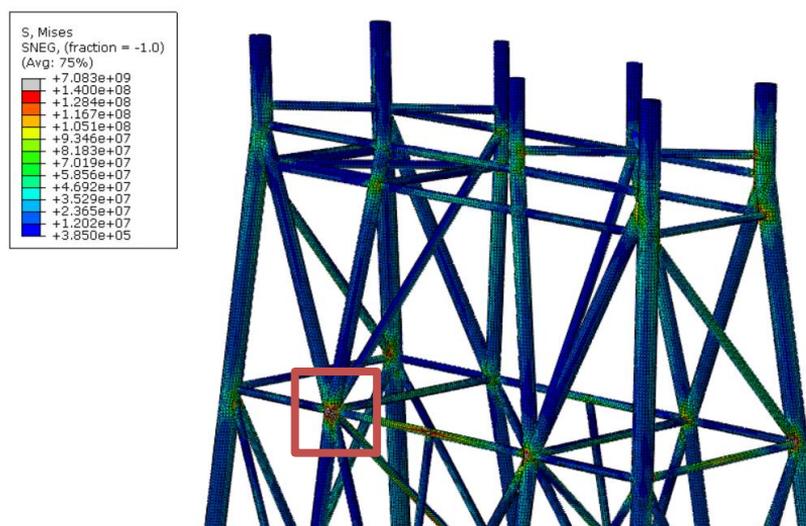


Figura 5.12 - Resultados das tensões (em Pa) nos elementos estruturais introduzidos pelas hidrodinâmicas (modelo FEM) no instante 2.1 s.

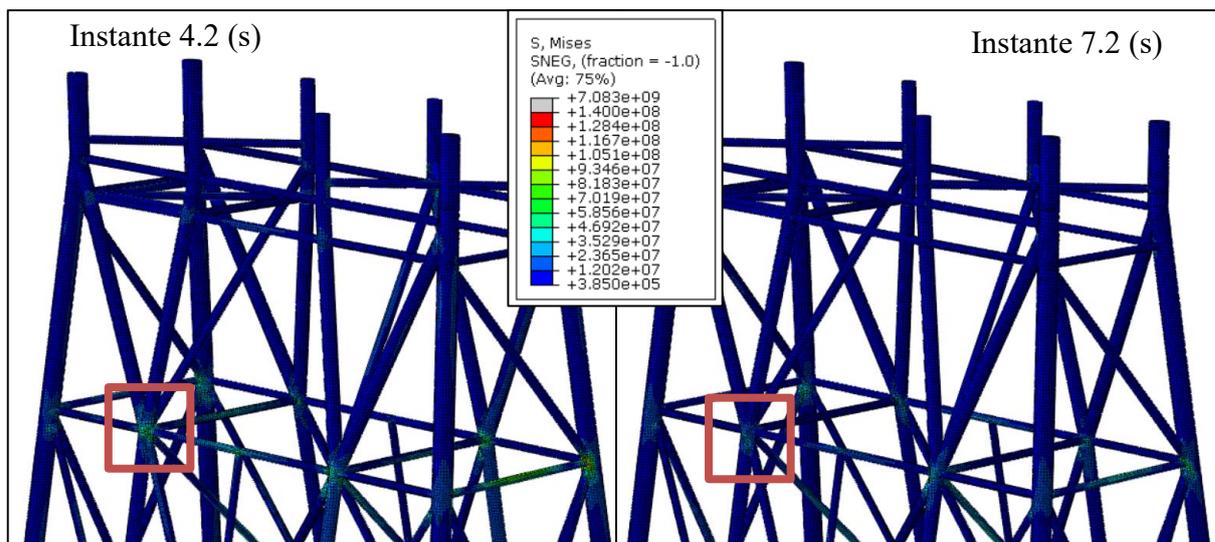


Figura 5.13 – Resultados das tensões nos elementos estruturais introduzidos pelas hidrodinâmicas (modelo FEM) nos instantes 4.2 s e 7.2 s.

