

# Engenharias Mecânica e Industrial: Gestão e Simulação

Franciele Bonatto  
Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
(Organizadores)



**Atena**  
Editora

Ano 2018

**Franciele Bonatto**  
**Henrique Ajuz Holzmann**  
**João Dallamuta**  
(Organizadores)

# **Engenharias Mecânica e Industrial: Gestão e Simulação**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E57	Engenharias mecânica e industrial [recurso eletrônico] : gestão e simulação / Organizadores Franciele Bonatto, Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web ISBN 978-85-85107-77-2 DOI 10.22533/at.ed.772180506  1. Automação industrial. 2. Engenharia mecânica. 3. Produtividade industrial. I. Bonatto, Franciele. II. Holzmann, Henrique Ajuz. III. Dallamuta, João.  CDD 670.427
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A engenharia mecânica provavelmente seja a mais versátil de todas as engenharias. Sua gama de atuação envolve praticamente todas as atividades industriais e inúmeros temas transversais como materiais, métodos, gestão e qualidade. Temas estes que se subdividem em vários outros, o que torna a organização de um livro de engenharia mecânica é uma tarefa desafiadora, porém gratificante. Nesta obra é possível verificar a diversidade de temas envolvendo a engenharia mecânica e industrial com metodologias de simulação e gestão.

A simulação é na sua essência uma ferramenta experimental e refere-se a um modelo de realidade que nos permite avaliar e prever a dinâmica de desdobramento dentro de condições pré definidas.

É uma das bases da atividade de engenharia, sem a qual viabilidades econômicas e sobretudo de segurança em projetos de componentes e sistemas não seriam obtidas. Processos de simulação buscam melhores índices de segurança e retorno para o projeto.

Neste livro são apresentados vários trabalhos, alguns com resultados práticos, sobre simulações em vários campos da engenharia industrial, nas áreas de escoamentos, elementos de máquinas e aproveitamento energético.

Igualmente importante para a segurança, mas sobretudo para o retorno econômico de projetos, são as técnicas de gestão adequadas. São apresentados trabalhos de análise de qualidade de vida, acidentes de trabalho e melhoria contínua do ambiente industrial. Estas abordagens trazem o elemento humano para a discussão e ratificam a importância do profissional de engenharia para a sociedade como um todo.

Boa leitura

Franciele Bonatto  
Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ANÁLISE DA CARÇAÇA INTERTRAVADA DE UM TUBO FLEXÍVEL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	
<i>Virgínia Siqueira Gonçalves</i>	
<i>Elias Rocha Gonçalves Júnior</i>	
<i>Álvaro de Azeredo Araújo de Carvalho</i>	
<i>Juliana Araujo Brasil</i>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>15</b>
ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO NO PADRÃO ANULAR: UMA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE ATRITO INTERFACIAL	
<i>Cidelei Ferreira de Paula Junior</i>	
<i>Luiz Eduardo Melo Lima</i>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>28</b>
MODELAGEM NUMÉRICA EM LÂMINA DE MOLA SEMIELÍPTICA	
<i>Marcella Monnique Mello da Silva</i>	
<i>Leonel Leonardo Delgado Morales</i>	
<i>Vinícius Rodrigues Moraes Silva</i>	
<i>Yanique Vidal Costa</i>	
<i>André Nepomuceno Trajano</i>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>37</b>
DETECÇÃO DE DEFEITOS EM ROLAMENTOS INDUSTRIAIS ATRAVÉS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	
<i>Luís Henrique Ferreira de Oliveira</i>	
<i>Jorge Nei Brito</i>	
<i>Lucas Costa Brito</i>	
<i>Daniel Junio Soares Rodrigues</i>	
<i>Vinícius Augusto Diniz Silva</i>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>49</b>
AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE SOMMERFELD E OCVRK PARA MANCAIS HIDRODINÂMICOS RADIAIS	
<i>Gabriel Alves Costa</i>	
<i>Erickson Fabiano Moura Sousa Silva</i>	
<i>Sillas de Oliveira Cezar</i>	
<i>Victor Hugo Martins de Almeida</i>	
<i>Vaneide Gomes</i>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>63</b>
ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE UM TRANSPORTADOR DE LÂMINAS DE CLÍNQUER	
<i>Raphael Calazans Cardoso</i>	
<i>Frederico Castro Souza</i>	
<i>Abraão Santos Silva</i>	
<i>Gustavo Dória Lima</i>	
<i>Sandro Griza</i>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>74</b>
TRAÇADO DO DIAGRAMA DE INTERAÇÃO N, M DE PILARES EM CONCRETO ARMADO SOB FLEXÃO NORMAL COMPOSTA	
<i>Ana Carolina De Oliveira Ribeiro</i>	
<i>Caroline Martins Calisto</i>	
<i>Cristiane Caroline Campos Lopes</i>	
<i>Thamires Carvalho Neves</i>	

