

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

GUILHERME BEGO ZATARIN

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA AVALIAR RISERS  
RÍGIDOS

Joinville

2024

GUILHERME BEGO ZATARIN

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA AVALIAR RISERS  
RÍGIDOS

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso de  
Graduação em Engenharia Naval do  
Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2024

GUILHERME BEGO ZATARIN

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA AVALIAR RISERS  
RÍGIDOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 03 de julho de 2024.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.  
Orientador

---

Dean Carlo Zimmermann, Dr. Eng.  
Membro

---

Prof. Vitor Takashi Endo, Dr. Eng.  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo computacional destinado a análise numérica de risers rígidos. Buscando uma maior flexibilidade, o modelo desenvolvido permite analisar o comportamento de risers submersos dispostos em catenária, além de permitir a adição de boias e flutuadores, gerando configurações conhecidas por Lazy S e Lazy-Wave. O objetivo principal deste estudo é desenvolver uma metodologia para avaliar o desempenho estrutural de um riser rígido durante diferentes condições operacionais, as quais consideram o ambiente marinho e a ação de eventuais forças externas. A metodologia empregada envolveu a modelagem utilizando o método dos elementos finitos, implementado na ferramenta Ansys APDL. Nessa abordagem os risers rígidos são modelados utilizando elementos do tipo pipe, ou seja, uma variação do tipo viga. Já o solo marinho é representado por elementos de casca. Por fim, um contato do tipo “no penetration” é estabelecido entre os elementos que representam o riser e aqueles que representam o solo marinho. Embora seja realizada uma análise estática, que não considera os efeitos dinâmicos das ações ambientais, a curvatura da estrutura é obtida em um processo iterativo não linear, onde busca-se uma configuração de equilíbrio para as condições impostas ao modelo. Os resultados revelaram fatores importantes sobre a resposta estrutural do sistema e a eficácia da adição de boias e flutuadores para a redução das tensões e deformações sofridas por risers rígidos. Por fim, este estudo mitiga lacunas e contribui para o avanço do conhecimento da engenharia oceânica, oferecendo insights valiosos para o projeto e operação de sistemas submerso que operam em águas profundas e ultra profundas, servindo de base para estudos futuros.

**Palavras-chave:** Risers. Método dos Elementos Finitos. Simulação numérica. Lazy Wave. Ansys APDL.

## ABSTRACT

This work presents the development of a computational model designed for the numerical analysis of rigid risers. To achieve greater flexibility, the developed model allows for the analysis of the behavior of subsea risers arranged in a catenary configuration and enables the addition of buoys and floaters, generating configurations known as Lazy S and Lazy Wave. The primary objective of this study is to develop a methodology to evaluate the structural performance of a rigid riser under different operational conditions, considering the marine environment and the action of external forces. The methodology employed involved modeling using the finite element method, implemented in the Ansys APDL tool. In this approach, rigid risers are modeled using pipe elements, which are a variation of beam elements. The seabed is represented by shell elements. Finally, a "no penetration" contact is established between the elements representing the riser and those representing the seabed. Although a static analysis is performed, which does not consider the dynamic effects of environmental actions, the curvature of the structure is obtained through a nonlinear iterative process, aiming to find an equilibrium configuration for the conditions imposed on the model. The results revealed important factors regarding the structural response of the system and the effectiveness of adding buoys and floaters to reduce the stresses and deformations experienced by rigid risers. Finally, this study addresses gaps and contributes to the advancement of knowledge in ocean engineering, providing valuable insights for the design and operation of subsea systems in deep and ultra-deep waters, serving as a basis for future studies.

**Keywords:** Risers. Finite Element Method. Numerical simulation. Lazy Wave. Ansys APDL.

## LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1 – Exemplos das principais configurações de riser</u> .....	16
<u>Figura 2 – Representação dos principais carregamentos oceânicos</u> .....	21
<u>Figura 3 – Elementos das famílias PIPE, CONTACT e TARGET</u> .....	26
<u>Figura 4 – Exemplo de atribuição das superfícies de contato e alvo</u> .....	27
<u>Figura 5 – Geometria do elemento TARGE170</u> .....	29
<u>Figure 6 – Tipos de segmento para definir a superfície alvo (target) rígida</u> .....	30
<u>Figura 7 – Geometria do elemento CONTA177</u> .....	31
<u>Figura 8 – Geometria dos elementos PIPE288 e PIPE289</u> .....	32
<u>Figura 9 – Riser em configuração Catenária: código Ansys APDL</u> .....	34
<u>Figura 10 – Riser em configuração Lazy S/Steep-S: código Ansys APDL</u> .....	35
<u>Figura 11 – Riser em configuração Lazy Wave/Steep-Wave: código Ansys APDL</u> ... 35	
<u>Figura 12 – Pontos e retas da configuração Lazy S/Steep-S</u> .....	36
<u>Figura 13 – Pontos e retas da configuração Lazy Wave/Steep-Wave</u> .....	36
<u>Figura 14 – Variáveis para inclinação do modelo Lazy S/Steep-S</u> .....	38
<u>Figura 15 – Variáveis para inclinação do modelo Lazy Wave/Steep-Wave</u> .....	38
<u>Figura 16 – Modelagem dos modelos de catenária, com boia e com flutuadores</u> .....	41
<u>Figura 17 – Exemplo de condições de contorno no modelo de catenária</u> .....	42
<u>Figura 18 – Carregamentos globais e específicos</u> .....	43
<u>Figura 19 – Seção transversal do riser e principais parâmetros</u> .....	43
<u>Figura 20 – Modelos deformados de riser em Catenária Livre e Lazy Wave</u> .....	45
<u>Figura 21 – Comportamento da tração efetiva do trabalho de referência</u> .....	49
<u>Figura 22 – Descontinuidade e pico na tração observada na simulação</u> .....	50
<u>Figura 23 – Modelo de Lazy Wave do estudo de caso 2</u> .....	52
<u>Figura 24 – Tração efetiva do riser em Lazy Wave</u> .....	53
<u>Figura 25 – Tração efetiva obtida do riser em configuração Lazy Wave</u> .....	54

## LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 1 – Parâmetros do estudo de caso 1 (catenária livre)</u> .....	48
<u>Tabela 2 – Resultados do estudo de caso 1 (catenária livre)</u> .....	48
<u>Tabela 3 – Dados de entrada do trabalho de referência</u> .....	50
<u>Tabela 4 – Malha do modelo em configuração Lazy Wave</u> .....	51
<u>Tabela 5 – Resultados do estudo de caso 2 (Lazy Wave)</u> .....	52

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABS – American Bureau of Shipping

APDL – Ansys Parametric Design Language

DNV – Det Norske Veritas

DOF – Degree of Freedom

DP – Posicionamento Dinâmico

FEM – Finite Element Method

ISO – International Organization for Standardization

MEF – Método de Elementos Finitos

SCR – Steel Catenary Riser

TDP – Touch Down Point

TTR – Top Tension Riser

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  : amplitude da onda

$A_{INT}$  : área interna

$A_{EXT}$  : área externa

$A_{SEC}$  : área da seção transversal

$B_R$  : força de flutuação do riser por unidade de comprimento

$C_A$  : coeficiente de massa adicional

$C_D$  : coeficiente de arrasto

$C_M$  : coeficiente de inércia

$D_{INT}$  : diâmetro interno

$D_{EXT}$  : diâmetro externo

$F$  : força total por unidade de comprimento de referência

$k$  : número da onda

$t$  : tempo

$\bar{U}$  : velocidade média do escoamento

$u(t)$  : velocidade do escoamento

$\dot{u}$  : aceleração do escoamento

$W_R$  : força peso do riser por unidade de comprimento

$W_O$  : força peso do fluido interno por unidade de comprimento

$x$  : posição  $x$  no espaço

$\dot{x}$  : velocidade da estrutura

$\ddot{x}$  : aceleração da estrutura

$\varphi$  : fase da onda

$\eta$  : elevação da superfície da água ou elevação de mar

$\rho_R$  : densidade do material do riser

$\rho_O$  : densidade do fluido interno

$\rho_{SW}$  : densidade da água do mar

$\omega$  : frequência angular ou velocidade angular

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1. OBJETIVO GERAL .....	12
<b>1.1.1. Objetivos Específicos</b> .....	<b>12</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>13</b>
2.1. RISERS .....	13
<b>2.1.1. Configurações de risers</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.2. Análises e considerações</b> .....	<b>17</b>
2.2. ANSYS APDL .....	18
<b>2.2.1. Tipos de Análises</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2.2. Carregamentos principais</b> .....	<b>20</b>
<u>2.2.2.1. Força do Vento</u> .....	<u>21</u>
<u>2.2.2.2. Ondas Marítimas</u> .....	<u>22</u>
<u>2.2.2.3. Corrente Marítima</u> .....	<u>23</u>
2.3. PARÂMETROS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	25
<b>2.3.1. Elementos</b> .....	<b>25</b>
<b>2.3.2. Par de Contato</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3.3. Elemento alvo TARGE170</b> .....	<b>28</b>
<b>2.3.4. Elemento de contato CONTA177</b> .....	<b>30</b>
<b>2.3.5. Elemento do riser PIPE289</b> .....	<b>31</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>33</b>
3.1. HIPÓTESES E CONSIDERAÇÕES .....	33
3.2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO .....	33
3.3. DADOS ENTRADA .....	45
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>47</b>
4.1. ESTUDO DE CASO 1 – RISER EM CATENÁRIA LIVRE .....	47
4.2. ESTUDO DE CASO 2 – RISER EM LAZY WAVE .....	50
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>60</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A engenharia naval e oceânica desempenha um papel fundamental na exploração e produção de recursos offshore, desafiando os limites tecnológicos para garantir a segurança e eficiência das operações em ambiente marinho.

Em um cenário global onde a busca por fontes energéticas sustentáveis é uma prioridade, a matriz energética mundial tem passado por transformações significativas. A exploração de petróleo, que tradicionalmente ocorria em áreas costeiras, agora se estende para águas profundas e ultra profundas, submetendo os risers submerso a carregamentos ainda mais intensos.

Os risers são estruturas tubulares instaladas para transportar o petróleo do poço à plataforma. Sendo elementos cruciais para a produção offshore, eles estão sujeitos a uma série de requisitos operacionais, incluindo limites de tensões decorrentes do movimento da plataforma, bem como critérios associados a estabilidade estrutural.

Tais requisitos são ainda mais severos nos casos das plataformas que operam em águas ultra profundas, pois pequenos percentuais de deslocamento da unidade do plano de linha d'água podem provocar grandes mudanças na curvatura dos risers, aumentando a probabilidade de ocorrência de fadiga, ruptura ou flambagem desses elementos.

Uma possível estratégia para mitigar esses efeitos consiste no uso de boias e flutuadores, os quais aliviam as tensões atuantes nos risers, mas adicionam uma maior complexidade para a análise, exigindo uma compreensão detalhada das interações estruturais e hidrodinâmicas desses sistemas.

Neste contexto, o presente trabalho busca investigar o comportamento estrutural de risers submersos lançados em catenária livre (SCR), bem como os efeitos da adição de boias e flutuadores na redução das tensões e na estabilização estrutural desses elementos.

Por meio de análises paramétricas e simulações numéricas utilizando o método de elementos finitos (MEF), este trabalho busca ampliar a compreensão acerca dos desafios enfrentados na análise de risers rígidos submersos, bem como avaliar o uso de boias e flutuadores para mitigar os riscos associados a esses componentes.

## 1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo desenvolver códigos computacionais, baseados no método de elementos finitos (MEF), para a modelagem de risers rígidos submersos, buscando avaliar as tensões atuantes nesses elementos quando são desconsiderados os efeitos dinâmicos de vento, correntes e ondas.

### 1.1.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram divididos em cinco etapas:

- 1) Desenvolver um código baseado no MEF capaz de modelar e avaliar os esforços de um sistema em catenária livre;
- 2) Acrescentar uma boia ao modelo de catenária livre e verificar os esforços e as deformações;
- 3) Acrescentar um comprimento de flutuadores ao modelo de catenária livre e verificar os esforços e as deformações;
- 4) Avaliar o uso de boias e flutuadores como estratégia para reduzir as tensões e deformações existentes em risers rígidos;
- 5) Verificar a consistência da metodologia proposta reproduzindo estudos de caso disponíveis na literatura.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são descritos os fundamentos teóricos que substanciam a metodologia desenvolvida neste trabalho. Inicialmente são apresentados os conceitos básicos acerca de risers. A seguir, são introduzidos os principais elementos de uma análise numérica baseada no método dos elementos finitos (MEF), discutindo, em especial, os tipos de elementos utilizados para a modelagem do contato entre o riser e o solo marinho.

### 2.1. RISERS

Um sistema de risers pode ser descrito simplesmente como um conjunto de dutos suspensos que conectam o leito marinho (Seabed) até a unidade marítima, localizada na superfície do mar. Eles são essenciais para a extração segura e eficiente do petróleo, gás e demais fluidos existentes nos reservatórios localizados no solo marinho.

Por outro lado, avarias e rupturas desses elementos podem provocar grandes catástrofes ambientais ou acidentes que podem inclusive comprometer a integridade da plataforma e a vida dos trabalhadores embarcados.

Assim, o projeto estrutural desses elementos é considerado crítico, pois esses elementos devem resistir a todos os esforços impostos, sendo os elementos críticos do desenvolvimento de uma coluna de perfuração. Seu projeto e análise devem levar em conta todas as cargas estruturais, dinâmicas e condições ambientais que impactam no sistema. Dada a sua importância, é imperativo compreender a complexidade e os desafios enfrentados no projeto, fabricação e operação desses componentes.

Existem duas categorias principais de risers: os rígidos e os flexíveis. Os risers rígidos são geralmente construídos com tubos de aço formado por juntas soldadas ou rosqueadas e são projetados para suportar uma variedade de cargas, incluindo as forças devido ao peso da coluna de perfuração, as pressões hidrostáticas do ambiente submerso e as cargas dinâmicas resultantes de correntes marítimas e dos movimentos da plataforma. Conforme descreve Bai e Bai (2012), essa categoria possui grande rigidez e resistência a cargas axiais, radiais e de flexão.

Por outro lado, os risers flexíveis são compostos por várias camadas de materiais, como plásticos e metais, oferecendo uma combinação única de resistência e flexibilidade. Eles são capazes de suportar grandes cargas axiais e são altamente adaptáveis a curvaturas, o que os torna ideais para operações em águas profundas.

As principais camadas utilizadas na fabricação de um riser flexível são:

- A camada plástica externa: a qual isola o duto do ambiente externo e tem a finalidade de inibir o efeito da corrosão;
- A carcaça intertravada: sendo a camada mais interna, tem a função de impedir o colapso do riser devido à pressão externa;
- A armadura de tração: a qual é responsável por fornecer rigidez à tração e a torção ao riser;
- A armadura de pressão: a qual tem como objetivo suportar a pressão no interior do riser.

Um navio instalador é uma embarcação projetada para a instalação de estruturas submersas, incluindo risers, umbilicais, cabos e dutos. Tais navios são essenciais para a indústria offshore de petróleo e gás, bem como para projetos de energia renovável, como a instalação de turbinas eólicas oceânicas.

Os navios instaladores são equipados com tecnologia avançada e uma variedade de equipamentos especializados, como guindastes, sistemas de posicionamento dinâmico (DP), carretéis de grande capacidade, tensionadores e sistemas de controle de carregamento. Esses recursos permitem que os navios lidem com tarefas complexas em ambientes marítimos desafiadores, garantindo a precisão e segurança durante o manuseio e a instalação desses componentes.

Por serem navios altamente especializados, os navios instaladores, embora desempenhem um papel crucial na instalação de risers (rígidos ou flexíveis), têm um elevado custo de operação.

Para risers flexíveis, frequentemente são utilizados navios menos complexos e mais econômicos, devido à menor rigidez e peso desse tipo de riser. Já a instalação de risers rígidos geralmente requer navios capazes de lidar com o peso e a rigidez do material, o que pode aumentar significativamente os custos de instalação.

Segundo Lin e Bai (2005), a diferença de custo entre risers rígidos e flexíveis pode ser significativa e depende de vários fatores. No que diz respeito ao custo de

fabricação, os risers flexíveis tendem a ser mais caros, devido à construção complexa que inclui várias camadas de materiais especializados, as quais proporcionam flexibilidade e resistência para as operações marítimas. Em contrapartida, os risers rígidos são geralmente mais baratos, pois são fabricados com materiais mais básicos.

No que se refere ao custo de instalação, os risers flexíveis geralmente apresentam uma vantagem, sendo mais baratos e rápidos de instalar. Pois, conforme já mencionado, devido ao menor peso e maior flexibilidade, eles podem ser instalados usando navios menos complexos, o que reduz os custos operacionais. Além disso, a adaptabilidade dos risers flexíveis a diferentes condições de mar e do fundo marinho pode diminuir a necessidade de engenharia especializada.

Por outro lado, a instalação de risers rígidos é mais cara e complexa, requerendo navios de construção especializados e dispendiosos. Por fim, como explicam Lin e Bai (2005) a instalação de risers rígidos tende a ser mais demorada e arriscada, especialmente em águas profundas e condições adversas de operação.