As deformações contribuíram para o aumento dos esforços nos elementos da base da estrutura incluindo as fundações (secção 5.5.2), devido à natural mobilização destes para as zonas de maior robustez.

5.5.3. Resposta da estrutura às pressões

Pela análise dos resultados (Figura 5.14) constatou-se que, como era esperado, ao longo do tempo de análise a superfície de pressões nulas foi baixando, acompanhando o movimento da superfície da onda. Por sua vez, também a pressão máxima foi diminuindo (1.340 MPa → 1.337 MPa → 1.321 MPa), dado que depende da altura da lâmina de água. Observou-se que à medida que a cava da onda se aproximou da estrutura, as pressões negativas se aproximaram do valor nulo.

Analisando o comportamento estrutural da *jacket* verificou-se que estes fenómenos, principalmente nos elementos da base, foram acompanhados pela diminuição das tensões. Desprezando as tensões “pontuais” localizadas nas interseções, as tensões máximas registaram-se no instante 2.1 s (pressão máxima), vindo a diminuir nos instantes seguintes (Figura 5.15). Como explicado em 5.5.1, as tensões de corte aplicadas à estrutura na zona superior também contribuíram para os resultados das tensões obtidas na zona da base.

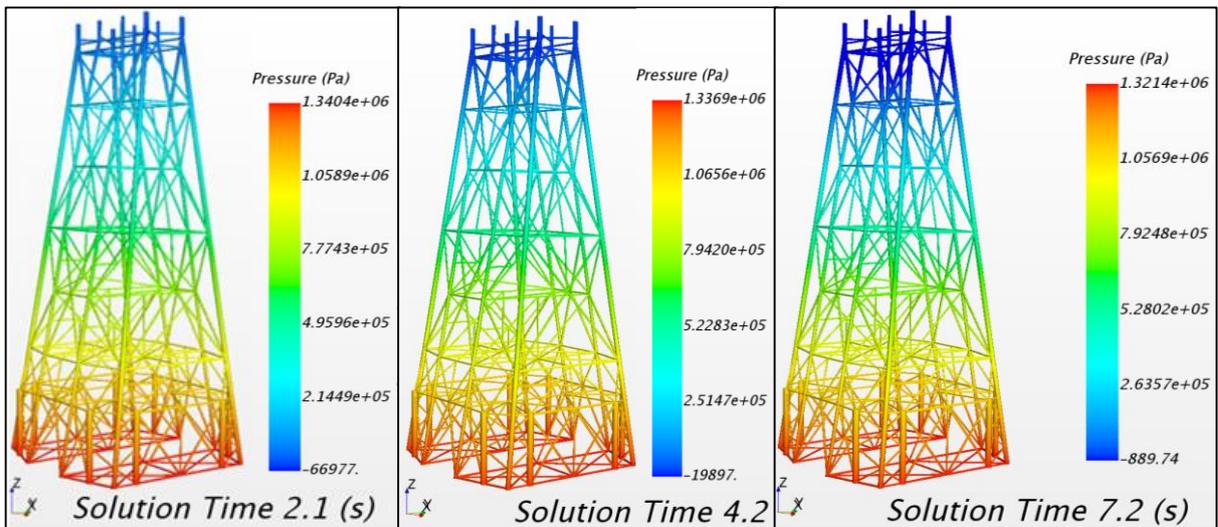


Figura 5.14 – Mapa de pressões na *jacket* devido às ações hidrodinâmicas (modelo CFD).