<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>82</b>
ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDA NA PLATAFORMA CONTINENTAL BRASILEIRA	
<i>Ricardo Cardoso Guimarães</i>	
<i>Phelype Haron Oleinik</i>	
<i>Eduardo de Paula Kirinus</i>	
<i>Bruno Vasconcellos Lopes</i>	
<i>William Correa Marques</i>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>90</b>
APLICATIVO EM AMBIENTE MATLAB PARA METODOLOGIA EDUCACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE PROJETOS FOTOVOLTAICOS	
<i>Bruno de Alencar Carneiro</i>	
<i>Rubens Soeiro Gonçalves</i>	
<i>Rômulo Diêgo Marinho Siqueira</i>	
<i>Ricardo Medeiros Rodrigues</i>	
<i>Dalmir dos Santos Matos</i>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>106</b>
ANÁLISE E DISCUSSÕES SOBRE ACIDENTES DE TRABALHO NAS OPERAÇÕES COM TRATORES AGRÍCOLAS NA REGIÃO DO ALTO SERTÃO SERGIPANO	
<i>Antonio Cardoso Ferreira</i>	
<i>Fábio Santos de Oliveira</i>	
<i>Fabrcio Oliveira da Silva</i>	
<i>Jubirai José Galliza Júnior</i>	
<i>Vagner dos Anjos Costa</i>	
<i>Silvio Leonardo Valença</i>	
<i>Cochiran Pereira dos Santos</i>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>118</b>
AS DIFERENTES NUANCES NA QUALIDADE DE VIDA NO TRABALHO (QVT) NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO COMPARATIVO EM EQUIPES DE MANUTENÇÃO E PROJETOS	
<i>André Luis Martins de Souza</i>	
<i>Renata Alessandra Evangelista</i>	
<i>Alexandre Assis Bueno</i>	
<i>Lucas Oliveira Magalhães</i>	
<i>Pedro de Freitas Silva</i>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>132</b>
O USO DA KAIZEN NO SETOR DE MONTAGEM	
<i>Maikon Ricardo Peruchini</i>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>145</b>

## ANÁLISE DA CARÇAÇA INTERTRAVADA DE UM TUBO FLEXÍVEL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

### **Virgínia Siqueira Gonçalves**

Universidade Candido Mendes  
Campos dos Goytacazes – Rio de Janeiro

### **Elias Rocha Gonçalves Júnior**

Universidade Candido Mendes  
Campos dos Goytacazes – Rio de Janeiro

### **Álvaro de Azeredo Araújo de Carvalho**

Universidade Candido Mendes  
Campos dos Goytacazes – Rio de Janeiro

### **Juliana Araujo Brasil**

Universidade Estácio de Sá  
Campos dos Goytacazes – Rio de Janeiro

**RESUMO:** As carcaças intertravadas são estruturas fundamentais para o desenvolvimento da indústria do petróleo e são utilizadas em tubos flexíveis. Os flexíveis são tubos aplicados em estruturas submarinas para o deslocamento de fluidos e/ou instrumentalizar sistemas em plataformas. Neste trabalho, foram desenvolvidas análises da carcaça de um tubo flexível de 4 polegadas sob carregamentos externos de tração utilizando o método de elementos finitos. As simulações foram realizadas pelo software Autodesk Inventor®, versão estudantil 2015. Através do monitoramento dos carregamentos de tração, pode-se assim determinar suas propriedades mecânicas, a fim de minimizar a possibilidade de ocorrência de falhas, aumentar a vida útil

e otimizar a confiabilidade operacional. Para realizar a análise da carcaça, foi utilizado um perfil próprio de 48 x 1,2 mm e o aço inoxidável AISI 304 como material de teste. A partir da análise realizada, pode-se afirmar que o perfil selecionado teve comportamento equivalente ao esperado, uma vez que a face que estava engastada deveria ser o ponto com menor e a face tracionada o de maior tensão. Além disso, verificou-se que a tensão máxima exercida no aço AISI 304 em teste é aproximadamente igual ao valor, deste mesmo material, de tensão máxima teórica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Carcaça intertravada, Carregamentos externos, Tubos flexíveis.

**ABSTRACT:** Interlocked carcasses are essential structures for the development of the petroleum industry and are used in flexible hoses. The flexible are tubes applied in underwater structures for the displacement of fluids and / or instrumentalize systems on platforms. In this work, analyzes of the carcass of a 4-inch flexible tube under external traction loads were developed using the finite element method. The simulations were carried out using Autodesk Inventor® software, student version 2015. Through the monitoring of traction loads, it is possible to determine its mechanical properties in order to minimize the possibility of

occurrence of failures, increase the useful life and optimize the reliability Operational. To perform the analysis of the carcass, a 48 x 1,2 mm profile and AISI 304 stainless steel were used as test material. From the analysis performed, it can be affirmed that the selected profile had behavior equivalent to that expected, since the face that was embedded should be the point with smaller and the traction face with the higher tension. Furthermore, it has been found that the maximum stress exerted on the test AISI 304 steel is approximately equal to the value of the theoretical maximum stress of the same material.

