

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

CAMILA MORI DE OLIVEIRA

ANÁLISE PARAMÉTRICA DO PROJETO BIDIMENSIONAL DE PLATAFORMAS  
OFFSHORE DO TIPO JAQUETA BASEADO EM TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E  
ELEMENTOS FINITOS

Joinville  
2017

CAMILA MORI DE OLIVEIRA

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DO PROJETO BIDIMENSIONAL DE PLATAFORMAS  
OFFSHORE DO TIPO JAQUETA BASEADO EM TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E  
ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Naval no curso de  
Engenharia Naval da Universidade Federal de  
Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville  
2017

CAMILA MORI DE OLIVEIRA

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DO PROJETO BIDIMENSIONAL DE  
PLATAFORMAS OFFSHORE DO TIPO JAQUETA BASEADO EM  
TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E ELEMENTOS FINITOS**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Naval e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 30 de novembro de 2017.

---

Prof. Luís Fernando Peres Calil, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Coordenador do Curso

**Banca examinadora:**

---

Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi,  
Orientador

---

M. Eng. Vítor Takashi Endo  
Membro

---

Dr. Eng. Marcos Alves Rabelo  
Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, eu gostaria de agradecer ao meu orientador Dr. Thiago Pontin Tancredi, pela oportunidade de trabalhar num tema no qual eu aprecio; pela paciência e dedicação; por compartilhar seus conhecimentos comigo; por seus conselhos e ajuda não somente durante o desenvolvimento deste trabalho, mas durante toda a graduação.

Ao meu pai Paulo (in memoriam), pessoa que me motivou nos momentos mais difíceis a continuar seguindo em frente e será pra sempre minha inspiração.

À minha mãe Maria Inês e ao meu irmão Paulo, por todo incentivo durante esse trabalho e pela paciência e carinho imensurável que me deram durante toda minha vida.

Por fim, eu gostaria de agradecer meus amigos André Luiz Artmann, Andressa Beckert Otto, Suélen Detofol, Gabrielle Pimenta por terem me dado suporte durante todos esses anos de percurso até aqui.

## RESUMO

As primeiras plataformas de petróleo em alto mar datam do início do século XX e eram fixas ao solo por meio de estruturas treliçadas denominadas jaquetas. No contexto atual, a sustentabilidade tornou-se uma das preocupações centrais acerca das políticas energéticas governamentais, o que faz com que muitas empresas busquem investir em energias renováveis. Assim, na busca por energia limpa, um papel proeminente é reservado para a energia eólica, em especial aquela gerada em alto mar. Visto que as plataformas de petróleo do tipo jaqueta já possuem uma estrutura fixa ao leito marinho, projetos como turbinas eólicas podem ser estudados e aplicados nessas plataformas a fim de auxiliar na produção desta modalidade de energia. O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre a otimização dos parâmetros que definem uma estrutura treliçada de aço em função da profundidade da lâmina d'água do local de instalação. O procedimento proposto envolve uma análise estrutural utilizando o método dos elementos finitos, bem como a utilização de técnicas de otimização baseadas no algoritmo genético NSGA2, para definir os parâmetros que minimizam a massa da estrutura. Os resultados apresentados verificam a variação no valor da largura da base, do número de reforços transversais, do diâmetro interno e externo dos elementos tubulares que constituem o projeto, além de verificar a influência das restrições de escoamento e de flambagem na solução otimizada do projeto.

**Palavras-chave:** Jaqueta, otimização, lâmina d'água, treliça, elementos finitos.

## ABSTRACT

The first offshore oil platforms are dated from the early twentieth century and were fixed to the seabed by a truss structure known for jackets. Nowadays sustainability has become one of the biggest concerns around government energy policies which make many companies to invest in renewable energy. Thus, in the search for green energy, wind energy has a big role, especially the one generated in offshore fields. Since the jacket offshore platforms have already a fixed structure in the seabed, projects such as wind turbines can be studied and applied to these platforms, helping in the production of this type of energy. This work aims to present a study on the optimization of the parameters that define a steel jacket structure depending on the water depth of the installation site. The procedure involves a structural analysis using the finite element method as well as the use of optimization techniques based on the generic algorithm NSGA2 to define the parameters that minimize the mass of the structure. The presented results verified the variation in the value of the base width, the number of transversal reinforcement, the internal and external diameter of the tubular elements, which constitute the project, in addition to verifying the influence of yield and buckling restrictions on the optimized project solution.

**Keywords:** Jacket, optimization, water depth, truss, finite element.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Plataforma de Mexilhão sendo transferida para a sua locação definitiva.....	12
Figura 2: Evolução da energia eólica no Brasil.....	13
Figura 3: Estruturas de apoio para torres eólicas em alto mar.....	14
Figura 4: Tipos de plataformas.....	17
Figura 5: Esquema de uma plataforma fixa do tipo jaqueta.....	18
Figura 6: Parque eólico no Ceará.....	20
Figura 7: Componentes turbina eólica.....	21
Figura 8: tipos de subestrutura (da esquerda para direita: Fixa de Gravidade, Monopile, Tripile, Jaqueta, e Flutuante).....	22
Figura 9: Esquema representando as os carregamentos atuantes numa plataforma fixa.....	23
Figura 10: Coluna com extremidades articuladas sob compressão de carga crítica.....	27
Figura 11: Exemplo de uma plataforma discretizada.....	30
Figura 12: Elemento de treliça.....	31
Figura 13: Elemento de viga.....	32
Figura 14: Fluxograma de desenvolvimento das etapas do trabalho.....	35
Figura 15: Exemplo variáveis de entrada do algoritmo Matlab.....	37
Figura 16: Modelo de uma plataforma gerada pelo algoritmo MatLab.....	38
Figura 17: Diferentes arranjos geométricos gerados pelo algoritmo Matlab.....	38
Figura 18: Condições de contorno.....	39
Figura 19: Esquema ilustrativo do modelo da plataforma e de seus elementos.....	40
Figura 20: Resultado tensão máxima – Modelo de treliça.....	41
Figura 21: Resultado tensão máxima – Modelo de viga.....	41
Figura 22: Análise de convergência de malha para o modelo com elementos do tipo viga.....	43
Figura 23: Projeto modeFrontier com restrição de escoamento e de flambagem.....	45
Figura 24: Otimização do raio externo em função do número de reforçadores, considerando a restrição de escoamento.....	47
Figura 25: Otimização do raio externo em função do raio interno, considerando a restrição de escoamento.....	48
Figura 26: Otimização do raio externo em função do comprimento da base inferior, considerando a restrição de escoamento.....	48
Figura 27: Otimização do raio externo em função do número de reforçadores, considerando a restrição de flambagem.....	49

Figura 28: Otimização do raio externo em função do raio interno, considerando a restrição de flambagem .....	50
Figura 29: Otimização do raio externo em função do comprimento da base inferior, considerando a restrição de flambagem.....	50
Figura 30: Variação da massa em função da lâmina d'água de acordo com o raio interno .....	52
Figura 31: Gráficos de critérios de falha em função do número de reforçadores .....	53
Figura 32: Otimização do raio externo em função do número de reforçadores, considerando as duas restrições de falha.....	53
Figura 33: Nova otimização do raio externo em função do número de reforçadores .....	54
Figura 34: Otimização do raio externo em função do raio interno, considerando as duas restrições de falha .....	55
Figura 35: Otimização do raio externo em função do raio interno, considerando as duas restrições de falha .....	55
Figura 36: Otimização do raio externo em função da base inferior, considerando as duas restrições de falha .....	56
Figura 37: Otimização do raio externo em função do comprimento da base, considerando as duas restrições de falha.....	57
Figura 38: Otimização do raio externo e da base em função do raio interno .....	58
Figura 39: Diagrama tensão-deformação para o aço (não está em escala).....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de subestrutura pra plataformas eólicas .....	22
Tabela 2 - Propriedades usadas no cálculo das forças hidrodinâmicas .....	25
Tabela 3 - Propriedades usadas no cálculo da força do vento .....	25
Tabela 4 - Classificação dos aços de acordo com a tensão de escoamento.....	26
Tabela 5 - Elementos que constituem um procedimento de otimização .....	33
Tabela 6: Sistemas de unidades utilizados para as propriedades no Abaqus .....	40
Tabela 7 – Resultados de tensões para cada elemento da plataforma .....	42
Tabela 8 - Resultados de tensão principal máxima e de massa para cada modelo.....	42
Tabela 9: Características dos parâmetros utilizados no processo de otimização .....	46
Tabela 10 – Resultados comparativos da massa quando se reduz o número de reforçadores..	47
Tabela 11: Comparação de resultados de análises com e sem força axial .....	51
Tabela 12: Comparação da massa calculada para diferentes casos de ri e N .....	54
Tabela 13 – Resultados de 10 diferentes arranjos para lâmina d'água igual à 84m.....	59
Tabela 14 - Resultados de 10 diferentes arranjos para lâmina d'água igual à 114m .....	59
Tabela 15 - Resultados de 10 diferentes arranjos para lâmina d'água igual à 226m .....	60
Tabela 16 - Resultados de 10 diferentes arranjos para lâmina d'água igual à 305m .....	60
Tabela 17: Comparação dos resultados de otimização .....	61

## SUMÁRIO

Lista de figuras .....	7
Lista de tabelas .....	9
1. Introdução.....	12
1.1. Objetivos.....	15
1.2. Organização do relatório.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
2.1. Plataformas petrolíferas .....	17
2.2. Energia eólica .....	19
2.3. Turbina eólica .....	20
2.4. Subestruturas.....	21
2.5. Cargas atuantes .....	23
2.5.1. Cargas permanentes .....	24
2.5.2. Cargas hidrodinâmicas .....	24
2.5.3. Cargas devido ao vento.....	25
2.6. Modos de falha.....	26
2.6.1. Escoamento.....	26
2.6.2. Flambagem .....	27
2.7. Método dos elementos finitos .....	29
2.7.1. MEF aplicado em elementos de treliças .....	31
2.7.2. MEF aplicado em elementos de viga.....	31
2.8. Otimização .....	32
2.9. Algoritmos genéticos .....	34
3. METODOLOGIA.....	35
4. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO MODELO .....	37
4.1. Ferramenta de análise desenvolvida no MatLab.....	37
4.2. Comparação dos resultados .....	40

5.	ANÁLISE PARAMÉTRICA ESTRUTURAL .....	44
5.1.	Modelo de Otimização .....	44
5.2.	Análise de Escoamento .....	46
5.2.1.	Número de reforçadores transversais .....	46
5.2.2.	Raio interno .....	47
5.2.3.	Base inferior .....	48
5.3.	Análise de Flambagem.....	49
5.3.1.	Número de reforçadores transversais .....	49
5.3.2.	Raio interno .....	49
5.3.3.	Base inferior .....	50
5.4.	Análise considerando as duas restrições de falha .....	51
5.4.1.	Número de reforçadores transversais .....	52
5.4.2.	Raio interno .....	54
5.4.3.	Base inferior .....	56
6.	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	58
6.1.	Análise preliminar.....	58
6.2.	Otimização global .....	59
	Comparação dos Resultados.....	60
7.	CONCLUSÃO.....	62
	REFERÊNCIAS .....	64
	APÊNDICE A .....	66
	• Região elástica .....	66
	APÊNDICE B.....	67

## 1. INTRODUÇÃO

Uma plataforma em alto mar é uma grande estrutura usada na perfuração de poços para a extração de petróleo e/ou gás natural cujas reservas se localizam abaixo do leito marinho.

A primeira operação de perfuração de petróleo em alto mar foi estabelecida em 1938 no Golfo do México. Atualmente, as plataformas existem em várias formas e tamanhos, dependendo de muitos parâmetros diferentes. Esses parâmetros incluem: profundidade da água, tamanho do reservatório de óleo, taxa de produção, condições ambientais, etc. (AMORIM, 2010).

As primeiras descobertas das jazidas de petróleo no mar foram em águas rasas, contribuindo para o desenvolvimento e popularidade das plataformas fixas. Geralmente as plataformas fixas são constituídas de estruturas modulares de aço, instaladas no local de operação sob estruturas chamadas jaquetas, fixas com estacas cravadas no leito marinho. No Brasil, a maior estrutura metálica construída foi a Plataforma de Mexilhão (Figura 1), instalada em uma lâmina d'água de 172 metros. (Portal Met@lica, 2010).

E mesmo com toda crise no setor de petróleo e gás, houve muito investimento para inovar os projetos e atender os desafios tecnológicos para exploração do petróleo em águas profundas e ultra profundas (AMORIM, 2010).

Figura 1: Plataforma de Mexilhão sendo transferida para a sua locação definitiva



Fonte: Portal Met@lica (2010)

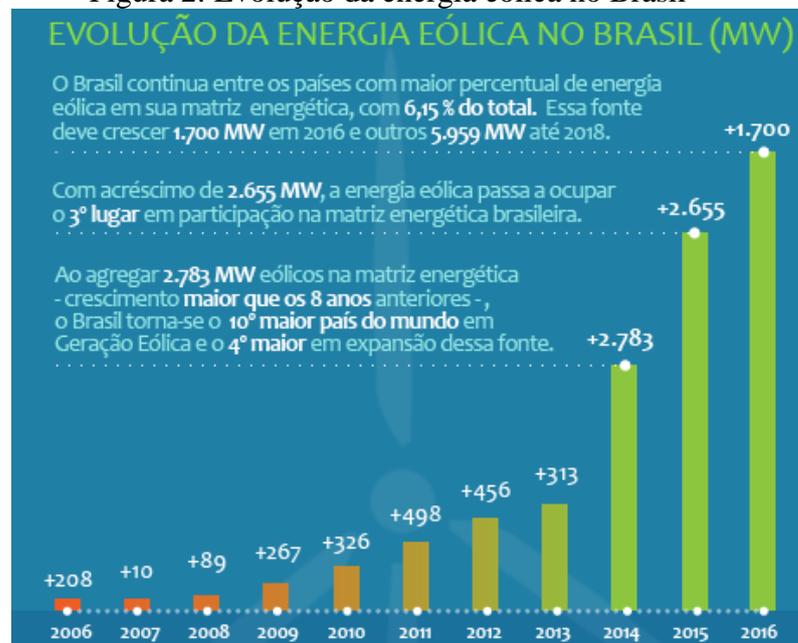
No contexto de sustentabilidade em que vivemos, muitas pessoas opõem-se à prospecção de petróleo, devido a preocupações do impacto dessa operação ao meio ambiente. Assim, diversos países estão investindo em projetos que utilizam as fontes de energia limpa. (GERVEN, 2011)

Energia limpa refere-se àquela fonte de energia renovável, ou seja, que não lança poluentes na atmosfera e que apresenta um impacto ambiental somente no seu local de instalação. A energia eólica é um dos pilares da filosofia da energia sustentável, pois é considerada a energia mais limpa do planeta, diante das energias tradicionais e mesmo em comparação com outros tipos de energias renováveis (solar, maremotriz, biomassa) (FRANCISCO, 2016).

Mesmo sendo uma fonte de energia que não polui e é renovável, não significa que o impacto ambiental seja nulo: impacto sonoro, visual e sobre a fauna (choque de pássaros com as pás). Porém, essas desvantagens são superadas quando se fala em suas vantagens: disponível em diversos lugares, inesgotável, reduz a contaminação causada pela queima dos combustíveis fósseis e possui excelente rentabilidade do investimento (FRANCISCO, 2016).

No Brasil, a adoção da energia eólica segue uma tendência de crescimento significativa. Segundo a ANEEL (2016), o país já está entre os maiores produtores de energia eólica e a expectativa é que a expansão avance nos próximos anos.

Figura 2: Evolução da energia eólica no Brasil



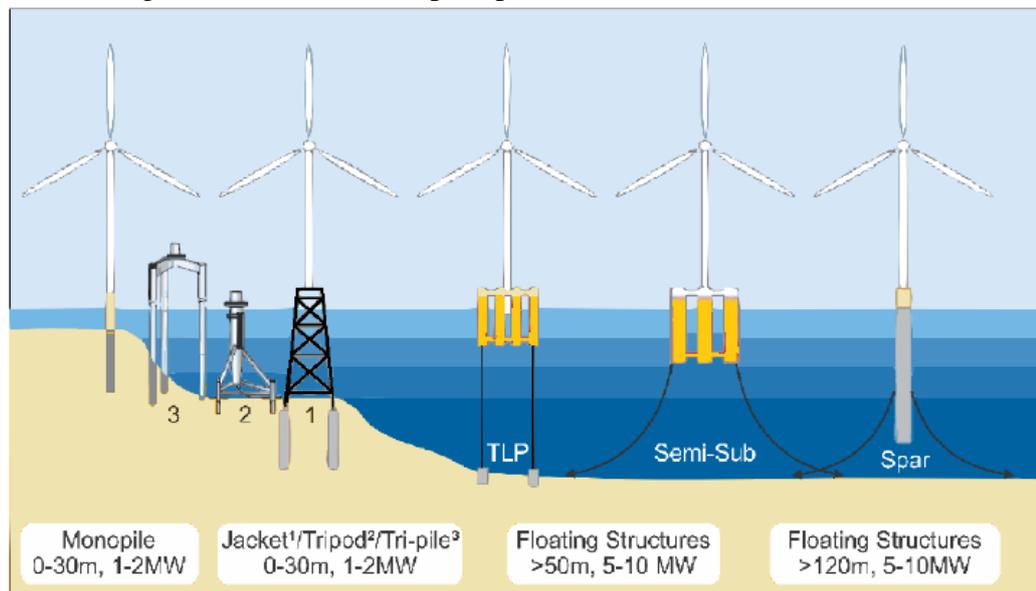
Fonte: ANEEL (2016)

A exploração de energia eólica em alto mar representa uma promissora oportunidade para diversos países devido aos seus aspectos atrativos como maior densidade de potência, disponibilidade de grandes áreas, menos ruído e poluição visual. Pensando nisso, governos de todo o mundo estão investindo e incorporando no planejamento energético. Além de países europeus que são líderes do mercado, a China fixou uma meta de 30GW em instalações eólicas offshore até 2020 (SILVA, 2015).

A incidência de ventos nas pás da estrutura promove momentos fletores que muito solicitam a estrutura da plataforma. Além disso, a movimentação de uma estrutura flutuante pode resultar em graves problemas associados à estabilidade da plataforma. Nesse caso, estruturas fixas, instaladas em águas abrigadas representam um excelente opção para a instalação desses sistemas.

Para consolidar a energia eólica como alternativa mais rentável de geração elétrica, além dos incentivos políticos, outras reduções de custos devem ser alcançadas para competir em igualdade de condições com outras fontes de energia. O que demonstra uma necessidade no investimento tecnológico para redução no custo total de fabricação.

Figura 3: Estruturas de apoio para torres eólicas em alto mar



Fonte: SILVA (2015)

Sabendo da alta quantidade de aço utilizado no projeto de uma plataforma fixa para operação em mar aberto, o custo desse material representa uma parcela significativa do custo total de construção da instalação.

A grande motivação deste trabalho é a carência de estudos relacionados à plataforma fixa nas universidades no Brasil, em especial no tocante à redução do peso estrutural. Apesar de o país possuir vasta tradição e possuir uma alta tecnologia e conhecimento na produção em alto mar, o foco dos trabalhos nacionais está principalmente relacionado com a indústria petrolífera.

Com o intuito de minimizar custos de fabricação e também de reduzir o tempo de desenvolvimento, este trabalho propõe um procedimento para o projeto otimizado de uma estrutura do tipo jaqueta visando à minimização da massa estrutural. O trabalho visa oferecer uma análise da influência dos parâmetros que descrevem a estrutura em função da lâmina d'água.

No processo de análise para busca de melhorias, um algoritmo baseado no método dos elementos finitos é utilizado para avaliar o efeito dos parâmetros sobre a integridade da estrutura.

### **1.1. Objetivos**

O objetivo geral consiste em apresentar um procedimento de análise do dimensionamento estrutural de uma plataforma do tipo jaqueta com o objetivo de minimizar a massa da estrutura, atendendo as restrições de integridade estrutural no projeto.

Para alcançar esse objetivo, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- ✓ Caracterizar o arranjo estrutural de uma plataforma do tipo jaqueta; Definir os tipos de esforços a serem aplicados na estrutura;
- ✓ Estabelecer um algoritmo para a análise simplificada de estruturas do tipo jaqueta usando o método dos elementos finitos;
- ✓ Realizar estudos de caso a fim de verificar o algoritmo de análise desenvolvido;
- ✓ Definir as variáveis de entrada, funções objetivo e restrições do problema de otimização associado ao projeto de plataformas do tipo jaqueta;
- ✓ Aplicar técnicas de otimização para a análise paramétrica da estrutura ótima em função de diferentes lâminas d'água de projeto;
- ✓ Analisar e discutir os resultados.