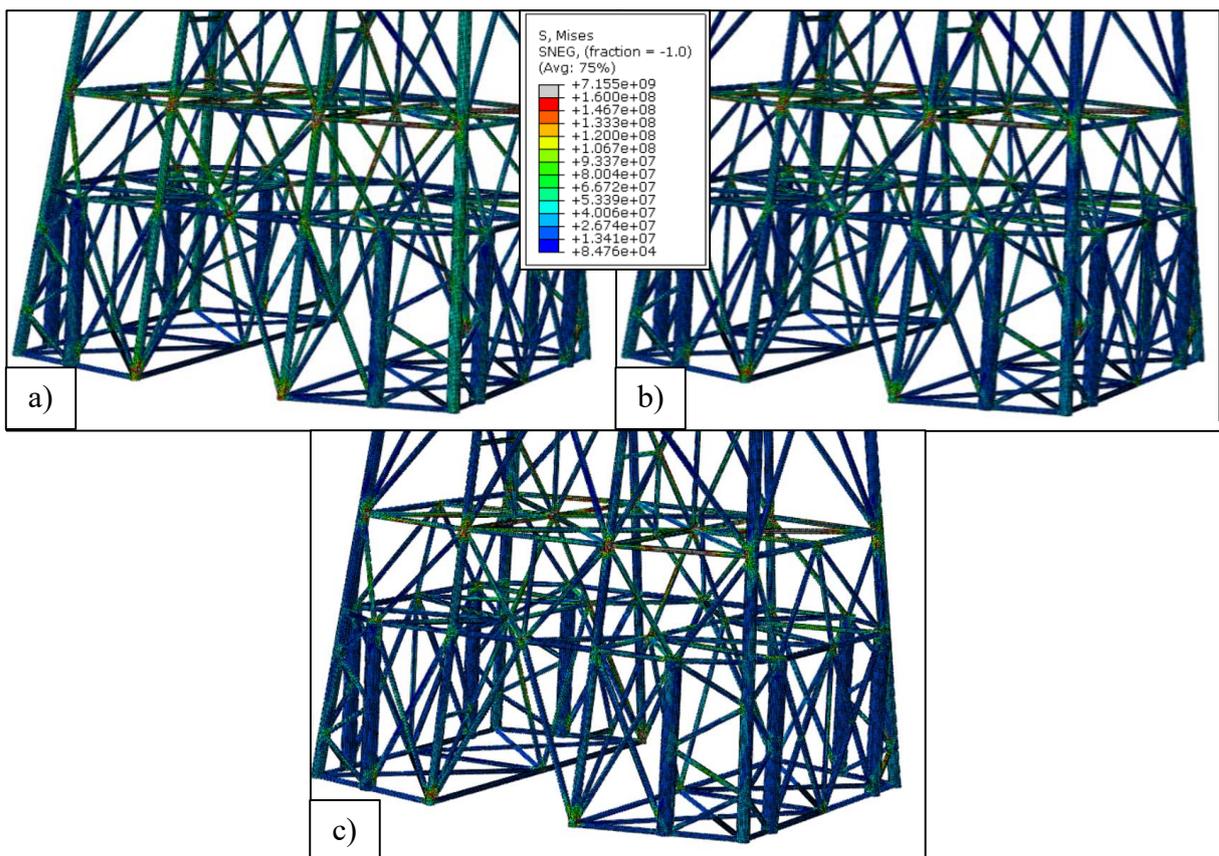


Figura 5.15 - Mapa das tensões (*Von Mises*) nos elementos da base da estrutura (ABAQUS) aos: a) 2.1 s, b) 4.2 s e c) 7.2 s.

5.5.4. Utilização dos resultados no processo de dimensionamento/otimização

Analizados os resultados obtidos através da co-simulação dos modelos do STAR-CCM+ e do ABAQUS, pretende-se aqui salientar que este método de análise pode ajudar no processo de dimensionamento e/ou de otimização da estrutura. Como já referido, a estrutura aqui modelada teve apenas em conta a configuração da estrutura, as características geométricas dos tubos e as características físicas do material (onde se considerou que o seu comportamento como linear). Assim, deixou-se de fora a modelação dos reforços nas zonas de maior tensão/deformação bem como o tipo de ligação utilizado entre os tubos. Contudo, esta análise pode servir como uma primeira aproximação para identificar os pontos críticos da estrutura. A título de exemplo na Figura 5.16 apresenta-se uma das zonas críticas identificadas, onde as deformações locais apresentam valores na ordem dos 70 cm. Através destes resultados percebe-se que será necessário controlar as deformações desta zona, onde uma das soluções poderá ser o contravento lateral.