Em termos de manutenção, risers flexíveis geralmente apresentam um custo menor devido à sua resistência à fadiga e à corrosão, necessitando de menos inspeções e reparos. Já os risers rígidos podem ter um custo de manutenção mais alto, pois são mais suscetíveis à corrosão e a fadiga, exigindo inspeções frequentes e reparos complexos.

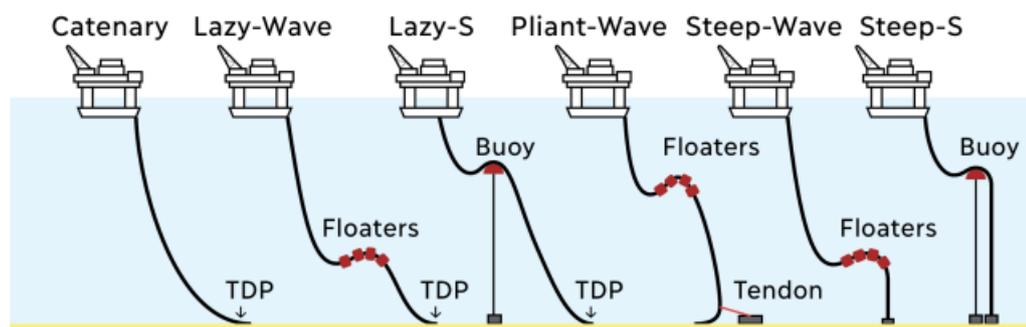
### **2.1.1. Configurações de risers**

As configurações dos risers variam de acordo com as condições específicas de operação, incluindo a profundidade da lâmina d'água, as características do leito marinho e o tipo de plataforma.

De acordo com Bai e Bai (2005), as configurações mais comuns incluem: a catenária livre, a Lazy-Wave, a Lazy-S, a Steep-Wave, a Steep-S e a Top Tension Riser (TTR). Sendo que cada configuração tem suas vantagens e desvantagens em termos de estabilidade, solicitações estruturais, facilidade de instalação, custo de manutenção e resistência à fadiga.

Na Figura 1 são mostradas as principais configurações utilizadas no ambiente offshore, as quais são discutidas neste capítulo e mencionadas ao longo do trabalho.

Figura 1 – Exemplos das principais configurações de riser



Fonte: Cardoso (2019)

A configuração de catenária livre é caracterizada pela simplicidade, onde o riser é fixado à plataforma e se estende livremente até o leito marinho. Essa configuração é comum em águas profundas devido à sua facilidade de instalação e baixo custo de manutenção. No entanto, conforme a lâmina d'água aumenta, o uso da configuração catenária livre pode se tornar inviável, devido ao excesso de tração no topo, a compressão dinâmica, ao peso próprio e a redução da vida útil em função da fadiga.

A configuração Lazy-Wave busca aliviar a tensão no topo de um riser rígido através do uso estratégico de flutuadores intermediários, tal como pode ser visto no comprimento em vermelho mostrado na Figura 1.

O uso de flutuadores cria um padrão de onda que reduz as tensões atuantes no riser e diminuem a movimentação do ponto de contato com o solo. Isso permite uma maior vida útil do riser em comparação com a catenária livre, especialmente em condições de mar agitado.

Similar à configuração Lazy-Wave, a configuração Lazy-S também busca aliviar as tensões no riser, porém, ao invés de flutuadores intermediários, é utilizada uma boia fixada no fundo do mar. Nessa configuração, o riser é dividido em dois trechos, um da plataforma até a boia e outro da boia até o solo marinho. Conforme discutido por Bai e Bai (2005), em decorrência da fixação da boia junto ao leito marinho, essa configuração pode ser menos compatível com os movimentos translacionais da unidade flutuante.

Já a configuração Steep-Wave é uma variação da Lazy-Wave, onde os flutuadores são posicionados na parte inferior do riser, ou seja, mais próximos ao leito marinho. Isso resulta em uma posição mais vertical do duto junto ao fundo do mar, o que é ideal em situações em que há restrições quanto à projeção horizontal do riser, oferecendo uma solução mais estável e verticalizada.

A configuração Steep-S, por sua vez, compartilha semelhanças com a Lazy-S. Porém, nesse caso, o elemento de flutuação está localizado em uma posição intermediária do riser, o que, além de sustentar parte de seu peso, faz com que o trecho que vai da boia até o leito marinho seja mais vertical, podendo evitar o contato do riser com o fundo do mar.

Por fim, a configuração Top Tension Riser (TTR) ou riser tracionado no topo, é uma configuração comumente utilizada com risers rígidos de aço que operam em águas ultra profundas. Nessa configuração, o riser é mantido constantemente tracionado através de tensionadores hidráulicos, cabos tensionadores ou flutuadores. Isso é feito para evitar a flambagem devido ao peso próprio da tubulação, além de limitar sua movimentação, garantindo a estabilidade e a integridade estrutural durante as operações de perfuração e produção (Cheng, Xu e Stanton, 2011).

### **2.1.2. Análises e considerações**

Além das considerações de carregamento e esforços estruturais, os risers também estão sujeitos a uma série de desafios ambientais, como corrosão marinha, interações fluido-estrutura e mudanças de temperatura. Tais fatores podem afetar significativamente a integridade e o desempenho dos risers ao longo do tempo, exigindo materiais e técnicas de fabricação avançadas para garantir sua durabilidade e confiabilidade.

O desenvolvimento contínuo de tecnologias de fabricação e métodos de análise, juntamente com o avanço na compreensão dos processos ambientais, tem possibilitado o projeto e a operação de risers cada vez mais robustos e eficientes. No entanto, o ambiente submerso continua sendo desafiador, exigindo uma abordagem holística e colaborativa entre engenheiros, pesquisadores e operadores para garantir o sucesso das operações de perfuração e produção offshore.

Em suma, os risers desempenham um papel essencial na indústria petrolífera, viabilizando o transporte de hidrocarbonetos do fundo do mar para as instalações de produção. Seu projeto, fabricação e operação exigem uma compreensão profunda dos desafios técnicos e ambientais envolvidos, bem como o uso de tecnologias avançadas e práticas de engenharia robustas para garantir sua integridade e desempenho ao longo do tempo.

## 2.2. ANSYS APDL

Para viabilizar a modelagem e a realização de análises estáticas de risers rígidos utilizando o método dos elementos finitos, ao longo deste trabalho foram desenvolvidos códigos, os quais possuem hipóteses e simplificações que facilitam sua implementação e funcionamento.

A primeira simplificação realizada consiste em desconsiderar as parcelas dinâmicas das forças causadas pelas correntes, ondas, vento, movimentação da unidade flutuante etc. Assim, são consideradas apenas as forças gravitacionais (peso), flutuação e as parcelas estáticas das correntes oceânicas e das ondas.

Basicamente, o modelo numérico desenvolvido primeiro esquematiza os elementos referentes a configuração do riser a ser analisada e depois aplica um método numérico para solucionar o problema (Ansys, 2013 e Ansys, 2009).

Devido a robustez, confiabilidade e alta capacidade de automatização, o procedimento numérico foi desenvolvido utilizando a ferramenta Ansys APDL, e pode ser dividido em 7 etapas:

- a. Formulação do problema: etapa inicial que precede a utilização da ferramenta, e visa estruturar e simplificar o problema. É nessa etapa que são definidas as hipóteses, parâmetros e variáveis do sistema a ser modelado;
- b. Seleção do tipo do elemento: nessa etapa é importante definir o elemento que melhor descreve o comportamento esperado da estrutura, levando em consideração as características físicas e comportamentais do sistema;
- c. Modelagem: é nessa etapa que são definidas a geometria do riser e do leito marinho (Seabed). Na modelagem realizada, o riser foi considerado como um duto longo e contínuo, ignorando eventuais junções e conexões;
- d. Seção e Material: nessa etapa são definidos o material e suas respectivas propriedades mecânicas, além de ser modelada a seção transversal do riser, a qual é definida por meio das propriedades geométricas mais relevantes, tais como: área da seção transversal, posição do centro de gravidade e momento de inércia da seção.

- e. Malha: envolve a discretização do sistema modelado, dividindo-o em elementos menores (ou células finitas) para as quais são aplicadas as equações de equilíbrio e as relações constitutivas do material. A qualidade e densidade da malha são aspectos críticos nessa etapa, pois podem afetar significativamente a precisão dos resultados e a eficiência do processo. Uma malha adequada deve garantir uma representação precisa do comportamento estrutural do riser, enquanto minimiza o custo computacional e os erros numéricos;
- f. Carregamentos: nessa etapa são aplicados os diferentes tipos de esforços aos quais o riser estará sujeito durante a sua operação, bem como as condições de contorno do sistema. Mais informações sobre esses parâmetros podem ser vistas na seção 3.2 deste trabalho;
- g. Solver e Pós processamento: essa etapa envolve a solução do sistema e a obtenção dos dados desejados, ou seja, os deslocamentos, as tensões principais, as tensões de von Mises, os momentos, as forças de reação etc.

### 2.2.1. Tipos de Análises

O comportamento dinâmico de um riser submerso pode ser descrito pelas equações de movimento que consideram a interação entre as forças aplicadas e a resposta estrutural do sistema.

Geralmente, as equações de movimento para um sistema estrutural dinâmico podem ser expressas pela Equação 1, a qual é derivada da segunda lei de Newton, sendo incluídos os termos referentes ao amortecimento e a rigidez do sistema.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

$$\{\ddot{x}\} = \{\dot{x}\} = 0 \quad (2)$$

$$[K]\{x\} = \{F\} \quad (3)$$

$[M]$  : matriz inercial ou matriz de massa do sistema

$[C]$  : matriz de amortecimento estrutural

$[K]$  : matriz de rigidez estrutural

$\{F\}$  : vetor de forças aplicadas

$\{\ddot{x}\}$  : vetor de acelerações nodais

$\{\dot{x}\}$  : vetor de velocidades nodais

$\{x\}$  : vetor de deslocamentos nodais

Os modelos numéricos de análise estática são baseados na equação de equilíbrio (Equação 3), a qual aplica os princípios de equilíbrio das forças e deslocamentos considerando acelerações e velocidades nulas, sendo derivada da segunda lei de Newton, ou seja, da Equação 1 (Ansys, 2008).

Dessa forma, o comportamento estático de um riser submerso pode ser descrito pelas equações que consideram o equilíbrio entre as forças externas aplicadas ao sistema e a resposta interna da estrutura.

A matriz de rigidez  $K$  contém as informações sobre a rigidez de cada elemento finito da estrutura. Para sistemas simples, como aquele formado por uma barra linear, a matriz de rigidez pode ser representada pela Equação 4. Já para sistemas mais complexos, a matriz é derivada com base nas propriedades geométricas individuais de cada elemento e como eles estão conectados na estrutura global.

$$K = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

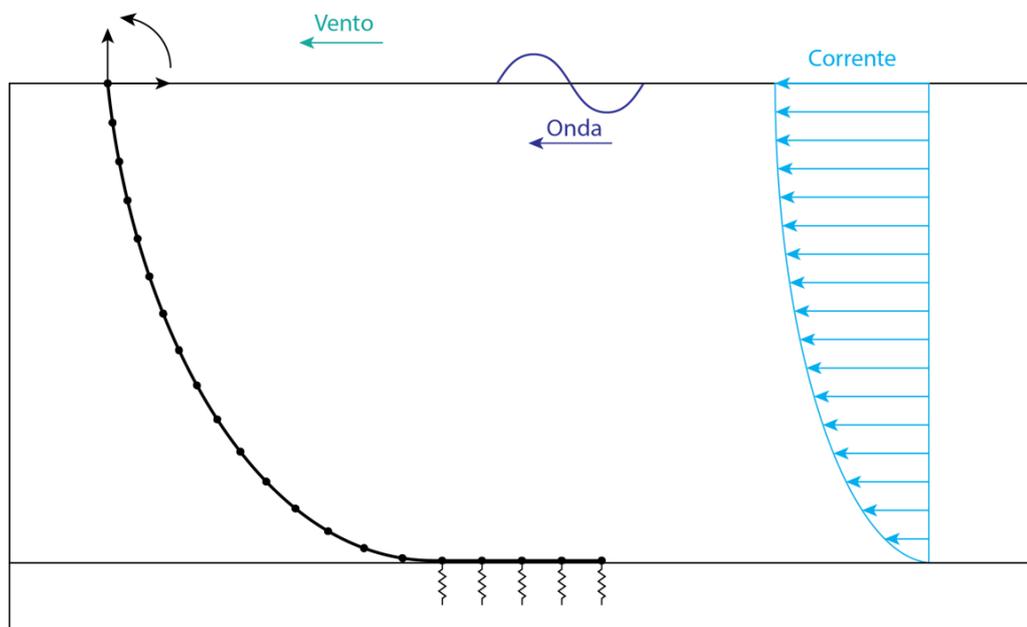
Assim, a finalidade dos modelos numéricos é resolver o sistema de equações lineares originado da Equação 3, para determinar os deslocamentos nodais  $\{x\}$ . Esses modelos utilizam métodos numéricos eficientes para solucionar esse sistema de equações, sendo que a precisão e estabilidade de tais métodos são importantes para se obter resultados confiáveis a um custo computacional aceitável.

### 2.2.2. Carregamentos principais

Um riser submerso pode estar sujeito a esforços estáticos e permanentes como o peso próprio e a flutuação; além de forças dinâmicas transientes, tais como as forças decorrentes da ação do vento, ondas e correntes.

Na Figura 2 são mostrados os principais carregamentos que atuam em um sistema offshore e que serão descritos nesta seção.

Figura 2 – Representação dos principais carregamentos oceânicos



Fonte: CASAPRIMA (2021)

### 2.2.2.1. Força do Vento

A força global gerada pelo vento pode ser descrita pela Equação 5.

$$q_{wind}(t) = 1/2 \cdot \rho_{air} \cdot C_D \cdot A \cdot (U(t) - \dot{x})^2 \quad (5)$$

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (6)$$

$$q_{wind}(t) = 1/2 \cdot \rho_{air} \cdot C_D \cdot A \cdot \bar{U}^2 + \rho_{air} \cdot C_D \cdot A \cdot \bar{U} \cdot u(t) - \rho_{air} \cdot C_D \cdot A \cdot \bar{U} \cdot \dot{x} \quad (7)$$

$\rho_{air}$  : densidade do fluido do vento (ar)

$C_D$  : coeficiente de arrasto

$A$  : área da seção

$U(t)$  : velocidade do vento

$\bar{U}$  : velocidade média do vento

$u(t)$  : velocidade de rajadas de vento

$\dot{x}$  : velocidade da estrutura

A Equação 7 descreve a força global explícita do vento, a qual é composta pelas três contribuições governantes. O primeiro termo descreve a força constante, a qual é gerada pela ação do vento médio, podendo ser incluída em análises estáticas. Já o segundo termo é a força de excitação de baixa frequência que vem de rajadas de vento, essas rajadas podem excitar os períodos naturais de oscilação de baixa frequência das estruturas flutuantes ancoradas, conforme descrito por Larsen (2019). O terceiro termo é a força do amortecimento de baixa frequência, proveniente da velocidade atuante na estrutura que sustenta o riser; esse termo é uma contribuição negativa para as forças totais do vento, pois é um termo de amortecimento.

#### 2.2.2.2. Ondas Marítimas

Carregamentos causados pelas ondas marítimas podem ser divididos em duas categorias principais, os de primeira ordem e os de segunda ordem. Os de primeira ordem possuem ordem de grandeza maior que os de segunda ordem, e, por isso, são os efeitos mais importantes que atuam na unidade flutuante (Raman-Nair e Baddour, 2003).

O movimento das ondas gera forças hidrodinâmicas que atuam no riser, cuja origem decorre da distribuição do campo de pressão tanto das ondas em si, quanto da interação fluido-estrutura.

Segundo Raman-Nair e Baddour (2003) e Raheem (2012), as forças geradas por ondas oceânicas são um dos principais carregamentos dinâmicos que afetam os risers submersos e são fundamentais para a análise e o projeto desses componentes.

Além das grandezas que definem uma onda (amplitude, comprimento, velocidade, altura, período etc.), deve-se considerar que um mar real corresponde a um somatório de ondas de infinitas frequências, sendo denominado de mar irregular. Nesse caso, a caracterização do mar é feita por parâmetros estatísticos, tais como: altura significativa e período de pico (Young, 2017).

A principal equação para estimar os carregamentos induzidos por uma onda regular é a equação de onda de Gerstner ou equação trocoidal de onda (Dean e Dalrymple, 1991), a qual descreve a propagação de uma onda regular em águas profundas. Esta equação modela ondas trocoidais, oferecendo uma solução exata para o movimento de ondas irrotacionais.

Além da equação de difração linear de ondas, representada em sua forma reduzida pela Equação 8, as forças causadas pela ação de ondas podem ser estimadas com outros métodos mais avançados, como as simulações numéricas que utilizam a equação de Navier-Stokes completa, e consideram fenômenos como a não linearidade, a dispersão e a interação com a geometria da estrutura.

$$\eta(x, t) = A \cdot \cos(kx - \omega t + \varphi) \quad (8)$$

$\eta$  : elevação da superfície da água ou elevação do mar

$A$  : amplitude da onda

$k$  : número da onda

$\omega$  : frequência da onda

$\varphi$  : fase da onda

$x$  : posição x no espaço

$t$  : tempo

### 2.2.2.3. Corrente Marítima

Um método comum para modelar as forças de arrasto geradas por correntezas em risers é o modelo de MORISON (1950), o qual é amplamente utilizado para estimar as forças induzidas por correntes em estruturas offshore.