**KEYWORDS:** Interlocked Carcass, External loads, Flexible pipelines.

## 1 | INTRODUÇÃO

Sabe-se que com toda a expansão ocorrida no mercado do petróleo, o aumento da exploração, produção e exportação foi bem visível nas últimas décadas. No Brasil, há uma das maiores petrolíferas do mundo, a Petróleo Brasileiro S/A, mais conhecida como PETROBRAS (FRANCISCO, 2016). A partir disso, tornou-se necessário que novos estudos fossem realizados para o desenvolvimento de novas tecnologias, transporte de fluido e gases, o que levou a uma evolução relevante na forma de obter o óleo. Assim, as empresas offshores começaram a fazer uso dos tubos flexíveis, com camadas concêntricas plásticas e metálicas. A característica que confere ao tubo essa flexibilidade é a carcaça, camada mais interna do duto, que, por ser intertravada, possibilita certo movimento (PORTAL PETROBRAS, 2016).

Nas empresas petrolíferas, são encontrados dois tipos de tubos, rígidos e flexíveis, sendo estes utilizados para o transporte de vários tipos de fluido como petróleo, água de injeção e gases utilizados para gaslift ou injeção, e produtos químicos, geralmente trabalhando em condições severas e altas pressões.

A partir de um significativo número de estudos, observou-se a viabilização do uso de tubos flexíveis, considerada uma das formas mais seguras de produzir petróleo. Por isso, é importante aprofundar os conhecimentos sobre estes, pois suas falhas podem causar vazamento de fluido, imobilização de sistemas de operação, atraso de produção e danos ao meio-ambiente.

Os flexíveis possuem alto custo de fabricação, sendo utilizados em grandes lâminas d'água, tanto no pré-sal, como no pós-sal, em lâminas pequenas como na exploração terrestre do petróleo, também denominada onshore. A capacidade de carga é derivada de sua flexibilidade e, nesse caso, necessitam do apoio do solo e resistem a cargas de menor valor. Estes são classificados como: *risers* e *flowlines*. Os *risers* são dutos utilizados para aplicações de caráter dinâmico e aqueles utilizados para aplicações estáticas são denominados *flowlines* (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE TUBO DE CONCRETO, 2016).

As duas classificações apresentam estruturas tubulares, formadas por

sobreposição de camadas metálicas, utilizadas para equilíbrio estrutural, suportar os esforços internos do fluido transportado e também carregamentos externos como pressão hidrostática e correnteza marítima, além de possuir camadas poliméricas que tem a função impermeabilizante (BICUDO, 2009).

Para a prevenção do colapso do tubo causado pelas camadas helicoidais quando submetidos a esforços externos, utilizamos a carcaça intertravada. Esta tem por funções sustentar as cargas radiais, resistir aos esforços de compressão diametral e a pressões externas. Geralmente, é composta de aços inoxidáveis do tipo ANSI 316L ou 304L (AK STEEL, 316/316L Stainless Steel; 304/304L Stainless Steel).

Como o objetivo do trabalho é analisar o comportamento estrutural da carcaça intertravada de um tubo flexível de quatro polegadas sob carregamentos externos de tração, vale fazer uma sucinta explicação sobre os tipos de esforço citados anteriormente. “1. Tração é o ato ou efeito de puxar, arrastar e movimentar”; “2. Ação de uma força que desloca o objeto móvel por meio de corda ou algo mais intermediário.” (FERREIRA, 1999).

Neste trabalho, os ensaios mecânicos não foram empregados, sendo análise numérica qualitativa dos esforços feita através do método de elementos finitos, utilizando-se do software Autodesk Inventor® 2015, versão estudantil.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

O tubo flexível foi inicialmente proposto pelo Instituto Francês de Petróleo (IFP) em 1960 e foi comercializado em 1972 (MACHADO, 1980). Em 1977, o campo de Garoupa, na Bacia de Campos, teve seus primeiros tubos flexíveis instalados. Aproximadamente 80% da produção atual de petróleo e gás brasileiros se dão pelo uso dos tubos flexíveis (CARNEVAL; MARINHO, 2006). Há cerca de 1200 flexíveis em operação e uma malha de quase 5.300 km se conectam as variadas estruturas de produção, como por exemplo, plataformas e boias.

