

Paula Salles Ferreira

**Uma Análise de Riser Rígido Utilizando o
Método de Elementos Finitos**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Carlos Alberto de Almeida

Rio de Janeiro
Julho de 2018

Agradecimentos

Em primeiro lugar, aos que me possibilitaram chegar até aqui, meus pais, Silvia e Antonio, por todo o apoio e motivação.

Ao meu orientador, professor Carlos Alberto de Almeida, pelo suporte e paciência ao longo deste trabalho.

Ao professor Ivan Menezes e ao Vitor Eboli que igualmente me auxiliaram a concluir este projeto.

Aos meus colegas da Seadrill, em especial ao Tiago Schaedler, Luiz Ferreira e Leonardo Guimarães por serem sempre solícitos e me passarem seus conhecimentos de perfuração.

Aos meus amigos da PUC-Rio que me auxiliaram, do ciclo básico ao profissional, sem vocês isso não seria possível. Agradeço diretamente a Ana Beatriz Goes, Pedro Savi, e Beatriz Borges pelo apoio e união neste desafio.

A toda a minha família pelo amor e preocupação.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação.

Resumo

Uma Análise de Riser Rígido Utilizando o Método de Elementos Finitos

O *riser* é um importante componente para a exploração de petróleo, tendo como finalidade encapsular e proteger os equipamentos de perfuração e servir de conduto ao poço. Este equipamento deve resistir a grandes esforços portanto é considerado um elemento crítico no desenvolvimento de uma coluna de perfuração. A demanda crescente do petróleo tem levado as empresas a buscar novas reservas em águas cada vez mais profundas, ambiente no qual as cargas atuantes nos *risers* aumentam consideravelmente. Na indústria, ao iniciar os estudos da perfuração de um poço de petróleo, são feitas análises de *risers* que estudam as diversas configurações e avaliam suas potenciais falhas. Este trabalho se propõe a realizar uma simulação numérica de elementos finitos adaptado à análise de *riser* rígido. A coluna de *riser* foi representada por um modelo de viga longa com seção reta, composta por materiais e geometrias adequadas a resistência mecânica e térmica e a facilidade de escoamento interno. A simulação numérica contempla o estudo de *riser* no equilíbrio estático, realizando uma análise de tensões e deformações ao longo da coluna. A geometria e os dados de carregamentos reais utilizados na simulação foram obtidos de uma empresa estrangeira de perfuração. O estudo será realizado no software ANSYS que utiliza o método de elementos finitos.

Palavras-chave

Riser; Perfuração; Petróleo; Método de Elementos Finitos; Tensão de Von Mises; Deformação.

Abstract

A Rigid Riser Analysis Using the Finite Element Method

The *riser* is an important component for the oil exploration activity, with the purpose of encapsulating and protecting the drilling equipment and serving as conduit to the well. This equipment must withstand large imposed loads, therefore it is considered a critical element in the development of a drilling column. The increasing demand for oil has led companies to look for new reserves in deeper waters, which leads to increasing loads on the *risers*. In the industry, when planning the drilling of an oil well, *riser* analyzes are conducted to determine the best configuration and evaluate their potential failures. This project proposes to perform a numerical simulation of finite elements suitable for rigid risers. The structure is represented by a long beam model with a straight section composed of materials and geometries suitable for mechanical and thermal resistance and ease of internal flow. The numerical simulation should contemplate the study of the *riser* in static equilibrium, performing an analysis of tensions and deformations along the column. The geometry and loading data used in the simulation were obtained from a drilling company. The study will be performed in ANSYS software that uses the finite element method.

Keywords

Riser; Drilling; Oil; Finite Element Method; Von Mises Stress; Deformation.

Sumário

1	Introdução	8
2	Revisão de Conceitos	10
2.1	Unidades Marítimas	10
2.2	Sistema de Risers	11
2.3	Equipamentos Relevantes	16
2.4	Movimentação da Unidade Marítima	17
3	O Método de Elementos Finitos	19
3.1	Formulação Geral	19
4	Carregamentos Atuantes	23
4.1	Cargas Estáticas	23
4.2	Cargas Dinâmicas	26
5	O Poço Estudado	27
5.1	Configuração Proposta	27
5.2	Tração Mínima Aplicada	28
5.3	Perfil de Corrente Marinha	28
6	A Simulação	30
6.1	Geometria	30
6.2	Condições de Contorno	31
6.3	Cargas Aplicadas	31
7	Resultados	33
7.1	Deformação	33
7.2	Tensão de Von-Mises	35
8	Conclusão	38
A	Cálculo do Módulo de Rigidez a Flexão	40

Lista de figuras

1.1	Matriz Energética Mundial 2005	8
2.1	Tipos de Plataforma de Perfuração	10
2.2	Juntas de Riser Rígido	12
2.3	Camadas Riser Flexível	13
2.4	a) Catenária Livre, c) Lazy S, d) Steep Wave, e) Lazy Wave	15
2.5	a) Blow Out Preventer, b) Junta Telescópica e Cabos Tensionadores	17
2.6	Graus de Liberdade de uma Unidade Marítima	18
3.1	Sólido 3D com Elementos de 8 Nós	21
4.1	Efeitos do Mar na Unidade Marítima	25
6.1	Geometria e Malha	30
6.2	Modelo com Cargas Aplicadas	32
7.1	Resultado - Deformação	33
7.2	Gráfico Deformação por Profundidade	34
7.3	Resultado - Tensão Von-Mises	35
7.4	Gráfico Tensão por Profundidade	36
7.5	Gráfico Tensão por Profundidade [1].	36
A.1	Geometria Riser de Aço.	40

Lista de tabelas

1.1	Demanda Global de Petróleo.	9
5.1	Dados Gerais do Poço	27
5.2	Configuração Proposta	27
5.3	Parâmetros para o Cálculo da Tração	28
5.4	Mínima Pré-Tração Necessária	28
5.5	Dados para o Cálculo de F_D	29
5.6	Perfil de Corrente e Força de Arraste	29
6.1	Especificações da Malha	31
6.2	Pressões Aplicadas	31
6.3	Cargas Aplicadas	32
7.1	Cargas Aplicadas	33
7.2	Ângulo Máximo das Flex Joints.	34
7.3	Cargas Aplicadas	35
A.1	Diâmetros do Riser de Aço Utilizados no Projeto.	40

1

Introdução

Uma das mais relevantes para a economia global, a indústria de petróleo é ainda hoje a fonte primária de maior importância na matriz energética mundial. Mesmo em tempos que demandam sustentabilidade de processos industriais e de incentivos às energias renováveis, o petróleo continua ainda sendo a principal fonte energética do mundo, como apontado pelo relatório do Conselho Mundial de Energia de 2016 [2]. Neste o petróleo aparece como responsável por 33% da matriz energética mundial, seguido do carvão mineral com 29% e do gás com 24%. Na Figura 1.1 é apresentada a evolução da participação das principais fontes energéticas nos últimos quinze anos. Note-se que apesar de uma gradual redução da sua participação, o petróleo e seus derivados são o responsável por suprir em 1/3 a demanda mundial por energia.

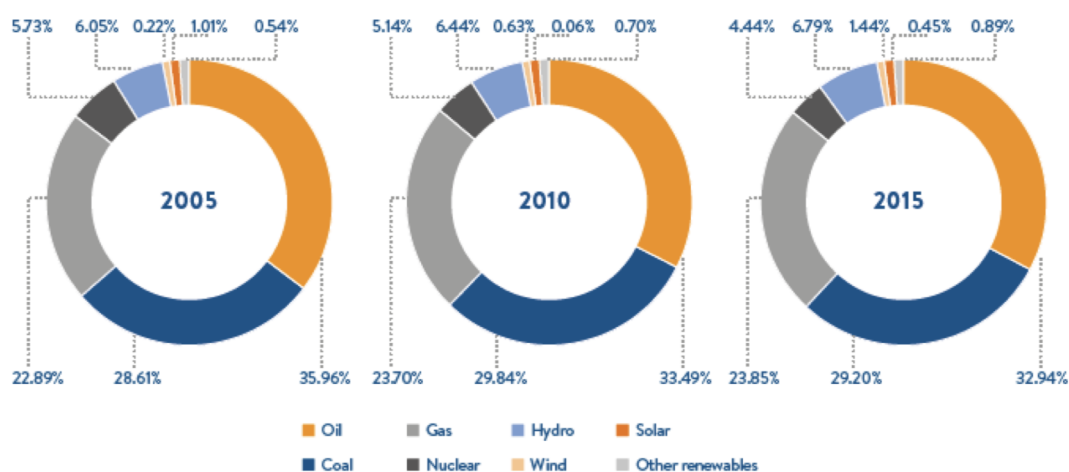


Figura 1.1: Matriz Energética Mundial 2005

Usado predominantemente na área de transportes (63%), o petróleo ainda não tem um substituto eminente até 2021. Para corroborar com esta tendência, desde 2014 a demanda do combustível tem aumentado, havendo previsão desse comportamento manter-se até 2020, como demonstrado na Tab. 1 abaixo [2].

Para acompanhar tal crescimento, a indústria de petróleo tem enfrentado em nosso país novos desafios na exploração e na produção - em águas cada vez mais profundas, exigindo o emprego de métodos e equipamentos inovadores na perfuração de poços em larga escala. Entre esses equipamentos encontram-se

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Global	92,4	93,3	94,5	95,7	96,9	98,0	99,1

Tabela 1.1: Demanda Global de Petróleo.

os *risers* de perfuração, que é a principal conexão entre a plataforma e o poço. Com a lâmina d'água na exploração de petróleo na costa brasileira cada vez maior, naturalmente os *risers* estão submetidos a carregamentos mais intensos devido especialmente ao peso próprio e ao empuxo, às correntes marítimas, ao mar, da embarcação, etc.