## 1.2. Organização do relatório

O presente trabalho está estruturado em 7 capítulos, assim organizados:

- No *Capítulo 1* é apresentada a introdução e a motivação deste trabalho.
- No *Capítulo 2* é apresentada a fundamentação teórica necessária para substanciar o desenvolvimento realizado, além de apresentar um histórico da plataforma em alto mar, a importância de seu estudo e suas aplicações.
- No *Capítulo 3* encontra-se a descrição da metodologia utilizada e as ferramentas utilizadas na realização do trabalho.
- No *Capítulo 4* é feita a validação da ferramenta de análise desenvolvida, a qual é baseada no método dos elementos finitos.
- O *Capítulo 5* apresenta uma análise paramétrica da estrutura em função da lâmina d'água de projeto.
- No *capítulo 6*, apresentado um procedimento de otimização global considerando a variação simultânea de todos os parâmetros do projeto.
- Por fim, no *capítulo 7*, apresentam-se as conclusões sobre os resultados obtidos e recomendações para trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

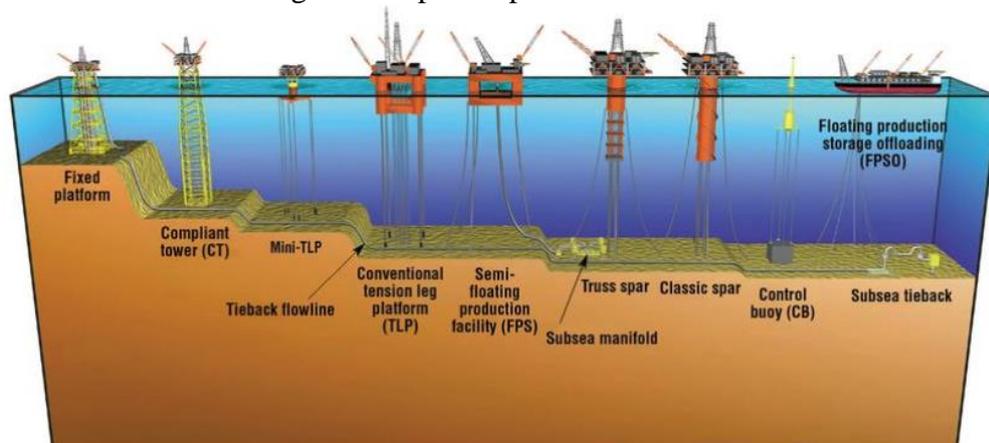
Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que substanciam o desenvolvimento proposto, bem como auxiliam no estabelecimento da metodologia a ser utilizada.

### 2.1. Plataformas petrolíferas

As plataformas petrolíferas são instalações onde os hidrocarbonetos (óleo e/ou gás) emergem do poço, são processados, separados ou simplesmente transportados.

Uma plataforma em alto mar é uma estrutura sem acesso via terrestre e que pode ser classificada como plataforma fixa (quando é rigidamente conectada ao leito marinho) ou flutuante (Figura 4).

Figura 4: Tipos de plataformas



Fonte: EL-MOHR

Amorim (2010) define as plataformas flutuantes como estruturas complacentes instaladas através de um sistema de ancoragem ou de posicionamento dinâmico. Conforme visto na Figura 4, existem vários tipos de unidades flutuantes: semi-submersíveis, o FPSO (Floating Production Storage Offloading), a TLP (Tension Leg Platform) e a SPAR.

A seleção do tipo de plataforma envolve diversos fatores, tais como capacidade do poço, lâmina d'água e as características do mar na região de instalação. Uma discussão mais profunda sobre esse processo foge ao escopo deste trabalho, mas pode ser encontrada em diversas publicações, tais como Neves (2015).

As plataformas fixas foram as primeiras plataformas oceânicas a serem desenvolvidas e as mais comumente utilizadas. São caracterizadas por estarem apoiadas diretamente no solo marinho e compreendem dois tipos: a do tipo jaqueta e plataforma fixa de gravidade. Sua principal limitação é a lâmina d'água pequena a ser instalada, em torno de 400 metros, pois a estrutura tende a ser muito esbelta e os seus períodos naturais se aproximam dos períodos das ondas ou de seus harmônicos, necessitando aumentar a rigidez da estrutura, o que implica em aumento considerável de peso e custo (AMORIM, 2010).

Silva (2014) define jaqueta como o elemento estrutural de suporte de uma plataforma fixa, que vai desde a fundação até pouco acima do nível do mar. Nela é instalada uma superestrutura que contém convés e módulos (onde localizam todos os equipamentos de perfuração, geração de energia elétrica, estocagem de materiais, alojamento da tripulação, bem como todas as instalações necessárias para a produção dos poços), como mostrado na Figura 4.

Figura 5: Esquema de uma plataforma fixa do tipo jaqueta



Fonte: SILVA (2014)

As jaquetas são estruturas treliçadas compostas de elementos tubulares de aço unidos por juntas soldadas. São projetados em tubos circulares buscando a minimização das forças hidrodinâmicas quando comparados aos membros tubulares de seção quadrada ou retangular. Os elementos das barras são submetidos predominantemente a esforços axiais de tração ou

compressão e são estruturas com grande capacidade de redistribuir os esforços internos após a falha de algum elemento estrutural SILVA (2014).

O projeto estrutural de uma plataforma é complexo e exige a competência de diferentes áreas da engenharia. O parâmetro da profundidade da lâmina d'água influencia decisivamente nas dimensões da jaqueta, métodos de construção e lançamento.

## **2.2. Energia eólica**

O petróleo é a principal fonte de energia mundial. Mas a tendência é que esses recursos, tão valorizados, tornem-se cada vez mais caros e escassos. Seja para substituir o petróleo como para suprir o crescimento da demanda por energia, as grandes nações estão investindo em fontes limpas e renováveis como: energia solar, a energia eólica, a energia das marés e o biodiesel (PERES, 2009).

A energia eólica, considerada uma das fontes mais limpas de energia, é que mais vem crescendo no Brasil e no mundo. Desde os primórdios da história, as pessoas aproveitaram a energia do vento. Os egípcios foram os primeiros a fazer uso prático do vento para ajudar na navegação dos navios no rio Nilo. Mais tarde, surgiram moinhos de vento para moer trigo e outros grãos (PIRES, 2016).

Segundo Pires (2016), a geração de eletricidade pelo vento começou na primeira metade do século XX na Dinamarca. E com a crise do petróleo na década de 1970, a visão de energia para os EUA e para o mundo mudou. Criou-se um interesse em fontes alternativas de energia, preparando o caminho para a reentrada da turbina eólica como importante elemento na geração de energia elétrica.

No âmbito nacional, a região Nordeste é a que mais gera energia eólica no Brasil, sendo o Rio Grande do Norte, o Ceará (Figura 6), e a Bahia os estados que mais produzem esse tipo de energia (NARLLA, 2013).

Figura 6: Parque eólico no Ceará



Fonte: NARLLA (2013).

Atualmente, a geração da energia eólica em terra firme encontra-se bastante reduzida, devido às restrições ambientais e à aceitação pública limitada, e desta forma, a exploração dos recursos eólicos no mar pode tornar-se crucial para proporcionar futuras necessidades de energia sustentável. Existem diversos locais em alto mar disponíveis e que possuem melhores propriedades de vento, tornando-os mais apropriados e eficientes para geração de energia (GERVEN, 2011).

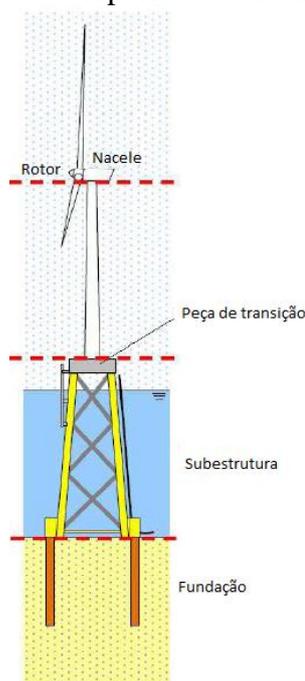
Um parque de vento em alto mar consiste de múltiplas turbinas eólicas, uma estação de transformadores e uma infraestrutura subaquática para o transporte e exportação da energia produzida. Segundo Gerven (2011), o desempenho dos parques eólicos melhora muito em águas mais profundas, onde os ventos são mais fortes e mais estáveis, no entanto exigem plataformas mais complexas e caras.

O mercado eólico em alto mar é relativamente novo, mas é um negócio que se desenvolve rapidamente, movimentando grandes quantidades de dinheiro em investimentos e pesquisas.

### **2.3. Turbina eólica**

Segundo mostrado na Figura 7 e descrito por Gerven (2011), uma turbina eólica em alto mar é constituída pelos componentes principais a seguir: rotor e nacele, torre, subestrutura, fundação e opcionalmente por uma peça de transição.

Figura 7: Componentes turbina eólica



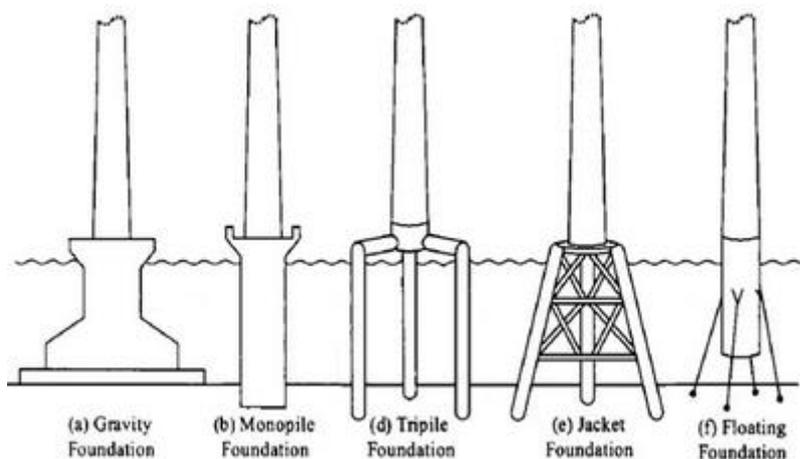
Fonte: Autora (2017)

O conjunto rotor e nacele tem a função de captar energia cinética dos ventos e convertê-la em energia mecânica. A torre é o elemento que sustenta o rotor e a nacele na altura apropriada para o funcionamento. A subestrutura é o segmento embaixo da torre, sendo que a maior parte encontra-se submersa, com apenas uma pequena parte acima d'água. A fundação é o elemento da estrutura que está em contato direto com o fundo do mar. A subestrutura é conectada à torre pela peça de transição que é responsável pela transferência de cargas da torre para a subestrutura. (GERVEN, 2011)

#### 2.4. Subestruturas

São conhecidos e analisados vários conceitos de subestrutura. Segundo Júnior (2014), esses conceitos podem ser divididos em cinco categorias principais, as quais são mostradas na Figura 8 e detalhadas na Tabela 1.

Figura 8: tipos de subestrutura (da esquerda para direita: Fixa de Gravidade, Monopile, Tripile, Jaqueta, e Flutuante)



Fonte: EL-MOHR

Tabela 1 - Tipos de subestrutura pra plataformas eólicas

Monopile	Consiste num único tubo de aço, cilíndrico, enterrado no fundo do mar. As cargas verticais podem ser facilmente transferidas para o solo através de atrito de parede e resistência de ponta. As cargas laterais, em comparação muito maiores, são transportadas para a base através da flexão. Para proporcionar rigidez suficiente, o diâmetro da base pilar deve ser suficientemente grande. Para águas mais profundas, os requisitos de rigidez e frequência natural resultarão em diâmetros tão grandes que será impossível fabricar tal estrutura.
Tripile	São estruturas com três pilares, feitos de aço, e podem ser verticais ou inclinadas. Estão conectados a um tubo principal que serve de peça transicional para a torre da turbina, criando assim uma estrutura mais rígida e estável, o que possibilita a instalação da turbina em águas mais profundas.
Jaqueta	Esta é composta por três ou quatro pernas principais e vários tubos de menor diâmetro soldados entre elas. Por ser mais larga, a base junto ao leito marinho oferece uma grande resistência á flexão causada por cargas laterais.
Fixa de Gravidade	Não necessita de fundações, pois faz uso do seu elevado peso para vencer as forças hidrodinâmicas e fixar-se assim ao solo e dar à turbina a estabilidade que esta necessita. Como requer uma massa grande, geralmente é feito de concreto, em virtude do menor custo em relação ao aço.
Flutuante	São plataformas flutuantes que são ancoradas no fundo do mar. Apesar de ser muito usada na indústria petrolífera a sua adaptação à indústria eólica vem ganhando espaço, pois podem ser localizadas em zonas de grande profundidade e afastadas da costa.

Fonte: Tabela a partir de (GERVEN, 2011)

O tipo de subestrutura tem comportamento diferente para várias profundidades de lâminas d'água. Segundo Gerven (2011), o conceito de monopile é considerado o menos adequado para águas mais profundas, sendo viável para lâminas d'água de até 30 metros de profundidade.

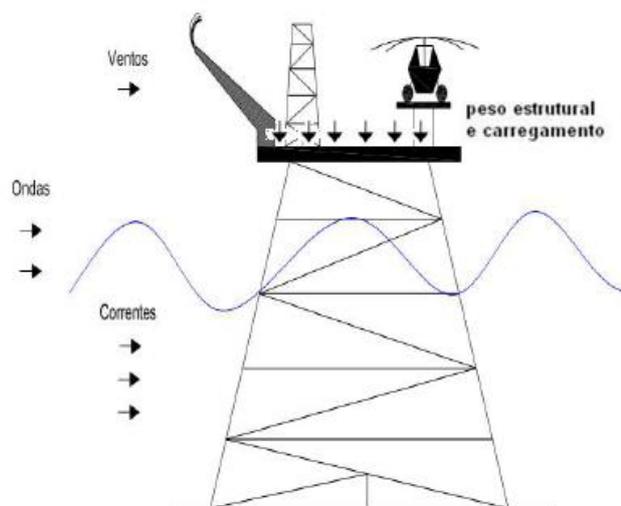
A subestrutura do tipo jaqueta é adequada para várias profundidades devido à estrutura transparente e à sua capacidade de transferir as forças principalmente de forma axial. Entretanto, sua desvantagem é o grande número de juntas soldadas. Portanto, em águas rasas não é tão rentável quanto o monopile (GERVEN, 2011).

Ainda segundo Gerven (2011), o tripé é visto como uma boa solução para a profundidade de águas entre 30 e 60 metros, pois pode ser visto como uma solução intermediária entre o monopile e a jaqueta. Por fim, as subestruturas do tipo flutuantes tem o melhor desempenho em águas profundas, porque não dependem da profundidade da água e das condições do solo para serem instaladas.

## 2.5. Cargas atuantes

No projeto de uma plataforma em alto mar devem ser consideradas dois tipos de cargas: as cargas permanentes (o peso próprio da estrutura e do convés) e as cargas devido a ondas, ventos e correntes marinhas, como mostradas na Figura 9. A seguir tais forças serão melhor discutidas.

Figura 9: Esquema representando as os carregamentos atuantes numa plataforma fixa



Fonte: Adaptado de SILVA (2014)

### 2.5.1. Cargas permanentes

Além do peso devido aos equipamentos instalados no convés, as forças gravitacionais agem em todos os elementos que compõem a estrutura da plataforma. Uma maneira analítica de calcular a massa por elemento é a partir do seu volume ( $V_{elem}$ ):

$$m_{elem} = \rho_{material} \times V_{elem} \quad (1)$$

Onde  $\rho_{material}$  representa a densidade do material utilizado, em geral aço. Usando a massa, o peso da estrutura é calculado através da equação (2):

$$P_{total} = g \times \sum m_{elem} \quad (2)$$

Onde “g” representa a aceleração da gravidade.

É importante observar que existem duas abordagens para considerar o efeito das forças gravitacionais na estrutura da plataforma. Na primeira, a força peso total é considerada como atuante diretamente no centro de gravidade da estrutura. Já na segunda, mais realista, a força peso de cada elemento é aplicada ao centro de massa de cada um dos elementos da estrutura.

### 2.5.2. Cargas hidrodinâmicas

O carregamento induzido por onda é decorrente das ações das forças inerciais e das forças de arrasto. No caso de estruturas cilíndricas esbeltas, as principais forças hidrodinâmicas que atuam em uma estrutura são as forças de arrasto. O método usual para o cálculo das forças foi proposto primeiramente por Morison, representada pela equação (3), é empregue para a determinação da força hidrodinâmica resultante da velocidade e aceleração do fluido sobre os elementos estruturais (NORSOK, 2007):

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D |u|u + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \dot{u} \quad (3)$$

Onde  $\rho$  representa a massa específica da água e “D” representa o diâmetro do cilindro. Os coeficientes  $C_D$  e  $C_M$  são conhecidos respectivamente como coeficiente de atrito e de inércia e os valores definidos pela NORSOK N-003 são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades usadas no cálculo das forças hidrodinâmicas

Propriedade	Símbolo	Valor
Massa específica	$\rho$	1.025 [ton/m <sup>3</sup> ]
Coeficiente de atrito	$C_D$	0.65
Coeficiente de inércia	$C_M$	1.6

Fonte: Autora (2017).

### 2.5.3. Cargas devido ao vento

De maneira análoga às forças hidrodinâmicas, as forças causadas pela ação do vento podem ser estimadas a partir da equação 4 proposta em Norsok (2007), e cujos valores recomendados são apresentados na Tabela 3

$$F_{vento} = \frac{\rho_{ar}}{2} C_s V^2 A \quad (4)$$

Onde:

$\rho_{ar}$ : densidade do ar;

$C_s$ : Coeficiente de arrasto;

V: velocidade do vento no centro dos esforços aerodinâmicos acima d'água (m/s);

A: Área projetada do objeto (mm<sup>2</sup>).

Tabela 3 - Propriedades usadas no cálculo da força do vento

Propriedade	Símbolo	Valor
Massa específica	$\rho_{ar}$	1.3 [kg/m <sup>3</sup> ]
Coeficiente de forma	$C_s$	0.5
Velocidade do vento	$V^1$	24.83 [m/s]

Fonte: Autora (2017)

<sup>1</sup> Velocidade do vento correspondente a um vento centenário

## 2.6. Modos de falha

A resistência dos materiais estuda os efeitos das forças e momentos atuantes numa estrutura com o objetivo de verificar potenciais modos de falha que possam levar ao colapso da estrutura.

A análise estrutural é uma etapa vital em um projeto de engenharia pois visa verificar se os níveis de tensão e deformação que o material pode suportar estão dentro dos limites admissíveis. Esta propriedade é inerente ao próprio material e deve ser determinada por métodos experimentais (HIBBELER, 2010).

Os principais modos de falha associados ao projeto de estruturas treliçadas do tipo jaqueta são: escoamento, flambagem e fadiga. Neste trabalho serão analisados apenas os dois primeiros, já que a fadiga é um modo de falha que ocorre ao longo do tempo e depende da análise do ciclo de vida da estrutura, em especial das juntas soldadas; fugindo ao escopo principal dessa pesquisa.

### 2.6.1. Escoamento

O modo de falha denominado escoamento ocorre quando os esforços atuantes sobre uma estrutura resultam em tensões que ultrapassam o limite de deformação elástica do material utilizado na construção da estrutura, conforme descrito no Apêndice A.

A tensão limite de escoamento é definida como a tensão a partir da qual o material perde a propriedade elástica e passa a ter o comportamento plástico, ou seja, quando as suas deformações se tornam permanentes, podendo comprometer a integridade da estrutura.

O aço é o material mais utilizado na construção de plataformas do tipo jaqueta, possuindo tensão de escoamento que depende fortemente da composição química e do tipo de tratamento térmico realizado. Alguns valores de tensão de escoamento para ligas de aço são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação dos aços de acordo com a tensão de escoamento

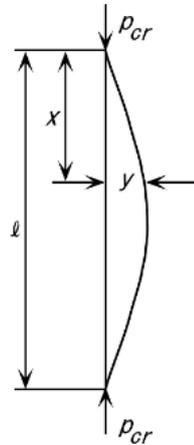
<b>Grupo</b>	<b>Limite de escoamento mínimo [MPa]</b>	<b>Exemplo</b>
Aço carbono de média resistência	195 a 259	ASTM A36
Aço de alta resistência e baixa liga	290 a 345	ASTM A572 Grau 50
Aços ligados tratados termicamente	630 a 700	ASTM A588 Grau B, ASTM A242

Fonte: Adaptado (CONSTRUÇÃO... 2014)

### 2.6.2. Flambagem

Dimensionar uma estrutura do tipo treliça e pórtico para resistência a tensão limite de escoamento não é suficiente, pois só avalia a resistência a tração. Devido à instabilidade do sistema, é necessário também avaliar o modo de falha estrutural decorrente de uma carga em compressão axial. Admite-se as barras rotuladas em suas extremidades (isto é, sendo livre sua rotação relativa nos nós) pelo fato das rótulas não transmitirem momento e devido à ausência de cargas nas barras, somente cargas aplicadas nas articulações (nós).