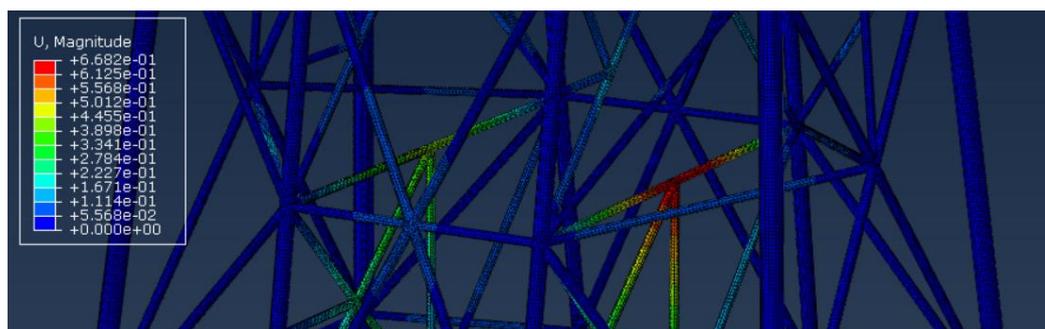


Figura 5.16 - Zona crítica da estrutura, com deformações locais elevadas.

Em forma de conclusão, a tensão máxima registada no estudo foi numa ligação na zona da base e foi cerca de 290 MPa (Figura 5.17) quando a tensão de cedência do material é de 315 MPa.

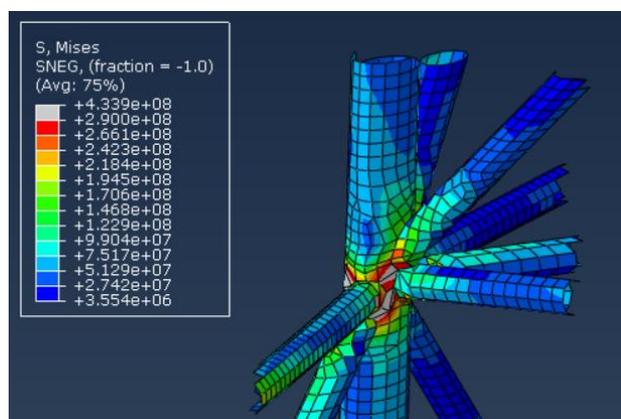


Figura 5.17 – Ligação onde se verificaram as tensões máximas

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com a realização deste trabalho chegaram-se às seguintes principais conclusões:

- O dimensionamento de plataformas *offshore* (fixas e flutuantes) é uma tarefa bastante complexa e com grandes especificidades quando comparadas com as regulares estruturas da Engenharia Civil;
- Esta complexidade deve-se essencialmente às suas dimensões e ao carácter dinâmico e irregular (espacial e temporal) das ações de origem ambiental, tornando difícil a sua correta quantificação e aplicação no dimensionamento de estruturas;
- A modelação CFD mostrou-se uma ferramenta bastante completa e precisa na modelação de escoamento de fluidos, possibilitando a sua análise em qualquer ponto do domínio;
- Sendo um *software* de modelação CFD, a capacidade do STAR-CCM+ em modelar a ação das ondas (teoria de ondas regulares e irregulares), a ação da corrente e ainda a ação do vento revelou-se uma ferramenta importante na área *offshore*;
- O ABAQUS, enquanto *software* de cálculo automático, apresentou grandes capacidades na modelação FEM de estruturas, apresentando resultados realistas;
- A possibilidade de realizar uma co-simulação direta entre o STAR-CCM+ e o ABAQUS (uni e bidireccionalmente) vem auxiliar o estudo do comportamento estrutural quando sujeita às ações ambientais, dando uma previsão mais realistas;
- Atendendo às deformações globais e às tensões obtidas, conclui-se que de uma forma geral a estrutura se mostrou capaz de resistir à onda de dimensionamento utilizada.