O modelo de Morison descreve as forças de arrasto (ou forças hidrodinâmicas) como uma combinação de duas componentes principais: uma força de arrasto constante devido à pressão hidrodinâmica e uma força de inércia variável devido à aceleração relativa do fluido no entorno da estrutura.

As correntes oceânicas exercem forças hidrodinâmicas no riser, resultando em carregamentos estáticos e dinâmicos, os quais consideram a velocidade e a direção da corrente atuante em cada seção do riser.

A equação de Morison (Equação 10) descreve a força de um fluxo oscilatório com velocidade  $u(t)$  atuando em um corpo em movimento. Já a Equação 11 descreve a força resultante em uma estrutura fixa sob a ação de um fluxo oscilatório.

$$C_M = 1 + C_A \quad (9)$$

$$F = \frac{\rho}{2} C_D \cdot D \cdot |u - \dot{x}| \cdot (u - \dot{x}) + \rho \frac{\pi D^2}{4} \cdot C_M \cdot \dot{u} - \rho \frac{\pi D^2}{4} C_A \cdot \ddot{x} \quad (10)$$

$$F = \frac{\rho}{2} C_D \cdot D \cdot |u| \cdot u + \rho \frac{\pi D^2}{4} \cdot C_M \cdot \dot{u} \quad (11)$$

$\rho$  : densidade da água do mar

$C_D$  : coeficiente de arrasto

$C_M$  : coeficiente de inércia

$C_A$  : coeficiente de massa adicional

$D$  : diâmetro de referência, geralmente de um cilindro

$u$  : velocidade do escoamento

$\dot{u}$  : aceleração do escoamento

$\dot{x}$  : velocidade da estrutura

$\ddot{x}$  : aceleração da estrutura

$F$  : força total por unidade de comprimento de referência

A Equação 10 representa as forças globais geradas pela corrente marítima, considerando a interação entre a velocidade constante da corrente e a velocidade de baixa frequência da estrutura. Ela se subdivide em três termos, o primeiro termo (proporcional às velocidades) corresponde, portanto à parcela da força de arrasto; as demais componentes (proporcionais às acelerações) correspondem à parcela de inércia, geradas pela aceleração relativa (segundo termo) e pela movimentação da unidade flutuante (terceiro termo).

Se a estrutura marítima for considerada fixa, a Equação 11 pode ser derivada da Equação 10, permitindo o cálculo das forças caudadas pela ação das correntes que atuam em estruturas submersas.

Uma explicação mais detalhada sobre esse fenômeno pode ser vista em Faltinsen (1990) e Ansys Theory Reference for Mechanical Applications (2013). No entanto, geralmente considera-se que a formulação de Morison é mais aplicável quando a força de arrasto é significativa, e os efeitos viscosos preponderam sobre os efeitos inerciais; sendo usualmente empregada na análise de corpos esbeltos, como risers e linhas de ancoragem.

## 2.3. PARÂMETROS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Nesta seção são descritos os elementos que melhor se adequam para a simulação de riser rígidos submersos, incluindo a modelagem do contato com o leito marinho.

### 2.3.1. Elementos

Os elementos indicados para modelar um riser na ferramenta Ansys APDL são o BEAM188, BEAM189, PIPE288 e PIPE289, sendo os elementos da família beam uma viga longa e continua com seção circular para representar o riser, já os elementos pipe são definidos como dutos contínuos de seção circular, esses elementos facilitam a implementação de fluido interno e uma camada externa de revestimento se necessários.

Para definir um contato na ferramenta é necessário criar um par de contato utilizando um elemento alvo (target) e um elemento de contato (contact), exemplificado na Figura 4, sendo depois atribuídos a suas devidas geometrias. Dos elementos apresentados na Figura 3, para modelar o problema será utilizado o elemento alvo TARGE170, sendo esse o mais indicado por se tratar de um segmento de contato tridimensional.

O Ansys APDL suporta cinco modelos de contato: o nó a nó, nó a superfície, superfície a superfície, linha a linha, e linha a superfície. Cada modelo de par de contato exige diferentes combinações de elementos de contato e alvo, sendo importante selecionar os elementos apropriados para cada situação específica a ser avaliada (Ansys, 2009).

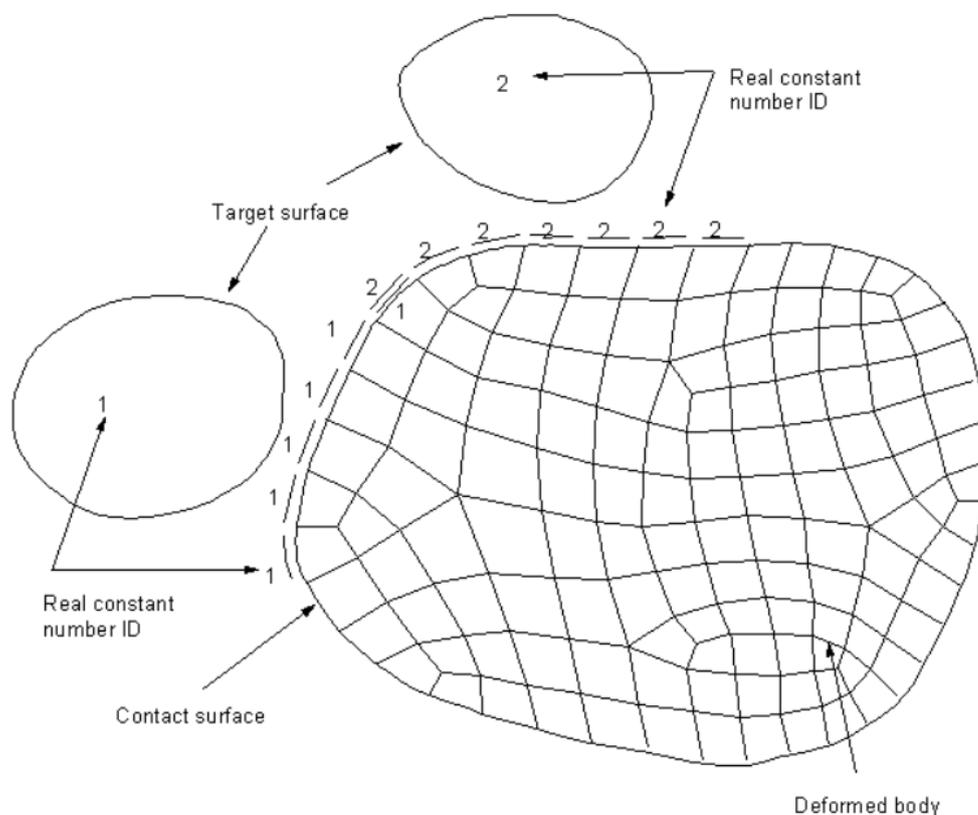
O elemento de contato deve atender aos requisitos específicos do problema e às restrições do par de contato, que incluem: problemas tridimensionais (3-D), contato entre linha e superfície, ou contato entre superfície e superfície. Neste contexto, os elementos CONTA173, CONTA174 e CONTA177 são adequados para a modelagem. No entanto, o elemento CONTA177 é o mais apropriado, pois permite a modelagem do riser como uma linha.

Figura 3 – Elementos das famílias PIPE, CONTACT e TARGET

PIPE Elements	Pictorials
<b>PIPE288</b> 3-D 2-Node Pipe 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	
<b>PIPE289</b> 3-D 3-Node Pipe 3 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	
<b>ELBOW290</b> 3-D 3-Node Elbow 3 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	
CONTAC Elements	Pictorials
<b>CONTA171</b> 2-D 2-Node Surface-to-Surface Contact 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, TEMP, VOLT, AZ	
<b>CONTA172</b> 2-D 3-Node Surface-to-Surface Contact 3 nodes 2-D space DOF: UX, UY, TEMP, VOLT, AZ	
<b>CONTA173</b> 3-D 4-Node Surface-to-Surface Contact 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, MAG	
<b>CONTA174</b> 3-D 8-Node Surface-to-Surface Contact 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, MAG	
<b>CONTA175</b> 2-D/3-D Node-to-Surface Contact 1 node 2-D/3-D space DOF: UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, AX, MAG	
<b>CONTA176</b> 3-D Line-to-Line Contact 3 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ	
<b>CONTA177</b> 3-D Line-to-Surface Contact 3 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ	
<b>CONTA178</b> 3-D Node-to-Node Contact 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, TEMP, VOLT	
TARGE Elements	Pictorials
<b>TARGE169</b> Contact 2-D Target Segment 3 nodes 2-D space DOF: UX, UY, ROTZ, TEMP	
<b>TARGE170</b> Contact 3-D Target Segment 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, TEMP	

Fonte: ANSYS Mechanical APDL Element Reference, ANSYS (2013)

Figura 4 – Exemplo de atribuição das superfícies de contato e alvo



Fonte: Contact Technology Guide, ANSYS (2009)

### 2.3.2. Par de Contato

Definidos os elementos e o tipo de contato, as etapas básicas para realizar uma análise típica de contato entre duas geometrias, de acordo com Ansys Contact Technology (2009) estão listadas abaixo:

1. Criar a geometria e a malha do modelo;
2. Identificar os pares de contato;
3. Separar as superfícies de contato (elemento CONTA) e alvo (elemento TARGE);
4. Definir a geometria alvo;
5. Definir a geometria de contato;
6. Definir as opções (KEYOPTS) dos elementos e constantes reais (Real Constants);
7. Definir/controlar o movimento da superfície alvo (apenas para contato rígido para flexível);

8. Aplicar as condições de contorno necessárias;
9. Definir opções de solução e etapas de carregamento;
10. Resolver o problema de contato;
11. Avaliar os resultados.

Para definir qual geometria será designada com o elemento alvo ou de contato, os elementos de contato são impedidos de penetrar na superfície alvo, já os elementos alvo podem penetrar através da superfície de contato. Assim, para um contato rígido-flexível, a superfície alvo é sempre a superfície rígida e a superfície de contato é sempre a superfície deformável. Para contato do tipo flexível-flexível, a escolha de qual superfície é designada como contato ou alvo pode causar uma quantidade diferente de penetração e, assim, afetar a precisão da solução (Ansys, 2009).

### **2.3.3. Elemento alvo TARGE170**

Os elementos de contato sobrepõem elementos sólidos, superfícies ou linhas descrevendo o contorno de um corpo deformável e que está potencialmente em contato com elementos alvo (Ansys Element Reference, 2013).

Os elementos alvo pode ser definidos como superfícies rígidas ou flexíveis, dependendo da sua configuração. Os elementos flexíveis permitem a aplicação de deslocamentos translacionais ou rotacionais, Além de forças, momentos e temperaturas.

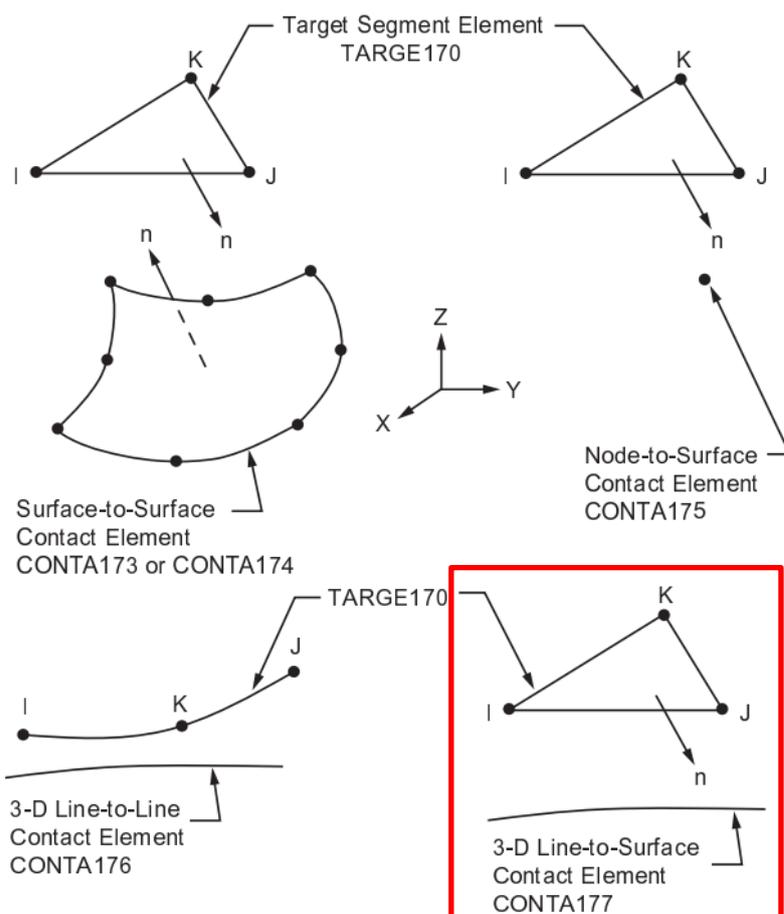
A Figura 5 ilustra os diferentes pares de contatos disponíveis para o elemento TARGE170, bem como a direção da normal da superfície alvo. O tipo de contato utilizado nesse trabalho é o entre linha e superfície, conforme destacado na figura, observa-se que a normal da superfície está orientada em direção à linha de contato.

O sistema de riser submerso, que pode entrar em contato com o leito do mar, foi modelado como o contato entre uma linha e uma superfície. O fundo do mar foi representado por uma superfície rígida, resultando em um par de contato rígido-flexível.

Para definir a superfície alvo rígida no Ansys APDL, utiliza-se o comando TSHAP, que permite especificar a forma da superfície alvo por diferentes tipos de segmentos. Os segmentos disponíveis incluem o triangular (3 ou 6 nós), quadrilateral (4 ou 8 nós), linha reta (2 nós), parábola (3 nós), cilindro (2 nós), cone (2 nós), esfera

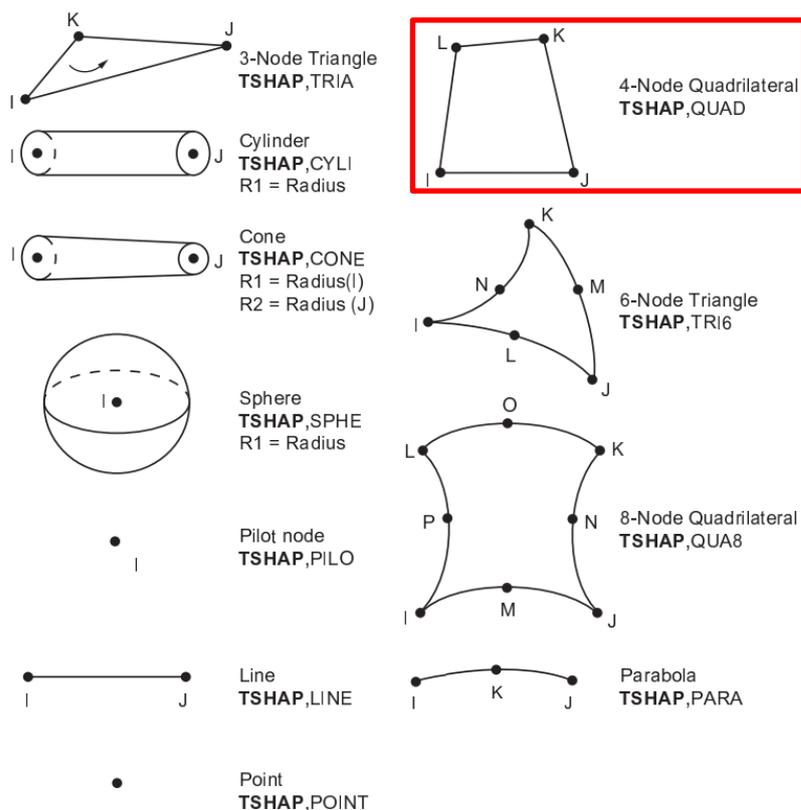
(1 nó), ponto piloto (1 nó), e ponto (1 nó). A Figura 6 ilustra os diferentes tipos de segmentos disponíveis. Neste trabalho, o leito do mar foi modelado como uma superfície quadrilateral com 4 nós, pois o foco não é avaliar detalhadamente o contato do riser com o fundo mar nem o leito marinho com uma geometria irregular.

Figura 5 – Geometria do elemento TARGE170



Fonte: Adaptado de Element Reference, ANSYS (2013)

Figure 6 – Tipos de segmento para definir a superfície alvo (target) rígida



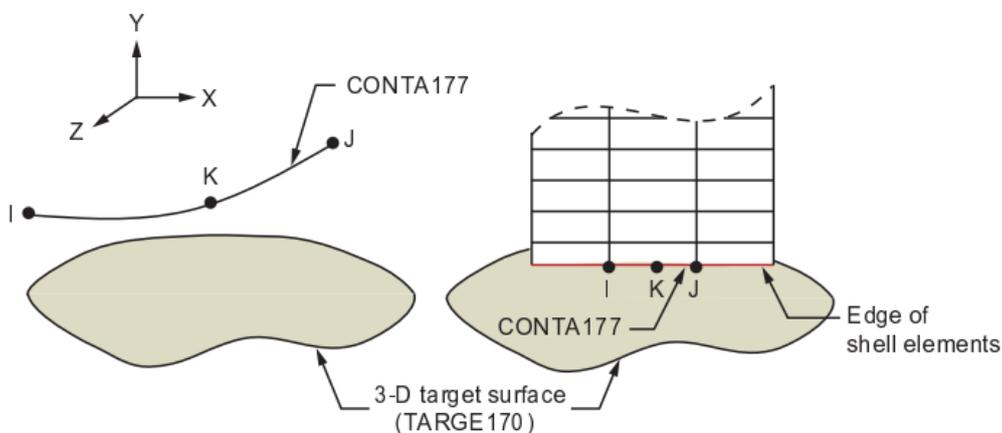
Fonte: Adaptado de Element Reference, ANSYS (2013)

### 2.3.4. Elemento de contato CONTA177

O par de contato CONTA177 e TARGE170 é utilizado para representar o contato com ou sem atrito entre segmentos tridimensionais e segmentos de linha deformáveis. A Figura 7 ilustra este par de contato e os nós do elemento de contato, mostrando que o eixo x está orientado na direção da linha I-J do elemento.