Os flexíveis são tubos aplicados em estruturas submarinas para o deslocamento de fluidos e/ou instrumentalizar sistemas em plataformas, conforme Figura 1. Witz (1996) afirma:

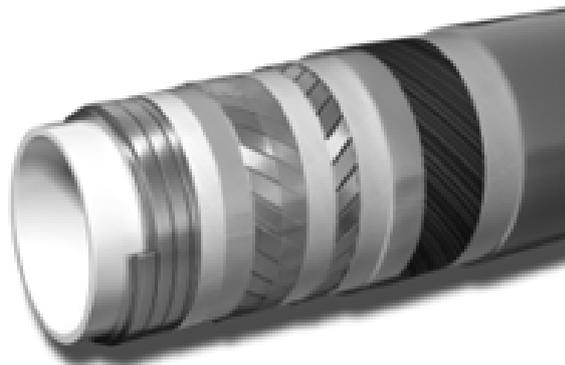


Figura 1. Tubo flexível típico

A estrutura do flexível tende a variar conforme o fabricante, o local de sua aplicação, a tecnologia adotada em sua fabricação, a especificação do fluido e a profundidade da lâmina d'água. Mas, fundamentalmente, é composta por camadas de aço que são enroladas helicoidalmente e de camadas homogêneas de termoplásticos com diferentes geometrias e materiais (TARFAOUI; GNING; COLLOMBET, 2009).

Conforme a sua fabricação, são classificados em não aderentes (*unbonded*) ou aderentes (*bonded*):

- Aderentes: Camadas ligadas através de adesivo ou pela aplicação simultânea de pressão e calor, tendo como resultado uma estrutura única;
- Não aderentes: Camadas independentes, deslizamentos podem ocorrer.

Quanto à aplicação, o flexível pode ser denominado como *Risers* ou *Flowlines*.

## 2.2 *Risers*

Os *risers* podem ser identificados como tubos de longos comprimentos constituídos de diferentes camadas que permitem o transporte do petróleo em águas ultra profundas, também interligam a unidade produtora e exploradora ao *flowline*. Podem ser rígidos ou flexíveis, sendo que estes possuem variadas aplicações voltadas para o campo da engenharia offshore, segundo a norma API RP 17B (2002) são classificadas em:

- Produção – petróleo, gás, condensados e água;
- Injeção – água, gás e produtos químicos para o poço;
- Exportação – petróleo semi-processado e gás;
- Serviços – produtos químicos de topo de poço e fluidos de controle.

Conforme a sua fabricação, são classificados em não aderentes (*unbonded*) ou aderentes (*bonded*):

- *Riser Bonded*: Com adesivo entre as camadas para reforçar a matriz polimérica;
- *Riser Unbonded*: Sem adesivo entre as camadas.

## 2.2 *Flowlines*

Os *flowlines*, assim como os *risers*, são formados por seções transversais compostos por camadas variadas, apresentando funções específicas. É caracterizado pelo seu assentamento no leito marinho após sua instalação, aplicados em serviços estáticos de interligação de equipamentos marinhos. A organização de suas camadas difere dos *risers*, não possuem camadas antidesgaste já que somente haverá movimento relativo em sua instalação e a disposição de algumas camadas poliméricas (SANTOS, 2011).

## 2.3 Características estruturais e mecânicas

Como Lopes (2013) afirma, os flexíveis são estruturados por camadas concêntricas. Assim, é esperado que as seguintes propriedades sejam alcançadas:

- Elevada resistência à tração;
- Baixa rigidez à flexão, permitindo o bobinamento e armazenamento;
- Elevada rigidez axial;
- Capacidade de resistir e ter seu peso próprio suportado durante o lançamento;
- Capacidade de acomodar os movimentos naturais aos processos de instalação e operação;
- Resistência à pressão interna e externa e a possíveis esforços de sua despressurização rápida;
- Estrutura esbelta.

A estrutura dos tubos flexíveis é complexa e de camadas variadas em função das condições de operação para as quais serão aplicadas, com características, finalidades e funcionalidades especificadas para cada camada.

Segundo Pagotto (2013), as camadas de um tubo flexível são as seguintes:

- Camada de isolamento térmico;
- Capa externa;
- Armadura de tração;
- Camada anti-desgaste;
- Armadura de pressão;
- Camada plástica interna;
- Carcaça intertravada.

## 2.4 Carcaça intertravada

Como este trabalho tem por finalidade analisar o comportamento estrutural da mesma sob esforços externos, faz-se necessário um conhecimento mais pertinente do seu processo de fabricação, materiais mais utilizados, conformação das fitas, entre outras características.

O processo de fabricação é dado por sucessivas conformações e soldagens. Para iniciar o processo, utiliza-se uma “fita” de aço inoxidável duplex que é conformada e enrolada em hélice em torno de um mandril, que é responsável por intertravar cada seção possibilitando a armação dessa “espiral”. Como o processo de “espiralagem” é contínuo, as fitas de aço vão sendo soldadas umas às outras até a obtenção da extensão pretendida em formatação em “S” para um encaixe sequencial (PEREIRA et al., 2014).