Os tradicionais *risers* formados por tubos de aço têm apresentado problemas logísticos e gerado custos elevados, tanto na sua fabricação e exploração. Por exemplo, a maior plataforma semi-submersível de petróleo do mundo, a Thunder Horse, utiliza risers convencionais rígidos, porém a carga criada pelos tubos de aço exigiu um gasto de 5 bilhões de dolares americanos para construir-se uma plataforma suficiente para suportar esse esforço. Portanto, há diversos estudos sendo realizados para desenvolver risers que atendam às exigências do cenário atual e minimizem os efeitos sobre o dimensionamento das plataformas [3].

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise das tensões e deformações ao longo de uma coluna de *riser* com base em um cenário real de projeto de poço. Para isso será feita uma simulação utilizado um software de método de elementos finitos, o ANSYS 19.0.

2

Revisão de Conceitos

2.1

Unidades Marítimas

Na perfuração de poços petrolíferos em ambiente offshore há três principais tipos de plataformas: auto eleváveis, semi-submersíveis, e navios sonda. Na Figura 2.1 abaixo ilustram-se os três tipos de plataforma:

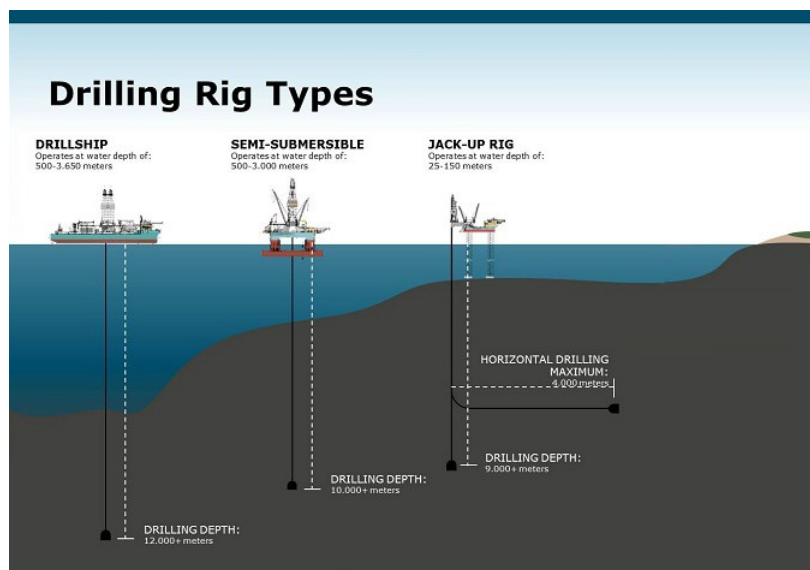


Figura 2.1: Tipos de Plataforma de Perfuração

As plataformas autoeleváveis, ou jack-ups, são usadas para perfuração em águas rasas, entre 5 a 130 metros de lâmina d'água. Este sistema conta com um casco flutuante e três ou quatro estruturas de apoio que se estendem verticalmente até o fundo do mar e elevam a plataforma a uma altura segura fora do alcance das ondas. Esse tipo de plataforma é móvel; quando há necessidade de deslocamento as pernas são elevadas e então a unidade é transportada por rebocadores.

A plataforma semi-submersível consiste em vários conveses contendo as áreas de operação, equipamentos e acomodações. Estes conveses são suportados por um casco composto de colunas e flutuadores submersos. Como indica o nome, estas plataformas operam em posição semi-submersível, para, entre outras coisas, gerar estabilidade, podendo operar em lâminas d'água superiores a 2000 metros de profundidade. Ela pode ser usada tanto na exploração como

na produção de petróleo em águas profundas. A plataforma mantém posição sobre o poço por meio de um sistema computadorizado de propulsores chamado de sistema de posicionamento dinâmico. Este tipo de unidade apresenta grande mobilidade, podendo ser transportada por rebocadores ou, para pequenas distâncias, com propulsão própria.

Os navios sondas são embarcações especializadas, equipados para operações de perfuração, podendo ser usados em águas ultra profundas com mais de 2000 metros de lâmina d'água. O navio possui uma torre de perfuração e uma abertura no casco, o *moon pool*. Para garantir a estabilidade da unidade são usados sensores acústicos e propulsores de posicionamento dinâmico objetivando anular os efeitos dos ventos e ondas. Suas vantagens em relação às submersíveis são a alta mobilidade e a grande capacidade de estocagem [4].

2.2

Sistema de Risers

Os risers são os dutos suspensos que conectam a unidade de exploração ou produção aos equipamentos submarinos no leito marinho. Seu objetivo é encapsular e proteger os equipamentos de perfuração, tais como *drill pipes* e revestimentos, e servir de conduto ao poço. Outra principal função é o transporte de fluido até o poço, tal como a lama que é bombeada para trazer de volta o cascalho resultante da perfuração da formação rochosa. Os risers devem resistir a todos os carregamentos impostos portanto são considerados os produtos mais críticos no desenvolvimento de uma coluna de perfuração. O projeto e a análise devem levar em conta todas as cargas dinâmicas e condições ambientais que eles devem suportar.

2.2.1

Estruturas de Riser

Riser Rígido

Os *risers* rígidos, mostrados na Figura 2.2, são dutos tubulares, normalmente de aço, formados por diversas juntas que sendo rosqueadas ou soldadas formam a coluna que desce até o leito marinho. Devido ao considerável peso de coluna que a plataforma tem de suportar, são usados *risers* com módulos de flutuação para reduzir seu peso. Esta estrutura de *riser* possui grande rigidez e resistência a cargas axiais, radiais e de flexão. [5].

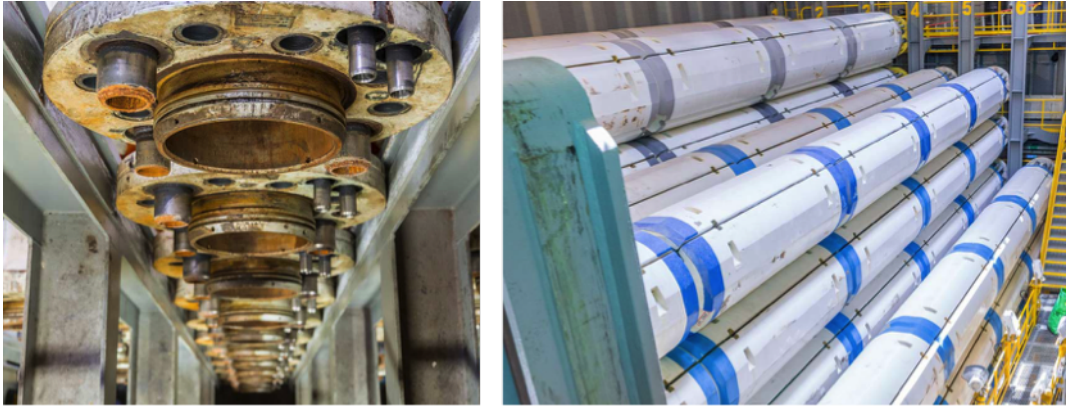


Figura 2.2: Juntas de Riser Rígido

Tipos de Juntas do Riser Rígido

Pup Joints

Os *risers* do tipo *pup joints* são juntas menores de tamanhos não tradicionais usadas para ajustar o comprimento da coluna em relação à lâmina d'água. Este tipo de junta é geralmente utilizada no topo da coluna, sendo conectadas aos equipamentos de superfície.

Buoyancy Joints - Juntas com Módulos de Flutuação

Os *buoyancy joints* são juntas de *risers* que possuem um módulo de flutuação (Fig 2.2). Estes flutuadores diminuem o peso da coluna de *risers* e as cargas suportadas pela unidade marítima.

Como os módulos de flutuação usados variam com a profundidade, devem ser feitos estudos para saber a melhor disposição dessas juntas. Neste estudo serão usados 3 módulos distintos: o de 3000ft, 5000ft e 7000ft.

Riser Flexível

Os *risers* flexíveis são formados por uma superposição de camadas, cada uma delas com uma finalidade, composição e materiais diferentes. As camadas plásticas fornecem estanqueidade externa e interna, já as camadas metálicas são responsáveis pela resistência aos carregamentos mecânicos.

Na Figura 2.3 abaixo apresenta-se um esquema mostrando as camadas que compõe um *riser* flexível. Algumas dessas camadas e suas funções são as seguintes:

- Camada Plástica Externa: Isola o duto do ambiente externo, evitando efeitos da corrosão das camadas internas e a entrada de água.
- Armaduras de Tração: Responsáveis pela rigidez à tração e torção do riser.
- Armadura de Pressão: Tem como objetivo suportar a pressão interna.
- Carcaça Intertravada: Camada mais interna da composição, responsável por impedir o colapso do duto devido à pressão externa [6].