Figura 10: Coluna com extremidades articuladas sob compressão de carga crítica



Fonte: Okumoto (2009)

A Figura 10 mostra uma coluna com extremidades articuladas à qual a carga crítica  $P_{cr}$  é aplicada. Segundo Okumoto (2009), o momento de flexão criado pela carga axial devido à distância horizontal  $y$  entre a carga e a deflexão da coluna deve ser sustentado pelo momento de flexão da coluna:

$$-EI \frac{d^2 y}{d^2 x} = P_{cr} \cdot y$$

$$-\frac{d^2 y}{d^2 x} + \frac{P_{cr}}{EI} y = 0 \quad (5)$$

Onde:

$E$  = módulo de elasticidade

$I$  = momento de inércia da seção transversal.

A equação 5 trata-se de uma equação diferencial ordinária, homogênea, linear e de segunda ordem, cuja a solução geral é obtida através da equação 6:

$$y = A \cos \sqrt{\frac{P_{cr}}{EI}} x + B \operatorname{sen} \sqrt{\frac{P_{cr}}{EI}} x \quad (6)$$

Onde A e B são constantes arbitrárias determinadas pelas condições de contorno e para uma coluna bi-articulada os valores são mostradas na equação 7:

$$y(0) = 0 \text{ e } y(L) = 0 \quad (7)$$

Onde “L” representa o comprimento da viga. Ao aplicar as condições de contorno, o resultado obtido e:

$$A = 0 \quad (8)$$

$$B \cdot \operatorname{sen} \sqrt{\frac{P_{cr}}{EI}} L = 0 \quad (9)$$

Como se deseja uma resolução significativa, deve-se ignorar a solução trivial (B=0), pois a viga permanece reta. Portanto, temos como solução a equação 10:

$$\sqrt{\frac{P_{cr}}{EI}} L = n \pi \quad (10)$$

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

Onde:

n = modo de flambagem

L = comprimento efetivo do elemento

A função que representa a forma da coluna deformada é chamada modo de flambagem. O valor de  $P_{cr}$  no qual a flambagem realmente ocorrerá numa compressão gradativa é o de menor valor, ou seja, para n=1, mostrado na equação 12.

$$P_{cr} = EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \quad (12)$$

A equação foi originalmente desenvolvida por L. Euler, no século XVIII e é chamada de carga crítica de flambagem de Euler ( $P_{cr}$ ) OKUMOTO (2009).

No caso das plataformas do tipo jaquetas, os elementos estruturais consistem de tubos circulares, cuja carga crítica para o primeiro modo de flambagem pode ser calculada com base na equação:

$$P_{cr} = E \pi^2 \left( \frac{2r_e^4 - 2r_i^4}{64 L} \right) \quad (13)$$

Onde:

$r_i$  = raio interno do elemento

$r_e$  = raio externo do elemento.

## 2.7. Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é definido por Mulford (2014) como um método matemático que divide um domínio complexo e de difícil solução em pequenas unidades individuais (discretas), que reproduzem aproximadamente o comportamento da estrutura original, como mostrado na Figura 12. É realizado através de ferramentas computacionais de alto desempenho, sendo possível simular aplicação de cargas, obter resultados sobre o campo de tensões da estrutura analisada e otimizar o desenho das estruturas.

O método dos elementos finitos apresenta diferentes técnicas possíveis. Em problemas de análise de sistemas conservativos (sem amortecimento) é comum derivar-se a matriz de rigidez utilizando-se a abordagem direta que consiste no relacionamento do vetor dos deslocamentos nodais com o vetor das forças nodais (GONÇALVES, 2013).

Em resumo, a equação de movimento para o sistema global é:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{R\} \quad (14)$$

Onde  $[M]$ ,  $[K]$ ,  $\{U\}$ ,  $\{\ddot{U}\}$  e  $\{R\}$  são denominados, respectivamente, matriz de massa, matriz de rigidez, vetor de deslocamentos, vetor de aceleração e vetor de carregamento, e são construídos a partir de matrizes elementares:

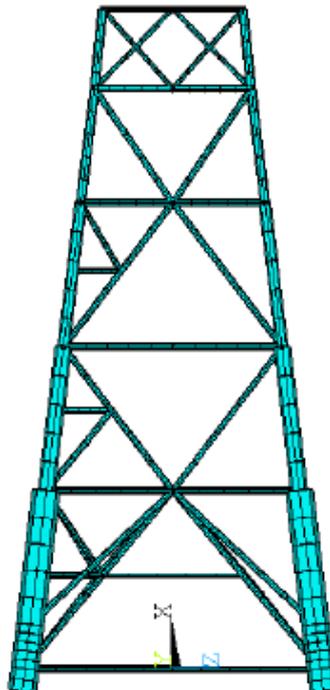
$$[M] = \sum_{e=1}^N T^T M_e T \quad (15)$$

$$[K] = \sum_{e=1}^N T^T K_e T \quad (16)$$

$$\{R\} = \sum_{e=1}^N T^T R_e \quad (17)$$

Onde  $M_e$ ,  $K_e$ , e  $R_e$  representam as matrizes de massa, rigidez e vetor de força de cada elemento. E  $T$  é chamada matriz transformação de coordenadas do sistema local para o sistema de coordenadas global.

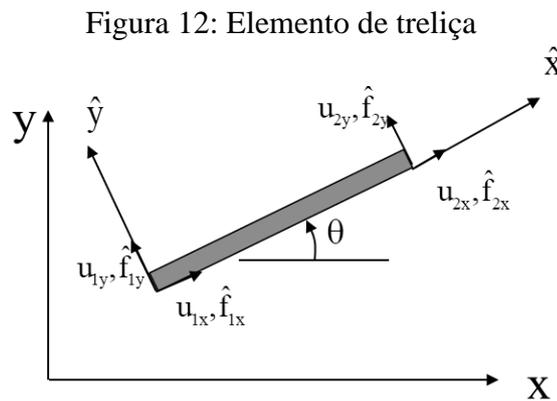
Figura 11: Exemplo de uma plataforma discretizada



Fonte: Autora (2017)

### 2.7.1. MEF aplicado em elementos de treliças

Treliças são elementos unidimensionais (Figura 12), os quais podem ser submetidos à tração e compressão na direção de seu eixo, com dois graus de liberdade por nó. É possível relacionar os deslocamentos e forças generalizadas nos eixos de uma barra no sistema local com os deslocamentos e forças generalizadas no sistema global, através da matriz de transformação. (MARTHA, 2017)



Fonte: Autora (2017)

As matrizes elementares para as treliças são dadas pelas equações abaixo:

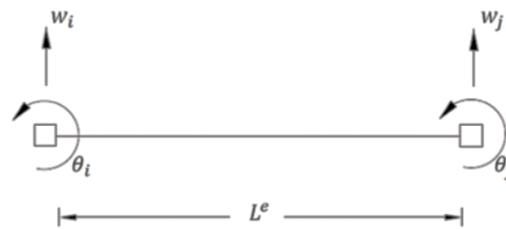
$$[M_e] = \frac{\rho A l}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[K_e] = \frac{E A}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

### 2.7.2. MEF aplicado em elementos de viga

Diferentemente de estruturas de treliça, vigas são elementos de barras que tem rigidez não apenas às deformações axiais, mas também a flexão, torção e cisalhamento.

Figura 13: Elemento de viga



Fonte: Autora (2017)

As matrizes elementares para as vigas são dadas pelas equações abaixo:

$$[M_e] = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l^2 \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$[K_e] = \frac{E I}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

## 2.8. Otimização

A demanda do mercado por sistemas mais eficientes e maiores margem de lucros exige um avanço no projeto de sistemas estruturais e a definição de um produto ideal, que maximize a eficiência e minimize os custos de produção. Encontrar as características mais adequadas de um projeto exige a avaliação de diversos parâmetros, até que se determine uma configuração que atenda todas as condições necessárias e minimize (ou maximize) as características que representem um diferencial competitivo para o produto.

Esse processo pode ser realizado através do uso de técnica de otimização, procedimento no qual são definidos os valores para as variáveis que descrevem o projeto de maneira automatizada, racional e dirigida, visando atingir, dentro dos limites permitidos, o objetivo definido pela função objetivo.

Tancredi (2008) estabelece o modelamento matemático típico de um problema de otimização que corresponde a um projeto de engenharia. Com base nisso, na Tabela 5 são apresentados os principais elementos que compõem um modelo de otimização aplicado ao projeto de uma estrutura do tipo jaqueta.

Tabela 5 - Elementos que constituem um procedimento de otimização

Variáveis	As variáveis de projeto, ou variáveis de decisão, são aquelas que caracterizam o projeto e precisam ser definidas pelo engenheiro ou projetista. Essas variáveis são consideradas determinísticas, isto é, não estão sujeitas a uma distribuição de probabilidades. Podem ter um espectro contínuo ao longo de um intervalo, ou podem estar restritas a valores discretos.
Parâmetros	Os parâmetros são variáveis de estado, ou seja, a princípio são fixas, mas podem variar em virtude da mudança de cenário. A mudança de um parâmetro é uma decisão do engenheiro realizada durante a modelagem do problema e não pode ser modificada pelo processo de otimização.
Constantes	As constantes são valores absolutos que dificilmente podem ser alterados durante a elaboração do projeto. Em geral tratam-se de constantes físicas tais como massa específica, aceleração da gravidade, viscosidade, etc.
Restrições	As restrições são funções escalares das variáveis de projeto que representam as condições que devem ser satisfeitas para que o projeto seja viável. Os problemas práticos de projeto geralmente estão sujeitos a uma série de restrições que estabelecem limites normativos ou funcionais para solução adotada.
Função Objetivo	A função objetivo é uma função escalar das variáveis de projeto a ser otimizada. Para a maioria dos problemas de engenharia, no entanto, a função objetivo é do tipo não explícita, pois os modelos de projeto não só envolvem equações, como também tabelas, gráficos, simulações ou análises numéricas.
Ponto ótimo	O ponto X que apresenta o menor valor da função objetivo dentro de toda a região viável, delimitada pelas restrições, é denominado mínimo absoluto ou mínimo global. Já o ponto que apresenta um valor da função objetivo mínimo entre todos os pontos situados numa sub-região, convenientemente definida, é denominado mínimo local.
Algoritmo	É o procedimento matemático realizado para direcionar a solução de um ponto inicial (ou conjunto de pontos iniciais) para uma solução de melhor desempenho.
Critério de parada	Representa uma condição que deve ser satisfeita para que o algoritmo de otimização interrompa o processo de busca da solução. Em geral refere-se a um número máximo de iterações ou a uma variação mínima da solução entre duas iterações subsequentes.

Fonte: Adaptado a partir do conteúdo de (TANCREDI, 2008).

Para exemplificar, no estudo deste trabalho temos como objetivo minimizar a massa da estrutura, cujo material (constante) será o aço, no qual as variáveis de entrada são: raio interno dos tubos, tamanho da base inferior e o número de reforçadores transversais. Os cenários são definidos pelas diferentes lâminas d'água (parâmetro) e tem como restrições, a tensão limite de escoamento e a carga crítica de flambagem.

## 2.9. Algoritmos genéticos

Existem diversos algoritmos utilizados para a aplicação de técnicas de otimização aos mais diversos tipos de problemas. Em geral, a escolha do algoritmo se baseia na eficiência e adequação ao tipo de problema, a disponibilidade, bem como a capacidade computacional disponível Tancredi (2008).

Discorrer sobre os diferentes tipos de algoritmo foge ao escopo deste trabalho. Mas dadas as características do problema e a disponibilidade, optou-se pelo uso de algoritmos genéticos no desenvolvimento proposto.

Segundo Tancredi (2008) apud Goldberg (1989) os algoritmos genéticos são técnicas de busca inspiradas em mecanismos de genética e seleção natural. Dada uma população inicial de soluções, esta evolui até os indivíduos convergirem para uma solução, por meio da aplicação de operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação.

Considerando um problema de otimização qualquer, os algoritmos genéticos iniciam a busca da melhor solução a partir de um conjunto inicial de soluções aleatórias. Cada elemento do conjunto inicial de soluções é denominado indivíduo ou cromossomo. Um indivíduo é representado por uma cadeia de símbolos, geralmente, uma cadeia binária. É importante que cada indivíduo da população seja capaz de representar completamente uma possível solução do problema tratado.

Em seguida, uma nova população ou geração é construída a partir da população inicial. Para criar os indivíduos da nova população, são utilizados operadores genéticos de cruzamento e mutação. Uma população é obtida a partir da anterior aplicando-se o cruzamento para aqueles indivíduos com maior valor de aptidão, simulando o processo de seleção natural.

O processo de geração de novas populações é repetido iterativamente até que o algoritmo genético chegue a uma solução aceitável, ou satisfaça alguma condição de parada.

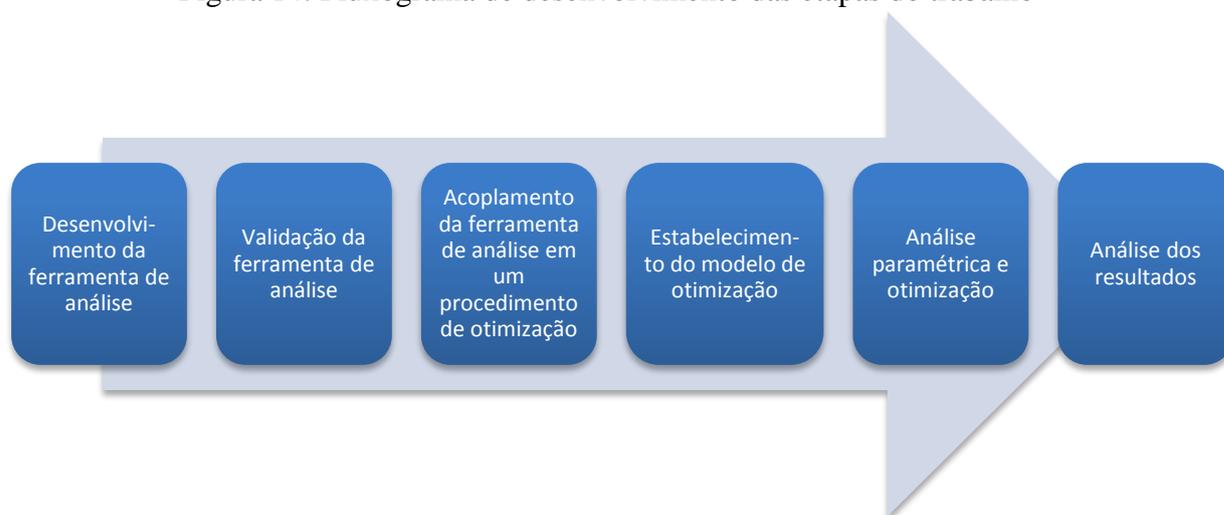
Entre as diferentes variações de algoritmos genéticos, este trabalho utilizará o algoritmo NSGA II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), reconhecidamente robusto e eficiente para aplicações de problemas complexos de engenharia (TANCREDI, 2008). Os detalhes específicos do algoritmo podem ser facilmente encontrados em farta literatura existente.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a realização do desenvolvimento proposto. Ao longo do texto são apresentados os processos de desenvolvimento, bem como os métodos e ferramentas utilizados em cada uma das etapas.

O procedimento proposto para o desenvolvimento consiste nas etapas mostradas no fluxograma da Figura 14.

Figura 14: Fluxograma de desenvolvimento das etapas do trabalho



Fonte: Autora (2017)

Conforme registra Tancredi (2008), o uso de técnicas baseadas no método dos elementos finitos dificulta o uso de técnicas de otimização em projetos complexos de engenharia, em virtude do custo computacional muitas vezes inviável.

Assim, a primeira etapa deste trabalho consiste na elaboração de um código eficaz e eficiente para a análise bidimensional de estruturas do tipo jaqueta usando elementos finitos do tipo treliça. O código foi desenvolvido em MatLab a partir do trabalho de pesquisa da aluna Cristina Mendes realizado em 2016.<sup>2</sup> Todo o algoritmo encontra-se no Apêndice B.

O código desenvolvido constrói a matriz de rigidez da estrutura e determina as tensões existente nos elementos que constituem a estrutura.

<sup>2</sup> Infelizmente, neste caso, não existe como fazer uma citação formal, visto que o trabalho foi interrompido e não chegou a ser publicado. No entanto fica o reconhecimento e o agradecimento a iniciativa inicial do trabalho desta pesquisadora.

A seguir o código desenvolvido é validado por meio da comparação dos resultados obtidos em um estudo de caso realizado tanto no código desenvolvido, quanto em um programa computacional comercial, sabidamente robusto e confiável.

A ferramenta utilizada nesta etapa foi o programa Abaqus, o qual é composto de um módulo de pré-processamento, um processador e um módulo de pós-processamento. O pré-processador permite a construção de um arquivo de entrada que contém os dados de geometria, propriedades do material, condições de contorno, carregamento e geração da malha de elementos finitos. Como pós-processador, o Abaqus possibilita a visualização gráfica dos resultados das análises.

Uma vez validada a ferramenta de análise desenvolvida, esta será incorporada a uma ferramenta de otimização. No caso a ferramenta escolhida foi o programa modeFrontier.

Usando o algoritmo NSGA2, uma série de estudos paramétricos de otimização serão realizados, cujos resultados serão tabelados no programa Excel, permitindo a análise e a obtenção de conclusões sobre as características do projeto que minimizam a massa considerando diferentes profundidades de lâminas d água.

No entanto é importante destacar que a escolha desse algoritmo, em detrimento de outros sabidamente mais eficientes, decorre da suspeita de que o problema possui comportamento multi-nodal (múltiplas soluções ótimas), além de potencialmente apresentar mínimos locais.

## 4. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Neste capítulo é apresentada a ferramenta de análise desenvolvida. A seguir é realizada a validação do algoritmo utilizando um estudo de caso realizado no programa Abaqus.

### 4.1. Ferramenta de análise desenvolvida no MatLab

A plataforma é discretizada em um modelo de Elemento Finito implementado em uma simulação numérica usando um algoritmo Matlab.

Todas as constantes e parâmetros relevantes da estrutura são declarados no início do código desenvolvido: número de reforçadores (N), lâmina d'água (La), tamanho da base superior (B) e inferior (b), raio interno (ri) e externo dos tubos (re), calado aéreo (*air gap*) e o peso da superestrutura (P), conforme mostrado na Figura 15.

A partir desses valores de entrada, o algoritmo calcula outros parâmetros necessários para a geração da geometria e para cálculos posteriores: altura total e inclinação dos reforçadores laterais. A partir daí, a estrutura é discretizada em elementos, no qual cada um corresponde a um membro estrutural.