De acordo com a Ansys Element Reference (2013), o CONTA177 é tratado como um elemento não linear e requer uma solução iterativa de Newton, independentemente de o problema envolver pequenas ou grandes deformações. Este elemento é adequado para análises estáticas ou dinâmicas transitórias.

Figura 7 – Geometria do elemento CONTA177



Fonte: Element Reference, ANSYS (2013)

O elemento CONTA177 possui diversos parâmetros importantes para definir um par de contato. Um dos principais conjuntos de parâmetros é o das constantes reais (Real Constants), que compartilha informações entre os elementos alvo e de contato. Entre as principais opções estão:

- O fator de rigidez para penalidade normal, que ajusta a rigidez na direção normal ao contato;
- O fator de tolerância de penetração, que define a tolerância permitida para penetração;
- A oclusão do contato inicial, que configura o tratamento do contato inicial;
- A região pinball, que estabelece a área ao redor da superfície de contato onde a interação é permitida;
- Os limites superior e inferior permitidos de penetração inicial, que definem a penetração permitida inicialmente.

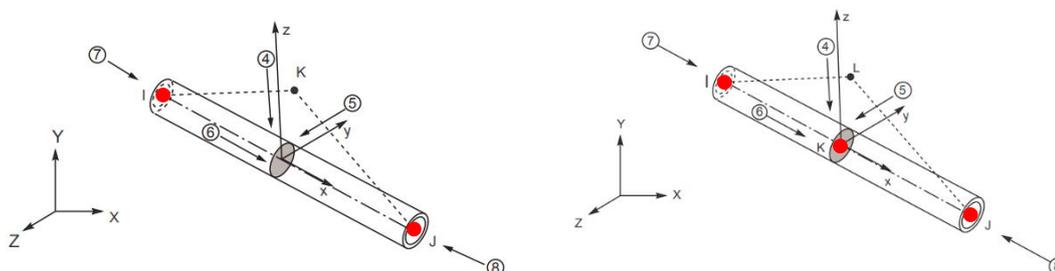
Mais opções e detalhes estão disponíveis na ANSYS Element Reference (2013).

### 2.3.5. Elemento do riser PIPE289

Na Figura 8, são mostrados os elementos PIPE288 à esquerda e PIPE289 à direita. A principal diferença entre eles é o número de nós, indicados como I, J e K na figura. O PIPE288 possui dois nós, localizados em cada extremidade do elemento,

enquanto o PIPE289 tem três nós: um em cada extremidade e um no meio do comprimento do elemento.

Figura 8 – Geometria dos elementos PIPE288 e PIPE289



Fonte: Adaptado de Element Reference, ANSYS (2013)

Os elementos da família PIPE são recomendados para a análise de corpos esbeltos de seção circular sólida ou com espessura. De acordo com a Ansys Element Reference (2013), sua teoria é baseada na teoria de vigas de Timoshenko, incorporando os efeitos de deformação por cisalhamento em sua formulação.

O elemento PIPE289, em particular, possui 6 graus de liberdade (translação e rotação nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ ), permitindo a análise de estabilidade flexural, lateral e torcional. Além disso, oferece suporte para a adição de fluido interno, revestimento externo, massa adicional, massa hidrodinâmica adicional e forças específicas, como flutuação e carregamentos oceânicos. Dessa forma, o elemento PIPE289 com os seus três nós, oferece uma maior precisão na representação dos esforços estruturais.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvido deste trabalho, sendo descritas as técnicas e ferramentas utilizadas em cada etapa realizada.

#### 3.1. HIPÓTESES E CONSIDERAÇÕES

A seguir são enumeradas as hipóteses utilizadas para definir o problema, além das considerações adicionais necessárias para o funcionamento do código desenvolvido para a análise numérica, as quais são:

1. Análise não linear e com grandes deformações;
2. Carregamentos aplicados apenas no plano xz;
3. Análise estática, tanto a unidade flutuante quanto os risers não possuem velocidades ou acelerações próprias;
4. Unidade flutuante definida como um ponto, não possuindo geometria e não sendo afetada pela ação de vento, ondas ou correntes;
5. Efeitos térmicos não considerados;
6. O riser é um elemento contínuo, não sendo modeladas eventuais juntas ou conexões;
7. Flutuadores com comprimento contínuo, não existindo espaçamento entre flutuadores subsequentes;
8. A geometria da boia e dos flutuadores é desconsiderada na modelagem, sendo considerados apenas os efeitos causados por esses elementos;
9. O leito marinho é definido com uma superfície retangular lisa e pertencente ao plano xy.

#### 3.2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

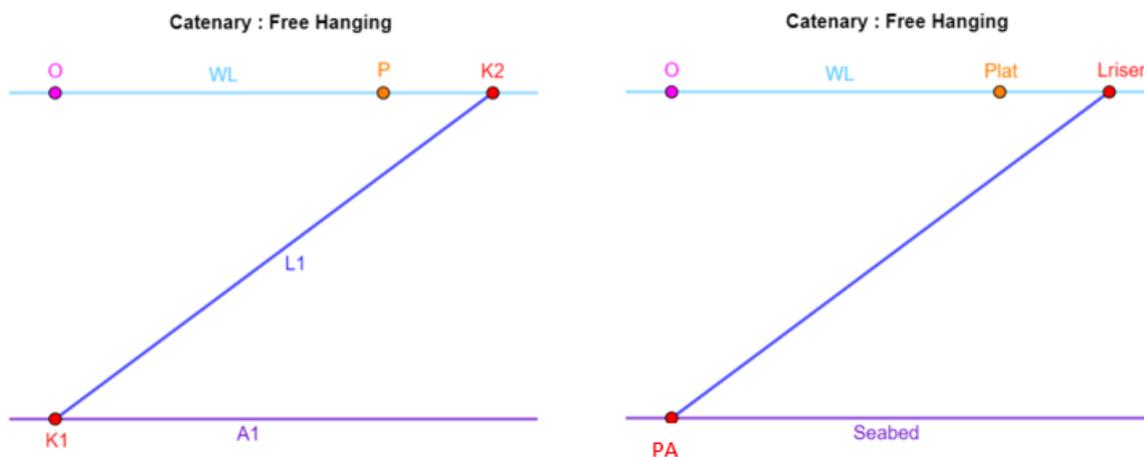
Nesta seção são mostrados os cálculos e considerações utilizadas na modelagem do riser nas três configurações estudadas: catenária livre (SCR), Lazy S (Steep-S) e Lazy Wave (Steep-Wave).

Para a modelagem são utilizadas: as coordenadas de cada ponto importante para a geometria, as equações que estabelecem as novas coordenadas e o peso molhado por metro do riser.

O método de modelagem desenvolvido consiste em, a partir do ponto que representa a localização do poço, calcular as coordenadas do ponto que representa a extremidade superior do riser, de tal sorte que a distância entre os pontos corresponda ao comprimento do riser e que a extremidade superior esteja contida no plano de linha d'água. A seguir são posicionados os pontos que correspondem à eventual presença de boias e flutuadores.

Na Figura 9 é mostrada a esquematização proposta para a simulação de um riser lançado na configuração de catenária: à esquerda são mostradas as entidades usadas no código numérico e à direita, a nomenclatura das coordenadas e parâmetros tradicionalmente utilizados nesse tipo de problema. Os termos foram mantidos em inglês, visto que tanto a operação quanto a documentação da ferramenta Ansys estão em inglês, evitando assim, erros de inconsistência na linguagem da ferramenta.

Figura 9 – Riser em configuração Catenária: código Ansys APDL



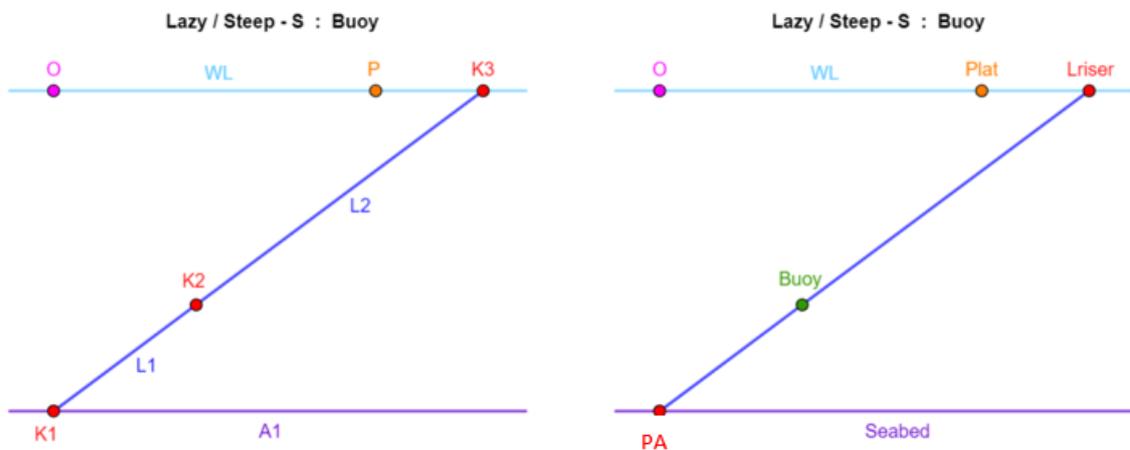
Fonte: Autor (2024)

Os termos apresentados nas Figuras 9, 10 e 11 correspondem às entidades utilizadas na modelagem numérica, sendo eles:

- Seabed: o leito marinho.
- Plat: a posição da plataforma.
- Lriser: a posição do topo do riser após a inclinação.

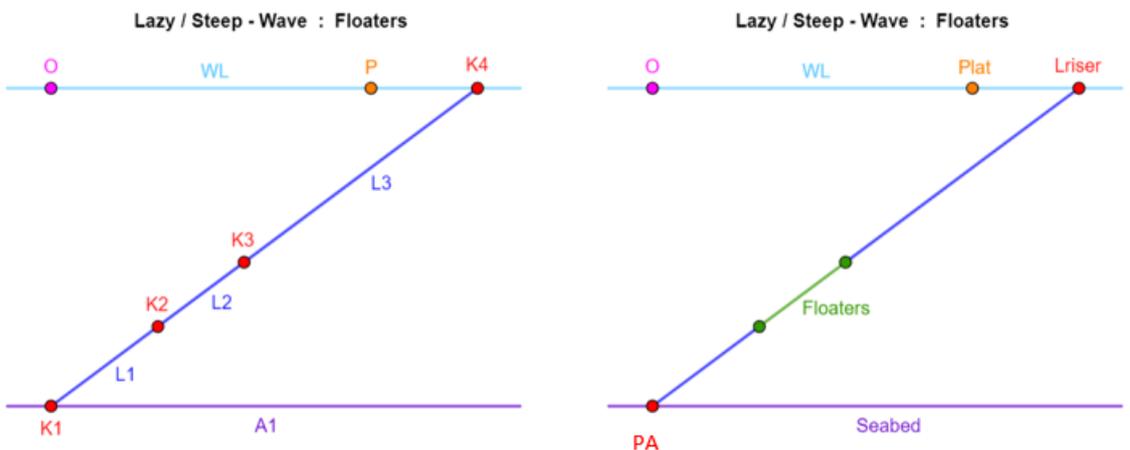
- PA: a posição do poço.
- Buoy: a posição da boia (quando existir).
- Floater: o comprimento dos flutuadores (quando existirem).
- Ki: uma entidade de ponto (keypoint)  $i$  definida para o código numérico.
- Li: a linha  $i$  definida para o código numérico.
- Ai: a área  $i$  definida para o código numérico.

Figura 10 – Riser em configuração Lazy S/Steep-S: código Ansys APDL



Fonte: Autor (2024)

Figura 11 – Riser em configuração Lazy Wave/Steep-Wave: código Ansys APDL



Fonte: Autor (2024)

É importante mencionar que a abordagem proposta visa aproximar a geometria inicialmente modelada daquela que será calculada durante a simulação numérica, reduzindo o custo computacional do processo de convergência numérica.

Definidas as coordenadas dos principais pontos da configuração a ser analisada, a próxima etapa consiste na modelagem dos elementos geométricos necessários para a determinação das posições dos pontos no sistema inclinado. Na Figura 12 são mostrados os pontos e linhas estabelecidos para a configuração contendo uma boia, enquanto na Figura 13 são mostrados os elementos necessários para a modelagem de uma configuração contendo flutuadores.

Figura 12 – Pontos e retas da configuração Lazy S/Steep-S

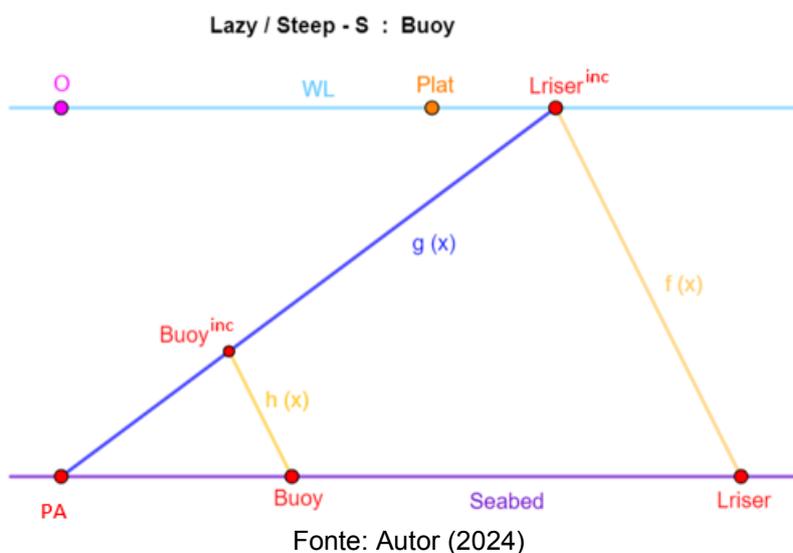
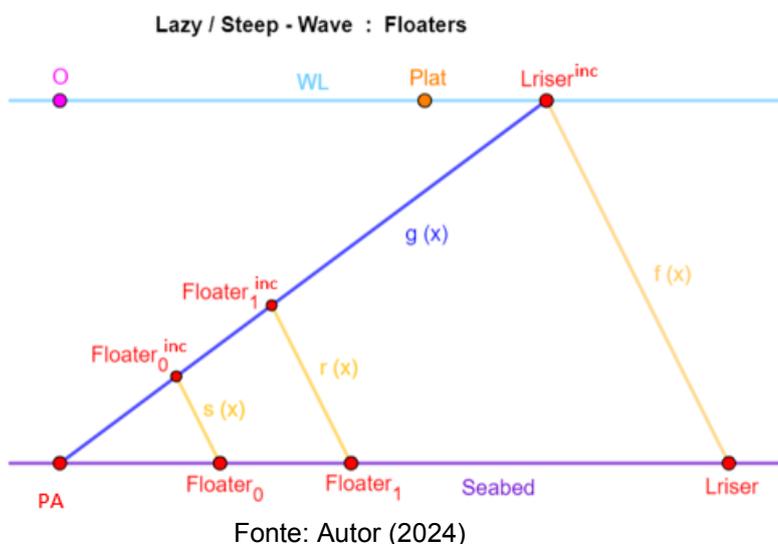


Figura 13 – Pontos e retas da configuração Lazy Wave/Steep-Wave



A seguir são discutidas a equação que representa o riser, bem como as equações que descrevem cada uma das linhas imaginárias definidas pelo ponto na configuração inicial e o seu equivalente na configuração inclinada.

A Equação 12 representa o riser e descreve a linha que conecta o poço com a extremidade superior do riser, localizada no plano de linha d'água.

$$g(x) = a \cdot x + b_g \quad (12)$$

Já a Equação 13 descreve a linha imaginária que liga a extremidade superior do riser, localizada no plano de linha d'água, com o mesmo ponto considerando o riser repousando horizontalmente no leito marinho.

$$f(x) = m \cdot x + b_f \quad (13)$$

Por fim, as equações a seguir descrevem as linhas imaginárias que conectam os pontos: da boia (Equação 14), do início do flutuador (Equação 15) e do fim do flutuador (Equação 16) com seus respectivos equivalentes posicionados na situação na qual o riser é considerado repousando horizontalmente no leito marinho.