Com isso, as juntas devem exibir boas características mecânicas em função da severidade da conformação. Então, se concretiza dessa forma o que se conhece como

carcaça intertravada (OLIVEIRA; LUZ, 2013).

Segundo Pagotto (2013), a carcaça intertravada é utilizada pela capacidade de prevenir o colapso do tubo quando submetido à pressão externa e suporta também a camada plástica interna.

Com o aumento da agressividade do fluido interno, o tipo de aço adequado para a carcaça intertravada passa gradativamente do aço carbono para o aço-liga com alto teor de níquel (SOUSA, 2005).

A carcaça intertravada é feita de aço inox austenítico, o qual obrigatoriamente possui boa resistência à corrosão por hidrocarbonetos e água. Utilizam-se aços inoxidáveis do tipo AISI 304, AISI 316, AISI 409, entre outros (SOUSA, 1999).

A Tabela 1 demonstra, segundo Bastian (2000), a relação entre as propriedades de alguns componentes da camada intertravada. Não houve a consideração da ação do encruamento no processo de fabricação nestes valores.

Tipo de AÇO	Tensão de Escoamento	Ruptura	
		Tensão	Deformação
AISI 304	310 MPa	620 MPa	30,0%
AISI 304L	310 MPa	620 MPa	30,0%
AISI 316	310 MPa	620 MPa	40,0%
AISI 316L	310 MPa	620 MPa	30,0%
AISI 409	205 MPa	380 MPa	20,0%
AISI 430	205 MPa	450 MPa	22,0%
UNS S31803	450 MPa	620 MPa	25,0%

**Tabela 1.** Propriedade dos aços utilizados para fabricação da carcaça intertravada.

## 2.5 Método dos Elementos Finitos

A modelagem numérica desempenha um papel muito importante na análise do comportamento das estruturas submetidas ao carregamento rápido (TARFAOUI; GNING; COLLOMBET, 2009). Esta análise, baseada na resolução da equação de equilíbrio dinâmico e na equação de conservação de energia com as condições de contorno impostas à estrutura, requer o uso do comportamento mecânico do material envolvido

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma eficiente ferramenta numérica de resolução de problema de um meio contínuo. Proporciona modelagens realísticas, seguras com aplicações práticas na engenharia, sendo mais econômicas que os modelos físicos, que são utilizados usualmente em escala reduzida e em laboratórios (SORIANO, 2003).

Segundo Pereira (2005), pode-se afirmar que atualmente este método é o modelo numérico mais utilizado na obtenção de soluções de diversos problemas com importância para a Engenharia.

O MEF permite o estudo de deslocamento e o estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria sob esforços externos. Quando utilizado para projetar uma

estrutura, é usual que diversas análises e modificações das suas características sejam realizadas, com o objetivo de se alcançar um resultado satisfatório na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares, além de alcançar níveis econômicos convenientes, o que viabilizaria o projeto (CLOUGH, 1960).

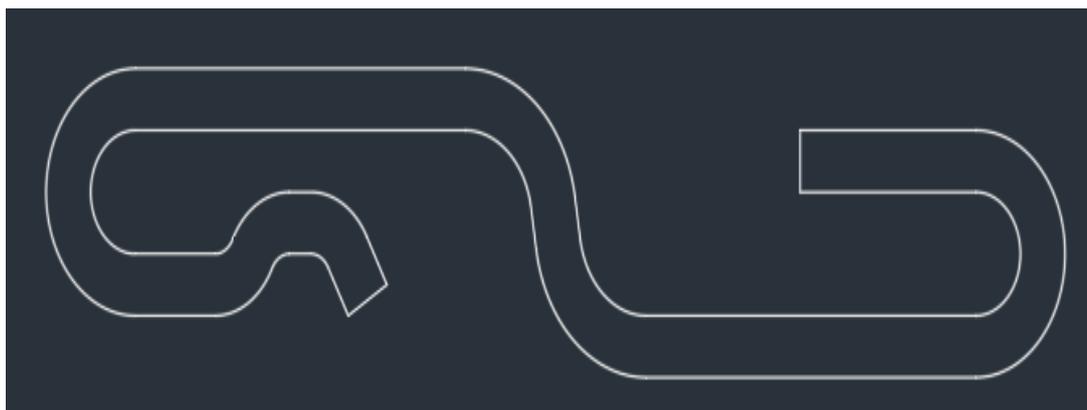
## 2.6 Modelagem e simulação de carregamentos externos

Foi realizada uma simulação de análise de tensão axial e, para tal, utilizou-se o software Autodesk Inventor® 2015, baseado no método de elementos finitos. Esta análise buscou avaliar o comportamento da carcaça intertravada de um tubo flexível, além de determinar o comportamento do material escolhido para a mesma, neste caso o aço inox AISI 304, e para validação do modelo de carcaça utilizado.