Figura 15: Exemplo variáveis de entrada do algoritmo Matlab

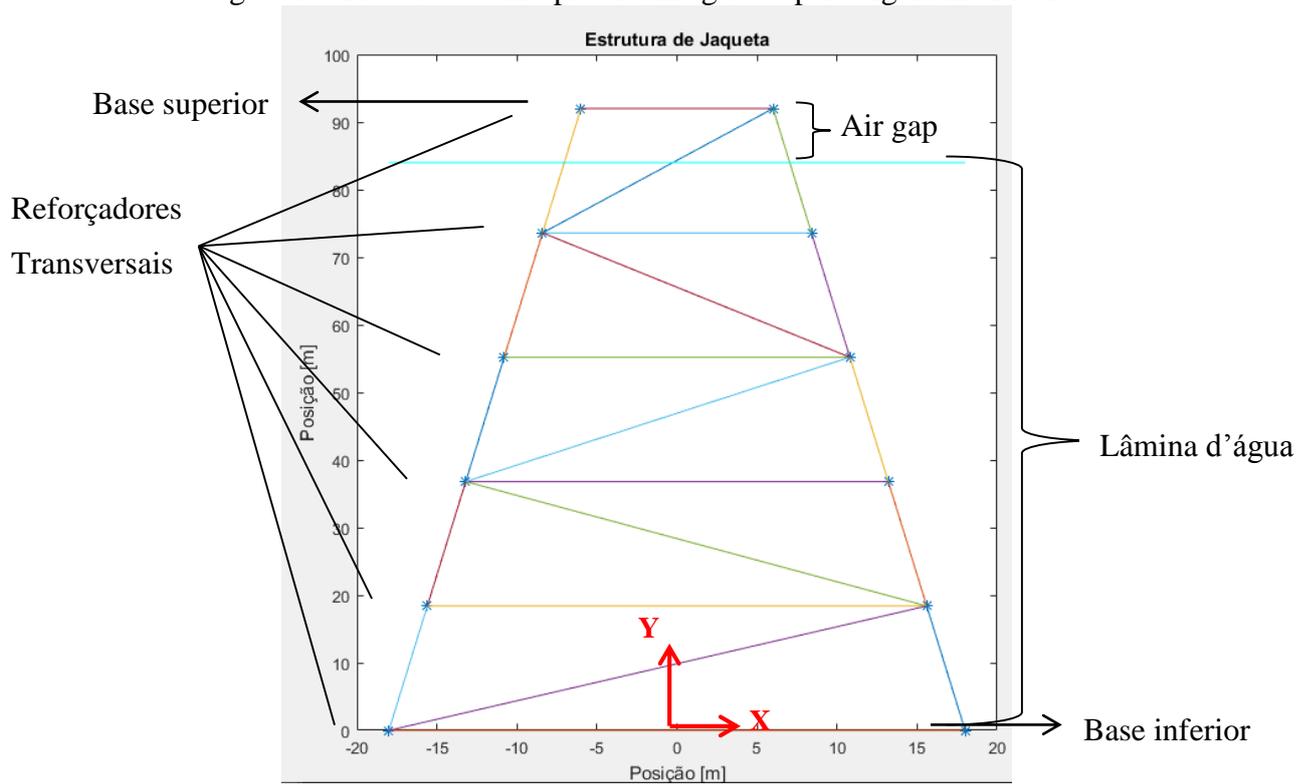
```
%Variáveis Preliminares de Entrada

N = 6; %Número de reforçadores horizontais
La = 92; %Lâmina de água [m]
B = 36; %Comprimento da base maior da plataforma[m]
b = 12; %Comprimento da base menor da plataforma[m]
re = 1.0; %Raio externo dos tubos [m]
ri = 0.7 %Raio interno dos tubos [m]
Ag = 8; %Air gap [m]
P = 2.5e7; %Peso Convés [N]
```

Fonte: Autora (2017)

A seguir, o código constrói as matrizes de massa e rigidez da estrutura, conforme a geometria modelada (Figura 16) As cargas atuantes descritas na fundamentação teórica são calculadas e aplicadas aos elementos. E, por fim, a fixação da plataforma no solo é representada considerando-se que os deslocamentos dos nós da base na direção horizontal (x) e vertical (y) são restritos, ou seja, são iguais a zero.

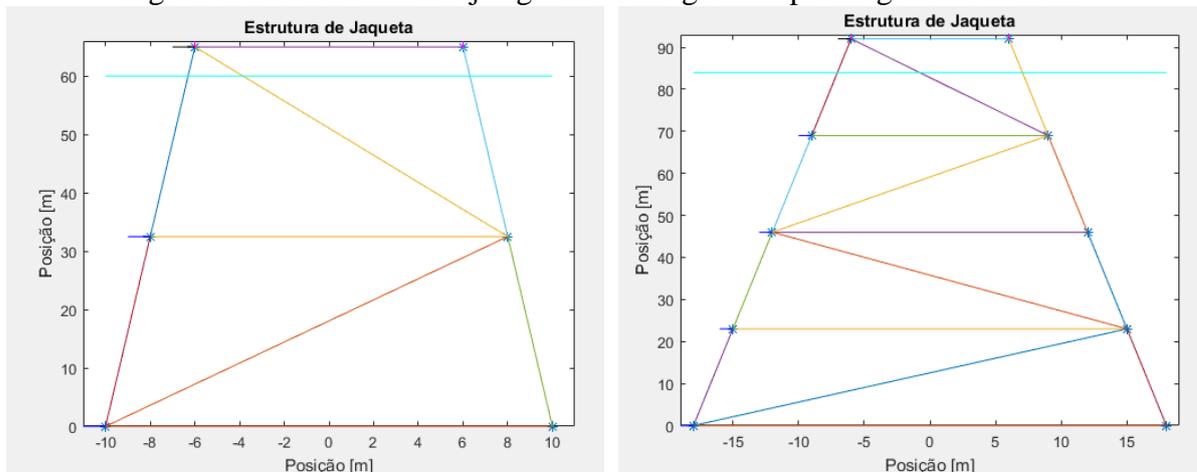
Figura 16: Modelo de uma plataforma gerada pelo algoritmo MatLab



Fonte: Autora (2017)

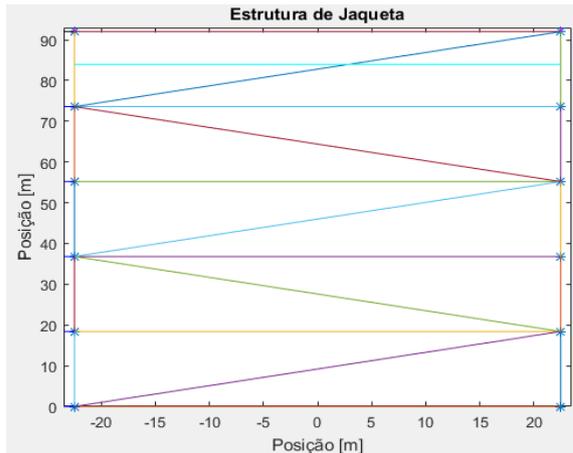
O algoritmo desenvolvido é flexível e permite modelar um grande número de arranjos estruturais para plataformas do tipo jaqueta. Na Figura 17 são mostrados diferentes arranjos geométricos gerados a partir do algoritmo desenvolvido.

Figura 17: Diferentes arranjos geométricos gerados pelo algoritmo Matlab

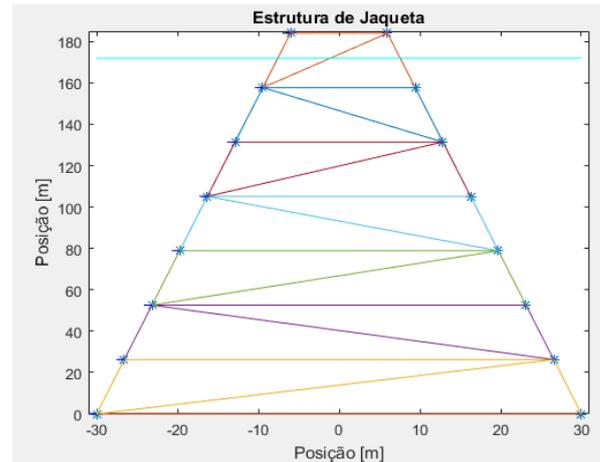


Air Gap = 5m;  
 Base = 20m ;  
 Lâmina d'água = 60m  
 Número de Transversais = 3.

Air Gap = 10 m  
 Base = 36 m  
 Lâmina d'água = 84 m  
 Número de Transversais = 5



Air Gap = 8 m;  
 Base = 45 m;  
 Lâmina d'água = 140m  
 Número de Transversais = 7.

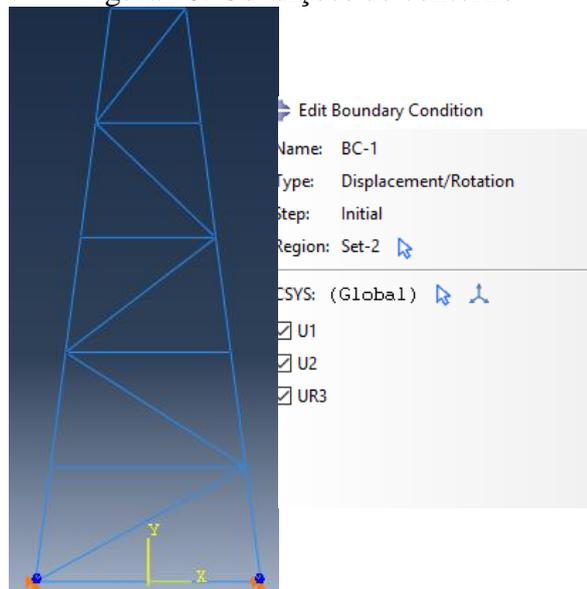


Air Gap = 12 m;  
 Base = 60 m  
 Lâmina d'água = 172 m  
 Número de Transversais = 8.

Fonte: Autora (2017)

No modelo do Abaqus, para garantir que a plataforma estivesse fixa ao solo, foram escolhidas as condições de contorno que possibilitassem essa restrição. Assim ambos os vértices que delimitam a base da jaqueta tiveram os movimentos restritos nas translações nas direções x e y e o na rotação relativa ao eixo z ( $U1=U2=UR3=0$ ), conforme pode ser visto na Figura 18.

Figura 18: Condições de contorno



Fonte: Autora (2017)

É importante observar que o Abaqus é um programa que não permite definir o sistema de unidades utilizado, requerendo que o usuário mantenha um sistema de unidades compatíveis ao

longo de toda a modelagem. No estudo de caso realizado utilizou-se o sistema de unidades descrito na Tabela 6.

Tabela 6: Sistemas de unidades utilizados para as propriedades no Abaqus

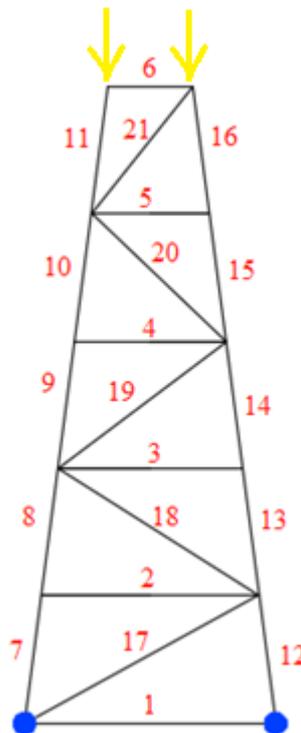
Propriedade	Unidade
Densidade	kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	GPa
Coefficiente de Poisson	-
Dimensões lineares	M

Fonte: Autora (2017)

#### 4.2. Comparação dos resultados

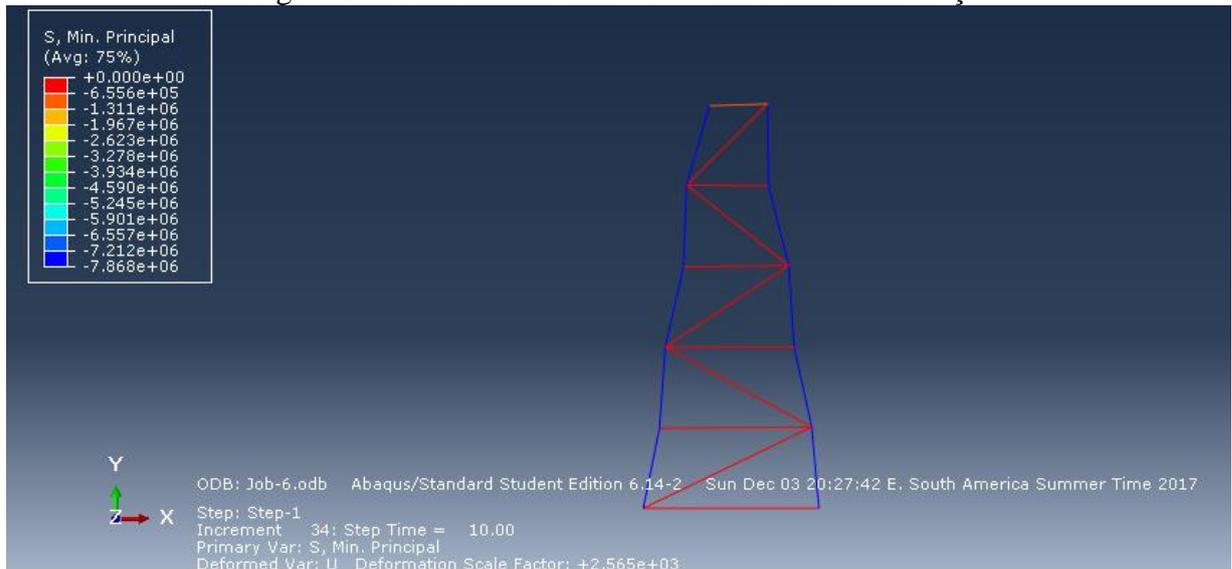
Para uma primeira análise dos resultados, o número de elementos dos modelos é equivalente ao número de membros da plataforma (21 elementos), com cargas verticais aplicadas na como na ilustração dada pela Figura 19. Os resultados de tensão são ilustrados pela Figura 20 e Figura 21.

Figura 19: Esquema ilustrativo do modelo da plataforma e de seus elementos



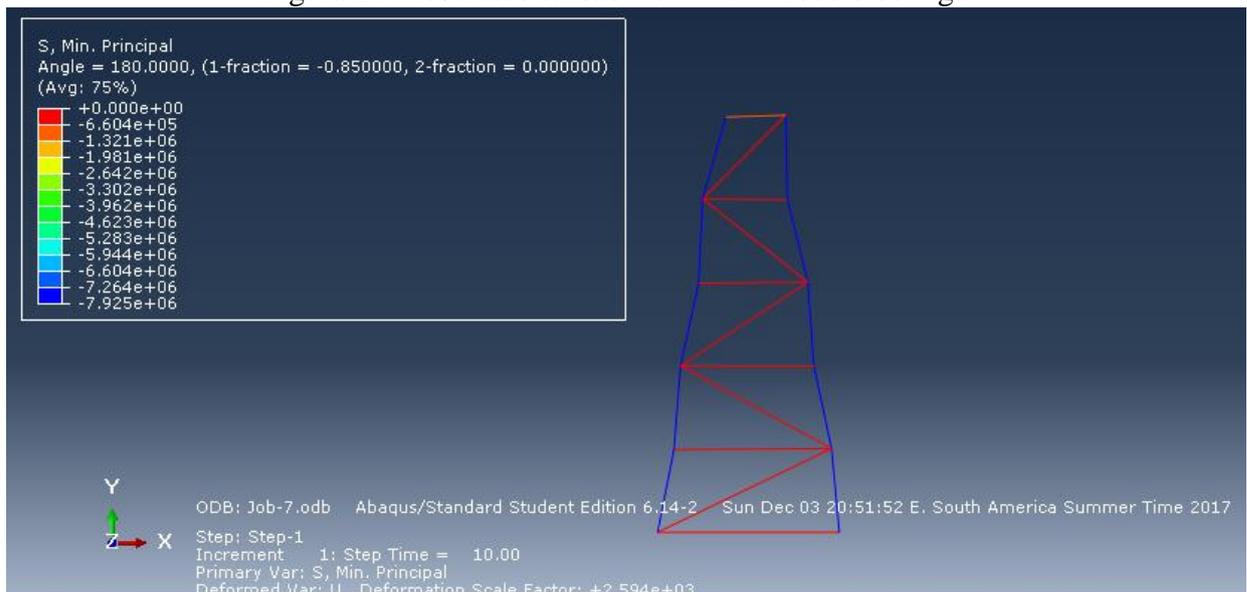
Fonte: Autora (2017)

Figura 20: Resultado tensão máxima – Modelo de treliça



Fonte: Autora (2017)

Figura 21: Resultado tensão máxima – Modelo de viga



Fonte: Autora (2017)

O comparativo dos resultados para cada elemento no modelo do Matlab com o modelo de treliça do Abaqus é dado pela Tabela 7. Nota-se que a diferença numérica máxima encontrada de 0.3 MPa é considerada muito pequena perto da ordem de grandeza significativa para as tensões.

Tabela 7 – Resultados de tensões para cada elemento da plataforma

<b>N elemento</b>	<b><math>\sigma</math> Matlab [Pa]</b>	<b><math>\sigma</math> Abaqus [Pa]</b>	<b>% dif</b>
1	0.000	0.000	0.000%
2	0.000	0.000	0.000%
3	0.000	0.000	0.000%
4	0.000	0.000	0.000%
5	0.000	0.000	0.000%
6	-1017600.000	-1311000.000	-28.833%
7	-7867800.000	-7868000.000	-0.003%
8	-7867800.000	-7868000.000	-0.003%
9	-7867800.000	-7868000.000	-0.003%
10	-7867800.000	-7868000.000	-0.003%
11	-7867800.000	-7868000.000	-0.003%
12	-7867800.000	-7868000.000	-0.003%
13	-7867800.000	-7868000.000	-0.003%
14	-7867800.000	-7868000.000	-0.003%
15	-7867800.000	-7868000.000	-0.003%
16	-7867800.000	-7868000.000	-0.003%
17	0.000	0.000	0.00%
18	0.000	0.000	0.00%
19	0.000	0.000	0.00%
20	0.000	0.000	0.00%
21	0.000	0.000	0.00%

Fonte: Autora (2017)

A massa da plataforma no Abaqus é obtida através da soma das forças resultantes dos nós da base inferior dividida pela aceleração da gravidade. Os resultados de tensão e massa são mostrados na tabela 8.

Tabela 8 - Resultados de tensão principal máxima e de massa para cada modelo

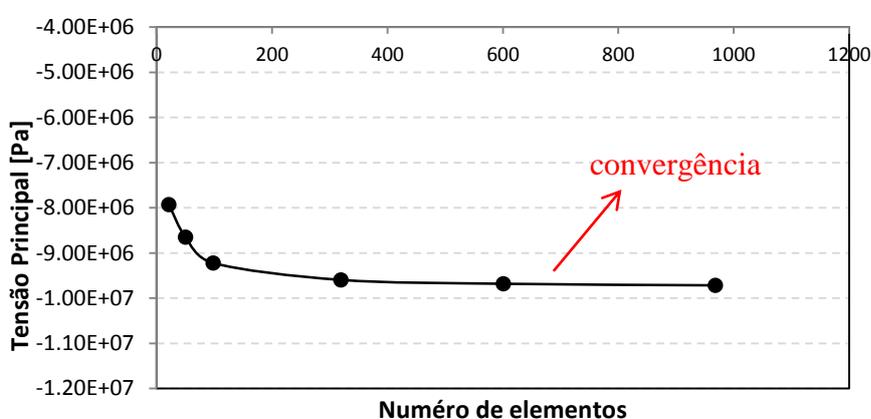
<b>Propriedade</b>	<b>Tensão [Pa]</b>	<b>Massa [kg]</b>
Matlab	$-7.8678 \times 10^6$	$6.06 \times 10^6$
Abaqus - Treliça	$-7.868 \times 10^6$	$6.13 \times 10^6$
Abaqus - Viga	$-7.925 \times 10^6$	$6.28 \times 10^6$

Fonte: Autora (2017)

Pela comparação observada acima, nota-se que as diferenças entre o cálculo analítico pelo algoritmo e o efetuado com o programa são muito pequenas, inferiores a 1%, demonstrando validando coerência no funcionamento do programa.

O programa Abaqus, através do modelo de elementos finitos desenvolvido neste trabalho, permite com que refine a malha o do modelo de vigas, alterando o número de elementos da estrutura. Algumas análises foram realizadas e a partir dos resultados encontrados um gráfico foi gerado:

Figura 22: Análise de convergência de malha para o modelo com elementos do tipo viga



Fonte: Autora (2017)

A partir do gráfico, nota-se uma convergência nos resultados, para uma tensão de aproximadamente  $-9.75 \times 10^6$  Pa. As diferenças nos resultados podem ter surgido devido as diferenças cumulativa durante o cálculo da matriz de rigidez. À medida que a complexidade da estrutura aumenta, isto é, o número de nós e elementos aumentam, a diferença na solução pode aumentar devido à sua natureza cumulativa.

Em engenharia busca-se tratar de maneira simples e adequada o complexo. Portanto, mesmo que as diferenças de resultados sejam relativamente significativas, a hipótese simplificada do modelo de treliça é válida para esta análise paramétrica. Em outras palavras, o foco do estudo é avaliar o comportamento dos parâmetros do projeto e não o valor da tensão propriamente dita. Aumentar o número de elementos, numa análise de elementos finitos, implica em aumentar o tempo e custo.

## 5. ANÁLISE PARAMÉTRICA ESTRUTURAL

Neste capítulo será apresentado o desenvolvido da análise paramétrica baseada em técnicas de otimização aplicada ao projeto de estruturas do tipo jaqueta considerando-se diferentes profundidades de lâmina d'água.