Tendo em conta que o estudo aqui desenvolvido se tratou de um 1º contacto com a modelação CFD e com o método da co-simulação dinâmica e atendendo à complexidade do estudo de estruturas *offshore*, considera-se que deve ser completado nos seguintes aspetos:

- Completar o modelo 3D da estrutura com integração da zona do *deck* e das estacas e aproximar as características das zonas das ligações com as reais
- Modelar a interação solo-estrutura através do sistema de molas horizontais nas estacas;
- Utilizar em ambos os modelos uma malha mais apertada;
- Explorar os modelos de turbulência disponíveis no STAR-CCM+ e utilizar o mais adequado ao caso em estudo, uma vez que não se dedicou muito tempo a este passo;
- Realizar um número maior de iterações por *time-step* (modelo CFD) e aumentar o tempo de análise da co-simulação;
- Estudar a influência da direção de propagação da onda no comportamento da *jacket*;
- Realizar uma análise estrutural mais detalhada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Manco, T. (2013). “Avaliação comparativa da regulamentação para estruturas offshore (API, ISO, NORSOK, EC3) ”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- [2] EU-FP7 MaRINET PROJECT. Deliverable D2.23: Review od Tow Tank Limitations. Março 2014.
- [3] Peric, M. (2008). “Marine Issues”. Marine Special Report - Revista Dynamics, edição 39, pág. 3. CD-Adapco.
- [4] ABAQUS User’s manual - Version 6.14 (2014). Dassault Systèmes Simulia Corp., USA.
- [5] Wikipédia@ (n.d.). “Petroleum”. <https://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum>. [Acedido em 25 de Fevereiro de 2015].
- [6] Cepa@ (n.d.). “História do Petróleo”. <http://cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/historia.html>. [Acedido em 25 de Fevereiro de 2015].
- [7] Wikipédia@ (n.d.). “Petronius (oil platform)”. [https://en.wikipedia.org/wiki/Petronius_\(oil_platform\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Petronius_(oil_platform)). [Acedido em 17 de Março de 2015].
- [8] Shell@ (n.d.). “Perdido”. <http://www.shell.com/about-us/major-projects/perdido.html> [Acedido em 17 de Março de 2015].
- [9] Noaa@ (n.d.). “Types of offshore oil and gas structures”. National Oceanic and Atmospheric Administration. http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/06mexico/background/oil/media/types_600.html [Acedido em 10 de Março de 2015].
- [10] Tesouro, N. (2010). “Aspectos Estruturais no Comportamento de Estruturas Offshore”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- [11] Cutaiar, T. (2011). “Fraudulently Pleaded Jones Act Claim Will Not Prevent Removal to Federal Court”. <http://mblb.com/2011/12/fraudulently-pleaded-jones-act-claim-will-not-prevent-removal-to-federal-court>. [Online em 29 de Dezembro de 2011] [Acedido em 20 de Março de 2015].