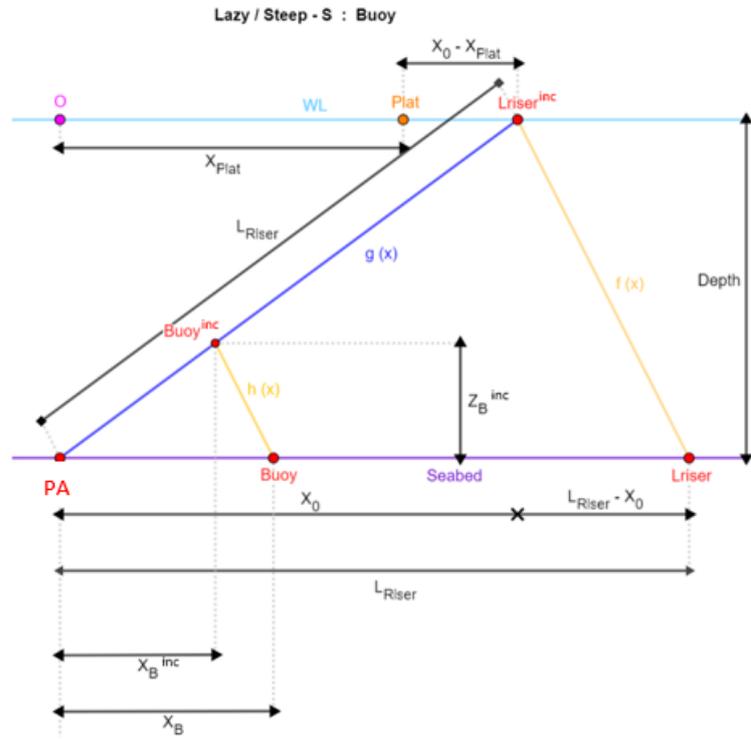
$$h(x) = m \cdot x + b_h \quad (14)$$

$$r(x) = m \cdot x + b_r \quad (15)$$

$$s(x) = m \cdot x + b_s \quad (16)$$

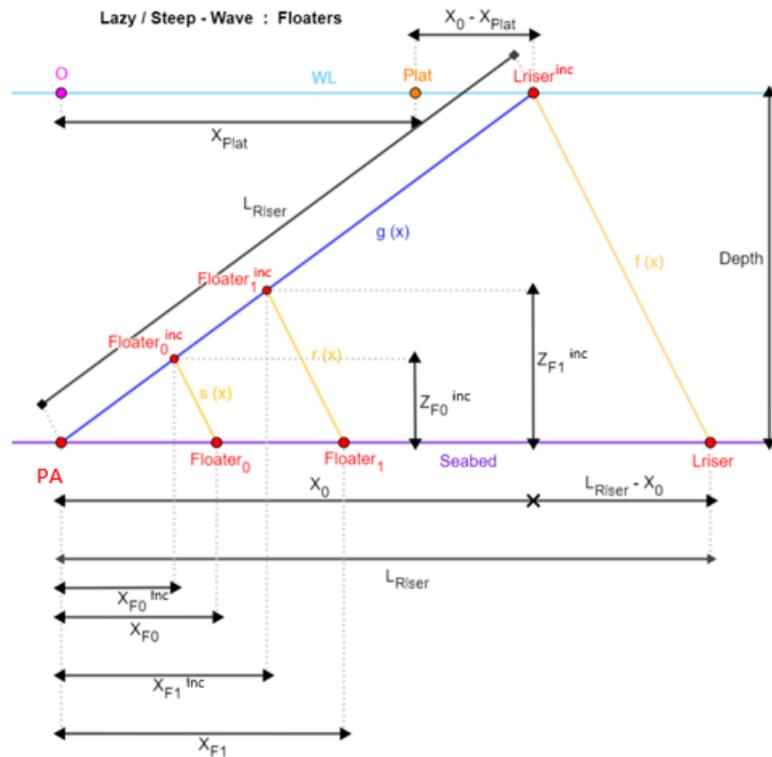
É importante destacar que as retas imaginárias possuem a mesma inclinação, ou seja, são paralelas, e, portanto, possuem o mesmo coeficiente angular  $m$ , o qual pode ser calculado utilizando-se os parâmetros mostrados nas Figuras 14 e 15 e as Equações 17, 18 e 19.

Figura 14 – Variáveis para inclinação do modelo Lazy S/Steep-S



Fonte: Autor (2024)

Figura 15 – Variáveis para inclinação do modelo Lazy Wave/Steep-Wave



Fonte: Autor (2024)

A variação horizontal do comprimento do riser para sua posição final na superfície da água é definida pela Equação 17.

$$X_0 = \sqrt{L_{Riser}^2 - Depth^2} \quad (17)$$

Já os coeficientes angulares podem ser calculados usando as equações:

$$a = \frac{Z_{L_{Riser}^{inc}} - Z_{PA}}{X_{L_{Riser}^{inc}} - X_{PA}} = \frac{Depth}{X_0} \quad (18)$$

$$m = \frac{Z_{L_{Riser}^{inc}} - Z_{L_{Riser}}}{X_{L_{Riser}^{inc}} - X_{L_{Riser}}} = \frac{Depth}{X_0 - L_{Riser}} \quad (19)$$

A próxima etapa consiste no cálculo dos coeficientes lineares das Equações 13, 14, 15 e 16, utilizando os pontos iniciais de cada reta, tal como mostrado nas equações abaixo.

$$b_g = Z_{L_{Riser}^{inc}} - a \cdot X_0 \quad (20)$$

$$b_f = Z_{L_{Riser}} - m \cdot X_0 \quad (21)$$

$$b_h = Z_B - m \cdot X_B \quad (22)$$

$$b_r = Z_{F_1} - m \cdot X_{F_1} \quad (23)$$

$$b_s = Z_{F_0} - m \cdot X_{F_0} \quad (24)$$

Uma vez definidas as equações das retas que descrevem as linhas imaginárias mostradas nas Figuras 11, 12 e 13, é possível calcular a posição  $x$  na reta inclinada através da interseção das retas imaginárias e da reta que descreve o riser. Por fim a coordenada  $z$  de cada um dos pontos pode ser obtida substituindo o respectivo valor de  $x$  na equação que descreve a respectiva linha imaginária.

Assim, as variações horizontais e verticais da posição da boia são calculadas pelas Equações 25 e 26, respectivamente.

$$g(x) = h(x) \rightarrow X_B^{inc} = \frac{b_h - b_g}{a - m} \quad (25)$$

$$g(X_B^{inc}) \text{ ou } h(X_B^{inc}) \rightarrow Z_B^{inc} = m \cdot X_B^{inc} + b_h \quad (26)$$

Já as variações horizontais e verticais da posição inicial dos flutuadores são definidas pelas Equações 27 e 28, respectivamente.

$$g(x) = s(x) \rightarrow X_{F_0}^{inc} = \frac{b_s - b_g}{a - m} \quad (27)$$

$$g(X_{F_0}^{inc}) \text{ ou } s(X_{F_0}^{inc}) \rightarrow Z_{F_0}^{inc} = m \cdot X_{F_0}^{inc} + b_s \quad (28)$$

Por fim, as Equações 29 e 30 definem, respectivamente, as variações horizontais e verticais da posição final dos flutuadores.

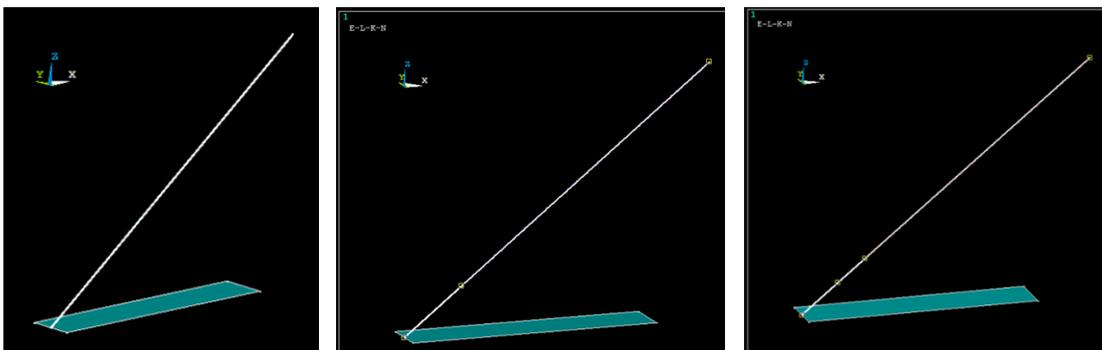
$$g(x) = r(x) \rightarrow X_{F_1}^{inc} = \frac{b_r - b_g}{a - m} \quad (29)$$

$$g(X_{F_1}^{inc}) \text{ ou } r(X_{F_1}^{inc}) \rightarrow Z_{F_1}^{inc} = m \cdot X_{F_1}^{inc} + b_r \quad (30)$$

Uma vez que todas as coordenadas inclinadas foram calculadas, a disposição dos principais pontos está definida, o que permite realizar a modelagem do riser na configuração a ser analisada.

Na Figura 16 são mostradas a modelagem MEF das três configurações discutidas neste capítulo. Na imagem da esquerda é mostrada a configuração de catenária livre, enquanto na imagem central é mostrada a configuração Lazy S, ou seja, existe uma boia posicionada ao longo do comprimento do riser. Por fim, na imagem a direita é mostrada a configuração Lazy Wave, ou seja, existe um conjunto de flutuadores posicionados ao longo do comprimento do riser.

Figura 16 – Modelagem dos modelos de catenária, com boia e com flutuadores



Fonte: Autor (2024)

A etapa seguinte consiste na aplicação das condições de contorno definidas para a modelagem, as quais são as mesmas independentemente da existência de boias ou flutuadores ao longo do riser. Para representar o comportamento real do sistema, um total de 12 condições de contorno foram aplicadas ao modelo:

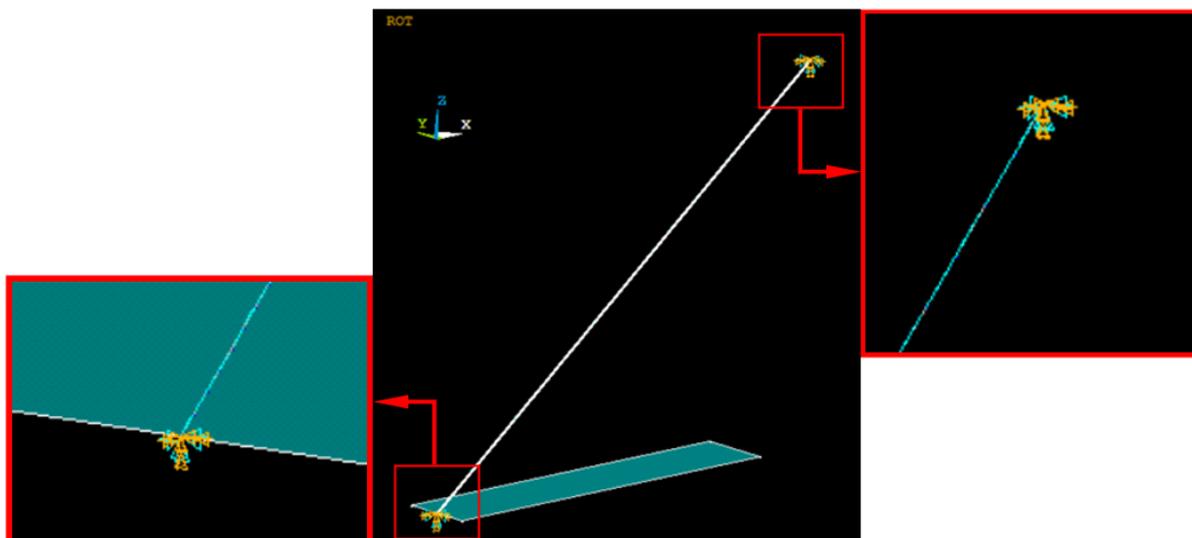
- O ponto que representa o poço deve ser engastado, ou seja, deve ter as translações e rotações restritas nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;
- O ponto que representa a extremidade superior do riser deve ter as translações restritas nos eixos  $y$  e  $z$ ;
- O ponto que representa a extremidade superior do riser deve ter as rotações restritas nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;
- Deve ser imposta uma translação no eixo  $x$  para o ponto que representa a extremidade superior do riser de modo que esse ponto esteja localizado junto a posição da unidade flutuante.

É importante destacar que, conforme já mencionado, as condições de contorno não variam com a adição de boias ou flutuadores e, por essa razão, na Figura 17 são mostradas as 12 condições de contorno aplicadas somente para a configuração catenária livre.

Por fim, devem ser aplicados os carregamentos atuantes para cada configuração de riser analisada, os quais podem ser separados em esforços globais e esforços específicos.

Os esforços globais referem-se às forças peso e de empuxo, enquanto as forças específicas variam de acordo com a configuração do riser, sendo que a adição de uma boia provoca uma força na posição da boia, enquanto os flutuadores resultam em uma força distribuída ao longo do comprimento dos flutuadores.

Figura 17 – Exemplo de condições de contorno no modelo de catenária

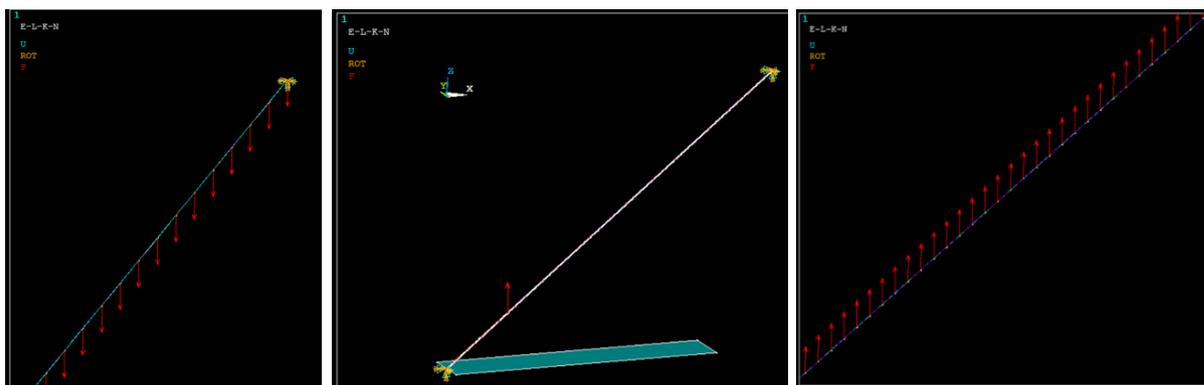


Fonte: Autor (2024)

Na Figura 18 são apresentadas três imagens. Na imagem à esquerda é mostrada a aplicação da força global, que inclui a resultante calculada considerando o peso do riser vazio, o peso do fluido interno e a flutuação da geometria da seção. Já na imagem do meio é mostrada a aplicação da força pontual, decorrente da existência de uma boia. Por fim, na imagem à direita é mostrada a aplicação da carga distribuída, decorrente da existência de flutuadores.

Em relação a força peso, existem duas abordagens possíveis. Na primeira, o usuário realiza o cálculo do peso do riser vazio e de seu respectivo fluido interno, aplicando essa força ao longo de todo o comprimento do riser. Já na segunda, é possível definir um vetor correspondente a aceleração gravitacional, fazendo com que o próprio programa calcule e aplique a força peso na estrutura. Nesse caso é importante destacar que o uso de elementos do tipo pipe permite que o programa compute tanto o peso estrutural do elemento quanto de seu fluido interno.

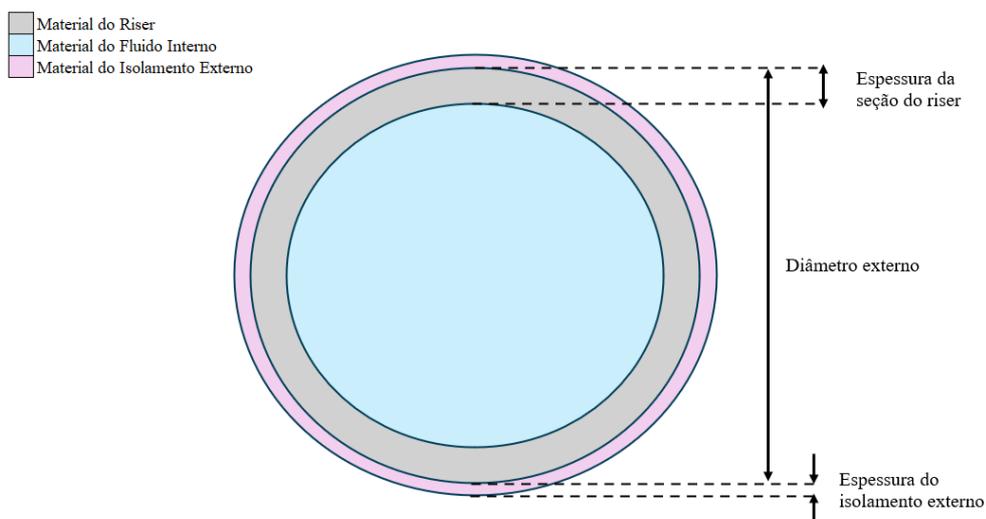
Figura 18 – Carregamentos globais e específicos



Fonte: Autor (2024)

Visando auxiliar no cálculo das forças globais atuantes no modelo, na Figura 19 são mostrados os principais parâmetros geométricos da seção transversal de um riser rígido, bem como os materiais utilizados na sua fabricação.