### 5.1. Modelo de Otimização

Neste trabalho, o objetivo da otimização é encontrar um projeto que apresente a melhor relação de compromisso entre os modos de falha da estrutura da plataforma e a massa da mesma.

É importante observar que o objetivo de minimizar a massa pode ser eventualmente associado à minimização do custo do projeto, enquanto a restrição de tensão é fundamental para garantir a integridade da estrutura.

Ao longo de todo o estudo, considerou-se que apenas um único tipo de viga é utilizado na fabricação da estrutura, sendo definida pelo diâmetro externo e interno da secção transversal circular.

As variáveis de projeto definidas para o estudo compreendem o raio interno, o raio externo, a largura da base inferior e o número de reforçadores transversais. Além das variáveis, o modelo contém os seguintes parâmetros: a lâmina d'água e a largura do convés (base superior).

Por fim o modelo define como função objetivo a minimização da massa, além de estabelecer duas restrições associadas à tensão de escoamento e ao critério de flambagem, conforme discutido na fundamentação teórica apresentada no capítulo 2.

A otimização utilizando como variáveis o raio externo e interno pode dificultar a convergência, visto que em muitas combinações o raio externo pode ser menor que o raio interno, resultando em erros e problemas na convergência do processo.

Assim, para facilitar a convergência do processo, foi criada uma constante que relaciona o raio interno e o externo (Equação 22). Quando essa constante é definida positiva, o diâmetro externo é sempre maior que o diâmetro interno.

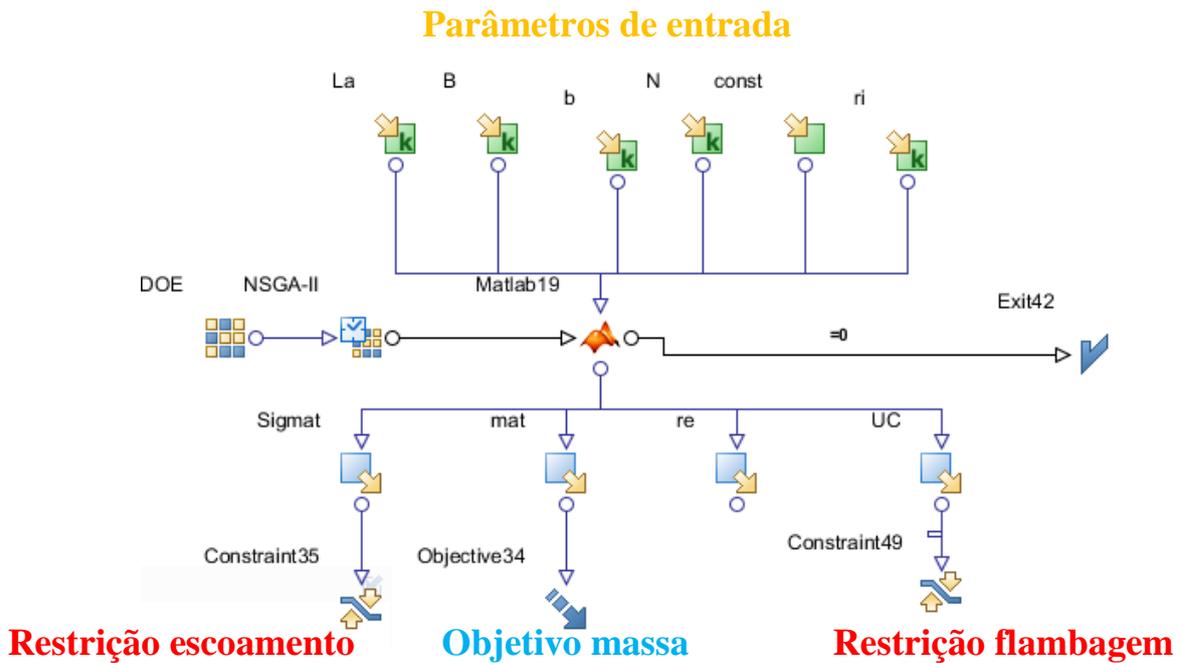
$$const = \frac{R_e}{R_i} \quad (22)$$

O modelo proposto foi então implementado no programa modeFrontier, conforme fluxograma mostrado na Figura 23. Conforme estabelecido na metodologia, o algoritmo

utilizado foi o NSGA2, o qual foi executado com uma população inicial de 10 indivíduos, com 60 gerações e uma taxa de mutação de 1 %.

A geração da população inicial foi feita através da geração pseudoaleatória de 10 indivíduos usando a técnica SOBOL.

Figura 23: Projeto modeFrontier com restrição de escoamento e de flambagem



Fonte: Autora (2017)

Para avaliar a falha por flambagem, foi criado um critério de verificação comparando, para cada elemento, a força de compressão no elemento com a carga crítica de flambagem, conforme a equação 23.

$$UC = \frac{F_{elem}}{P_{crit}} \quad (23)$$

Desta forma, para respeitar integridade estrutural, o valor de UC deve ser menor do que 1 para todos os elementos da estrutura. De maneira análoga, a tensão em todos os elementos deve ser inferior a tensão de escoamento do aço.

As características gerais do modelo de otimização desenvolvido para este trabalho são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Características dos parâmetros utilizados no processo de otimização

<b>Parâmetro</b>	<b>Tipo</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Lim Sup</b>	<b>Lim Inf</b>
Base superior [m]	Parâmetro	B	12	12
Lâmina d'água [m]	Parâmetro	La	305	84
Base inferior [m]	Variável	b	120	12
Nº de reforçadores transversais	Variável	N	12	1
Raio interno [m]	Variável	ri	1.22	0.457
Constante de espessura	Variável	const	1.1	1.001
Massa total da estrutura [kg]	Objetivo	mat		
Tensão máxima na estrutura [MPa]	Restrição	Sigmat	345	
Coefficiente de Flambagem	Restrição	U	1	0

Fonte: Autora (2017)

Os cenários de lâmina d'água considerados para este estudo foram: 84, 114, 226 e 305 metros de profundidade. Além disso, neste estudo, três tipos de análises foram feitas:

- 1) Análise de falha somente por escoamento;
- 2) Análise de falha somente por flambagem;
- 3) Análise considerando falha por escoamento e flambagem.

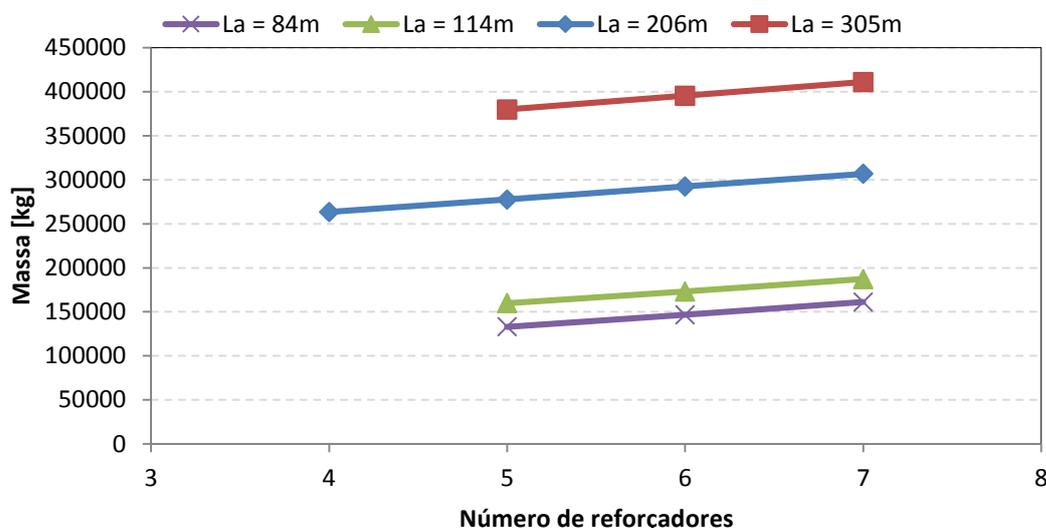
## **5.2. Análise de Escoamento**

Esta análise foi realizada com as condições descritas nos capítulos anteriores e de maneira a encontrar para cada cenário de lâmina d'água um modelo ótimo, quando o critério de escoamento é satisfeito.

### **5.2.1. Número de reforçadores transversais**

Na Figura 24 é mostrado o resultado do processo de otimização do raio externo dos tubos que formam a estrutura, considerando diferentes números de reforçadores transversais.

Figura 24: Otimização do raio externo em função do número de reforçadores, considerando a restrição de escoamento



Fonte: Autora (2017)

A redução da massa ainda ocorre na situação com o qual se aumenta cerca de 4 vezes o raio interno, mas o número de reforçadores é reduzido. Um exemplo é mostrado na Tabela 10:

Tabela 10 – Resultados comparativos da massa quando se reduz o número de reforçadores

B [m]	L [m]	N	B [m]	const	Ri [m]	Re [m]	Massa [kg]	Tensão [Pa]
36	84	6	12	1.016477	0.6096	0.619644	146.8	3.44E+08
36	84	5	12	1.001142	2.35	2.352683	136.9	3.42E+08

Fonte: Autora (2017)

Portanto, avaliando apenas o escoamento, para obter a menor massa para uma mesma estrutura, o número ideal de reforçadores transversais seria o menor possível, ou seja, apenas um.

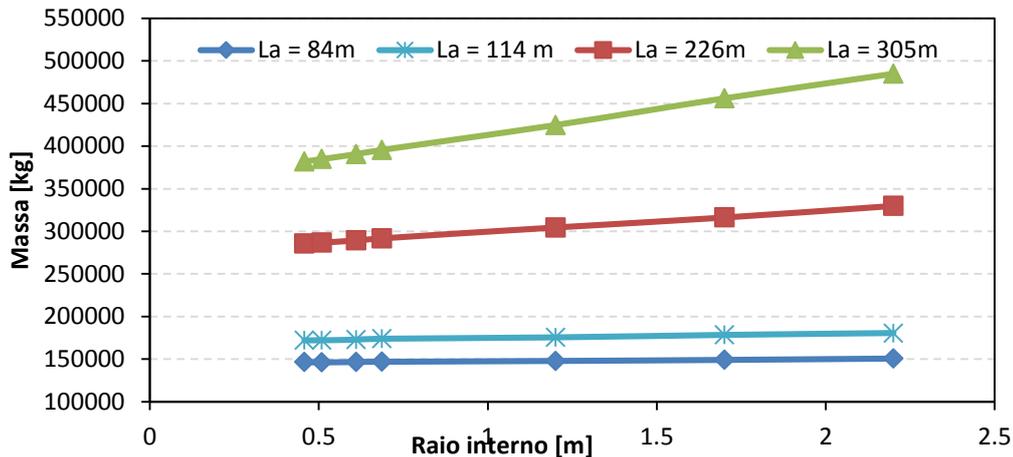
### 5.2.2. Raio interno

Na Figura 25 é mostrado o resultado do processo de otimização do diâmetro externo dos tubos que formam a estrutura, considerando diferentes raios internos. Observa-se a partir do gráfico que, para linhas d'água menores, a massa não varia significativamente. No entanto, para linhas d'água maiores, o aumento da massa passa a ser mais intenso, pois as curvas passam a ter uma maior declividade.

Esse resultado mostra que a massa de uma estrutura cresce significativamente para uma maior lâmina d'água, o que justifica a inviabilidade desse tipo de estrutura para a exploração

de águas profundas. Esse maior crescimento decorre do aumento das forças hidrodinâmicas associadas a corrente marinha, bem como o aumento do momento fletor existente na estrutura, o qual é decorrente das forças laterais estarem mais distantes dos pontos de apoio da estrutura.

Figura 25: Otimização do raio externo em função do raio interno, considerando a restrição de escoamento

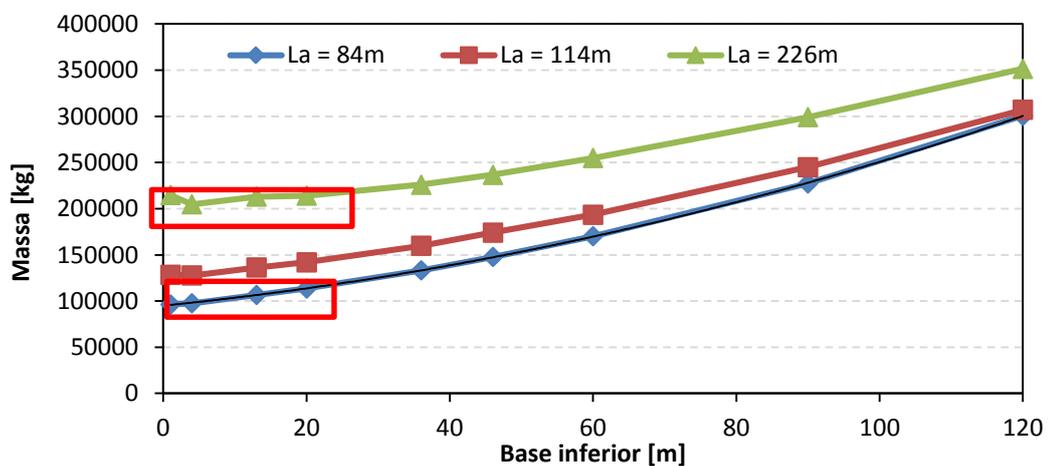


Fonte: Autora (2017)

### 5.2.3. Base inferior

Na Figura 26 é mostrado o resultado do processo de otimização do diâmetro externo dos tubos que formam a estrutura, considerando diferentes valores para o comprimento da base inferior da estrutura. Observa-se que o aumento da massa é exponencial, o que significa que até certo valor o aumento da massa não é tão significativo, induzindo a constatação de que existem inúmeras soluções ótimas.

Figura 26: Otimização do raio externo em função do comprimento da base inferior, considerando a restrição de escoamento



Fonte: Autora (2017)

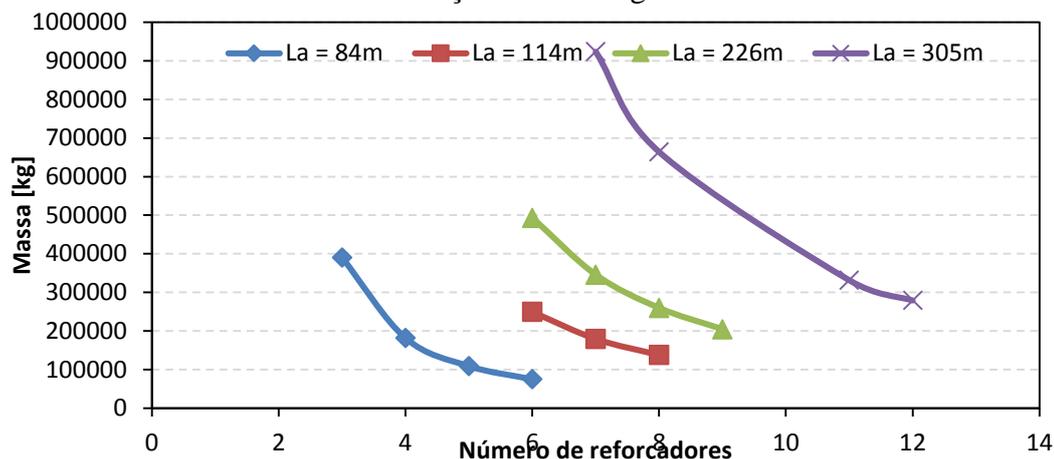
### 5.3. Análise de Flambagem

Esta análise foi realizada com as condições descritas nos capítulos anteriores e de maneira a encontrar para cada cenário de lâmina d'água um modelo ótimo, quando o critério de flambagem é satisfeito.

#### 5.3.1. Número de reforçadores transversais

Na Figura 27 é mostrado o resultado do processo de otimização do diâmetro externo dos tubos que formam a estrutura, considerando diferentes números de reforçadores transversais.

Figura 27: Otimização do raio externo em função do número de reforçadores, considerando a restrição de flambagem



Fonte: Autora (2017)

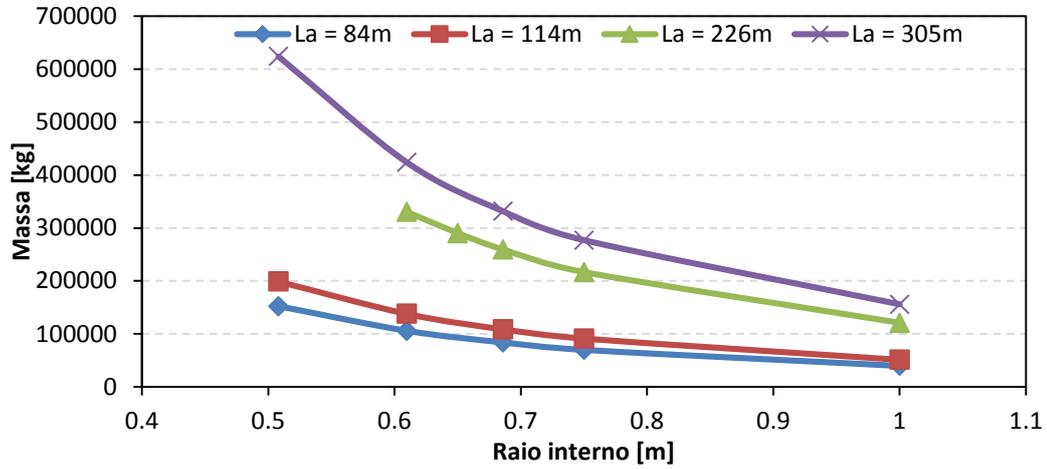
Diferentemente da análise de escoamento apresentada anteriormente, considerando-se apenas o modo de falha de flambagem, o número ideal de reforçadores seria o maior possível dentro do espaço amostral. O que é o esperado, devido ao fato de quanto maior o número de reforçadores, menor será o comprimento, aumentando a carga crítica de flambagem e minimizando o modo de falha por flambagem.

#### 5.3.2. Raio interno

Na Figura 28 é mostrado o resultado do processo de otimização do diâmetro externo dos tubos que formam a estrutura, considerando diferentes diâmetros internos. Observa-se a partir do gráfico que, quanto maior o raio interno, menor será a massa da estrutura, quando avaliada somente por flambagem. Quanto maior for o raio interno, maior será o momento de inércia,

minimizando a tendência a flambar. Entretanto existe um valor para o qual ao aumentar o raio interno, a massa da plataforma permanece praticamente constante.

Figura 28: Otimização do raio externo em função do raio interno, considerando a restrição de flambagem



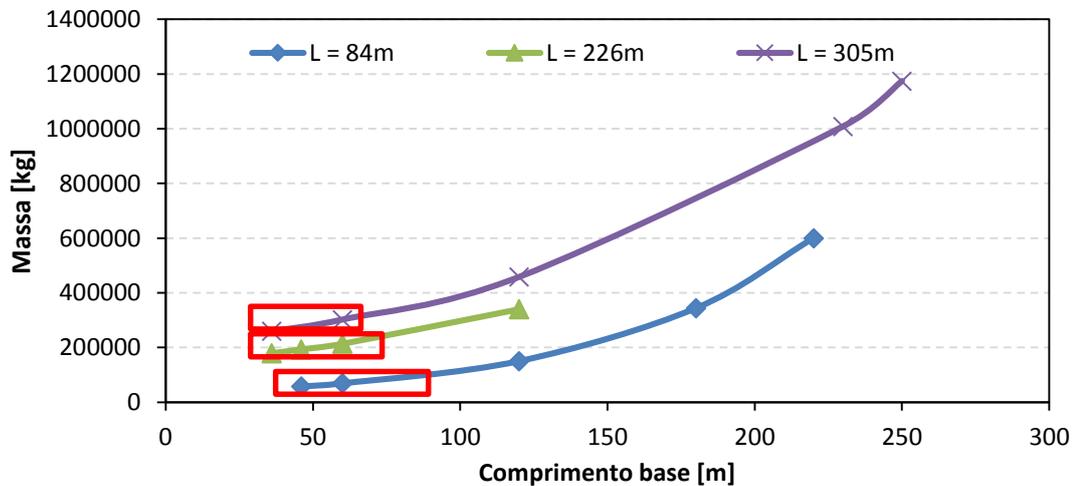
Fonte: Autora (2017)

### 5.3.3. Base inferior

Na Figura 29 é mostrado o resultado do processo de otimização do diâmetro externo dos tubos que formam a estrutura, considerando diferentes valores para a largura da base inferior da estrutura.

Ao plotar os resultados, percebe-se novamente que, possui inúmeras soluções ótimas de tamanhos de base para uma mesma faixa de valores de massa.