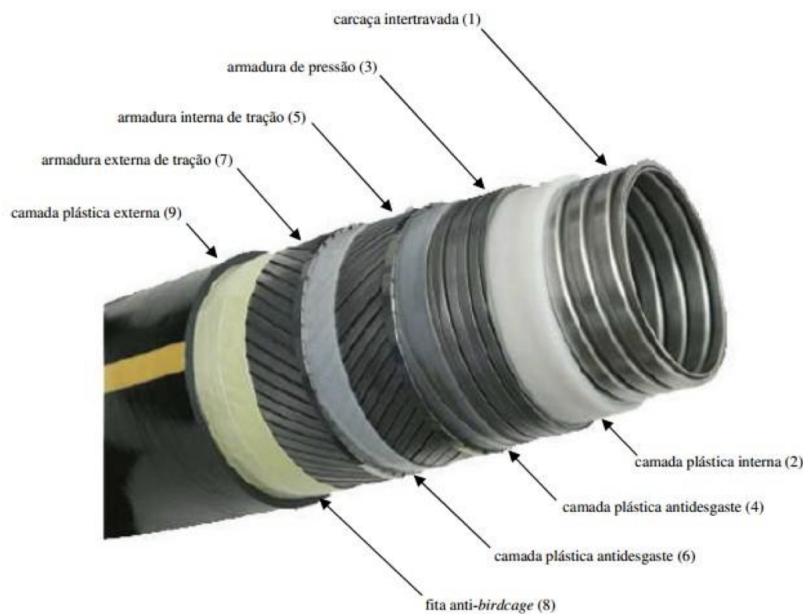


Figura 2.3: Camadas Riser Flexível

2.2.2 Configuração de Risers

A coluna de *riser* pode assumir várias configurações, dependendo das condições de operação. A mais adequada é definida com base no tipo de embarcação, nas condições ambientais e na profundidade em que se encontra o poço. Algumas das principais configurações estão descritas a seguir:

Catenária Livre

Nesta configuração o *riser* é preso à plataforma e se estende livremente em catenária até o leito marinho, conforme é mostrado na Figura 2.4.a. Devido à sua simplicidade, o custo de manutenção é baixo, sendo de fácil instalação e comum na exploração em águas profundas. Porém, com o aumento extensivo da lâmina d'água, a catenária livre é inviável pois há excesso de tração no topo, compressão dinâmica e baixa vida útil devido à fadiga.

Lazy-Wave

Com o intuito de aliviar a tração no topo da coluna, a configuração Lazy-Wave é obtida com o uso de flutuadores intermediários, conforme é mostrado na Figura 2.4.e. Esta implementação faz com que os risers obtenham um formato tipo onda, diminuindo assim a tensão ao longo da coluna e também a movimentação do ponto de contato com o solo, permitindo um aumento da vida útil do duto.

Lazy-S

Semelhante à Lazy-Wave, a Lazy-S é uma configuração que tem o propósito de aliviar tensões sendo obtida com a utilização de uma boia fixa ao invés de flutuadores. Conforme apresentado na Figura 2.4.c a coluna é separada em duas catenárias, uma da plataforma até a boia, a outra da boia até o solo marinho. Embora seja simples, esta configuração é menos compatível aos movimentos da plataforma.

Steep Wave

A configuração Steep-Wave é uma Lazy-Wave, porém com os flutuadores em posição distinta, vide Figura 2.4.d. Nesta configuração os flutuadores são posicionados na parte inferior da coluna de *riser*, o que faz com que o riser chegue em uma posição mais vertical no solo. [7].

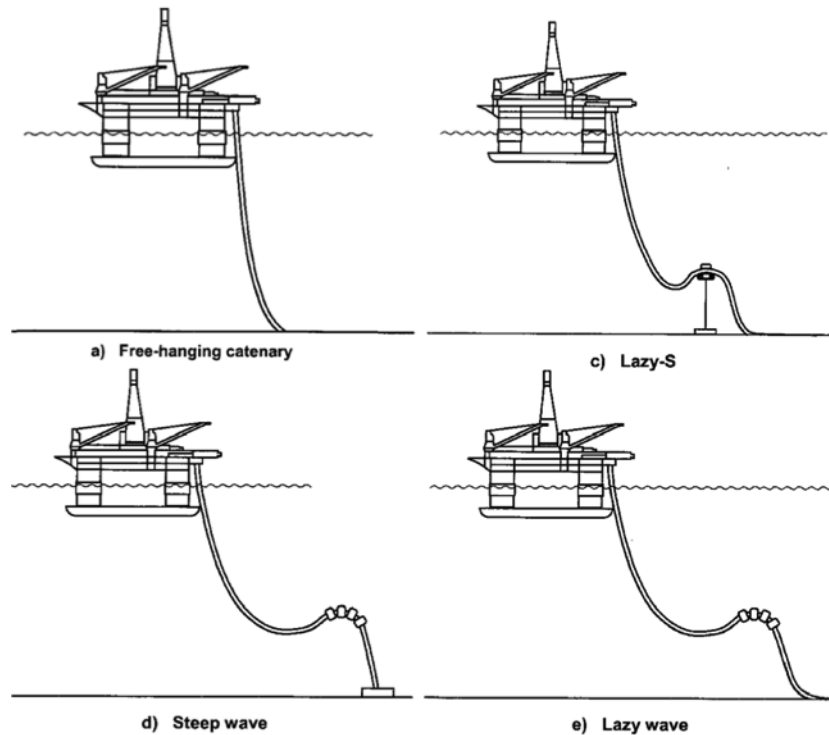


Figura 2.4: a) Catenária Livre, b) Lazy S, c) Steep Wave, d) Lazy Wave

Top Tension Riser (TTR) - Risers Tracionados no Topo

Risers tracionados no topo (Top Tension Riser, TTR), é uma configuração normalmente usada com risers rígidos de aço em que a coluna fica constantemente tracionada. Tracionadores hidráulicos, cabos tensionadores, ou até mesmo flutuadores, mantêm uma tração constante com o objetivo de evitar a flambagem devido ao peso próprio da coluna e para limitar a sua movimentação. Este tipo de configuração tem se tornando cada vez mais comum para perfuração de poços em águas ultra profundas. Isso implica na necessidade de tensionadores que suportem o peso da coluna de *risers*, minimizando a compressão no fundo e diminuindo a interferência entre as juntas.

A configuração de um TTR estudada nesse trabalho inclui cabos tensionadores e um equipamento chamado junta telescópica, descrito na seção 2.3.

2.3

Equipamentos Relevantes

2.3.1

Blow Out Preventer (BOP)

O blow out preventer, ou BOP (Fig. 2.5.a), é um dos equipamentos de segurança mais importantes na plataforma de petróleo. Projetado para impedir o fluxo descontrolado de fluidos, o BOP é uma válvula instalada no topo do poço durante os estágios de perfuração e completação. Durante a perfuração, se a pressão hidrostática do poço ficar abaixo da pressão de formação, pode ocorrer um kick, que é o fluxo de fluidos da formação para dentro do poço. Se não controlado, um kick pode levar a um blowout, ou seja a perda total do controle do fluxo de fluidos (gás, óleo, água, e lama) de um poço, o que pode resultar em explosões na plataforma [8].

Podendo apresentar configurações distintas dependendo das pressões e desenho do poço, o BOP é levado pelos *risers* até a cabeça do poço, onde ele é anexado. A coluna de perfuração com a broca e os tubos de perfuração passam pelo seu interior, portanto, em casos de emergência, o mesmo tem a capacidade de vedar, ou até desconectar a plataforma do poço, cisalhando o tubo, caso necessário.

O BOP é composto por quatro componentes principais, o preventor anular, o blind ram, blind shear ram, e o pipe ram. Cada um desses componentes tem uma função específica, sendo ativados à medida do necessário, podendo vedar o poço ou cortar a coluna.

Acima do BOP é instalado o *Lower Marine Riser Package* (LMRP), contendo mais preventores anulares para segurança em caso de blow out. Acima dele, o Flex Joint, equipamento que permite o movimento relativo angular do riser, prevenindo stress na junta devido à movimentação da plataforma.

2.3.2

Junta Telescópica

A movimentação da plataforma é um fator importante a ser considerado no projeto dos risers, podendo causar tração e compressão dependendo das condições do mar. Como a coluna é mantida constantemente tracionada, utiliza-se uma junta telescópica e cabos tensionadores (Fig. 2.5.b) que tem como principal função compensar o movimento relativo entre o navio e a coluna de risers.

A junta telescópica mostrada na Figura 2.5.b) é composta por um barril externo que é conectado ao riser, um barril interno que é conectado à plataforma, e um anel tensionador que transmite as cargas do sistema tensionador para o barril externo do riser. Esta configuração permite o movimento para cima e para baixo, chamado de stroke, compensando a movimentação da plataforma [9].

Em uma configuração de TTR, o stroke máximo da junta telescópica e dos cabos tensionadores é um fator que tem de ser levado em consideração. Este cálculo é importante para que se avalie a movimentação máxima e a tração a ser aplicada.

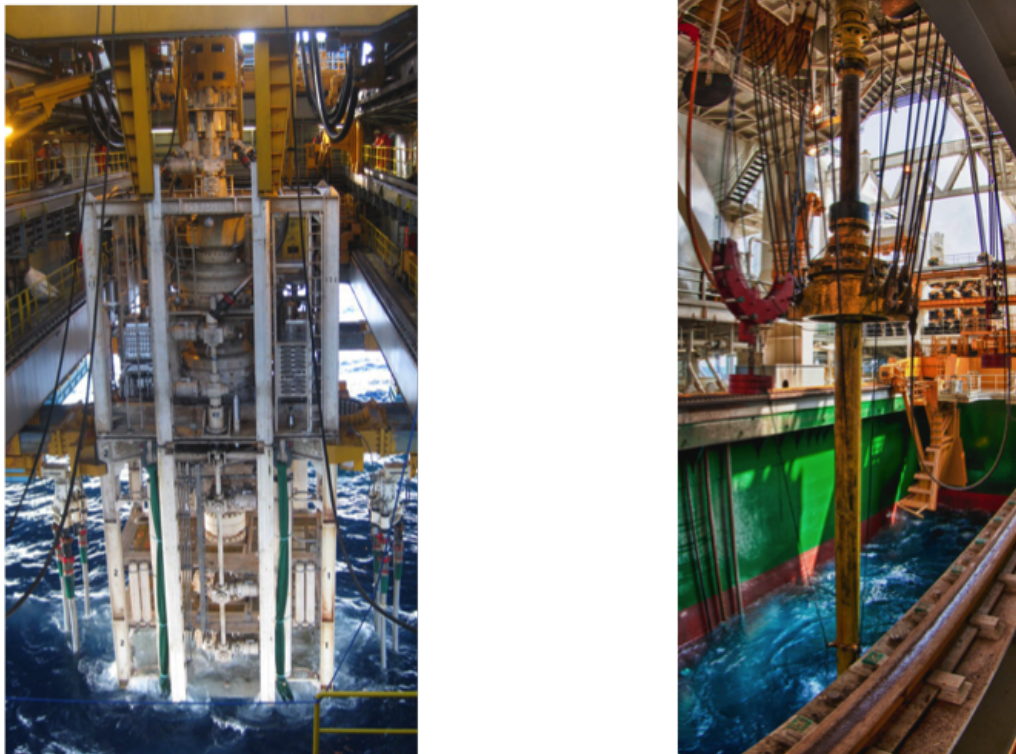


Figura 2.5: a) Blow Out Preventer, b) Junta Telescópica e Cabos Tensionadores

2.4

Movimentação da Unidade Marítima

O posicionamento preciso da sonda de perfuração é crucial para a perfuração do poço. Um mal posicionamento, como um afastamento em relação à linha vertical do poço, chamado de offset, pode gerar o rompimento da coluna.