A simulação foi realizada com a aplicação de carga na carcaça intertravada de um *riser*, pelo fato de este ser o tipo de tubo flexível que está sujeito a esforços dinâmicos, uma vez que o *flowline* fica disposto no leito marinho, livre de quaisquer esforços do tipo dinâmico ou impactos. A força a ser aplicada teve um módulo de 14380 Newtons, sendo que esse valor foi encontrado devido aos vários testes realizados na amostra, a fim de atingir a tensão máxima suportada pelo material.

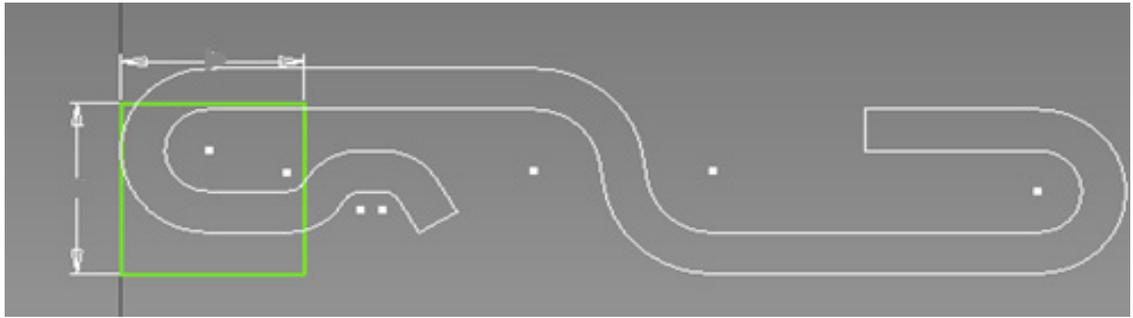
Foi desenvolvido um modelo próprio de carcaça intertravada foi adotado para esta análise de tensão. O perfil da fita foi de 48 x 1,2 mm. O desenho do perfil “S” foi feito no Autodesk Autocad® 2017, em seguida, o desenho foi importado para o Autodesk Inventor® 2015 para a criação do modelo sólido de 4 polegadas. Em uma conversão de polegada para milímetro, obtemos 101,6 de diâmetro interno.

O desenho inicial foi feito no Autodesk Autocad® 2017, ilustrado na Figura 2, e em seguida a carcaça foi projetada em 3D no Autodesk Inventor® 2015.

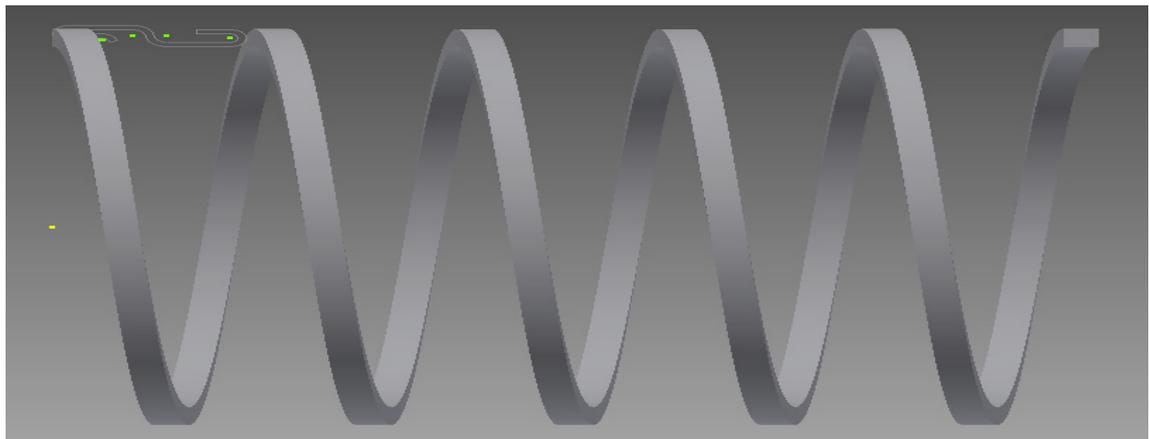


**Figura 2.** Desenho do perfil da carcaça intertravada no Autodesk Autocad® 2017

Para que o desenho tenha o perfil cilíndrico de um tubo, desenhou-se um quadrado pequeno na parte inferior da carcaça, vide Figura 3, para que o comando “coil” pudesse ser realizado com passo de 28,5 mm, vide Figura 4, com a intenção de ser utilizado como base para modelagem da carcaça.