Figura 29: Otimização do raio externo em função do comprimento da base inferior, considerando a restrição de flambagem



Fonte: Autora (2017)

#### 5.4. Análise considerando as duas restrições de falha

Para completar esse capítulo, realizou-se a análise com as condições descritas nos capítulos anteriores e de maneira a encontrar, para cada cenário de lâmina d'água um modelo ótimo, considerando tanto a restrição de escoamento, quanto a restrição de flambagem.

Para uma primeira comparação, duas análises foram feitas em relação ao tipo de carregamento aplicado à estrutura. A primeira análise considera apenas a carga externa vertical do convés, enquanto a segunda considera além do carregamento vertical, as cargas horizontais de corrente e do vento.

Tabela 11: Comparação de resultados de análises com e sem força axial

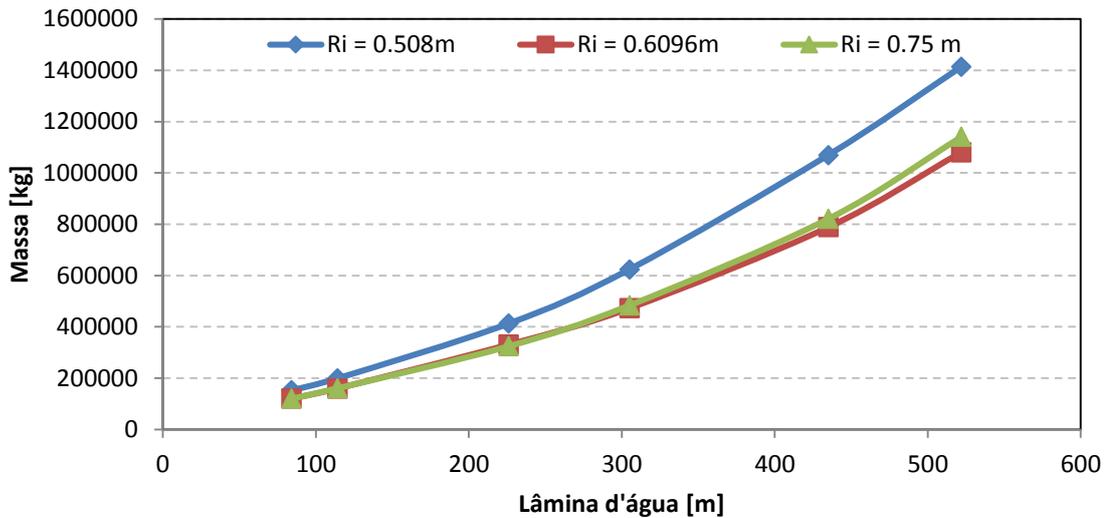
La	Raio interno [m]	Constant (Re/Ri)		dif. const	% massa
		s/ Força axial	c/ Força axial		
84 m	0.508	1.0293	1.0295	0.0002	0.7096
	0.6096	1.0161	1.0162	0.0001	0.6824
	0.6858	1.0128	1.0129	0.0002	1.25116
	0.75	1.0107	1.0108	0.0001	0.50044
114m	0.508	1.0292	1.0295	0.0003	1.06678
	0.6096	1.0163	1.0165	0.0002	1.39400
	0.6858	1.0129	1.0131	0.0002	1.50129
226m	0.6096	1.0178	1.0188	0.0010	5.65599
	0.65	1.0151	1.0161	0.0010	6.53688
	0.6858	1.0136	1.0144	0.0008	6.21548
	0.75	1.0113	1.0122	0.0009	7.86977
305m	0.508	1.0342	1.0373	0.0031	9.18134
	0.6096	1.0178	1.0198	0.0020	11.2381
	0.6858	1.0141	1.0159	0.0018	12.7358
	0.75	1.0118	1.0134	0.0016	13.8738

Fonte: Autora (2017)

Nota-se, pela Tabela 11 que a relação entre os raios mesmo variando pouco (milímetros), representa um fator importante sobre a massa. E como já esperado, quanto maior a profundidade, maior será a pressão e conseqüentemente maior será a carga aplicada. E, portanto, a estrutura precisa ser mais robusta para manter integridade.

Observando o gráfico da Figura 30 fica evidente que a carga horizontal se torna cada vez mais importante com o aumento da lâmina d'água, em decorrência do aumento do momento fletor já discutido na seção anterior.

Figura 30: Variação da massa em função da lâmina d'água de acordo com o raio interno



Fonte: Autora (2017)

Esse resultado corrobora a tese de que o aumento de massa é exponencial com o aumento da lâmina d'água, indicando que a partir de certo valor de lâmina d'água, a utilização de plataformas do tipo jaqueta torna-se inviável.

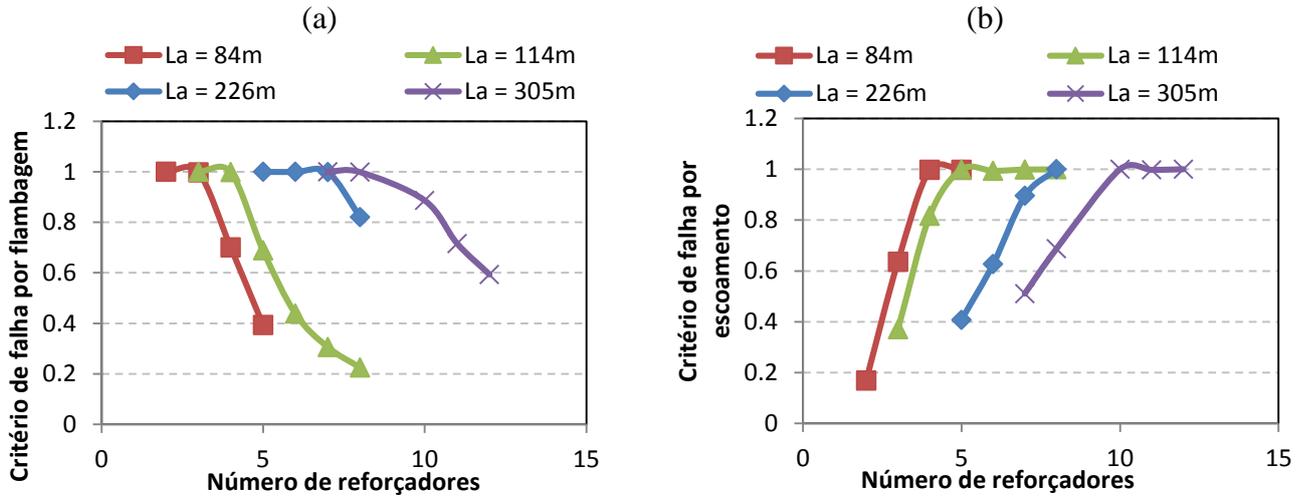
Na análise estrutural, os resultados estão intimamente relacionados às cargas e condições de contorno. Como o carregamento está relacionado ao critério de falha da estrutura, por consequência, para análise do comportamento dos parâmetros apresentada a seguir, todos os carregamentos foram considerados.

#### 5.4.1. Número de reforçadores transversais

Novamente, na Figura 32 é mostrado o resultado do processo de otimização do diâmetro externo dos tubos que formam a estrutura, considerando diferentes números de reforçadores transversais.

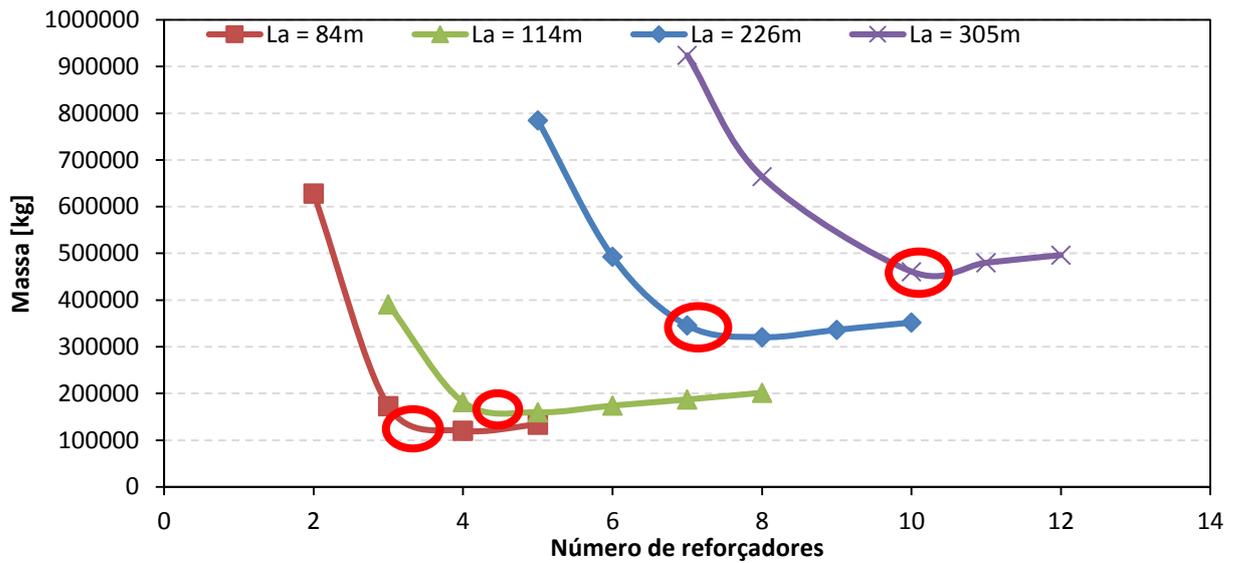
No gráfico da Figura 31a, verificou-se quais resultados são limitados pela restrição de flambagem, enquanto na Figura 31b, verificou-se quais resultados são limitados pela restrição de escoamento. Assim, observou-se que dependendo do número de reforçadores, ora a estrutura falha por flambagem, ora ela falha por escoamento.

Figura 31: Gráficos de critérios de falha em função do número de reforçadores



Fonte: Autora (2017)

Figura 32: Otimização do raio externo em função do número de reforçadores, considerando as duas restrições de falha



Fonte: Autora (2017)

A partir dos gráficos acima, conclui-se que existe um valor ótimo de reforçadores transversais para cada cenário de lâmina d'água analisado. A partir desse valor mínimo, aumentar o número de reforçadores transversais, só aumenta a massa e o custo da estrutura. Os valores ideais para o número de reforçadores transversais em virtude da lâmina d'água, para o raio interno igual a 0.6858 m são mostrados na Tabela 12.

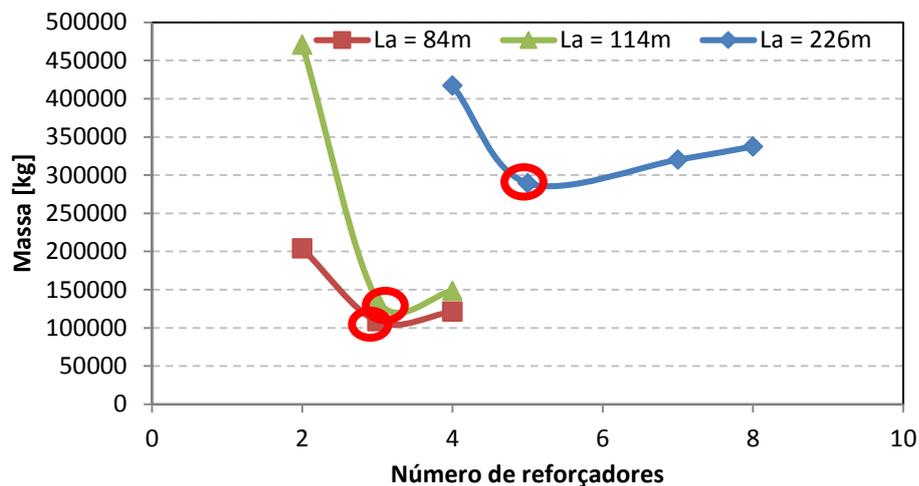
Como já foi visto anteriormente (seção 5.2.1), é possível reduzir a massa diminuindo o número de reforçadores e aumentando o diâmetro. Neste tópico, aumentou-se o raio interno em 75% e o valor mínimo de reforçadores encontrado para cada cenário é menor, além de ter ocorrido uma diminuição da massa, como mostrado a seguir:

Tabela 12: Comparação da massa calculada para diferentes casos de  $r_i$  e  $N$

La [m]	Ri		1.75 Ri		Redução Massa
	N	Massa [kg]	N	Massa [kg]	
84	4	120283	3	108488	10%
114	5	159771	3	136252	15%
226	8	320652	5	289188	10%

Fonte: Autora (2017)

Figura 33: Nova otimização do raio externo em função do número de reforçadores



Fonte: Autora (2017)

Assim conclui-se que existe uma combinação ótima entre o número de reforçadores transversais e valor do raio interno da seção transversal dos elementos estruturais que compõem uma estrutura do tipo jaqueta.

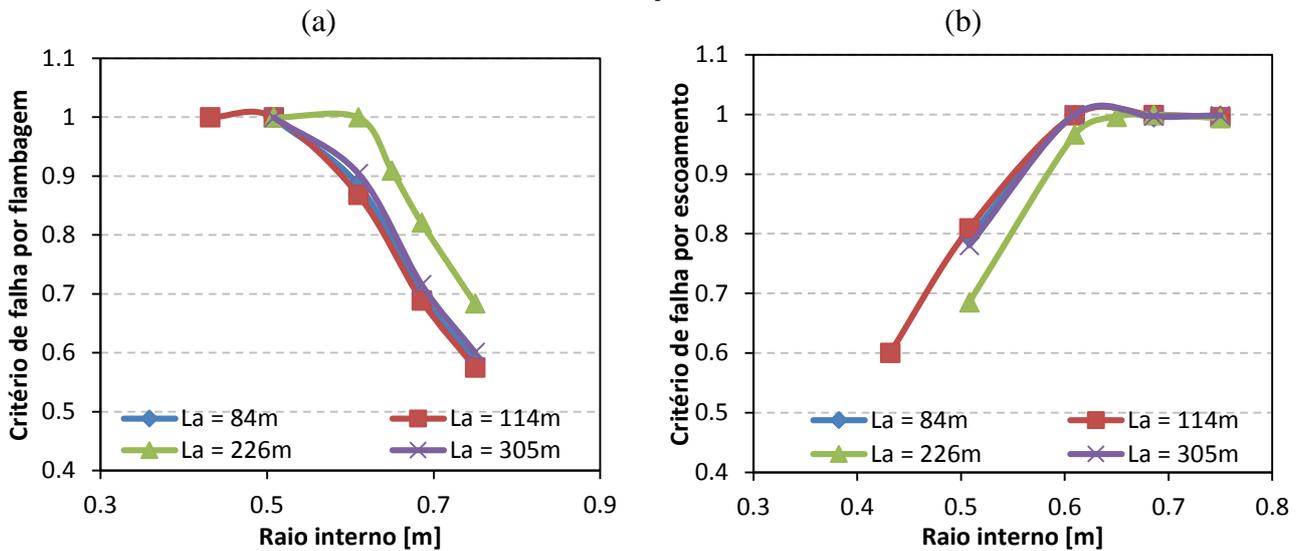
#### 5.4.2. Raio interno

A exemplo da seção anterior, na Figura 35 é mostrado o resultado do processo de otimização do diâmetro externo dos tubos que formam a estrutura, considerando diferentes diâmetros internos. Observa-se a partir do gráfico que, quanto maior o raio interno, menor será a massa da estrutura, quando avaliada considerando tanto o critério de escoamento, quanto o critério de flambagem.

No gráfico da Figura 34a, verificou-se quais resultados são limitados pela restrição de flambagem, enquanto na Figura 34b, verificou-se quais resultados são limitados pela restrição de escoamento.

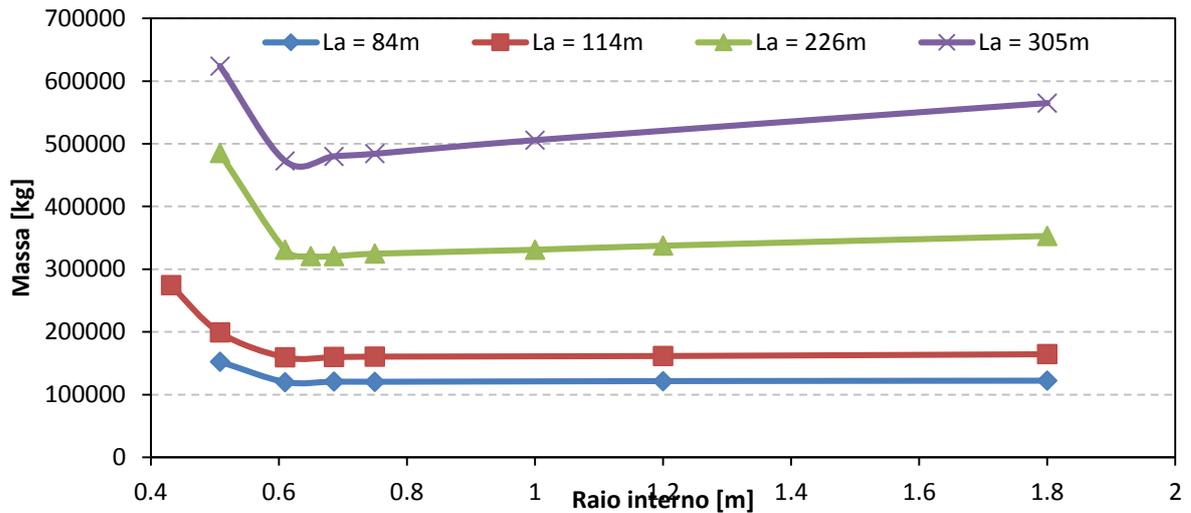
Na análise observou-se que, mantido o raio interno constante, pode-se atingir a espessura limite; assumindo-se o número ideal de reforçadores de cada linha d'água calculado no tópico anterior.

Figura 34: Otimização do raio externo em função do raio interno, considerando as duas restrições de falha



Fonte: Autora (2017)

Figura 35: Otimização do raio externo em função do raio interno, considerando as duas restrições de falha



Fonte: Autora (2017)

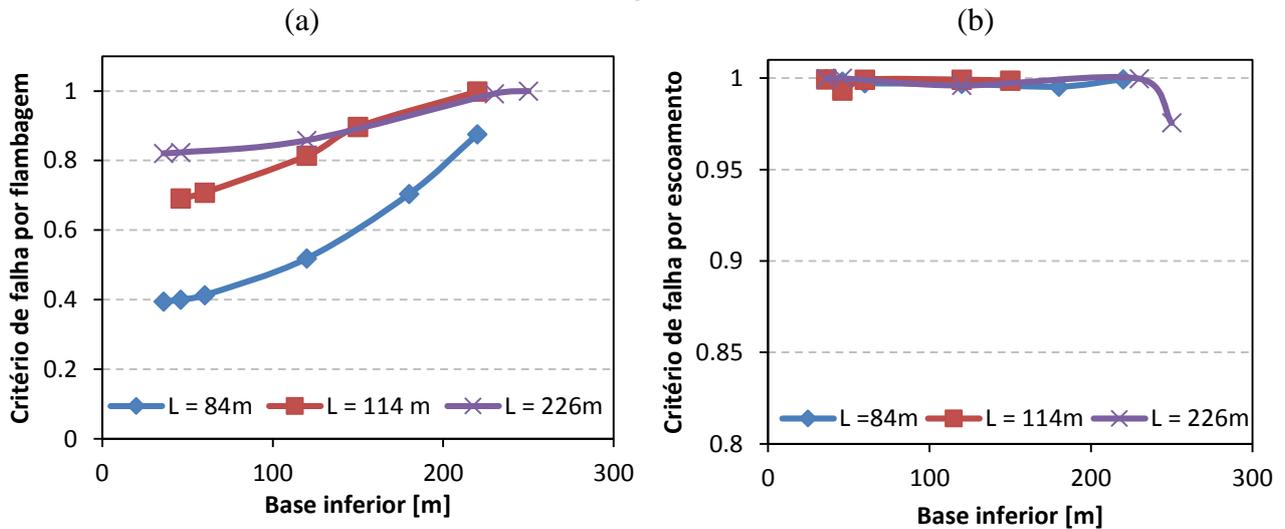
Ao analisar as duas falhas, percebe-se que existe um valor de raio interno considerado ótimo. A partir desse valor, tanto ao diminuí-lo, quanto ao aumentá-lo, a massa da estrutura será maior.

### 5.4.3. Base inferior

Por fim, na Figura 37 é mostrado o resultado do processo de otimização do diâmetro externo dos tubos que formam a estrutura, considerando diferentes valores para a largura da base inferior da estrutura, considerando tanto a restrição de flambagem (Figura 36a) quanto a restrição de escoamento (Figura 36b).