Uma plataforma de perfuração apresenta 6 graus de liberdade: 3 translações- surge, sway, e heave, e 3 rotações - roll, pitch, e yaw (Fig. 2.6).

Para compensar o movimento de heave é utilizada a junta telescópica, discutida no item 2.3.2. Já para os outros graus de liberdade é utilizado o sistema de posicionamento dinâmico.

Este sistema tem a função de fazer com que a embarcação tenha um controle automático de sua posição por meio de propulsores ou thrusters, acionados toda vez que o centro da plataforma se afasta das coordenadas do poço, determinado por GPS. Há diversos sensores que transmitem o sinal para o painel de controle onde é calculada a potência necessária para manter o navio em posição e em que direção ela deve ser aplicada [10].

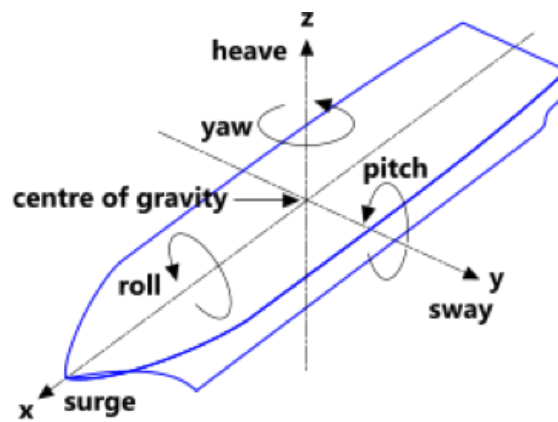


Figura 2.6: Graus de Liberdade de uma Unidade Marítima

3

O Método de Elementos Finitos

O método de elementos finitos (MEF) é uma ferramenta numérica frequentemente utilizada em dimensionamento e na verificação de projetos de engenharia. As análises são feitas através de simulações computacionais empregando-se softwares, como o ANSYS, escolhido para realizar este estudo.

No MEF o domínio da geometria do corpo a ser analisado é dividido em subdomínios, denominadas de elementos. Estes elementos estão interconectados por pontos chamados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto destes - elementos e nós - tem-se a formação de uma malha representativa do problema considerado.

Devido à simplificação do problema obtido por aproximação das variáveis de estado por meio de funções de fume a solução obtida resulta em aproximada. A precisão do MEF depende da quantidade de elementos e nós da malha, quanto maior o número de nós e elementos, mais refinada é a malha tornando a solução mais precisa [11].

3.1

Formulação Geral

Na formulação geral do Método de Elementos Finitos impõe-se o Princípio dos Deslocamentos virtuais e assim é obtida a equação de equilíbrio do sistema associado aos deslocamentos verticais. Tem-se que o equilíbrio de um corpo é satisfeito para qualquer campo de deslocamento pequeno e compatível quando o trabalho virtual interno for igual ao trabalho virtual externo:

$$W_{interno} = W_{externo} \quad (3-1)$$

Assim, a condição de equilíbrio estático é atingida quando o trabalho das forças externas for igual ao trabalho das tensões e deformações internas:

$$\int \int \int \bar{\epsilon}^T dV = \int \int \int \bar{U}^T f^B dV + \int \int \bar{U}^{S^T} f^S dS + \sum_i \bar{U}^{i^T} R_c^i \quad (3-2)$$

Onde \bar{U} e $\bar{\epsilon}$ são os deslocamentos e deformações virtuais, respectivamente. Chama-se "virtual" pois os deslocamentos não são os deslocamentos reais de um corpo devido aos carregamentos impostos; são completamente independentes. Isto é equivalente à condição de minimização de energia potencial de um corpo elástico contínuo, sendo descrita da seguinte forma:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_v \bar{\epsilon}^T \bar{\sigma} dV - \int_v \bar{U}^T \bar{F}_B dV - \int_A \bar{U}_A^T \bar{F}_A dA - \sum \bar{U}_C^T \bar{F}_C \quad (3-3)$$

sendo Π um elemento matemático funcional, $\bar{\epsilon}^T$ e $\bar{\sigma}$ vetores contendo os componentes dos tensores das deformações e tensões. A relação entre as tensões e deformações é datada através das equações constitutivas envolvendo as matrizes constitutivas C , correspondente para cada elemento:

$$\bar{\sigma} = C \bar{\epsilon} \quad (3-4)$$

Na equação 3-3 \bar{F}_A é o vetor das forças de superfície, \bar{F}_B das forças de corpo e \bar{F}_C dos carregamentos concentrados. \bar{U}^T contém os deslocamentos nas três coordenadas globais de um ponto do corpo.

Avaliando a variação $\delta\Pi = 0$ em relação ao deslocamento, obtém-se a equação de equilíbrio do sistema:

$$\delta\Pi = 0 \rightarrow \int_V \delta\bar{\epsilon}^T C \bar{\epsilon} dV = \int_V \delta\bar{U}^T \bar{F}_B dV + \int_A \delta\bar{U}_A^T \bar{F}_A dA - \sum \delta\bar{U}_C^T \bar{F}_C \quad (3-5)$$

Sendo $\delta\bar{U}^T$, $\delta\bar{U}_A^T$ e $\delta\bar{U}_C^T$ são as variações do deslocamentos associados as forças do corpo, superfície e carregamentos concentrados, respectivamente, e $\delta\bar{\epsilon}^T$ corresponde à variação das deformações de corpo.

O MEF é uma técnica numérica da resolução das equações diferenciais parciais representativas das condições de contorno, compatibilidade geométrica e constitutiva.

Na Fig. 3.1 abaixo considera-se um corpo sólido 3D que é aproximado por elementos finitos interconectados através dos seus pontos nodais. A relação entre as coordenadas dos deslocamentos no interior do elementos e as coordenadas dos deslocamentos dos pontos nodais é dada através de uma matriz de interpolação de deslocamentos:

$$u^{(m)}(x, y, z) = H^{(m)}(x, y, z) \bar{U} \quad (3-6)$$

Sendo $u^{(m)}$ o vetor que contém as componentes dos deslocamentos nas coordenadas globais x, y, z e \bar{U} o vetor dos deslocamentos nodais formados pelos deslocamentos globais U_i, V_i e W_i dos i nós do elemento:

$$\bar{U}^{(m)} = [U_1, V_1, W_1 \dots U_k, V_k, W_k] \quad (3-7)$$

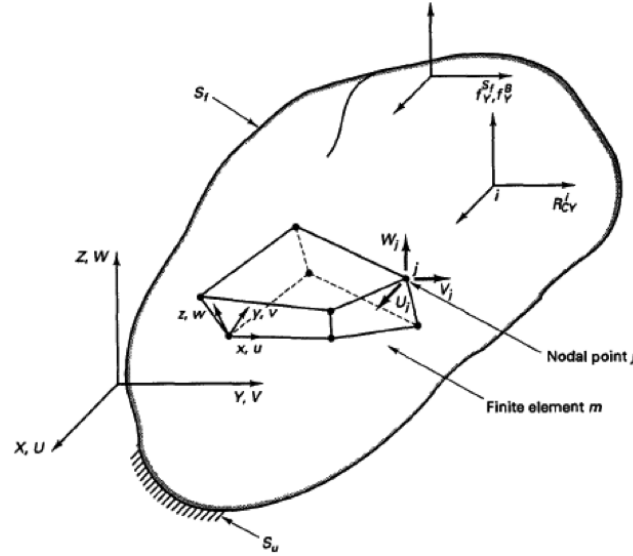


Figura 3.1: Sólido 3D com Elementos de 8 Nós

A construção da matriz de interpolação dos deslocamentos depende da geometria do elemento, do número de elementos nodais, da quantidade de graus de liberdade associados e dos critérios de convergência. Através do campo de deslocamentos da equação 3.7 obtém-se a equação para as medidas das deformações;

$$\epsilon^{(m)}(x, y, z) = B^{(m)}(x, y, z) \bar{U} \quad (3-8)$$

Onde $B^{(m)}$ é a matriz que relaciona as deformações com os deslocamentos nodais do elemento (m), composta por funções de grandezas geométricas do elemento e dos polinômios de interpolação.