Figura 19 – Seção transversal do riser e principais parâmetros



Fonte: Autor (2024)

As equações a seguir permitem o cálculo das áreas da seção do riser.

$$A_{EXT} = \pi D_{EXT}^2 / 4 \quad (31)$$

$$A_{INT} = \pi D_{INT}^2 / 4 \quad (32)$$

$$A_{SEC} = \pi(D_{EXT}^2 - D_{INT}^2) / 4 = A_{EXT} - A_{INT} \quad (33)$$

$D_{INT}$  : diâmetro interno

$D_{EXT}$  : diâmetro externo

$A_{INT}$  : área interna

$A_{EXT}$  : área externa

$A_{SEC}$  : área da seção transversal estrutural

Com as áreas e propriedades dos materiais, é possível calcular as parcelas da força global, sendo elas: a força peso do material do riser, a força peso do fluido interno e a flutuação gerada pelo riser. Quando um isolamento externo é adicionado, há uma parcela de força peso causada por esse isolamento.

$$W_R = \rho_R \cdot g \cdot A_{SEC} \quad (34)$$

$$W_O = \rho_O \cdot g \cdot A_{INT} \quad (35)$$

$$B_R = \rho_{SW} \cdot g \cdot A_{EXT} \quad (36)$$

$\rho_R$  : densidade do material do riser

$\rho_O$  : densidade do fluido interno

$\rho_{SW}$  : densidade da água do mar

$W_R$  : força peso do riser por unidade de comprimento

$W_O$  : força peso do fluido interno por unidade de comprimento

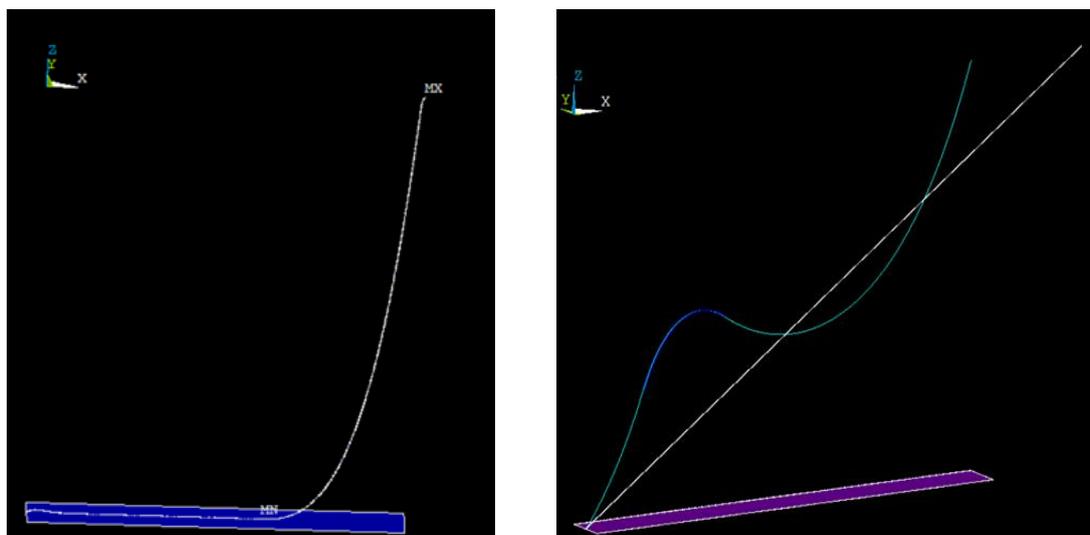
$B_R$  : força de flutuação do riser por unidade de comprimento

Uma vez definidos todos os elementos que constituem o modelo de simulação, o próximo passo consiste na obtenção da solução, a qual é realizada diretamente pela ferramenta utilizada.

Considerando que essa é uma análise não linear, a convergência pode não ser alcançada dependendo do número de divisões dos elementos e do número de steps definidos. Assim, é fundamental realizar um processo de ajuste desses parâmetros para garantir a estabilidade e a precisão da simulação. O processo de ajuste de parâmetros visando a convergência de simulações não lineares é tópico complexo que foge ao escopo deste trabalho. No entanto, maiores detalhes podem ser vistos, por exemplo, em Ansys Mechanical APDL Performance Guide (2013).

Por fim, na Figura 20 são mostrados os resultados referentes a curvatura simulada de um riser na configuração catenária livre (a esquerda) e Lazy Wave (a direita). No modelo catenária livre, observa-se a configuração típica de um riser rígido que opera sem a inclusão de elementos adicionais. Já no modelo Lazy Wave, a presença de flutuadores cria uma forma ondulada característica, demonstrando a eficácia da modelagem em capturar diferentes comportamentos do sistema.

Figura 20 – Modelos deformados de riser em Catenária Livre e Lazy Wave



Fonte: Autor (2024)

### 3.3. DADOS ENTRADA

Os dados de entrada são elementos essenciais em problemas numéricos, pois alimentam o modelo matemático e/ou algoritmo utilizado para a obtenção da solução. Eles representam variáveis independentes ou condições de contorno iniciais do problema. Para um riser em catenária livre, os dados de entrada são:

- Comprimento do riser
- Diâmetro externo do riser
- Espessura da seção
- Posição da plataforma
- Profundidade do mar
- Posição do poço
- Número de elementos usados na discretização da geometria

Se uma boia for adicionada ao sistema, é necessário incluir:

- Posição da boia
- Diâmetro da boia ou a força resultante atuando na boia

Caso existam flutuadores, os dados de entrada adicionais são:

- Posição inicial dos flutuadores
- Comprimento dos flutuadores ou a posição final dos flutuadores
- Diâmetro dos flutuadores ou a força resultante por metro dos flutuadores

Os principais parâmetros dos materiais utilizados são:

- Módulo de elasticidade do material do riser
- Coeficiente de Poisson do material do riser
- Densidade do material do riser
- Densidade da água do mar
- Densidade do fluido interno
- Coeficiente de atrito do contato do riser com o leito marinho, se houver
- Densidade do material usado no revestimento externo do riser
- Espessura do revestimento externo do riser

Segundo AMAECHI (2022) e RAHEEM (2012), para tornar a análise mais realista, é possível adicionar carregamentos adicionais ao modelo, sendo eles: a força do vento, a força de corrente e a força de onda. Nesse caso é necessário realizar uma análise transiente (dinâmica) a qual requer a definição dos seguintes parâmetros:

- Coeficiente de arrasto normal ao elemento do riser
- Coeficiente de arrasto tangencial ao elemento do riser
- Coeficiente de inércia do riser
- Sentido e direção da ação da gravidade
- Perfil de velocidade da corrente em relação à profundidade
- Tipo de modelo de onda (regular, irregular, entre outros)
- Ângulo da direção da onda
- Altura, período e fase da onda, se o modelo for regular
- Altura significativa e período de pico do espectro de onda, se o modelo for irregular

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados utilizando a metodologia discutida no Capítulo 3, a qual descreve o desenvolvimento e a aplicação de um código numérico para a análise de risers rígidos submersos utilizando o método dos elementos finitos implementado na linguagem Ansys APDL.

A consistência dos resultados foi verificada utilizando-se os mesmos dados de entrada observados em outros trabalhos com o mesmo tema, permitindo uma comparação direta e assertiva entre os resultados obtidos neste estudo e aqueles relatados nos trabalhos utilizados como referência.

A seguir são apresentados dois estudos de caso, sendo que o primeiro caso foi baseado no trabalho de BUBERG (2014) que usou a ferramenta RIFLEX para avaliar um riser na configuração catenária livre. Já o segundo caso foi baseado na pesquisa de COUTINHO (2018) que utilizou a ferramenta ORCAFLEX para analisar risers lançados na configuração Lazy Wave.

### 4.1. ESTUDO DE CASO 1 – RISER EM CATENÁRIA LIVRE

A fim de verificar a consistência da metodologia desenvolvida, inicialmente foi realizado o estudo de caso descrito por BUBERG (2014), cujos parâmetros utilizados são sistematizados na Tabela 1, enquanto os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2, juntamente com os valores descritos por BUBERG (2014).

Nota-se que os resultados da análise realizada divergem daqueles relatados na referência, conforme demonstram os erros relativos mostrados na Tabela 2. Essa diferença provavelmente se deve à discretização do modelo ou ao refino de malha utilizados. Além disso, eventuais diferenças contextuais ou metodológicas também podem ter contribuído para os erros observados.

Destaca-se que a ferramenta RIFLEX, utilizada por BUBERG (2014), é desenvolvida especificamente para análises offshore, facilitando a implementação de carregamentos oceânicos, enquanto o Ansys APDL, utilizado neste trabalho, embora reconhecidamente robusto e confiável, destina-se a uma aplicação mais geral da análise estrutural.

Tabela 1 – Parâmetros do estudo de caso 1 (catenária livre)

ID	Parâmetro	Valor	Unidade
1	Configuração	Catenária livre	
2	Densidade da água do mar	1025	kg/m <sup>3</sup>
3	Profundidade do leito marinho	1000	m
4	Distância horizontal entre o poço e a unidade flutuante	1000	m
5	Densidade do fluido interno ao riser	750	kg/m <sup>3</sup>
6	Material do riser	Aço carbono X65	
7	Módulo de elasticidade do aço carbono X65	207000	MPa
8	Densidade do aço carbono X65	7850	kg/m <sup>3</sup>
9	Espessura do revestimento externo	10	mm
10	Densidade do revestimento externo	900	kg/m <sup>3</sup>
11	Comprimento do riser	2400	m
12	Diâmetro do riser	12	Polegada
13	Espessura da parede do riser	1	Polegada

Fonte: Autor (2024)

Tabela 2 – Resultados do estudo de caso 1 (catenária livre)

ID	Carregamento	Valores
1	Tração Máxima Referência [kN]	1930
2	Tração Máxima Obtida [kN]	2552
3	Erro Relativo [%]	32.23%
4	Tração Extremidade Referência [kN]	1930
5	Tração Extremidade Obtida [kN]	1981
6	Erro Relativo [%]	2.64%
7	Tração Mínima Referência [kN]	600
8	Tração Mínima Obtida [kN]	620
9	Erro Relativo [%]	3.33%

Fonte: Autor (2024)

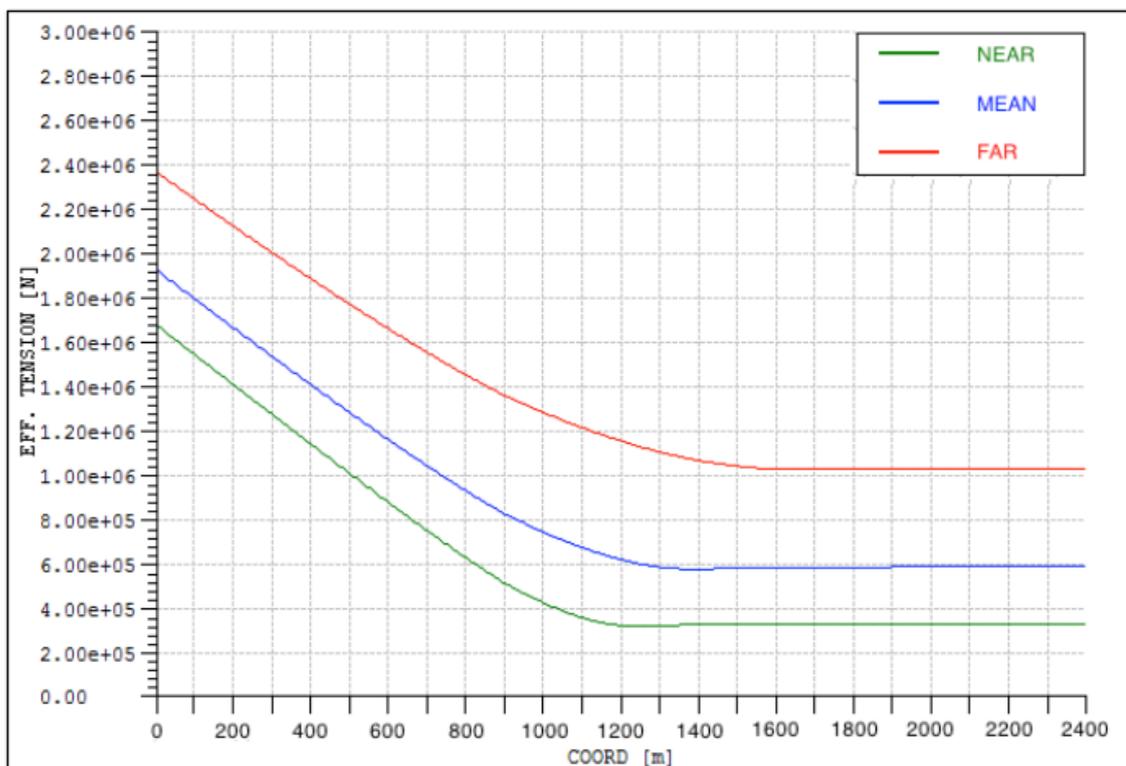
Durante a análise numérica, foi observado um pico de tração na extremidade da estrutura. Uma das possíveis causas desse comportamento pode ser um efeito artificial decorrente da escolha do analista de engastar a extremidade junto ao poço e restringir as rotações na extremidade junto a plataforma. Essa abordagem é utilizada na modelagem para garantir a convergência dos cálculos numéricos, porém, pode não refletir com precisão as condições reais do sistema.

Na prática, as condições de contorno existentes em risers reais podem permitir um certo grau de movimento e/ou rotação nas extremidades, ao contrário das

restrições aplicadas na análise numérica. Assim, embora seja uma abordagem conservadora, o engastamento completo e a restrição total das rotações podem introduzir forças adicionais na simulação, as quais resultam em um pico de tração localizado que não ocorreria nas condições reais de operação. Esse efeito artificial pode levar a uma interpretação errônea dos resultados, superestimando os níveis de tração no topo do riser e ampliando o erro observado nas simulações.

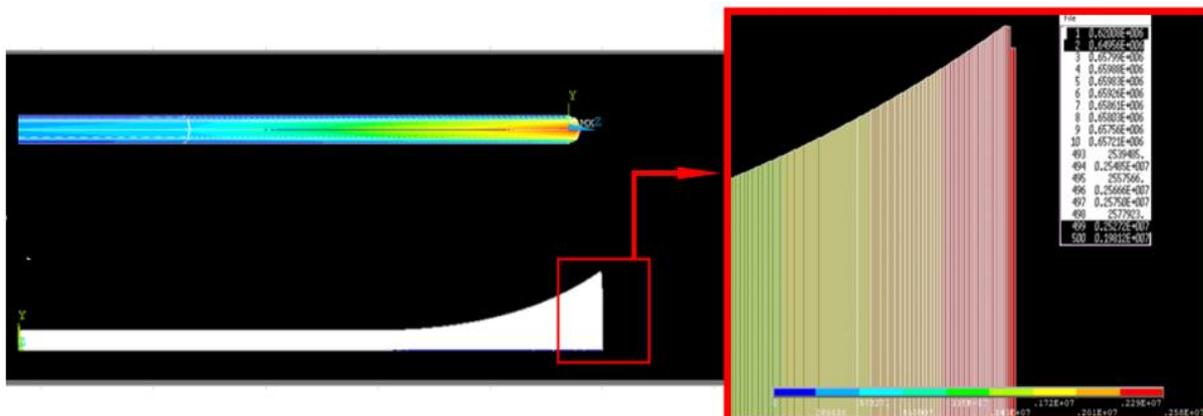
Conforme visto na Tabela 2, a tração máxima obtida possui um erro de 32% quando comparado com o valor relatado por BULBERG (2014). No entanto, ao se observar a curva de tração mostrada na Figura 21 (condição *mean*), percebe-se que a tração máxima está localizada na extremidade junto a unidade flutuante. Já no resultado obtido, há um pico de tração e uma descontinuidade na distribuição logo após essa extremidade (Figura 22). Avaliando o valor da tração na extremidade antes do pico, o erro relativo é de apenas 2.64% em relação ao trabalho de referência. Por fim, no ponto localizado junto ao poço, observa-se que a tração é mínima; e, dado que não existem descontinuidades ou picos de tração, o erro observado é de 3.33%.

Figura 21 – Comportamento da tração efetiva do trabalho de referência



Fonte: BULBERG (2014)

Figura 22 – Descontinuidade e pico na tração observada na simulação



Fonte: Autor (2024)

#### 4.2. ESTUDO DE CASO 2 – RISER EM LAZY WAVE

Para verificar a confiabilidade do código desenvolvido, neste estudo de caso foram utilizados os dados de entrada e demais parâmetros descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados de entrada do trabalho de referência

ID	Carregamento	Riser de Topo	Riser Intermediário	Riser de Fundo
1	Comprimento [m]	380	1730	1100
2	Massa [ton/m]	0.2	0.2	0.2
3	Diâmetro Externo [m]	0.33	0.394	0.395
4	Diâmetro Interno [m]	0.152	0.152	0.152
5	Densidade Fluido Interno [kg/m³]	850	850	850

Fonte: Adaptado de COUTINHO (2018)

Em seu trabalho, COUTINHO (2018) dividiu o riser em três segmentos (topo, intermediário e fundo), cada qual com seu respectivo diâmetro. Assim, dado que o modelo desenvolvido neste trabalho considera um único valor para o diâmetro do riser, para replicar essa análise, adotou-se o diâmetro intermediário de 0.394 m como sendo o valor definido para toda a extensão do riser. Além disso, as dimensões da plataforma foram desconsideradas e foi assumida uma profundidade de 2000 m.