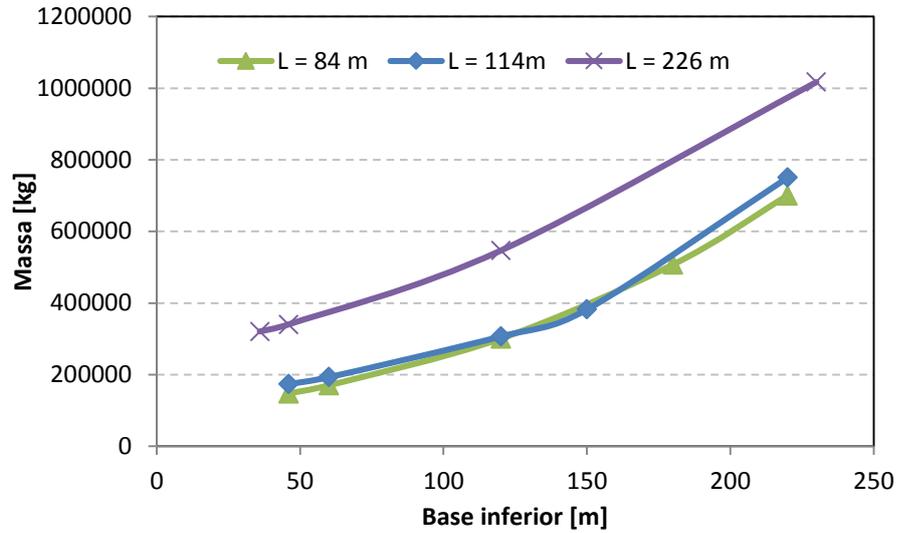
Para garantir a avaliação do comportamento da base, assumiu-se o número mínimo de reforçadores de cada linha d'água calculado no tópico anterior.

Figura 36: Otimização do raio externo em função da base inferior, considerando as duas restrições de falha



Fonte: Autora (2017)

Figura 37: Otimização do raio externo em função do comprimento da base, considerando as duas restrições de falha



Fonte: Autora (2017)

Como dito na seção 5.2.3, não existe um limite máximo ou mínimo para o valor da base em um cenário. Existe um conjunto de soluções de base inferior, que possuem as massas praticamente iguais.

Percebe-se que o critério de falha dominante é o escoamento e que somente ao aumentar muito a largura da base, ocorre falha por flambagem.

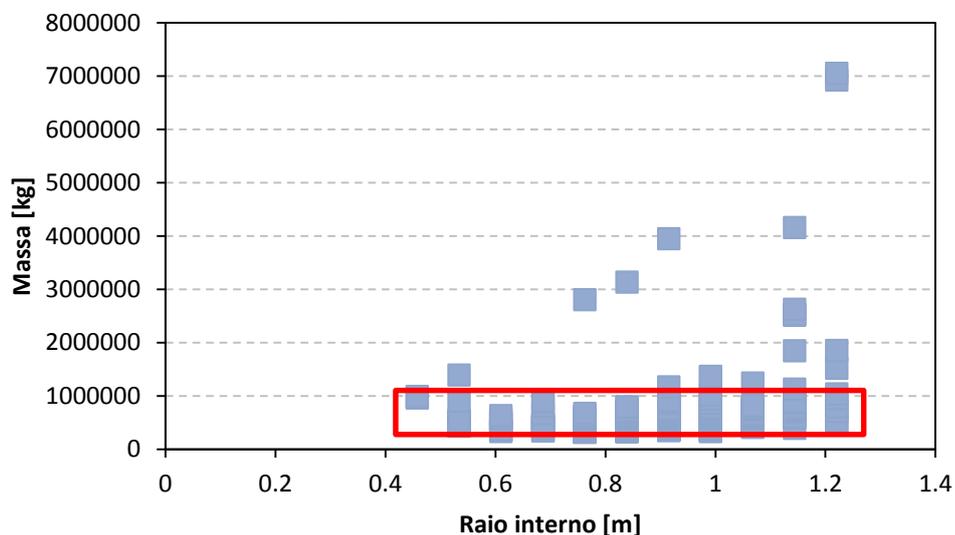
## 6. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

No capítulo anterior, a análise dos parâmetros foi feita variando manualmente os valores e observando o comportamento. Neste capítulo, será realizado uma análise preliminar, variando dois parâmetros. Em seguida, um procedimento de otimização global, com um intervalo de valores atribuído juntos para cada um dos parâmetros (base inferior, número de reforçadores e raio interno) para cada cenário de lâmina d'água.

### 6.1. Análise preliminar

No capítulo anterior, os resultados mostraram que a base não é um fator limitante para o processo, podendo ter inúmeras soluções. Pensando nisso, uma análise preliminar foi feita, para investigar o comportamento do raio interno quando a base inferior é livre (também varia). Os resultados do cenário de lâmina d'água de 226m foram plotados no gráfico da Figura 38, para exemplificar. A base superior de 12 m, o intervalo de variação do raio interno e da base superior são os mesmos da Tabela 9.

Figura 38: Otimização do raio externo e da base em função do raio interno



Fonte: Autora (2017)

Conforme já esperado, existem inúmeras combinações possíveis de raio interno e reforçadores para uma mesma linha d'água, indicando que o problema potencialmente tem múltiplas soluções ótimas com geometrias consideravelmente diferentes.

## 6.2. Otimização global

Neste tópico, todos os parâmetros foram variados conforme mostrado na Tabela 9. características de 10 diferentes arranjos encontrados dentro de uma mesma faixa de valores para cada cenário analisado são mostradas nas Tabelas 13, 14, 15, e 16.

Tabela 13 – Resultados de 10 diferentes arranjos para lâmina d'água igual à 84m

<b>B [m]</b>	<b>La [m]</b>	<b>N</b>	<b>b [m]</b>	<b>const</b>	<b>ri [m]</b>	<b>re [m]</b>	<b>mat [kg]</b>
12	84	5	12	1.0287125	0.457	0.470	104427.19
12	84	5	12	1.0217657	0.533	0.545	107411.58
14	84	5	12	1.029006	0.457	0.470	107615.02
12	84	6	12	1.0288705	0.457	0.470	110465.71
17	84	5	12	1.0290703	0.457	0.470	111116.95
14	84	5	12	1.0224274	0.533	0.545	112921.8
16	84	5	12	1.0298274	0.457	0.470	112925.48
12	84	5	12	1.0180548	0.609	0.620	116186.3
13	84	5	12	1.0316889	0.457	0.470	116565.7
20	84	5	12	1.0297156	0.457	0.470	117057.98

Fonte: Autora (2017)

Tabela 14 - Resultados de 10 diferentes arranjos para lâmina d'água igual à 114m

<b>B [m]</b>	<b>La [m]</b>	<b>N</b>	<b>b [m]</b>	<b>const</b>	<b>ri [m]</b>	<b>re [m]</b>	<b>mat [kg]</b>
12	114	5	12	1.0135574	0.686	0.695	137864.48
16	114	5	12	1.0168546	0.609	0.620	139743.65
16	114	5	12	1.0134042	0.686	0.695	140440.12
18	114	5	12	1.0169726	0.609	0.620	142873.66
17	114	5	12	1.0173789	0.609	0.620	145219.74
17	114	5	12	1.0137637	0.686	0.695	145325.38
16	114	5	12	1.0078474	0.915	0.922	145815.77
18	114	5	12	1.0138337	0.686	0.695	147179.97
24	114	5	12	1.013254	0.686	0.695	147557.15
25	114	5	12	1.0133489	0.686	0.695	149759.04

Fonte: Autora (2017)

Tabela 15 - Resultados de 10 diferentes arranjos para lâmina d'água igual à 226m

<b>B [m]</b>	<b>La [m]</b>	<b>N</b>	<b>b [m]</b>	<b>const</b>	<b>ri [m]</b>	<b>re [m]</b>	<b>mat [kg]</b>
37	226	5	12	1.00467	1.22	1.226	290753.2
20	226	5	12	1.005017	1.22	1.226	292017.1
39	226	5	12	1.004803	1.22	1.225	301517.8
29	226	5	12	1.006556	1.067	1.074	302881.3
29	226	6	12	1.00635	1.067	1.074	303480.7
37	226	5	12	1.006371	1.067	1.074	303912.7
37	226	6	12	1.006144	1.067	1.074	305356.7
20	226	5	12	1.005299	1.22	1.226	308457.6
21	226	5	12	1.005307	1.22	1.226	310110.9
37	226	5	12	1.005696	1.144	1.150	311840.3

Fonte: Autora (2017)

Tabela 16 - Resultados de 10 diferentes arranjos para lâmina d'água igual à 305m

<b>B [m]</b>	<b>La [m]</b>	<b>N</b>	<b>b [m]</b>	<b>const</b>	<b>ri [m]</b>	<b>re [m]</b>	<b>mat [kg]</b>
36	305	7	12	1.0067583	1.06744	1.075	434840.53
28	305	7	12	1.0071021	1.06744	1.075	441568.34
37	305	7	12	1.0068555	1.06744	1.075	443029.24
32	305	7	12	1.0070151	1.06744	1.075	443692.31
36	305	7	12	1.0053433	1.22	1.226	448769.39
28	305	7	12	1.0072833	1.06744	1.075	452876.4
40	305	7	12	1.0069271	1.06744	1.075	453530.02
36	305	7	12	1.0062348	1.14372	1.150	460420.08
36	305	8	12	1.007006	1.06744	1.075	464743.86
28	305	8	12	1.011919	0.8386	0.848	470094.61

Fonte: Autora (2017)

A partir dos resultados mostrados nas tabelas, conclui-se novamente que o projeto de uma jaqueta é um problema multi-modal, pois não possui somente um arranjo de parâmetros ótimo, mas sim diversas combinações.

### Comparação dos Resultados

A partir dos tópicos anteriores, uma tabela de comparação da massa final é feita, para avaliar os dois processos de otimização (global e paramétrico), cujos resultados são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17: Comparação dos resultados de otimização

La [m]	Massa [kg]				Dif. Maxima [ton]	% Dif. Maxima
	<i>ri</i>	<i>N</i>	<i>B</i>	<i>Todos</i>		
84	108214	108666	95466	104427	13	14%
114	159799	159618	135466	137864	24	18%
226	319495	318974	298151	290753	28	10%
305	461053	460952	449274	434841	26	6%

Fonte: Autora (2017)

É importante observar que mesmo se tratando de um problema complexo, com várias variáveis e múltiplas soluções ótimas com geometrias diferentes, a otimização global conseguiu alcançar o mesmo peso estrutural do que o obtido usando o procedimento de otimização paramétrica (variando cada parâmetro individualmente) em 3 das 4 lâminas d'água estudadas.

## 7. CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho o desenvolvimento de um estudo sobre o projeto estrutural de plataformas de petróleo do tipo jaqueta instaladas em mar aberto.

Inicialmente foi apresentada a problemática e a justificativa da importância que as estruturas fixas do tipo jaqueta representam para a indústria petrolífera, bem como o potencial que representam para a indústria eólica.

A seguir estabeleceu-se um equacionamento simplificado para estimativa das forças que atuam nesse tipo de estrutura, com especial destaque para o peso da planta de processos, o peso da estrutura, a carga lateral aerodinâmica e a carga lateral hidrodinâmica oriunda da ação de correntes. Por simplificação, omitiu-se a carga oriunda da ação de ondas que, embora tenha atuação análoga à ação das correntes, possui formulação mais complexa, fugindo ao escopo do trabalho.

A seguir o problema de projeto desse tipo de estrutura foi modelado na forma de um problema de otimização, estabelecendo as variáveis de projeto, restrições e funções objetivo.

A região viável, que delimita o espaço de valores no qual as variáveis podem ser definidas foi estabelecida utilizando valores razoáveis para esse tipo de projeto. No entanto, a ausência de literatura confiável e o caráter investigatório da pesquisa, permitem maior flexibilidade na escolha de tais parâmetros.

A otimização paramétrica buscou isolar o efeito das variáveis de projeto, bem como estabelecer o comportamento dessas variáveis em diversas lâminas d'água.

Observou-se que dependendo do número de reforçadores transversais, ora a estrutura falha por flambagem, ora ela falha por escoamento. Assim, conclui-se que existe um número ideal de reforçadores transversais para cada cenário de linha d'água analisado. A partir desse valor mínimo, aumentar o número de reforçadores transversais, só aumenta a massa e o custo da estrutura.

Ao analisar a influência do raio interno, percebe-se que existe um valor de raio interno considerado ótimo, a partir do qual, tanto ao diminuí-lo, quanto ao aumentá-lo, a massa da estrutura será maior.

Já em relação à largura da base inferior, percebeu-se não existe um limite máximo ou mínimo para esse valor em um dado cenário, pois existe um conjunto de soluções que possuem massas praticamente iguais, indicando que o problema possa ter uma característica multimodal, apresentando diversas soluções ótimas equivalentes. Percebe-se que o critério de falha

dominante é o escoamento e que somente ao aumentar muito a largura da base, o critério de falha por flambagem passa a ser relevante.

Por fim, observou-se que a carga horizontal se torna cada vez mais importante com o aumento da lâmina d'água, em decorrência do aumento do momento fletor causado na base da estrutura.

Esses resultados corroboram a tese de que a massa cresce exponencialmente com o aumento da lâmina d'água, indicando que a partir de um certo valor de lâmina d'água, a utilização de plataformas do tipo jaqueta torna-se inviável.

A otimização global mostrou que, para cada cenário analisado, existem diversas soluções com massas consideravelmente próximas, indicando que o problema de projeto de uma plataforma oceânica do tipo jaqueta possui múltiplas soluções ótimas de projeto, dadas por diferentes combinações de valores entre as variáveis de projeto.

Além disso é importante destacar que a otimização global recuperou, em 3 dos 4 cenários a solução ótima obtida por ciclos sucessivos de análises de otimização paramétrica.

Assim, o trabalho apresentado cumpre os objetivos estabelecidos, mas diante de novas descobertas estabelece-se como recomendações para trabalho futuros as seguintes sugestões:

- Analisar a influência do peso próprio da estrutura no processo de projeto baseado em otimização;
- Estabelecer limites para os valores das variáveis baseados também em recomendações estabelecidas pelas Normas de sociedades classificadoras como ABS (America Bureau of Shipping), BV (Bureau Veritas), DNV (Det Norske Veritas);
- Incluir uma abordagem tridimensional ao problema de projeto proposto;
- Melhorar o modelo de estimativa das forças hidrodinâmicas;
- Melhorar a ferramenta de análise desenvolvida para utilizar elementos do tipo viga.

## REFERÊNCIAS

- ABAQUS. (2010). **ABAQUS User's Manual**. Providence, Rhode Island, USA: Dassault Systèmes. Simulia Corporation ABAQUS vs. 6.10.
- AMORIM, Tailand. **Plataformas Offshore: Uma breve análise desde a Construção ao Descomissionamento**. Dissertação (Mestrado). 2010. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Evolução da energia eólica no Brasil**. 2016. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_eolica/energia\\_eolica.htm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/energia_eolica.htm). Acesso em: 16 set. 2017.
- Construção em Aço: Aços Estruturais**. 2014. Disponível em: <http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>. Acesso em: 07 nov. 2017.
- EL-MOHR, I. **Renewable Energy Systems - Wind Energy (2)**. Course Material. Disponível em <http://slideplayer.com/slide/10266678/>. Acesso em: 07 novembro. 2017.
- FRANCISCO, C. W. **Energia eólica**. Mundo Educação, 2016 Disponível em: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/energia-eolica.htm> Acesso em: 22 de novembro de 2017.
- GERVEN, F.P.M. **Optimising the Design of a Steel Substructure for Offshore Wind Turbines in Deeper Waters**. 2011. 188f. MSc thesis - Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, 2011
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA, 1989.
- GONÇALVES, A. K. **Análise de Problemas Elastodinâmicos por Intermédio do Acoplamento do Método dos Elementos Finitos e do Método dos Elementos de Contorno**. Dissertação (Mestrado). 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010
- JÚNIOR, A. M. **Estruturas metálicas para suporte de turbinas eólicas offshore**. Dissertação (Mestrado). 2014. Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.
- MARTHA, Luiz Fernando. **Análise Matricial de Estruturas: Aplicada a Modelos Lineares**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: <http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/~lfm/analestrut3-162/LFMartha-AnalMatEstrut-cap02.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2017.
- MET@LICA, Portal, 2010. **O incrível mundo das Plataformas de Petróleo**. Disponível em: [http://www.metallica.com.br/pg\\_dinamica/bin/pg\\_dinamica.php?id\\_pag=1275](http://www.metallica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=1275) Acesso em: 22 Setembro de 2017.

MULFORD, Garcia Edgard. **Procedimento para determinação experimental de carregamentos externos para o projeto estrutural de uma plataforma Semi-Submersível.** Dissertação (Mestrado). 2014. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

NARLLA, Hayanne. **Nordeste é maior produtor de energia eólica no Brasil; Ceará aparece em 3º no País.** 2013. Disponível em: <<http://tribunadoceara.uol.com.br/noticias/ceara/nordeste-e-maior-produtor-de-energia-eolica-no-brasil-ceara-aparece-em-3o/>>. Acesso em: 15 out. 2017.

NEVES, Cheyenne. **Seleção de um conceito de plataforma offshore Para atuação na Bacia de Santos, baseada na análise do movimento de heave.** Trabalho de Conclusão de Curso, Santa Catarina. 2015.

NTS, **NORSOK N-003 Actions And Action Effects**, Norwegian Technology Standards Institution, Second edition 2007.

OKUMOTO, Yet al. **Design of Ship Hull Structures – A Practical Guide for Engineers.** 2. ed. Japão: Springer, 2009.

PERES, P. I. S. **Proposta de Utilização da Energia Eólica e Outras Formas de Energias Alternativas Como Geração Complementar na Exploração e Produção de Petróleo.** 2009. 61 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-graduação Lato Sensu em Formas Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PIRES, Julio. **Início do uso da energia eólica.** 2016. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/sieolica/hist.html>>. Acesso em: 22 set. 2017.

SILVA, A. R. **Energia Eólica em Alto Mar: Distribuição dos Recursos e Complementaridade Hídrica.** 2015. 139 f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SILVA, Luciano da. **Análise Modal e Controle de Plataformas Offshore Sujeitas a Perturbações Persistentes.** 2014. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2014.

TANCREDI, T.P. **Otimização Multidisciplinar Distribuída aplicada a Projetos de Engenharia.** 2008. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

## APÊNDICE A

Através do ensaio de tração é possível determinar muitas propriedades mecânicas de um material. Ao aplicar uma carga definida ( $F$ ) em um corpo de prova com dimensões conhecidas é possível calcular a tensão nominal ( $\sigma$ ), segundo a equação:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

A deformação ( $\epsilon$ ) do material é calculada através da relação entre a variação no comprimento de referência ( $\delta$ ) do corpo de prova e o próprio comprimento original de referência ( $L_0$ ):

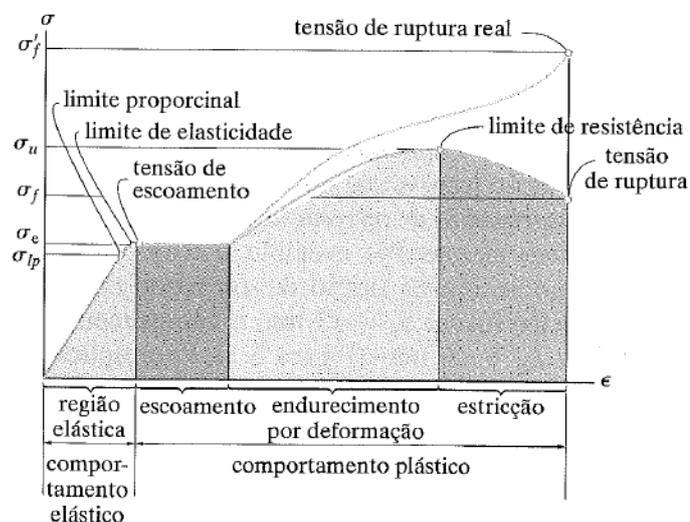
$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

Segundo Hibbeler (2010), o diagrama tensão-deformação (como mostrado Figura 39) é um gráfico muito importante na engenharia, pois proporciona meios para obter dados sobre a resistência à tração de um material sem considerar a geometria do mesmo. Para este trabalho, os aspectos mais relevantes da curva são:

- **Região elástica**

Quando o material apresenta deformações elásticas, significa que o material deforma quando uma carga é aplicada, porém ao retirar a carga, o material volta à configuração original (não deformado).