Substituindo os campos de deslocamento e deformações na equação de equilíbrio para todos os elementos e integrando sobre cada domínio, obtém-se o sistema linear que governa o comportamento da estrutura:

$$K\bar{U} = R \quad (3-9)$$

Sendo

- \bar{U} o vetor dos deslocamentos contendo todos os graus de liberdade associados aos pontos nodais
- K é a matriz de rigidez global
- R é o vetor dos carregamento nodais equivalentes

Combinando a matriz deformação-deslocamento obtida na equação 3.8 e a matriz constitutiva C , resulta-se em:

$$K = \sum m \int_V B^{(m)T} C^{(m)} B^{(m)} dV^{(m)} \quad (3-10)$$

R resulta da adição dos vetores das forças de corpo (R_B), superfície (R_S) e cargas concentradas R_C :

$$R = R_B + R_S + R_C \quad (3-11)$$

Sendo

$$R_B = \sum m \int_V H^{(m)T} f^{B(m)} dV^{(m)} \quad (3-12)$$

$$R_S = \sum m \int_S H^{(m)T} f^{S(m)} dS^{(m)} \quad (3-13)$$

$$R_C = \sum m \int_v H^{(m)T} \tau^{(m)} dV^{(m)} \quad (3-14)$$

4

Carregamentos Atuantes

4.1

Cargas Estáticas

4.1.1

Peso Próprio

Em um projeto de coluna de *risers* o peso do equipamento é de suma importância. A unidade marítima terá de suportar todo o peso da coluna, portanto estudos buscam minimizar o peso a ser suportado. Para auxiliar na diminuição do peso a ser suportado pela plataforma, os *risers* são subdivididos em módulos de flutuação, podendo haver diferentes módulos associados a cada profundidade e o efeito dos flutuadores deve ser considerado no peso do equipamento submerso.

4.1.2

Pré Tração Aplicada

Neste estudo considera-se uma configuração de *riser* do tipo TTR, tracionado no topo.

Para o cálculo da pré-tração aplicada na coluna de riser serão seguidas as recomendações da API RP 16Q. Desta forma a tensão mínima no topo do *riser*, T_{min} , é definida como o maior valor dentre as expressões seguintes:

Considerando-se:

$$T_{min,flamb} = [W_s F_{wt} - B_n f_{bt} + A_i(\rho_m H_m - \rho_w H_w) + T_{reserve}] \frac{N}{R_f(N - n)} \quad (4-1)$$

$$T_{min,flamb} = [T_{min,API} + T_{reserve}] \frac{N}{R_f(N - n)} \quad (4-2)$$

$$T_{min,desc} = [W_s F_{wt} - B_n f_{bt} + W_{LMRP} F_{wt} + T_{overpull}] \frac{1}{R_f} \quad (4-3)$$

$$T_{min,desc} = [W_s F_{wt} - B_n f_{bt} + A_i(\rho_m H_m - \rho_w H_w) + W_{LMRP} F_{wt}] \frac{1}{R_f} \quad (4-4)$$

Sendo:

$$T_{SRmin} = W_s f_{wt} - B_n f_{bt} + A_i (\rho_m H_m - \rho_w H_w) \quad (4-5)$$

$$T_{min,API} = T_{SRmin} \frac{N}{R_f(N - n)} \quad (4-6)$$

Onde:

- W_s = Peso do riser submerso acima do ponto de consideração
- F_{wt} = Fator de tolerância do peso submerso
- B_n = Elevação do material de flutuante acima do ponto de consideração
- F_{bt} = Perda de flutuabilidade e fator de tolerância resultante da compressão elástica, absorção de água a longo prazo e tolerância de fabricação
- A_i = Área da seção transversal interna do riser
- ρ_m = Densidade de fluido de perfuração
- H_m = Altura da coluna de fluido de perfuração até o ponto de consideração
- ρ_w = Densidade da água do mar
- H_w = Altura da coluna de água do mar até o ponto de consideração
- N = Número de cabos tensionadores suportando os risers
- n = Número de cabos tensionadores sujeitos a falha súbita
- R_f = Fator de redução que relaciona a tensão vertical no anel coletor ao ajuste do esticador para considerar o ângulo da frota e a eficiência mecânica
- $T_{reserve}$ = Tensão reserva após falha
- $T_{overpull}$ = Tensão de Overpull
- W_{LMRP} = Peso submerso do LMRP
- T_{SRmin} = Mínima tensão do slip ring
- $T_{min,API}$ = Tensão mínima aplicada no topo de acordo com a API

As equações 4-1 e 4-2 consideram a tensão mínima para evitar a flambagem da coluna de *riser* e as equações 4-3 e 4-4 a tensão mínima para assegurar a desconexão da coluna em caso de emergência. É necessário que a força aplicada seja suficiente para assegurar a elevação do LMRP em caso de desconexão e também considerar a falha de pelo menos um tensionador de acordo com cada projeto. Considerando estes dois casos, será aplicada a maior tensão calculada pelas equações de flambagem e desconexão (4-1 a 4-4).

4.1.3

Correntes Marítimas

As correntes marítimas são de grande influência no carregamento a ser considerado em uma coluna de *riser* rígido. O perfil da corrente no local da instalação do *riser* deve ser levado em consideração, podendo variar de direção e de velocidade de acordo com a profundidade do local. Normalmente a velocidade da corrente é maior na superfície, diminuindo com a profundidade, como mostrado na Figura 4.1 a seguir.

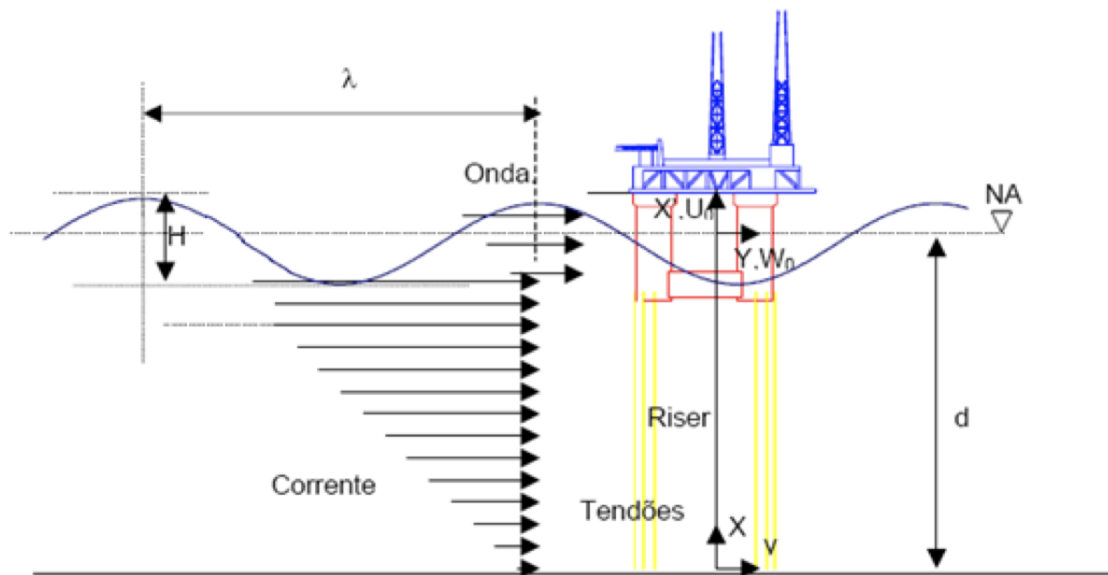


Figura 4.1: Efeitos do Mar na Unidade Marítima

4.2

Cargas Dinâmicas

4.2.1

Ondas

As ondas em alto mar afetam a posição da plataforma em relação ao solo marinho devido aos efeitos da maré. O efeito na embarcação depende da amplitude e frequência das ondas, o que é estudado e planejado diariamente nas plataformas. Há diversas teorias para representar matematicamente as ondas marítimas, sendo a de Airy uma das teorias mais simples. Para simular a forma da onda e sua velocidade, considera-se que a sua amplitude é pequena em relação ao seu comprimento podendo, por exemplo, ser aproximada por uma função seno:

$$\eta = a * \text{sen}(kx - \omega t) \quad (4-7)$$

onde:

a-amplitude de onda

ω - frequência de oscilação

k - número da onda

Porém, neste projeto não serão consideradas as ondas como cargas dinâmicas pois a configuração dos risers é de TTR. Isto resulta praticamente no efeito nulo das ondas nos risers pois há um sistema de compensação para a variação da altura.

5

O Poço Estudado

O poço escolhido para este trabalho foi baseado em dados reais retirados de uma análise de riser para uma operação na bacia de Santos, no litoral brasileiro. Os dados gerais do poço encontram-se na tabela 5.1.

Profundidade	Peso Máximo de Lama
2119 m	9,5 ppg

Tabela 5.1: Dados Gerais do Poço

5.1

Configuração Proposta

Com base nos estudos da análise de *riser* feita pela empresa, a configuração da coluna de *riser* a ser adotada neste trabalho é a descrita na tabela abaixo:

Componente	No. de Juntas	Comp. por Junta [m]	Peso no Ar [kg]	Peso na Água [kg]
5ft Riser Pup	1	1,52	2663,4	2415,6
20ft Riser Pup	1	6,10	5783,3	5028,1
40ft Riser Pup	1	12,20	9863,4	8575,2
3000ft Buoyancy	23	22,86	23840,8	75,7
5000ft Buoyancy	26	22,86	25028,3	1293,6
7000ft Buoyancy	27	22,86	26181,4	2458,0
75ft Slick Riser	14	1,77	14550,4	12649,8

Tabela 5.2: Configuração Proposta

E o peso total da coluna resulta em 294857 kg.