-
- [12] Offshore Energy Today@ (2012). “Norway: Successful Tie-In of Fifth Pipeline on Statoil’s Troll A Platform”. <http://www.offshoreenergytoday.com/wp-content/uploads/2012/06/Norway-Fifth-Pipeline-Connects-to-Statoil%E2%80%99s-Troll-A-Platform-1024x683.jpg>. [Acedido em 8 de Abril de 2015].
- [13] 2b1st Consulting@ (2012). “Jack-up”. http://www.2b1stconsulting.com/wp-content/uploads/2012/04/Jack-up-drilling_rig.jpg. [Acedido em 18 de Março de 2015].
- [14] Amorim, T. (2010). “Plataformas Offshore: Uma breve análise desde a construção ao descomissionamento”. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, Brasil.
- [15] Wikipédia@ (n.d.). “Plataforma Petrolífera”. https://pt.wikipedia.org/wiki/Plataforma_petro%C3%ADfera. [Acedido em 26 de Fevereiro de 2015].
- [16] Gigantes do Mundo@ (2011). “A estrutura mais alta do mundo”. <http://gigantesdomundo.blogspot.pt/2011/06/estrutura-mais-alta-do-mundo.html>. [Acedido em 6 de Abril de 2015].
- [17] Ta na Água@ (2010). “Offshore: Plataforma de Petróleo do tipo SPAR”. <http://tanaagua.blogspot.pt/2010/08/plataforma-de-petroleo-tipo-spar.html>. [Acedido em 4 de Maio de 2015].
- [18] Hype Science@ (2013). “10 produtos derivados do petróleo que você usa no dia-a-dia”. <http://hypescience.com/produtos-derivados-do-petroleo>. [Acedido em 16 de Setembro de 2015].
- [19] Matos, V. (2015). “Ingleses localizam seis jazidas de petróleo em Portugal”. http://www.sabado.pt/portugal/detalhe/ingleses_localizaram_seis_jazidas_de_petroleo_em_portugal.html. [Acedido em 25 de Fevereiro de 2015].
- [20] Estanqueiro, A. (2010). “Energia Eólica Offshore: Levantamento do potencial do país, limitações e soluções tecnológicas”. Conferências Energia 2020, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- [21] Rimola, B. (2010). “Análise dinâmica de plataformas de aço para produção de petróleo com base na consideração do efeito da interação solo-estrutura”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.
-

-
- [22] Nallayarasu, S. (n.d.) “Steel tubular member design 1”. Module 3 (Lecture 1), Design of Offshore Structures, Department of Ocean Engineering, Indian Institute of Technology, Madras, India.
- [23] STAR-CCM+ User’s manual - Version 10.06.010 (2015). CD-Adapco, USA.
- [24] Hou, G., Wang, J., Layton, A. (2012). “Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction – A Review”. *Communications in Computational Physics*, Vol. 22, No. 2, pp. 337-377.
- [25] Bloxom, A. (2014). “Numerical Simulation of the Fluid-Structure Interaction of a Surface Effect Ship Bow Seal”. Tese de Doutorado, Faculty of Aerospace Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- [26] Benra, F., Dohmen, H., Pei, J., Schuster, S., Wan, B. (2011). “A Comparison of One-Way and Two-Way Coupling Methods for Numerical Analysis of Fluid-Structure Interactions”. *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2011, 16 pages.
- [27] Garcia, G. (2010). “Simulação Computacional do escoamento no interior de uma Jante de Competição”. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [28] Wikipédia@ (n.d.). “Computational fluid dynamics”. https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics. [Acedido em 3 de Junho de 2015].
- [29] Youtube@ (2015). “STAR-CCM+ Animation of Flow in a Dam Spillway”. CD-adapco’s channel. https://www.youtube.com/watch?v=nSNzC_5gvjE [Acedido em 27 de Outubro de 2015]
- [30] Buchner, B., Heerink, R., Wilde, J., Witz, J., Hjelholt, K. (2009). “Evaluating the Loading and Structural Response of an Offshore Platform Using Integrated Large and Small Scale Testing Combined With Diffraction and Finite Element Analysis and Offshore Measurements”. *Offshore Technology Conference (OTC)*, Houston, Texas, USA.
- [31] Finnegan, W., Goggins, J. (2015). “Linear irregular wave generation in a numerical wave tank”. *Applied Ocean Research* 52, pp. 188-200.
- [32] Kim, J., Magee, A., Guan, K. (2011). “CFD Simulation of Flow-Induced Motions of a Multi-Column Floating Platform”. *ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE)*, Vol. 7: CFD and VIV; *Offshore Geotechnics*, pp. 319-326, Rotterdam, The Netherlands.
- [33] Lefevre, C., Constantinides, Y., Kim, J., Henneke, M., Jang, H., Gordon, R., Wu, G. (2013). “Guidelines for CFD Simulations of SPAR VIM”. *Proceedings of the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Nantes, France.
-