Figura 39: Diagrama tensão-deformação para o aço (não está em escala)



Fonte: Hibbeler (2010)

## APÊNDICE B

- Algoritmo usado:

```

clc
clear all
close all
set(figure,'Units','Normalized','OuterPosition',[0.5 0 0.5 1]);

%=====
%%
%Vari'is Preliminares de Entrada

N = 2; %Nmero de reforçoes horizontais
La = 100; %L'na de la [m]
B = 25; %Comprimento da base maior da plataforma[m]
b = 10; %Comprimento da base menor da plataforma[m]
re = 1.1226; %Raio externo dos tubos [m]
ri = 1.1001; %Raio interno dos tubos [m]
Ag = 10; %Air gap [m]
P = 2.5e7; %Peso Conv'ido [N]

rhoa = 7850; %Densidade a'oa [kg/m^3]
H = La + Ag;
h = H/(N-1); %Altura entre reforçoes horizontais [m]
alpha = atand(H/((B-b)/2)); %'ngulo entre os reforçoes horizontais e
laterais [deg]
%=====
%%
%Vari'is utilizadas na parametriza'ao da estrutura

N_el = (4*N)-3; %Nmero de elementos
NN = N*2; %Nmero de n'ospan>
x = zeros(1,NN); %Vetor de n'ospan> coordenada X [m]
y = zeros(1,NN); %Vetor de n'ospan> coordenada Y [m]
a = h/tand(alpha); %Cateto adjacente [m]
%=====
%%
%Criando a matriz de n'ospan>

count1 = 1; %Contador
i = 0; %Contador utilizado na parametriza'ao

for j = 1:1:NN

    if(count1 > 2)
        count1 = 1;
        i = i + 1;
    end

    y(j) = h*i;

    if (mod(j,2)==0)
        x(j)=(B/2)-(a*i);
        if (x(j)<0)
            disp('Inconsist'ncia geom'trica (Revise sua geometria...')
            break;
        end
    else
        x(j)=- (B/2)+(a*i);

```

```

        if (x(j)>0)
            disp('Inconsistência geométrica (Revise sua geometria)...')
            break;
        end
    end

    i;

    count1 = count1+1;

end

No = [x(:),y(:)]; %Matriz de n-span>
%=====
%%
%Criando a matriz de elementos

El = zeros(N_el,2); %Matriz de elementos

m_h = 1; %Contador barra horizontal valor
k_h = 1; %Contador barra horizontal linha
l_h = 1; %Contador barra horizontal coluna

m_d = 2; %Contador barra direita valor
k_d = N + 1; %Contador barra direita linha
l_d = 1; %Contador barra direita coluna

m_e = 1; %Contador barra esquerda valor
k_e = N + ((2*(N-1))/2) + 1; %Contador barra esquerda linha
l_e = 1; %Contador barra esquerda coluna

m_diag = 1; %Contador barra diagonal valor
k_diag = N + (2*(N-1)) + 1; %Contador barra diagonal linha
l_diag = 1; %Contador barra diagonal coluna
case1 = true; %Contador barra diagonal
case2 = false; %Contador barra diagonal

for j = 1:1:N_el

    switch(j)
        case j * (j<=N)
            El(k_h,l_h) = m_h;
            l_h = l_h + 1;
            m_h = m_h + 1;
            El(k_h,l_h) = m_h;

            if(l_h>=2)
                l_h = 1;
                k_h = k_h + 1;
                m_h = m_h + 1;
            end

        case j * ((j>N) & (j<=((2*(N-1))/2)+N))

            El(k_d,l_d) = m_d;
            l_d = l_d + 1;
            m_d = m_d + 2;
            El(k_d,l_d) = m_d;

            if(l_d>=2)
                l_d = 1;
            end
        end
    end
end

```

```

        k_d = k_d + 1;
    end

    case j * (j >= (((2*(N-1)))/2)+N+1) & (j <= (2*(N-1))+N)
        El(k_e,l_e) = m_e;
        l_e = l_e + 1;
        m_e = m_e + 2;
        El(k_e,l_e) = m_e;

        if(l_e >= 2)
            l_e = 1;
            k_e = k_e + 1;
        end

    case j * (((j >= (2*(N-1))+N+1)) & (j <= N_el))

        if(case1 == true)
            El(k_diag,l_diag) = m_diag;
            l_diag = l_diag + 1;
            m_diag = m_diag + 3;
            El(k_diag,l_diag) = m_diag;
            l_diag = 1;
            k_diag = k_diag + 1;
            case1 = false;
            case2 = true;
        else
            El(k_diag,l_diag) = m_diag;
            m_diag = m_diag + 1;
            l_diag = l_diag + 1;
            El(k_diag,l_diag) = m_diag;
            k_diag = k_diag + 1;
            l_diag = 1;
            case1 = true;
            case2 = false;
        end

    end

end

end

=====
%% Rotina de plot estrutura

El_print = zeros(N_el,4); %Matriz de elementos a ser plotada

p = 1; %Linhas
q = 1; %Colunas
count2 = 1; %Contador
count3 = 1; %Contador
coluna = 1; %Colunas
g_linha = 1; %Linhas
h_linha = 1; %Colunas

for j = 1:1:(N_el*4)

    El_temp = El(p,q);

    count3 = count3 + 1;
    count2 = count2 + 1;

    if count2 > 2
        q = q + 1;
        count2 = 1;
    end

end

```

```

    if count3 > 4
        q = 1;
        p = p + 1;
        count3 = 1;
    end

    El_print(g_linha,h_linha) = (No(El_temp,coluna));

    coluna = coluna + 1;

    if coluna > 2
        coluna = 1;
    end

    h_linha = h_linha + 1;

    if h_linha > 4
        h_linha = 1;
        g_linha = g_linha + 1;
    end

end

%Plotando a estrutura

plot(No(:,1),No(:,2),'*')

h_linha = 1; %Colunas
g_linha = 1; %Linhas

for j = 1:1:N_el

    x1 = El_print(g_linha,h_linha);
    x2 = El_print(g_linha,h_linha+2);
    y1 = El_print(g_linha,h_linha+1);
    y2 = El_print(g_linha,h_linha+3);

    g_linha = g_linha + 1;

    hold on
    plot([x1 x2], [y1 y2])
end

title('Estrutura de Jaqueta')
ylabel('Posi機 [m]')
xlabel('Posi機 [m]')

% Plotando a linha de  $\lambda$  a

hold on
plot([No(1,1) No(2,1)], [La La], 'c')
%=====
%%
% Defini機 das  $\square$ as de cada elemento

AreaSec = zeros(1,N_el);
for i=1:1:N_el
    AreaSec (i) = (pi)*((re^2)-(ri^2));
end
%=====

```

```

%%
% Definição do módulo de elasticidade cada elemento

Elast = zeros(1,N_el);
for i=1:1:N_el
    Elast (i) = 200*(10^9);
end
=====
%%
% Definição das condições de contorno

BC = [1 2 3 4;
      0 0 0 0];
=====
%%
% Solução Elementos Finitos

% Contar quantidade de número elemento
Num_nos_el=size(El,2); % número de colunas da matriz El
% Contar quantidade de elementos
Num_el=size(El,1); % número de linhas da matriz El
% Contar quantidade de número span>
Num_nos=size(No,1); % contar número de linhas da matriz No
% Quantidade de graus de liberdade por número span>
Num_gl_no=2; % Deslocamento na direção x e y para elemento de barra
% Quantidade total de graus de liberdade
Num_gl=Num_nos*Num_gl_no;

% Criar matriz de rigidez global com termos nulos
KK=zeros(Num_gl,Num_gl); % (mesmo tamanho dos graus de liberdade total)

% Matriz para definir graus de liberdade para cada elemento
Edof=zeros(Num_el,4); % cada coluna representa um grau de liberdade do
elemento
for i=1:Num_el
    Edof(i,1)=El(i,1)*2-1;
    Edof(i,2)=El(i,1)*2;
    Edof(i,3)=El(i,2)*2-1;
    Edof(i,4)=El(i,2)*2;
end

for i=1:Num_el
    AxE(i)=AreaSec(i)*Elast(i); % constante elastica
end

theta = zeros(1,N_el);

for i=1:Num_el %para todos elementos

    % Identificar a numeração do número elemento
    no_1=El(i,1);
    no_2=El(i,2);

    % Identificar a posição no espaço/span>
    x1=No(no_1,1); y1=No(no_1,2);
    x2=No(no_2,1); y2=No(no_2,2);

    % Calcular angulo em relação ao eixo X global
    if(x2-x1)==0 % Elemento na vertical
        if(y2>y1)

```

```

        theta(i)=90; % [degrees]
    else % y2<y1
        theta(i)=-90; % [degrees]
    end
elseif (y2-y1)==0 % Elemento na horizontal
    if (x2>x1)
        theta(i)=0; % [degrees]
    else % x2<x1
        theta(i)=180; % [degrees]
    end
elseif x2<x1
    if y2<y1
        theta(i)=180+atand((y2-y1)/(x2-x1));
    else %y2>y1
        theta(i)=180+atand((y2-y1)/(x2-x1));
    end
elseif x2>x1
    if y2<y1
        theta(i)=360+atand((y2-y1)/(x2-x1));
    else %y2>y1
        theta(i)=atand((y2-y1)/(x2-x1));
    end
end

L(i)=sqrt((x2-x1)^2+(y2-y1)^2); % Comprimento inicial de cada elemento
[m]
V(i) = (pi)*L(i)*((re^2)-(ri^2)); % Volume de cada elemento [m^3]
ma(i) = rhoa * V(i); % Massa de cada elemento [kg]
ma = ma(:);
mat = sum(ma); % Massa total [kg]
P_ma(i) = 9.81*ma(i); %Peso de cada elemento [N]

% Matriz de transformação
c=cosd(theta(i));
s=sind(theta(i));
T=[c s 0 0;-s c 0 0; 0 0 c s; 0 0 -s c];

% Rigidez da Barra
Rig_Bara(i)=AxE(i)/L(i); %K equivalente para cada elemento
k_l=Rig_Bara(i)*[1 0 -1 0; 0 0 0 0; -1 0 1 0; 0 0 0 0]; % Local
k_g=T'*k_l*T; % Global
KK(Edof(i,:),Edof(i,:)) = k_g + KK(Edof(i,:),Edof(i,:));

%Pressão crítica de flambagem
L_quad=L.^2;%quadra o vetor L
C_Crit(i)=1/((pi^2)*Elast(i)*((pi*(((2*re)^4)-((2*ri)^4)))/64));
%constante pressão crítica
P_Crit(i)=L_quad(i)*C_Crit(i);%p_crit^-1
P_Crit(i)=P_Crit(i)^-1; %p_crit corrigido
P_Crit = P_Crit(:);

end
%P_ma(1:N_el) = 0;
disp('Massa de cada elemento [kg]');disp(ma)
disp('Força Crítica das Barras em compressão [N]');disp(P_Crit)
%=====
%%
%Círculo das forças laterais [Bacia de Campos]

%Força Vento

```

```

cv = 0.7;
rhov = 1.225; %densidade vento [kg/m^3]
LV = Ag/(cosd(90-alpha));
Av = LV*(2*re);
vv = 24.83; %velocidade do vento [m/s]
Ve = (cv*rhov*Av*(vv^2))/2;

%Forçador Correnteza
cc = 0.7;
rhoc = 1040; %densidade correnteza [kg/m^3]
LO = La/(cosd(90-alpha));
Ac = LO*(2*re);
vc = 1.6; %velocidade correnteza [m/s]
On = (cc*rhoc*Ac*(vc^2))/2;
=====
%%
% Definição dos carregamentos (peso convectivo n°ubmersos)

colunaload = 3; %Tamanho da matriz de carregamentos

nos_adicionais = (floor(La/h)+1); %N°ubmersos

nos_adicionais_peso = NN; %N°a estrutura

colunaload = colunaload + nos_adicionais + nos_adicionais_peso;

Load = zeros (2,colunaload);

count4 = 1;
m_ld = ((4*N)-3); %Contador V e P valor
k_ld = 1; %Contador V e P linha
l_ld = 1; %Contador V e P coluna

for j = 1:1:2*(colunaload-nos_adicionais-nos_adicionais_peso)

    if (count4<3)
        Load(k_ld,l_ld) = m_ld;
        m_ld = m_ld + 1;
        l_ld = l_ld + 1;
    end
    if(count4==3)
        m_ld = m_ld + 1;
        Load(k_ld,l_ld) = m_ld;
    end
    if(count4==4)
        m_ld = Ve;
        l_ld = 1;
        k_ld = k_ld + 1;
        Load(k_ld,l_ld) = m_ld;
    end
    if(count4==5)
        m_ld = -P/2;
        l_ld = l_ld + 1;
        Load(k_ld,l_ld) = m_ld;
    end
    if(count4==6)
        m_ld = -P/2;
        l_ld = l_ld + 1;
        Load(k_ld,l_ld) = m_ld;
    end
end

```

```

count4 = count4 + 1;
end

count5 = 0;
m_onda = 1; %Contador O valor
k_onda = 1; %Contador O linha
l_onda = 4; %Contador O coluna

for j = 1:1:(2*(nos_adicionais)+1)

    if(count5<nos_adicionais)
        Load(k_onda,l_onda) = m_onda;
        m_onda = m_onda + 4;
        l_onda = l_onda + 1;
    end

    if(count5==nos_adicionais)
        k_onda = k_onda + 1;
        l_onda = 4;
    end

    if(count5 > nos_adicionais)
        Load(k_onda,l_onda) = On/nos_adicionais;
        l_onda = l_onda + 1;
    end

    count5 = count5 + 1;

end

% Definição dos carregamentos (peso da estrutura)
n_rows_column_load=size(Load);
n_column_load = n_rows_column_load(2);
index = 2;

for j = (n_column_load-NN+1):1:n_column_load
    Load(1,j) = index;
    index = index + 2;
end

line = 1;
column = 1;
index_1 = 1;
index_2 = 1;

for j=1:1:N_el*2

    temp_node = El(line,column);
    column = column + 1;

    if column > 2
        column = 1;
        line = line + 1;
    end

    temp_node = temp_node*2;

    for j = (n_column_load-NN+1):1:n_column_load

        if temp_node == Load(1,j)

```

```

        temp_column = j;
    end
end

Load(2,temp_column) = Load(2,temp_column) - (P_ma(index_1)/2);

index_2 = index_2 + 1;

if index_2 > 2
    index_1 = index_1 + 1;
    index_2 = 1;
end

end

=====
%%

% Quantidade de graus de liberdade com condi機 de contorno
Num_BC=size(BC,2);
% Quantidade de graus de liberdade com carregamento
Num_Load=size(Load,2);

K1=KK; % Armazenando matriz K para pos-processamento

% Criar um vetor coluna para a Forç/span>
F=zeros(Num_gl,1); % Criando matriz forç/span>
for i=1:Num_Load
    F(Load(1,i),1)=Load(2,i)+F(Load(1,i),1); % Atribuindo o valor da forç
no gl
end

% Elimando as linhas desnecess[as da matriz global de rigidez do sistema

line = 1;
column = 1;
k_new = KK;
u_bc(1:Num_gl,1)=1;
u_bc(1,1) = 0;
u_bc(2,1) = 0;
u_bc(3,1) = 0;
u_bc(4,1) = 0;

for j = 1:1:(Num_gl*Num_gl)

    if u_bc(line)==0 | u_bc(column)==0
        k_new(line,column)=0;
    end

    column = column + 1;

    if column > Num_gl
        column = 1;
        line = line + 1;
    end

end

end

% Gerando a nova matriz global de rigidez do sistema sem colunas e linhas
nulas

del_line = 0;

```

```

del_column = 0;

for j = 1:1:Num_gl
    if u_bc(j) == 0
        k_new(j-del_line,:) = [];
        del_line = del_line + 1;
    end
end

for j = 1:1:Num_gl
    if u_bc(j) == 0
        k_new(:,j-del_column) = [];
        del_column = del_column + 1;
    end
end

% Eliminando os termos nulos referentes aos deslocamentos nulos do vetor de
for 破

del_line = 0;
f_new = F;

for j = 1:1:Num_gl
    if u_bc(j) == 0
        f_new(j-del_line,:) = [];
        del_line = del_line + 1;
    end
end

% Achando os valores de deslocamento
u_new = k_new^(-1)*f_new;

% Reconstruindo o vetor de deslocamentos
U = zeros(Num_gl,1);
count1 = 1;

for j = 1:1:Num_gl
    if u_bc(j) ~= 0
        U(j) = u_new(count1);
        count1 = count1 + 1;
    else
        U(j) = 0;
    end
end

% Resultado da análise: campo de deslocamentos nodais
disp('Deslocamentos nodais (m):'); disp(U)

% For破de rea破 nos n破om gl restrito
RF=K1*U;
disp('Forcas nos n破N:'); disp(RF)

% Culo para cada elemento
Force=zeros(Num_el,1); % Vetor para as for破 internas

```

```

for i=1:Num_el % Avaliaσ para cada elemento
    % Considerando que o vetor theta jσoi definido anteriormente
    c=cosd(theta(i));
    s=sind(theta(i));
    t=[c s]; % Matriz de transformaσ
    deltaU(1,i)= U(Edof(i,3))-U(Edof(i,1)); % U2-U1 (direσ x)
    deltaU(2,i)= U(Edof(i,4))-U(Edof(i,2)); % V2-V1 (direσ y)
    F_int(i)=Rig_Bara(i)*t*deltaU(:,i);
    Sigma(i)=F_int(i)/AreaSec(i);
    F_int = F_int(:);
    Sigma = Sigma (:);
end
disp('Forca interna em cada elemento [N]:'); disp(F_int)
disp('Tensao em cada elemento [Pa]:'); disp(Sigma)
=====
%%
%Teste de flambagem

R_1 = zeros(Num_el,1);

for i=1:Num_el
    if F_int(i,1) < 0
        if abs(F_int(i,1))>abs(P_Crit(i,1))%testa se a forσ de compressσ
exede o limite de flambagem do elemento
            R_1(i,1) = R_1(i,1) + (abs(F_int(i,1))-abs(P_Crit(i,1)));
            Valor1=abs(F_int(i,1))/(P_Crit(i,1));%calcula quantas vezes
exede o limite (ex: 1,2576 vezes maior)
            disp('Elemento');disp(i);disp('excede
em');disp(Valor1);disp('vezes o limite de flambagem')%se exeder, avisa qual
elemento, e quantas vezes
            disp('_____')
        end
    end
end

R_total_1 = sum(R_1);
R_total_1

%Teste de escoamento

Sigma_max = 345e+6; % Pa
R_2 = zeros(Num_el,1);

for i=1:Num_el
    if abs(Sigma(i,1))>Sigma_max %testa se o elemento escoou
        R_2(i,1) = R_2(i,1) + (abs(Sigma(i,1))-abs(Sigma_max));
        Valor2=abs(Sigma(i,1))/Sigma_max; %calcula quantas vezes exede o
limite (ex: 1,2576 vezes maior)
        disp('Elemento');disp(i);disp('excede em');disp(Valor2);disp('vezes
o limite de escoamento')%se exeder, avisa qual elemento, e quantas vezes
        disp('_____')
    end
end

R_total_2 = sum(R_2);
R_total_2
=====
% %% Printando vetores de carregamento de onda e vento
%
% drawArrow = @(x,y,varargin) quiver( x(1),y(1),x(2)-x(1),y(2)-y(1),0,
varargin{:} );

```

```

%
% delta = -1;
%
% j = 1;
%
% for i = 1:1:(NN/2)
%
%     x1 = [(No(j,1)+delta) No(j,1)];
%     y1 = [No(j,2) No(j,2)];
%
%     j = j + 2;
%
%     if i <= nos_adicionais
%         drawArrow(x1,y1,'MaxHeadSize',100,'linewidth',0.5,'color','b')
%     else
%         drawArrow(x1,y1,'MaxHeadSize',100,'linewidth',0.5,'color','k')
%     end
% end
%
% delta = 1;
%
% x1 = [No(NN-1,1) No(NN-1,1)];
% y1 = [No(NN-1,2)+delta No(NN-1,2)];
% x2 = [No(NN,1) No(NN,1)];
% y2 = [No(NN,2)+delta No(NN,2)];
%
% drawArrow(x1,y1,'MaxHeadSize',100,'linewidth',0.5,'color','m')
% drawArrow(x2,y2,'MaxHeadSize',100,'linewidth',0.5,'color','m')
%
% axis([- (B+2)/2 (B+2)/2 0 (H+1)])

```