5.2

Tração Mínima Aplicada

Para o cálculo da tração mínima aplicada foram usadas as equações 4-1 a 4-4. Os parâmetros usados, detalhados na seção 4.1.2, estão dispostos nas tabelas abaixo:

W_s [kips]	B_n [kips]	W_{LMRP} [kips]	$T_{overpull}$ [kips]	$T_{reserve}$ [kips]	f_{wt}	f_{bt}
2708	1893,88	201	200	75	1,02	0,98

ρ_m [ppg]	ρ_w [ppg]	H_m [ft]	H_w [ft]	N	n	R_f
9,5	8,55	7042	6952	6	1	0,95

Tabela 5.3: Parâmetros para o Cálculo da Tração

Aplicando os valores acima nas equações 4-1 a 4-4 temos que:

Peso de Lama [Kips]	T_{SRmin} [Kips]	$T_{min,flamb}$ [Kips]	$T_{min,desc}$ [Kips]	$T_{min,desc}$ [Kips]
123	1107	1397,8	1389,9	1309,2

Tabela 5.4: Mínima Pré-Tração Necessária

Os dados usados no cálculo serão, seguindo os requerimentos da API RP 16Q, o maior valor da tração aplicada na coluna de *risers* entre os calculados acima: 1397,8 Kips, ou 6217724,15 N.

5.3

Perfil de Corrente Marinha

Para encontrar a força exercida pela corrente na coluna de risers através da velocidade será utilizada a seguinte expressão de escoamento ao redor de corpos submersos:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A_p \quad (5-1)$$

Sendo:

A_p = HD considerando a hipótese de que $H \gg D$

C_D = Coeficiente de Arraste

V = Velocidade de Fluxo

ρ = Densidade do Fluido

C_D	ρ	A_p
1.2	1025 kg/m^3	1066 m^2

Tabela 5.5: Dados para o Cálculo de F_D

Para a velocidade será utilizada o perfil de corrente extrema de 95% de NEXC. Abaixo encontram-se as velocidades ao longo da profundidade e a força de arraste.

Profundidade (m)	Corrente (m/s)	Força de Arraste (N)
0	0,43	133340,45
50	0,43	121218,59
100	0,31	111812,91
150	0,29	33081,07
200	0,26	17727,15
250	0,25	7682,7
300	0,21	5059,52
350	0,19	3550,02
375	0,18	2655,14
800	0,13	1107,95
1200	0,09	398,27
1600	0,1	327,80
2000	0,12	236,01
2200	0,1	0,0

Tabela 5.6: Perfil de Corrente e Força de Arraste

A partir dos dados de força obtidos, a intuito de simulação, foi traçada uma linha de tendência para definir um perfil de corrente linear.

6

A Simulação

O programa escolhido para realizar a simulação estática de uma coluna de *risers* é o ANSYS 19.0, software que utiliza o método de elemento finitos. Para isso foi definida a geometria do *riser*, as condições de contorno e as cargas aplicadas. O detalhamento destes será feito a seguir.

6.1

Geometria

Para a simulação a geometria do *riser* foi simplificada, considerando-se somente o tubo interno do equipamento. Foi criado um cilindro vertical com $D_{ext} = 0,533m$ e $D_{int} = 0,488m$ com um comprimento de 2000m.

Na figura abaixo encontra-se a geometria adotada e também a malha usada na simulação. Devido ao tamanho extenso da geometria as imagens são reduzidas e dispostas de acordo com a melhor visualização.

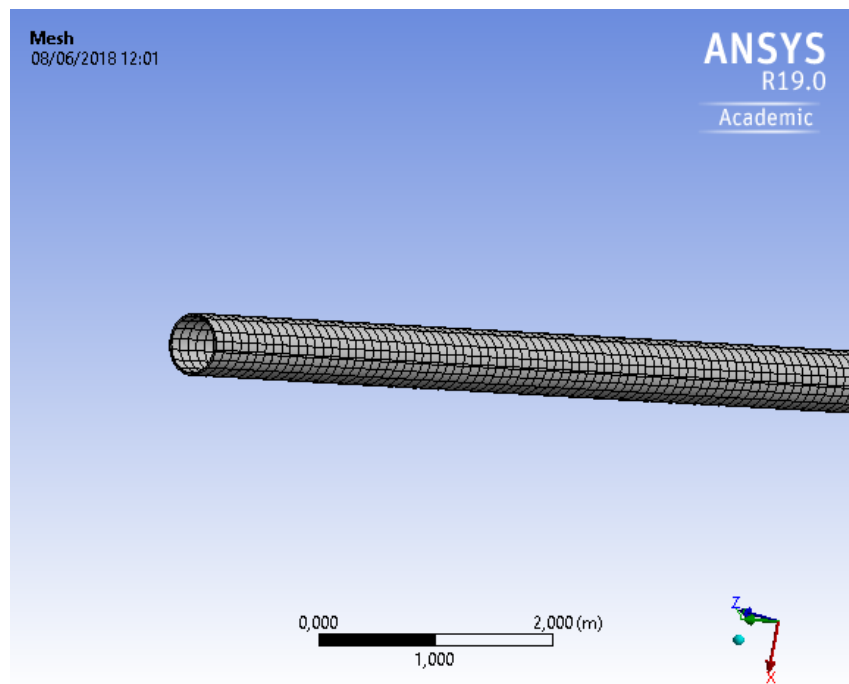


Figura 6.1: Geometria e Malha

Número de Nós	Número de Elementos
2320504	523964

Tabela 6.1: Especificações da Malha

6.2

Condições de Contorno

Para aproximar o comportamento da coluna de *riser* à realidade de um TTR - Top Tension *Risers* que compensa o movimento vertical, as condições de contorno aplicadas são as de uma coluna bi-rotulada. Isto é, limitando seu movimento nos eixos x, y, e z e liberando as rotação para simular o efeito de ball-joint nas extremidades.

6.3

Cargas Aplicadas

As cargas aplicadas foram descritas detalhadamente no capítulo 4, porém foram feitas algumas considerações para simular os efeitos da corrente marítima na coluna de *riser*.

Para criar um perfil de corrente triangular ao longo do comprimento do *riser* no ANSYS foi necessário aplicar este efeito como pressão. Portanto, ao definir o perfil, foi utilizado o valor mínimo e máximo de pressão. Estes valores foram obtidos usando a expressão abaixo:

$$P = \frac{F_D}{A} \quad (6-1)$$

Sendo F_D a força de arraste calculada no seção 5.4 e $A=H*D$.

Assim a pressão máxima e mínima são as seguintes:

P Máxima [Pa]	P Mínima [Pa]
125	0

Tabela 6.2: Pressões Aplicadas

As cargas a serem aplicadas são:

Pré-Tracção [N]	Peso [Kg]	Pressão [Pa]
6217724,15	294857	125-0

Tabela 6.3: Cargas Aplicadas

Abaixo encontra-se o modelo com todas as cargas aplicadas. Destaca-se que o peso da coluna foi considerado como massa distribuída.

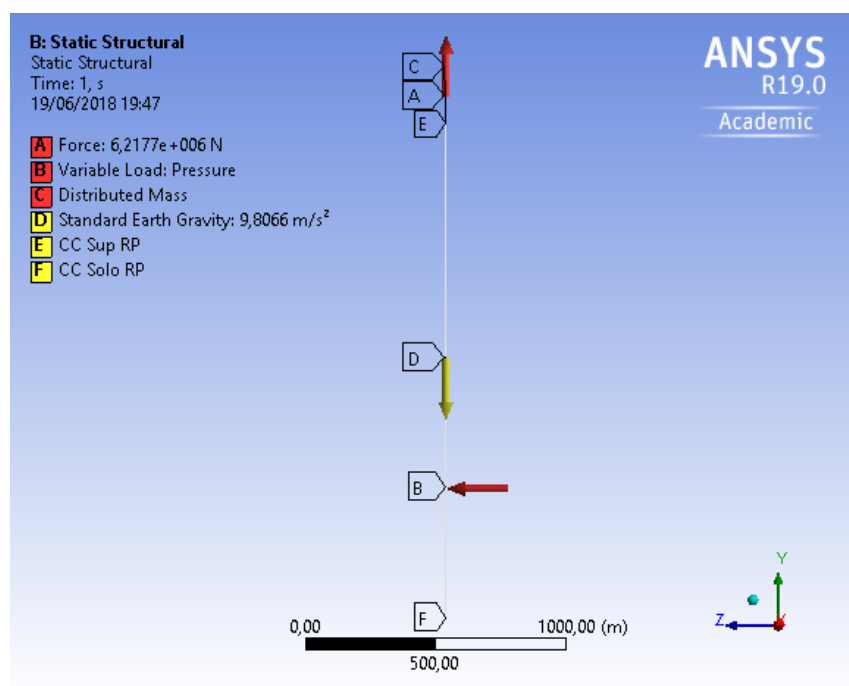


Figura 6.2: Modelo com Cargas Aplicadas

7

Resultados

7.1

Deformação

Pode-se observar nas Figuras 7.1 e 7.2 abaixo a deformação sofrida pela coluna com a aplicação das cargas. Como esperado, houve uma flexão devido ao efeito da corrente marítima, sendo a maior deformação aproximadamente no centro da coluna. Pelo gráfico verifica-se o comportamento ao longo da profundidade.