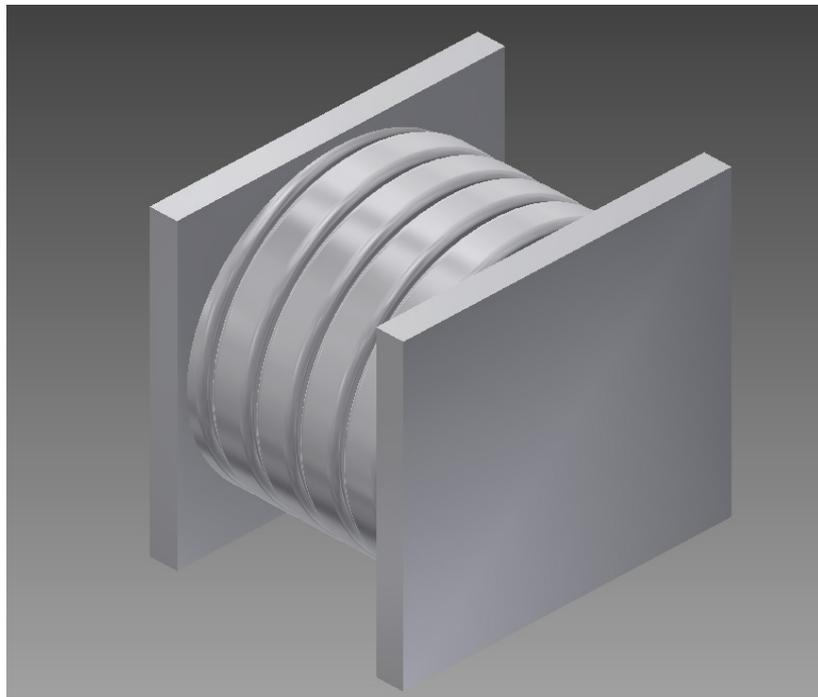
**Figura 3.** Quadrado utilizado para molde



**Figura 4.** Comando “coil” no perfil quadrado

O comando utilizado para que o perfil intertravado acompanhasse o perfil quadrado foi o “sweep” e as espiras foram cortadas de forma que ficassem verticalmente uniformes para receberem as placas.

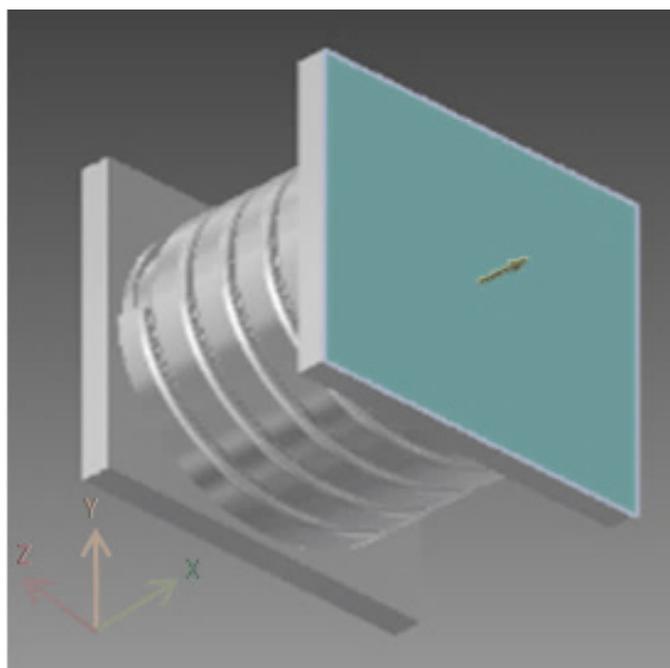
Duas placas que foram anexadas às extremidades da carcaça, com a finalidade de que a carga seja aplicada de forma uniforme e homogênea em toda a sua estrutura para resultados mais confiáveis. O tamanho inicial do corpo da amostra da carcaça intertravada utilizado na análise de estresse foi de 70 mm e cada placa anexada às extremidades possui 5 mm, conforme Figura 5.



**Figura 5.** Estrutura final para teste

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a modelagem da carcaça intertravada, realizou-se a simulação de estresse, que consiste na aplicação axial de força. As placas anexadas aos limites da carcaça intertravada, visto que uma face foi engastada, ou seja, fixada, e a extremidade oposta ficou sujeita a carga de tração, como demonstrado na Figura 6.



**Figura 6.** Face da estrutura sujeita a aplicação de carga de tração

Na Tabela 2, podem ser verificadas algumas informações apresentadas pelo relatório gerado pelo software Autodesk Inventor® 2015 ao fazermos a análise. Os dados foram reportados em inglês, logo uma versão traduzida para português será apresentada neste trabalho.

Nome	Aço inoxidável AISI 304	
Geral	Densidade da Massa	8 g/cm <sup>3</sup>
	Força de Rendimento	215 MPa
	Resistência a Tração	505 MPa
Estresse	Módulo de Young	195 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.29 ul
	Módulo de Cisalhamento	75.58 GPa

**Tabela 2.** Informações base do Aço Inoxidável AISI 304.

A carga de tração aplicada na imagem acima teve um módulo de 14380 Newtons, como mostrado na Tabela 3.