Por fim, COUTINHO (2018) considerou flutuadores com peso de 2000 kg e um diâmetro de 1.8 m, dispostos espaçadamente ao longo de um trecho do riser. Novamente, para se adaptar ao modelo desenvolvido, foi utilizado um valor médio de

flutuação uniformemente distribuído ao longo do mesmo trecho onde os flutuadores foram posicionados no trabalho de referência.

Na Tabela 4 são sintetizados os dados referentes a discretização da malha utilizada por COUTINHO (2018), os quais permitiram definir o comprimento dos trechos: do fundo até o início dos flutuadores, dos flutuadores e do final dos flutuadores até a plataforma.

Tabela 4 – Malha do modelo em configuração Lazy Wave

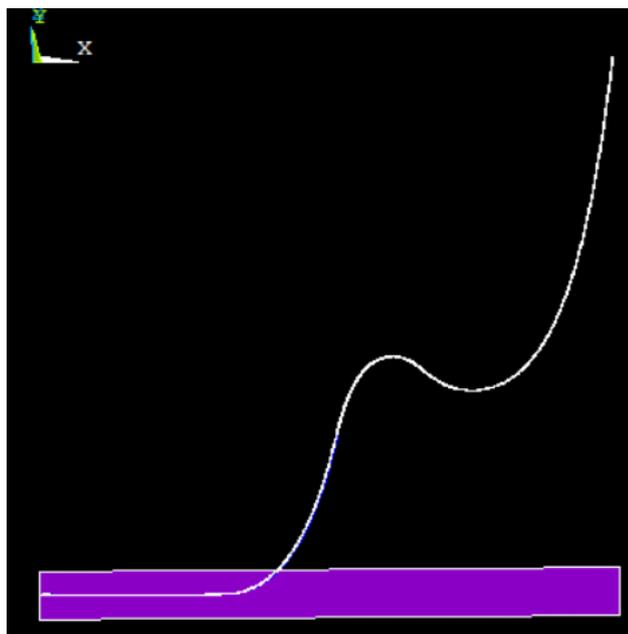
Segmentos	Descrição do Segmento	Comprimento do Segmento (m)	Comprimento do elemento (m)	Nº de elementos
1	Seção de Riser de Topo	2.7	0.1	27
2		2.5	0.3	8
3		5	1	5
4		370	5	74
5	Seção de Riser Intermediario	652	5	130
6		512	5	102
7	Seção de boia	445	5	89
8	Seção de Riser Intermediario	20	5	4
9		101	10	10
10	Seção de Riser de Fundo	500	10	50
11		100	5	20
12		200	2	100
13		100	5	20
14		200	5	40

Fonte: COUTINHO (2018)

O comportamento do riser modelado nesse estudo de caso utilizando a metodologia proposta neste trabalho é mostrado na Figura 24, onde é possível ver a influência dos flutuadores na geometria assumida pelo riser.

Analisando os resultados mostrados na Tabela 5, é possível concluir que, similar ao caso anterior, a tração máxima no riser submerso ocorre no ponto junto a plataforma, onde também é possível observar um pico de tração logo após essa extremidade.

Figura 23 – Modelo de Lazy Wave do estudo de caso 2



Fonte: Autor (2024)

Tabela 5 – Resultados do estudo de caso 2 (Lazy Wave)

ID	Carregamento	Máxima
1	Tração Máxima Referência [kN]	1647
2	Tração Máxima Obtida [kN]	2752
3	Erro Relativo [%]	67.09%
4	Tração Extremidade Referência [kN]	1647
5	Tração Extremidade Obtida [kN]	2036
6	Erro Relativo [%]	23.65%

Fonte: Autor (2024)

O erro relativo observado nos valores máximos de tração foi de 67%, um valor bastante elevado. No entanto, ao considerar o valor da tração na extremidade, o erro reduz para 23,65%. Assim como no caso anterior, essa diferença provavelmente se deve ao pico decorrente da concentração de tração nessa região.

No entanto, diferentemente do caso anterior, não foi possível reproduzir com exatidão a análise realizada no trabalho de referência. Pois, conforme já mencionado, na simulação realizada foi necessário utilizar um valor médio para o diâmetro do riser, sendo que na região de máxima tração, esse valor é maior do que o existente no trabalho original, o que pode justificar parte do erro observado.

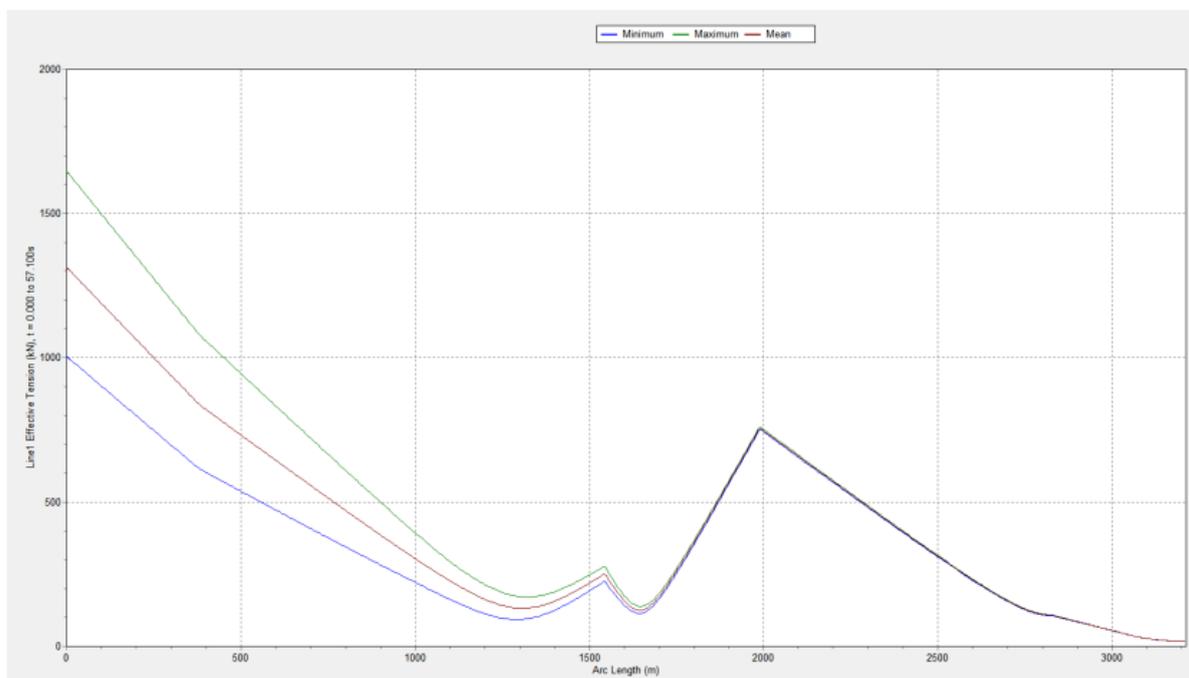
Outro ponto importante é a força de corrente computada no artigo de referência, a qual não é avaliada na análise estática realizada neste trabalho, tendo um impacto significativo no erro observado. Além disso, a inclusão das correntes marinhas implica em uma mudança no tipo de análise, pois, enquanto o trabalho de referência realiza uma análise dinâmica, a metodologia deste trabalho realiza uma análise estática.

Dessa forma, não faz sentido comparar diretamente os valores obtidos, mas sim o comportamento da tração observada ao longo do riser. Na Figura 25 é mostrado o comportamento da tração efetiva observado no trabalho de referência, enquanto na Figura 26 é apresentada a distribuição de tração obtida neste trabalho.

Apesar das diferentes abordagens e hipóteses adotadas, ambas as análises apresentaram uma distribuição de tração bastante semelhante, com os valores máximos na extremidade junto a unidade flutuante, seguidos de dois pontos de sag e hog (relacionados com a presença dos flutuadores), e, por fim, um valor de tração mínimo na extremidade junto ao poço.

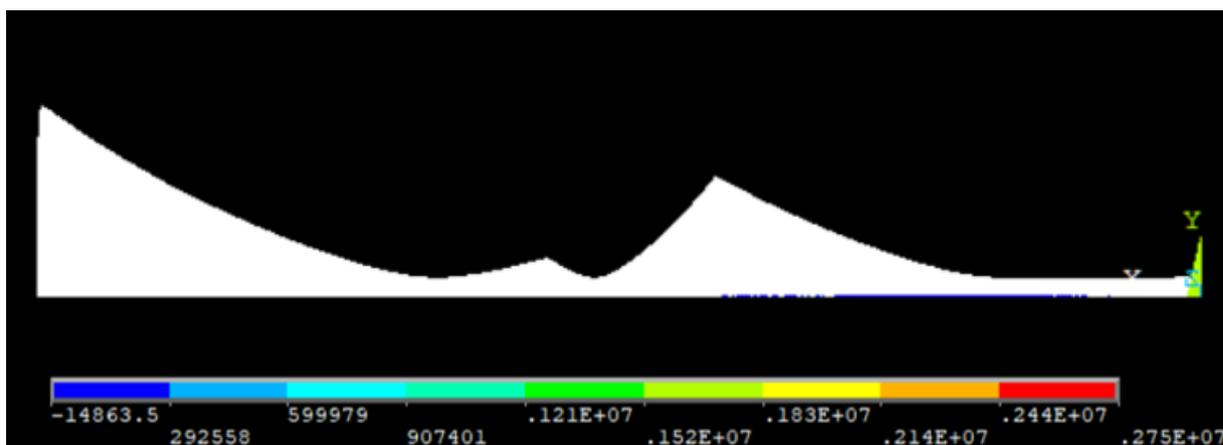
Portanto, embora os valores absolutos de tração diferenciem-se devido à natureza distinta das análises (dinâmica versus estática), o comportamento da tração no riser na análise estática retrata de forma eficaz o comportamento observado na análise dinâmica realizada no trabalho de referência.

Figura 24 – Tração efetiva do riser em Lazy Wave



Fonte: COUTINHO (2018)

Figura 25 – Tração efetiva obtida do riser em configuração Lazy Wave



Fonte: Autor (2024)

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um código numérico baseado no método dos elementos finitos desenvolvido para a análise de risers rígidos lançados tanto em catenária livre quanto nas configurações Lazy S (com adição de uma boia) e Lazy Wave (com adição de flutuadores).

Os estudos de caso realizados visaram verificar a metodologia desenvolvida e buscaram analisar o comportamento da tração efetiva ao longo do riser, identificando pontos críticos (picos de tração) e as eventuais descontinuidades existentes nas extremidades do modelo.

Os resultados dos estudos de caso revelaram uma concentração significativa de tração, manifestada como um pico de tração efetiva, na extremidade superior do riser, onde está localizada a unidade flutuante.

Essa concentração de tração no topo dos risers pode ser atribuída a diversos fatores. Primeiramente, a descontinuidade da geometria e das propriedades mecânicas existente na interface entre o riser e a unidade flutuante causa uma transição abrupta que resulta em uma redistribuição de tensões, concentrando-as na extremidade superior. Além disso, se a malha não for suficientemente refinada, podem ocorrer problemas numéricos durante a simulação em função da variação abrupta das propriedades mecânicas daquela região.

Outro fator relevante são as condições de contorno, as quais introduzem variações significativas nas forças atuantes. A aplicação da condição de engaste no ponto junto ao poço e a restrição das rotações no ponto junto a plataforma podem amplificar as trações atuantes no topo do riser.

Por fim, variações abruptas na carga linear aplicada ao longo do riser, em especial a flutuabilidade fornecida pelas boias e flutuadores, pode criar um gradiente de forças, afetando a distribuição da tração ao longo do riser.

Portanto, a concentração de tração na extremidade superior de um riser rígido submerso é resultado de uma combinação de: descontinuidades geométricas, condições de contorno restritivas e variações abruptas na densidade aparente do material. Essa conclusão destaca a importância de um projeto cuidadoso e de uma análise detalhada para mitigar tais efeitos, garantindo a integridade estrutural e a segurança operacional do sistema de produção.

Em relação a aplicação de boias ou flutuadores, as simulações mostraram que, assim como descrito na literatura, a aplicação de tais elementos suaviza as curvaturas e reduz o nível de tração ao longo de risers rígidos.

Diante do exposto, acredita-se que os objetivos estabelecidos tenham sido alcançados, pois a metodologia apresentada, embora ainda não reproduza com precisão todos os fenômenos existentes, permite realizar, com bastante facilidade, simulações numéricas de risers rígidos lançados nas configurações: Catenária Livre, Lazy S e Lazy Wave.

Para trabalhos futuros, recomenda-se estudar procedimentos de refino da malha visando mitigar os problemas numéricos associados as concentrações de tração e descontinuidades verificados em algumas simulações realizadas.

Adicionalmente, a inclusão de novos parâmetros ao modelo desenvolvido permitiria a realização de análises dinâmicas que considerariam as forças de corrente e de ondas; fornecendo uma compreensão mais precisa do comportamento do riser sob condições reais de operação.

Por fim, outra possibilidade de pesquisa consiste na adição da geometria da unidade flutuante ao modelo, o que possibilitaria avaliar os impactos que as ações ambientais atuantes na plataforma exercem nas trações e nos deslocamentos sofridos por um riser rígido submerso.

Tais melhorias certamente contribuirão para um modelo de análise numérica mais robusto e detalhado, aumentando a precisão dos resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

AMAECHI, C. V.; REDA, A.; BUTLER, H. O.; JA'E, I. A.; AN, C. **Review on fixed and floating offshore structures. Part I: Types of platforms with some applications.** Journal of Marine Science and Engineering, v. 10, n. 8, p. 1074, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse10081074>. Acesso em: 04/05/2024.

ANSYS, Inc. **ANSYS Mechanical APDL Element Reference.** 15.0 ed. Canonsburg, Southpointe: ANSYS Release, 2013.

ANSYS, Inc. **Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications.** 12.0 ed. Canonsburg, Southpointe: ANSYS Release, 2008.

ANSYS, Inc. **ANSYS Mechanical APDL Basic Analysis Guide.** 15.0 ed. Canonsburg, Southpointe: ANSYS Release, 2013.

ANSYS, Inc. **ANSYS Mechanical APDL Theory Reference.** 15.0 ed. Canonsburg, Southpointe: ANSYS Release, 2013.

ANSYS, Inc. **ANSYS Contact Technology Guide.** 9.0 ed. Canonsburg, Southpointe: ANSYS Release, 2004.

ANSYS, Inc. **Contact Technology Guide.** 12.1 ed. Canonsburg, Southpointe: ANSYS Release, 2009.

ANSYS, Inc. **ANSYS Mechanical APDL Fluids Analysis Guide.** 15.0 ed. Canonsburg, Southpointe: ANSYS Release, 2015.

ANSYS, Inc. **ANSYS Mechanical APDL Technology Demonstration Guide.** 16.0 ed. Canonsburg, Southpointe: ANSYS Release, 2015.

ANSYS, Inc. **ANSYS Mechanical APDL Performance Guide.** 15.0 ed. Canonsburg, Southpointe: ANSYS Release, 2013.

BAI, Y. **Pipelines and Risers.** Vol 3. Oxford, Elsevier Ocean Engineering Book Series, 2001.

BAI, Yong; BAI, Qiang. **Subsea Pipelines and Risers**. Elsevier, 2005.

BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea Engineering Handbook**. Gulf Professional Publishing, 2012.

BUBERG, Thomas. **Design and Analysis of Steel Catenary Riser Systems for Deep Waters**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Marítima, Universidade de Ciência e Tecnologia da Noruega. Noruega, 2014.

CARDOSO, Paulo H. S. **Otimização da configuração geométrica de risers rígidos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2019.

CASAPRIMA, Nicholas A. **Otimização da Configuração Geométrica de Risers usando o Método de Otimização Bayesiana**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2021.

CHENG, L.; XU, J.; STANTON, D. **Offshore pipelines and risers**. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, v. 1, 2011.

COUTINHO, Thiago M. N. **Análise global de configurações de risers flexíveis em águas profundas**. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2018.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. Singapore: World Scientific Publishing, 1991.

FALTINSEN, O. M. **Sea Loads on Ships and Offshore Structures**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

KNAPSTAD, B. **Optimization of Steel Lazy Wave Risers**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Offshore, Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade de Stavanger. Noruega, 2017.

LARSEN, K. **Station Keeping and Mooring of Floating Structures**. TMR4225 Marine Operations, 2019.

LARSEN, K. **Marine Operations of installing a floating wind turbine farm (Equinor's Hywind Tampen)**. TMR4225 Marine Operations, 2020.

LARSEN, K. **Marine Operations of Installing a Floating Wind Turbine Farm. TMR4225 Marine Operations**. TMR4225 Marine Operations, 2020.

LIN, T.; BAI, Y. **Subsea Pipelines and Risers**. Elsevier, 2005.

MOAN, T. **Finite Element Modelling and Analysis of Marine Structures**, Trondheim: Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2003

MORISON, J. R.; O'BRIEN, M. P.; JOHNSON, J. W.; SCHAFER, S. A. **The force exerted by surface waves on piles**. Petroleum Transactions, v. 189, p. 149-154, 1950.

RAHEEM, Shehata E. Abdel; AAL, Elsayed M. A. Abdel; SHAFY, Aly G. A. Abdel; SEED, Fayez K. Abdel. **Nonlinear analysis of offshore structures under wave loadings**. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 15., 2012, Lisboa. Anais [...]. Lisboa: 15 WCEE, 2012.