-
- [34] Kim, J., Jang, H., O'Sullivan, J. (n.d.). "A Cost-Effective Computational Tool For Offshore Floater Design".
- [35] Marzban, A., Lakshmiraju, M., Richardson, N., Henneke, M., Wu, G., Vargas, P., Oakley, O. (2012). "Offshore Platform Fluid Structure Interaction Simulation". Proceedings of the ASME 31nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brasil.
- [36] Santo, H., Taylor, P., Bai, W., Choo, Y. (2015). "Current blockage in a numerical wave tank: 3D simulations of regular waves and currents through a porous tower". *Computers & Fluids* 115, pp. 256-269.
- [37] Documentos de apoio do Curso de Formação de Estruturas Offshore (2015), Coimbra, Portugal.
- [38] Haritos, N. (2007). "Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures – Na Overview". *EJSE Special Issue: Loading on Structures*.
- [39] Prof2000@ (n.d.). "Tipos de ondas". <http://www.prof2000.pt/users/mrsd/8ano/ondas.htm>. [Acedido em 12 de Novembro de 2015].
- [40] Pipeline Encyclopedia@ (n.d.). "Wave". <http://4.bp.blogspot.com/-VwPH6Lk66E0/UzO3SIO9NQI/AAAAAAAAAJ0/09I-kxRktVU/s1600/wave+length.png>. [Acedido em 12 de Novembro de 2015].
- [41] Wikipédia@ (n.d.). "Onda oceânica de superfície". https://pt.wikipedia.org/wiki/Onda_oce%C3%A2nica_de_superf%C3%ADcie. [Acedido em 12 de Novembro de 2015].
- [42] Shoreform@ (n.d.). "Shore Form Stable Bays". <http://shoreform.co.uk/shoreform-stable-bays.html>. [Acedido em 13 de Novembro de 2015].
- [43] Chakrabarti, S. (2005). "Handbook of Offshore Engineering". Offshore Structures Analysis, Inc., Plainfield, Illinois, USA.
- [44] Det Norske Veritas (2010). "Environmental Conditions and Environmental Loads", Recommended Practice DNV-RP-C205, October 2010.
- [45] Fenton, D. 1985. "A Fifth-Order Stokes Theory for Steady Waves", *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 111 (2), pp. 216-234.
- [46] INVENTOR User's manual - Version 2016. Autodesk, Inc., USA.
- [47] American Petroleum Institute (1993). "API RP 2A (LRFD) - Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Load and Resistance Factor Design". Ed.1, API, Washington.
-

8. ANEXOS

Anexo 1 - Modelo do ficheiro *input* do ABAQUS

```
*Heading
** Job name: JACKETIMP04 Model name: JACKETIMP03
** Generated by: Abaqus/CAE 6.14-2
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
(Definição omitida)
** ASSEMBLY
(Definição omitida)
*End Assembly
**
** MATERIALS
**
*Material, name="Aço Estrutura"
*Density
7850.,
*Elastic
2.05e+11, 0.3
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: Disp-BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
SET-2, ENCASTRE
** -----
**
** STEP: Cargas
**
*Step, name=Cargas, nlgeom=NO, inc=1000000
co-simulação
*Dynamic, alpha=-0.05, nohaf
0.06, 7.2, 6e-05, 0.06
**
```

```
** LOADS
**
** Name: GRAVITY-1  Type: Gravity
*Dload
, GRAV, 9.81, 0., 0., -1.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
** Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
** Output, field, variable=PRESELECT, time interval=0.06
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
** Output, history, variable=PRESELECT
**
** CO-SIMULATION, NAME=Jacket, PROGRAM=MULTIPHYSICS
** CO-SIMULATION REGION, TYPE=SURFACE, IMPORT
ASSEMBLY_FSI_INTERFACE, CF
**
** End Step
```