Máxima [m]	Média [m]	Mínima [m]
170,31	90,38	0

Tabela 7.1: Cargas Aplicadas

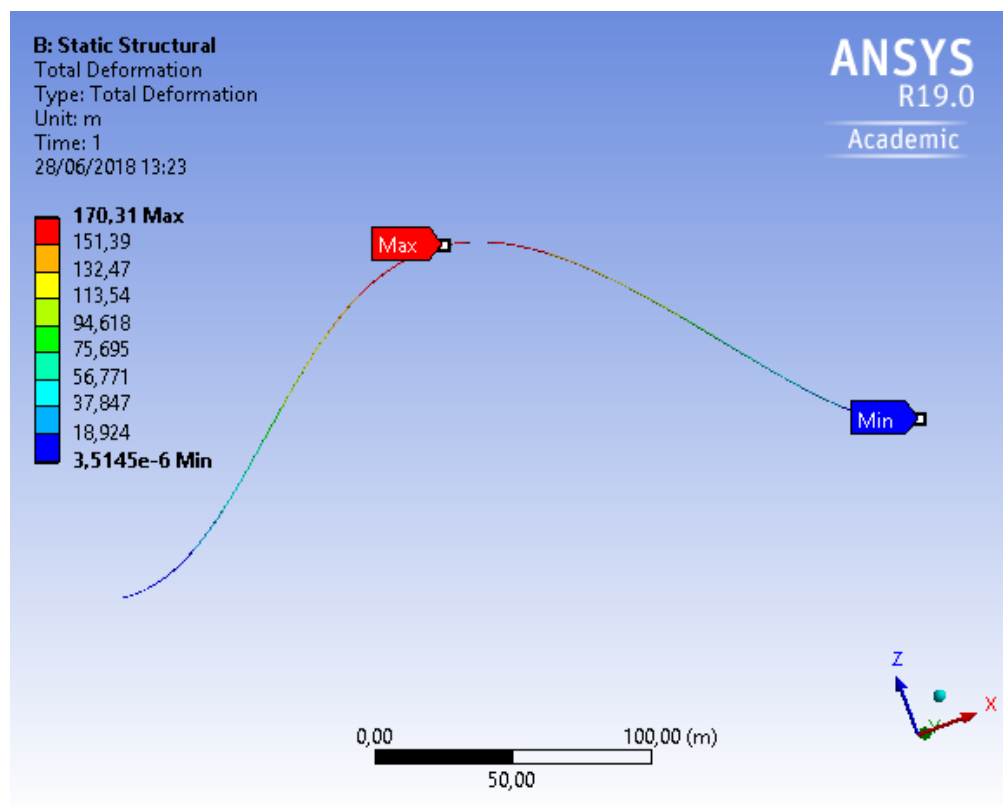


Figura 7.1: Resultado - Deformação

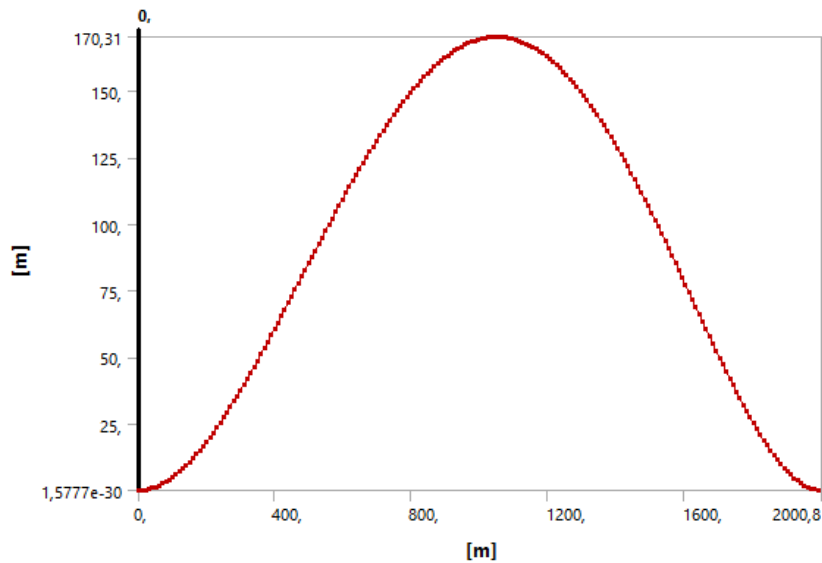


Figura 7.2: Gráfico Deformação por Profundidade

Para efeito de comparação de resultados foi calculada a deformação aproximada de uma coluna de *riser* utilizando os ângulos máximos da upper e lower flex joint através de trigonometria básica; considera-se a deformação máxima em 1045m de profundidade.

Flex Joint	Ângulo Máx [°]	Deformação Máx.[m]
Upper Flex Joint	15	280
Lower Flex Joint	10	184,26

Tabela 7.2: Ângulo Máximo das Flex Joints.

A deformação máxima obtida na simulação foi de 170m de flexão da coluna. Embora este resultado esteja abaixo do limite máximo da angulação da flex joint (Tab. 7.2), ele é considerado de grande magnitude. Vale ressaltar que o offset da plataforma, combinado com a flexão da coluna, seria um fator que contribuiria para a falha da coluna; entretanto, para efeitos desse estudo, o offset foi considerado como desprezível (i.e. plataforma perfeitamente posicionada sobre o poço).

A hipótese utilizada nessa simulação de representar a coluna de *risers* como uma estrutura bi-engastada é outro fator a ser considerado na análise dos resultados, uma vez que ao bi-engastar a coluna para simular uma TTR despreza-se o efeito da pré-tração. A tração em uma TTR, parâmetro crítico no desenho da coluna, contribui para diminuir a sua deformação, portanto, o resultado da simulação deve ser interpretado de forma qualitativa.

7.2

Tensão de Von-Mises

Abaixo encontra-se o resultado da análise de tensões de Von-Mises ao longo da coluna de *riser*. Observa-se que as tensões que apresentam maiores magnitudes se encontram perto da cabeça do poço e no topo da coluna. Pelo gráfico da figura 7.3 é possível verificar as tensões ao longo da profundidade, sendo os pontos máximos nas extremidades, decrescendo em um comportamento linear até aproximadamente a metade do comprimento da coluna. Abaixo encontram-se os valores máximos, mínimo e médio encontrados:

Máxima [Pa]	Média [Pa]	Mínima [Pa]
$1,68 \times 10^8$	$4,41 \times 10^7$	10945

Tabela 7.3: Cargas Aplicadas

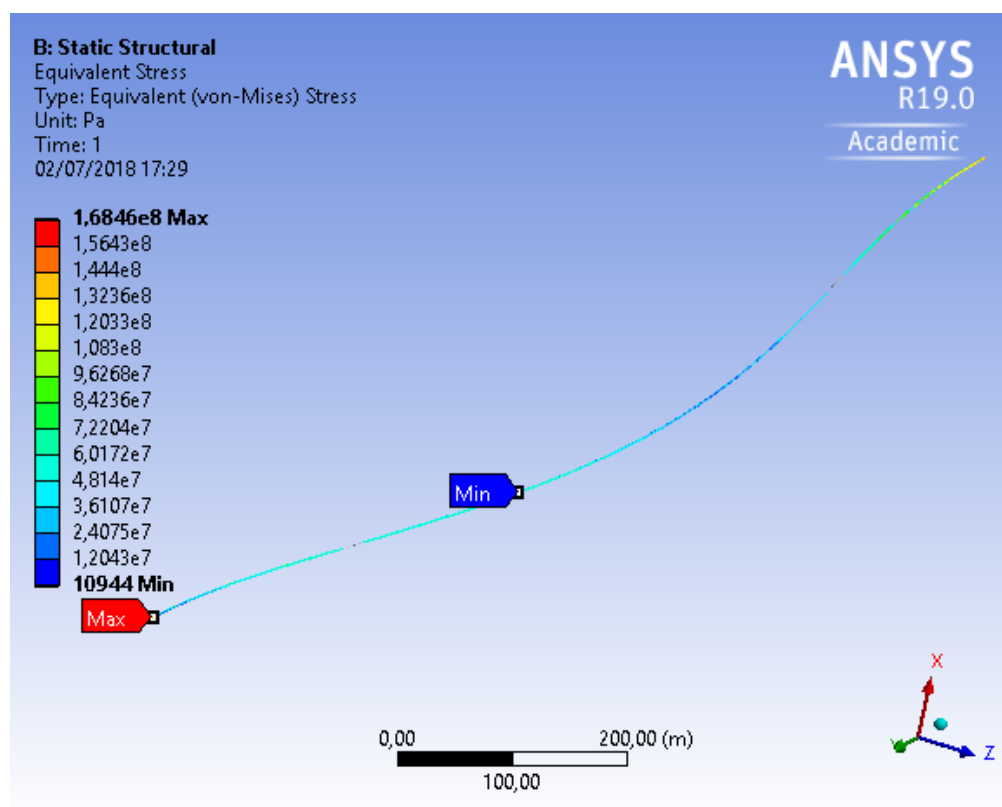


Figura 7.3: Resultado - Tensão Von-Mises

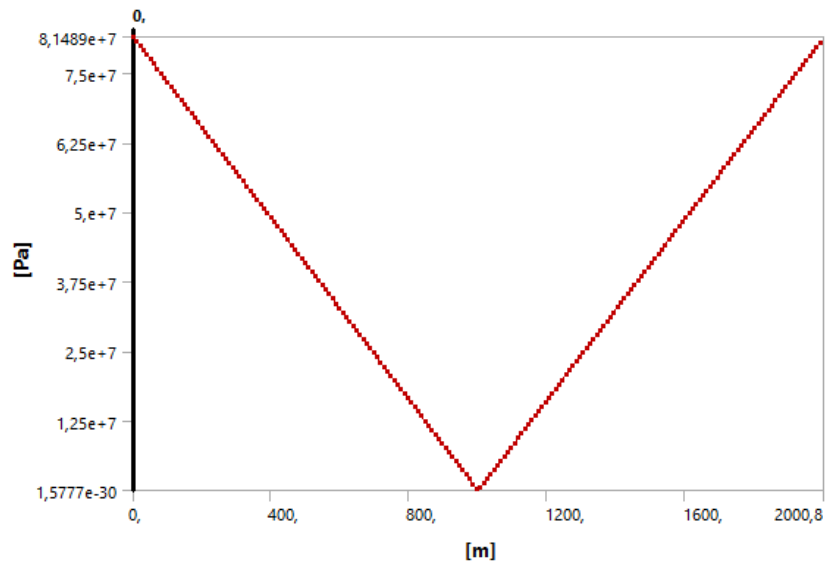


Figura 7.4: Gráfico Tensão por Profundidade

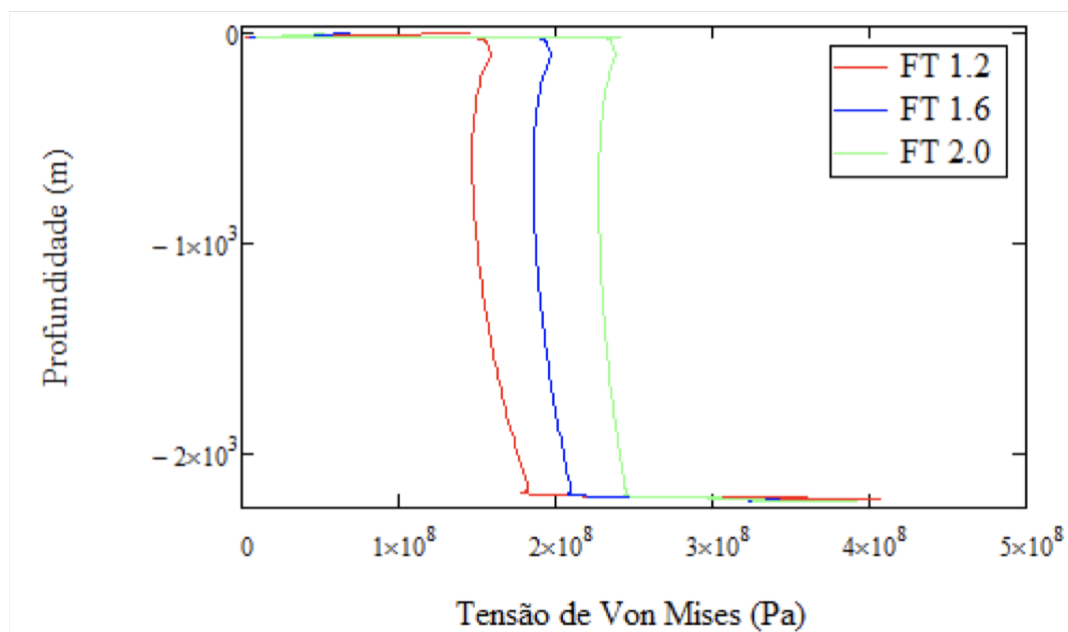


Figura 7.5: Gráfico Tensão por Profundidade [1].

Os resultados das tensões Von-Mises foram como o esperado. Em uma coluna de *risers* as tensões máximas sempre se encontram na cabeça do poço ou no topo da coluna, o que foi obtido neste estudo. O valor do limite de escoamento para o aço AISI 4130 é de 460 MPa [12] enquanto a tensão máxima obtida foi de 168 MPa. É importante constatar também que o valor da tensão na cabeça de poço não ultrapassou o limite do conector do BOP que é de

aproximadamente 4×10^8 Pa.

Apesar de os valores estarem coerentes, o comportamento das tensões ao longo da coluna também deve ser interpretado de forma qualitativa. Mais uma vez, devido à simulação bi-engastada e à falta do efeito de tração no topo da coluna os resultados das tensões de Von Mises também foram afetados.

Tomando como comparação o gráfico 7.5 pode-se observar o comportamento real das tensões ao longo da coluna. As tensões máximas se encontram nas extremidades, porém a queda da tensão ao longo da coluna não tem um comportamento linear como o obtido na simulação. O valor da tensão é praticamente mantido constante ao longo da profundidade, isto é devido ao efeito da tração aplicada pelos cabos tensionadores. Observa-se no gráfico que os diferentes resultados correspondem às Forças de Tração aplicadas (FT) distintas, sendo a FT 2.0 a maior tração. Assim verifica-se a relação entre as tensões e a força de tração.

8

Conclusão

Os *risers* são equipamentos com extrema importância para a exploração de petróleo. Devido às variadas condições operacionais e diversidade de cargas que este equipamento deve suportar, são feitas análises para estudar os limites estruturais e a melhor configuração da coluna para cada poço. A simulação presente neste estudo é uma das diversas análises feitas por companhias antes de iniciarem a perfuração de um poço de petróleo.

O método de elementos finitos provou ser adequado para o dimensionamento da coluna de *risers*. O software ANSYS 19.0 utilizado para as simulações, apesar de suas limitações, forneceu resultados qualitativa para a validação de uma estrutura deste tipo.

Para efeito de simulação, a coluna foi bi-engastada para representar o efeito de uma TTR com uma *slip joint* para compensar o movimento vertical. Porém, na realidade, isto não ocorre, o que causa um impacto nos resultados que precisa ser considerado, mas não invalida a análise. Portanto, para uma análise quantitativa, recomenda-se simular os esforços sujeitos aos efeitos da pré-tração utilizando programas próprios para análises de colunas de perfuração.

Adicionalmente, como continuidade, poderia ser realizado um estudo dinâmico e avaliar o tempo para a coluna atingir seu limite estrutural e, consequentemente, o valor do offset da plataforma neste caso.

Por fim, pode-se afirmar que o objetivo deste trabalho foi concluído com êxito. A simulação de uma coluna de *riser* rígido utilizando o método de elementos finitos no programa ANSYS forneceu uma análise de tensões e deformações válidas para este estudo.

Referências Bibliográficas

- [1] SILVA, VINÍCIUS RIBEIRO MACHADO DA SILVA. Análise global de riser rígido vertical tracionado no topo para Águas ultra profundas). Disponível em: www.monografias.poli.ufrj.br:Acesso em: 27.06.2018, Jun 2011.
- [2] WORLD ENERGY COUNCIL. World energy resource 2016. *24th Edition*, Disponível em: www.worldenergy.org:Acesso em: 09.04.2018, 2016.
- [3] LEGAULT, MICHAEL. Oil gas: Will the composite riser rise again? *CompositesWorld*, Disponível em: www.compositesworld.com:Acesso em: 10.04.2018, 16 Fev 2016.
- [4] PETROBRAS. Infográfico: Tipos de plataformas. *Petrobras*, Disponível em: www.petrobras.com:Acesso em: 12.04.2018.
- [5] LUCENA, AMANDA BRAZ. Risers - trabalho de introdução naval offshore. Disponível em: www.ebah.com:Acesso em: 16.04.2018, 2 Maio 2011.
- [6] BADIOLA, GABRIEL VIVACQUA. Análise local de duto flexível pelo método de elementos finitos. Disponível em: www.monografias.poli.ufrj.br:Acesso em: 16.04.2018, Mar 2016.
- [7] TANAKA, RAFAEL LOUREIRO. Otimização da configuração de risers rígidos. Disponível em: www.teses.usp.br:Acesso em: 16.04.2018, 2009.
- [8] ARESO. What is a blowout preventer? Disponível em: www.arescotx.com:Acesso em: 19.04.2018.
- [9] NEWAS GROUP OIL. Telescopi joint slip joint - drilling riser systems. Disponível em: www.tewasgroup.us:Acesso em: 01.05.2018, 2018.
- [10] MARQUES, FELIPE. Entenda de maneira simples como funciona um sistema de posicionamento dinâmico. *Grupo Portal Marítimo*, Disponível em: www.portalmaritimo.com:Acesso em: 01.05.2018, 17 Fev 2017.
- [11] MIRLISENNA, GIUSEPPE. Método de elementos finitos: O que é? *ESSS*, Disponível em: www.esss.com:Acesso em: 20.06.2018, 5 Mar 2018.
- [12] AZOM. Aisi 4130 alloy steel (uns g41300). *AZOM*, Disponível em: www.azom.com:Acesso em: 27.06.2018, 12 Nov 2012.

A

Cálculo do Módulo de Rigidez a Flexão

Para encontrar a rigidez de flexão (EI) de um riser primeiramente será encontrada seu momento de inércia (I). Para isso será considerado somente o tubo principal, assumindo que a flange não confere resistência mecânica ao equipamento.

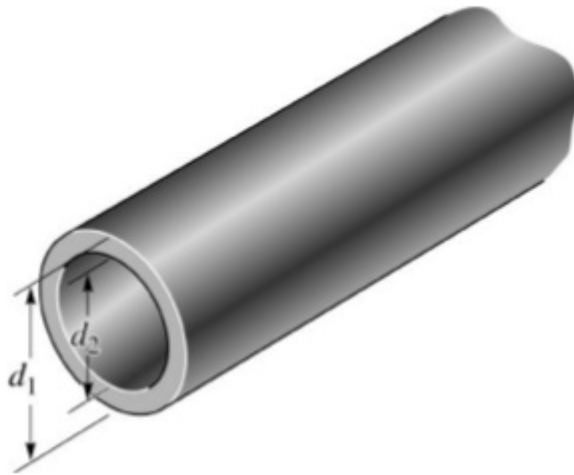


Figura A.1: Geometria Riser de Aço.

Diâmetro	SI	CI
Externo d_1	0.533 m	21"
Interno d_2	0.488 m	19.25"

Tabela A.1: Diâmetros do Riser de Aço Utilizados no Projeto.

Como a geometria considerada consiste em um tubo vazado será considerado a seção transversal como uma seção circular. Assim pode-se tomar que:

$$I_o = \frac{\pi D^4}{64} \quad (\text{A-1})$$

Portanto, considerando a seção vazada:

$$I = \frac{\pi d_1^4}{64} - \frac{\pi d_2^4}{64} \quad (\text{A-2})$$

Substituindo os valores encontrados na tabela:

$$I=6.6 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Considerando o material do tubo principal sendo Aço AISI 4130, que possui um módulo de elasticidade (E) de 205GPa é possível obter o módulo de rigidez a flexão:

$$EI=1.353 \times 10^8 \text{ Nm}^2$$