RAMAN-NAIR, W. e BADDOUR, R. **Three-dimensional dynamics of a flexible marine riser undergoing large elastic deformations**. Multibody System Dynamics, v. 10, 393 – 423, 2003.

RAMAN-NAIR, W. and WILLIAMS, C. **Vortex-induced response of a long flexible marine riser in a shear current**. In International Symposium on Technology of Ultra Deep Ocean Engineering, Toquio, Japão. 2005.

Ruan, W., Bai, Y., & Cheng, P. **Static analysis of deepwater lazy-wave umbilical on elastic seabed**. Ocean Engineering, 2014, 91, 73–83.

Ruan, W., Shang, Z., & Wu, J. **Effective static stress range estimation for deepwater steel lazy-wave riser with vessel slow drift motion**. Ships and Offshore Structures, 2019, 1–11.

YOUNG, Ian R. **Regular, irregular waves and the wave spectrum**. Canberra: Australian National University, 2017.

## APÊNDICE A

Código base utilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

```

! *
! =====
! ***** Input Data *****
! =====
! *** Constants ***
*SET,pi , 3.1415
*SET,gravity , 9.81      ! [m/s]
*SET,inch , 0.0254     ! [m]
! *
! -----
! *** Material Parameters ***
*SET,Esteel , 2.06E11   ! Young Modulus           [kg/m3]
*SET,Psteel , 0.3      ! Poisson Ratio
*SET,Rsteel , 7860     ! Density                 [kg/m3]
*SET,fr , 0.001       ! Friction Coefficient : Contact
*SET,Rwater , 1025    ! Salt Water Density      [kg/m3]
*SET,Roil , 881       ! Internal Fluid Density (Oil) [kg/m3]
! *
! -----
! *** Riser and Coordinates ***
*SET,ndiv , 1000      ! Number of divisions
*SET,Depth , 1093     ! Sea Depth               [m]
*SET,Length , 2050    ! Riser: Length          [m]
*SET,Dext , 0.35      ! Riser: Outside Diameter [m]
*SET,th , (Dext-0.3)/2 ! Riser: Thickness       [m]
*SET,X_Plat , 1200    ! Platform Position      [m]
! *
! -----
! *** Conditionals and Inputs ***
! 0 = Catenary
! 1 = Buoy
! 2 = Floaters
*SET,CONFIG , 2
*SET,D_b , 0.00
*SET,X_b , 0.00
*SET,D_f , 0.396
*SET,D_fint , 0.394
*SET,X_f0 , 470
*SET,L_f , 400
*SET,Rfluid , 1.225   ! Buoys/Floaters Fluid Density :

! -----
! 0 = User-Defined
! 1 = Geometric
! 2 = Via acel
*SET,LS_SW , 2
*SET,LS_FB , 0
*SET,LS_FF , 0
*SET,FZ_riser , -100*gravity ! [N/m]
*SET,B_Buoy , 0           ! [N/m]
*SET,B_Float , 165*gravity ! [N/m]
! -----
! 0 = No coating
! 1 = With Coating
*SET,SEC_CO , 0
*SET,Rcoat , 900
*SET,th_coat , 0.1
! -----
! 0 = No/without
! 1 = Yes/with

```

```

*SET,LS_OC , 1
*SET,LS_CURR , 0
*SET,LS_WAVE , 0
! Wave Configuration
! 0 = Regular Wave
! 1 = Jonswap
*SET,WAVENTYPE , 1
*SET,CDyz , 1.0
*SET,CT , 0.0
*SET,CMyz , 1.0
*SET,THETA , 0 ! Angle of the wave direction theta
*SET,Height , 0 ! Wave Height [m]
*SET,Twave , 0 ! Wave Period [s]
*SET,Pwave , 0 ! Wave Phase Shift [degrees]
*SET,HS , 15 ! Significant wave height of the spectrum
*SET,TP , 16 ! Peak period of the spectrum
*SET,NWV , 1 ! Number of wave components - 50def
*SET,CUR_SUP , 0.2 ! Current Speed Water Level [m/s]
*SET,CUR_INF , 0 ! Current Speed Floor Level [m/s]
! *
! -----
! -----
! =====
! -----
! ***** Analytical Data *****
! Riser
*SET,Dint , Dext-2*th
*SET,As , pi*(Dext**2-Dint**2)/4
*SET,Ai , pi*Dint**2/4
*SET,At , pi*Dext**2/4
*SET,Ws_ana , Rsteel*As*gravity
*SET,Wo_ana , Roil*Ai*gravity
*SET,Bw_ana , Rwater*At*gravity
*SET,Fz_Global , Bw_ana-Ws_ana-Wo_ana ! [N/m]
! Buoy
*SET,Ab , pi*D_b**2/4
*SET,Wb_ana , Rfluid*Ab*gravity
*SET,Bb_ana , Rwater*Ab*gravity
*SET,Fz_Buoy , Bb_ana-Wb_ana ! [N/m]
! Floater
*SET,Af , pi*(D_f**2-D_fint**2)/4
*SET,Aft , pi*D_f**2/4
*SET,Wf_ana , Rfluid*Af*gravity
*SET,Bf_ana , Rwater*Aft*gravity
*SET,Fz_Floater , Bf_ana-Wf_ana ! [N/m]
! *
! -----
! ***** Projection of Stretched out Riser *****
! Functions
*SET,X0 , SQRT(Length**2-Depth**2)
*SET,ag , Depth/X0
*SET,mf , Depth/(X0-Length)
*SET,bgx , -ag*X0
*SET,bfx , -mf*X0
*SET,bhx , -Depth-mf*X_b
*SET,brx , -Depth-mf*(X_f0+L_f)
*SET,bsx , -Depth-mf*X_f0
!

```

```

!
*SET,XB, (bhx-bgx)/(ag-mf)
*SET,ZB, mf*XB+bhx
*SET,XF0, (bsx-bgx)/(ag-mf)
*SET,XF1, (brx-bgx)/(ag-mf)
*SET,ZF0, mf*XF0+bsx
*SET,ZF1, mf*XF1+brx
! *
! -----
! *** Coordinates ***
! TDP
*SET,X_TDP , 0
*SET,Y_TDP , 0
*SET,Z_TDP , -Depth
! Riser
*SET,X_Riser , X0
*SET,Y_Riser , 0
*SET,Z_Riser , 0
! Buoy
*SET,X_B , XB
*SET,Y_B , 0
*SET,Z_B , ZB
! Floater
*SET,X_F0 , XF0
*SET,Y_F0 , 0
*SET,Z_F0 , ZF0
*SET,X_F1 , XF1
*SET,Y_F1 , 0
*SET,Z_F1 , ZF1

! -----
! Platform Displacement
*SET,DX , X_Plat-X_Riser
! *
! =====
! ***** Pre Processor *****
! =====
! *
/PREP7
SMRT,OFF
! *
! -----
! *** MATERIAL PROPERTIES ***
! Steel
MP,EX,1,Esteel      ! Young Modulus
MP,PRXY,1,Psteel   ! Poisson Ratio
MP,DENS,1,Rsteel    ! Density
MP,KXX,1,60.5       ! Conductivity [W/(m*k)]
MP,C,1,434          ! Specific Heat [J/(kg*K)]
MP,ALPX,1,12E-6     ! Coefficient of Thermal Expansion
! Contact
MP,MU,2,fr          ! Coefficient of Friction
! Sea Water
MP,DENS,3,Rwater    ! Density
! Internal Fluid
MP,DENS,4,Roil
! Coating
MP,DENS,5,Rcoat
! *
! -----
! *** ELEMENT TYPES ***
ET,1,PIPE289        ! 3-D 3-NODE PIPE
!KEYOPT,1,3,3
!KEYOPT,1,4,1
!KEYOPT,1,6,0

```

```

ET,2,CONTA177      ! 3-D LINE-TO-SURFACE CONTACT
KEYOPT,2,2,1
KEYOPT,2,3,1
!KEYOPT,2,4,0
!KEYOPT,2,7,1
!KEYOPT,2,10,0
!KEYOPT,2,11,1
!KEYOPT,2,12,2
ET,3,170          ! 3-D TARGET SEGMENT
!KEYOPT,3,1,0
!KEYOPT,3,2,0
! *
! -----
! *** SECTION DATA ***
! IF,LS_SW,EQ,0,THEN
!   IF,SEC_CO,EQ,0,THEN
!     SECTYPE,1,PIPE,,PIPE1
!     SECDATA,Dext,th,16,,1,,
!     SECOFFSET,0,0,
!     SECCONTROL,0,
!   *ELSEIF,SEC_CO,EQ,1
!     SECTYPE,1,PIPE,,PIPE1
!     SECDATA,Dext,th,16,,1,,5,th_coat
!     SECOFFSET,0,0,
!     SECCONTROL,0,
!   *ENDIF
! *ELSEIF,LS_SW,EQ,1,OR,LS_SW,EQ,2
!   IF,SEC_CO,EQ,0,THEN
!     SECTYPE,1,PIPE,,PIPE1
!     SECDATA,Dext,th,16,,1,4,,
!     SECOFFSET,0,0,
!     SECCONTROL,0,
!   *ELSEIF,SEC_CO,EQ,1
!     SECTYPE,1,PIPE,,PIPE1
!     SECDATA,Dext,th,16,,1,4,5,th_coat
!     SECOFFSET,0,0,
!     SECCONTROL,0,
!   *ENDIF
! *ENDIF
! *

```

```

! -----
! *** SOLID MODEL ***
*IF,CONFIG,EQ,0,THEN      ! Catenary
  K,1,X_TDP,Y_TDP,Z_TDP
  K,2,X_Riser,Y_Riser,Z_Riser
  L,1,2
*ELSEIF,CONFIG,EQ,1      ! Buoy
  K,1,X_TDP,Y_TDP,Z_TDP
  K,2,X_B,Y_B,Z_B
  K,3,X_Riser,Y_Riser,Z_Riser
  L,1,2
  L,2,3
*ELSEIF,CONFIG,EQ,2      ! Floater
  K,1,X_TDP,Y_TDP,Z_TDP
  K,2,X_F0,Y_F0,Z_F0
  K,3,X_F1,Y_F1,Z_F1
  K,4,X_Riser,Y_Riser,Z_Riser
  L,1,2
  L,2,3
  L,3,4
*ENDIF
! *
! -----
! *** MESHING ***
*IF,CONFIG,EQ,0,THEN      ! Catenary
  LSEL,S,LINE,,1
  LESIZE,ALL,,ndiv,,,,1
  LMESH,ALL
*ELSEIF,CONFIG,EQ,1      ! Buoy
  LSEL,S,LINE,,1,2
  LESIZE,ALL,,ndiv,,,,1
  LMESH,ALL
*ELSEIF,CONFIG,EQ,2      ! Floater
  LSEL,S,LINE,,1,3
  LESIZE,ALL,,ndiv,,,,1
  LMESH,ALL
*ENDIF
! *
! -----

! *** CONTACT/TARGET ***
TYPE, 2
REAL, 2
MAT, 2
ESURF
*GET, NODE_MAXNUM_DEF, NODE, 0, NUM, MAXD
*SET, TARGET_NODE1, NODE_MAXNUM_DEF+1
*SET, TARGET_NODE2, NODE_MAXNUM_DEF+2
*SET, TARGET_NODE3, NODE_MAXNUM_DEF+3
*SET, TARGET_NODE4, NODE_MAXNUM_DEF+4
N, TARGET_NODE1, 0, -100, -Depth
N, TARGET_NODE2, X_Plat, -100, -Depth
N, TARGET_NODE3, X_Plat, 100, -Depth
N, TARGET_NODE4, 0, 100, -Depth
TSHAP, QUAD
TYPE, 3
E, TARGET_NODE1, TARGET_NODE2, TARGET_NODE3, TARGET_NODE4
ALLSEL, ALL
RMODIF, 2, 29,
RMODIF, 2, 30,
KEYOPT, 2, 12, 2
ALLSEL, ALL
FINISH
! *

```

```

! =====
! ***** Solution *****
! =====
! *
/SOLU
! *
! -----
! *** BOUNDARY CONDITIONS ***
*IF,CONFIG,EQ,0,THEN      ! Catenary
KSEL,S,KP,,1
NSLK,S,
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
D,ALL,ROTX,0
D,ALL,ROTY,0
D,ALL,ROTZ,0
!*
KSEL,S,KP,,2
NSLK,S,
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
D,ALL,ROTX,0
D,ALL,ROTY,0
D,ALL,ROTZ,0
*ELSEIF,CONFIG,EQ,1      ! Buoy
KSEL,S,KP,,1
NSLK,S,
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
D,ALL,ROTX,0
D,ALL,ROTY,0
D,ALL,ROTZ,0
!*
!*
KSEL,S,KP,,3
NSLK,S,
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
D,ALL,ROTX,0
D,ALL,ROTY,0
D,ALL,ROTZ,0
*ELSEIF,CONFIG,EQ,2      ! Floaters
KSEL,S,KP,,1
NSLK,S,
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
D,ALL,ROTX,0
D,ALL,ROTY,0
D,ALL,ROTZ,0
!*
KSEL,S,KP,,4
NSLK,S,
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
D,ALL,ROTX,0
D,ALL,ROTY,0
D,ALL,ROTZ,0
*ENDIF

```

```

ALLSEL
! *
*IF,CONFIG,EQ,0,THEN      ! Catenary
KSEL,S,KP,,2
NSLK,S,
D,ALL,UX,DX
*ELSEIF,CONFIG,EQ,1      ! Buoy
KSEL,S,KP,,3
NSLK,S,
D,ALL,UX,DX
*ELSEIF,CONFIG,EQ,2      ! Floaters
KSEL,S,KP,,4
NSLK,S,
D,ALL,UX,DX
*ENDIF
! *
! -----
! GLOBAL
*IF,LS_SW,EQ,0,THEN
*IF,CONFIG,EQ,0,THEN      ! Catenary
LSEL,S,LINE,,1
NSLL,S,1
F,ALL,FZ,FZ_riser
ALLSEL
*ELSEIF,CONFIG,EQ,1      ! Buoy
LSEL,S,LINE,,1,2
NSLL,S,1
F,ALL,FZ,FZ_riser
ALLSEL
*ELSEIF,CONFIG,EQ,2      ! Floaters
LSEL,S,LINE,,1,3
NSLL,S,1
F,ALL,FZ,FZ_riser
ALLSEL
*ENDIF
*ELSEIF,LS_SW,EQ,1
*IF,CONFIG,EQ,0,THEN      ! Catenary
LSEL,S,LINE,,1
NSLL,S,1
F,ALL,FZ,Fz_Global
ALLSEL
*ELSEIF,CONFIG,EQ,1      ! Buoy
LSEL,S,LINE,,1,2
NSLL,S,1
F,ALL,FZ,Fz_Global
ALLSEL
*ELSEIF,CONFIG,EQ,2      ! Floaters
LSEL,S,LINE,,1,3
NSLL,S,1
F,ALL,FZ,Fz_Global
ALLSEL
*ENDIF
*ENDIF
! SPECIFIC
*IF,CONFIG,EQ,1,THEN      ! Buoy
*IF,LS_FB,EQ,0,THEN
KSEL,S,KP,,2
NSLK,S,1
F,ALL,FZ,B_Buoy
ALLSEL
*ELSEIF,LS_FB,EQ,1
KSEL,S,KP,,2
NSLK,S,1
F,ALL,FZ,Fz_Buoy
ALLSEL
*ENDIF

```

```

*ELSEIF,CONFIG,EQ,2          ! Floaters
*IF,LS_FF,EQ,0,THEN
LSEL,S,LINE,,2
NSLL,S,0
F,ALL,FZ,B_Float
ALLSEL
*ELSEIF,LS_FF,EQ,1
LSEL,S,LINE,,2
NSLL,S,0
F,ALL,FZ,Fz_Floater
ALLSEL
*ENDIF
*ENDIF
! *
! -----
! INERTIA - DYNAMIC
*IF,LS_SW,EQ,2,THEN
ACEL,0,0,9.81,
*ENDIF
! BASIC OCEAN
*IF,LS_OC,EQ,1,THEN
OCTYPE,BASIC
OCDATA,Depth,3,0,0,0,0
OCTABLE,, ,CDyz,CDyz,CT,CMyz,CMyz
*ENDIF
! CURRENT OCEAN
*IF,LS_CURR,EQ,1,THEN
OCTYPE,CURR
OCTABLE,0,CUR_SUP,,
OCTABLE,Depth,CUR_INF,,
*ENDIF

! WAVE OCEAN
*IF,LS_WAVE,EQ,1,THEN
*IF,WAVETYPE,EQ,0,THEN          ! REGULAR
OCTYPE,WAVE
OCDATA,2,THETA                ! STOKES FIFTH-ORDER WAVE
OCTABLE,Height,Twave,Pwave
*ELSEIF,WAVETYPE,EQ,1
OCTYPE,WAVE
OCDATA,5,THETA,1,3            ! JONSWAP
OCTABLE,HS,TP,,NWV
*ENDIF
*ENDIF
! *
! -----
! *
ANTYPE,0
AUTOTS,ON
NLGEOM,1
*SET,SUBSTEPS,1000
NSUBST,SUBSTEPS
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
ALLSEL,ALL
SOLVE
FINISH

```