Tipo de carga	Força
Magnitude	14380,000 N
Vetor X	- 14380,000 N
Vetor Y	0,000 N
Vetor Z	0,000 N

**Tabela 3.** Módulo da carga aplicada, extraído do relatório de análise de estresse

Dos resultados obtidos durante a análise de tensão, os valores que serão levados em consideração são os de Análise de Estresse de Von Mises (Von Mises *Stress*) e o Deslocamento.

### 3.1 Método dos Elementos Finitos Análise de estresse de Von Mises

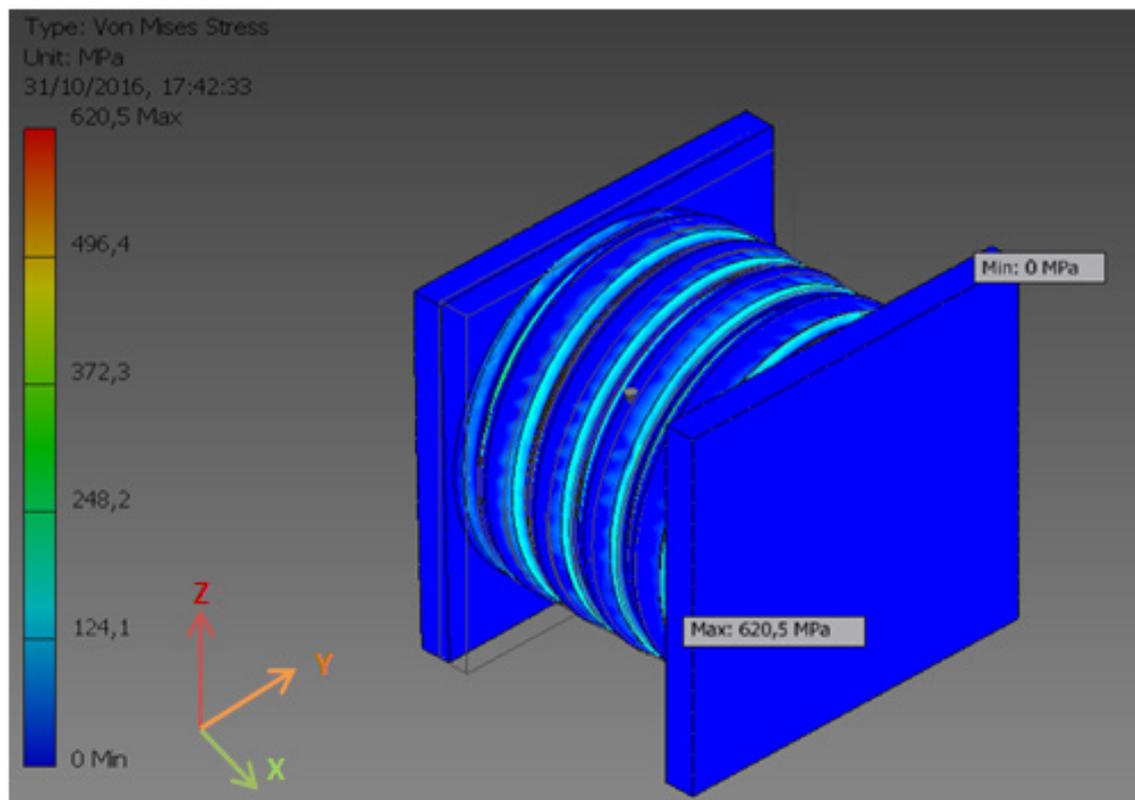
Segundo Cury (2016), a teoria de Von Mises se correlaciona melhor com os dados experimentais, e por isso é a mais utilizada. Nessa teoria, são levados em consideração os conceitos de energia de distorção de certo corpo, ou seja, a energia associada nas mudanças na forma do elemento e não do seu volume.

O critério de Von Mises se enuncia como (CURY, 2016):

Um elemento estrutural (dúctil) irá falhar se a energia associada à mudança de forma de um corpo, submetido a um carregamento multiaxial, ultrapassar a energia de distorção de um corpo de prova submetido a um ensaio uniaxial de tração.

A partir da aplicação de uma carga de 14380 N, obtiveram-se os valores mínimos e máximos de tensão que foram registrados no corpo e informados pelo software. O

módulo de tensão de ruptura do material aço inoxidável AISI 304 obtido no teste é de 620,5 MPa, conforme Figura 7.



**Figura 7.** Estresse de Von Mises após realização da simulação

Na Tabela 4, é destacada a tensão máxima e mínima informadas pela amostra através do relatório de ensaio gerado pelo *software*.

Nome	Mínimo	Máximo
Volume	371989 mm <sup>3</sup>	-
Massa	2,97591 kg	-
Von Mises Stress	0,00753533 MPa	620,472 MPa

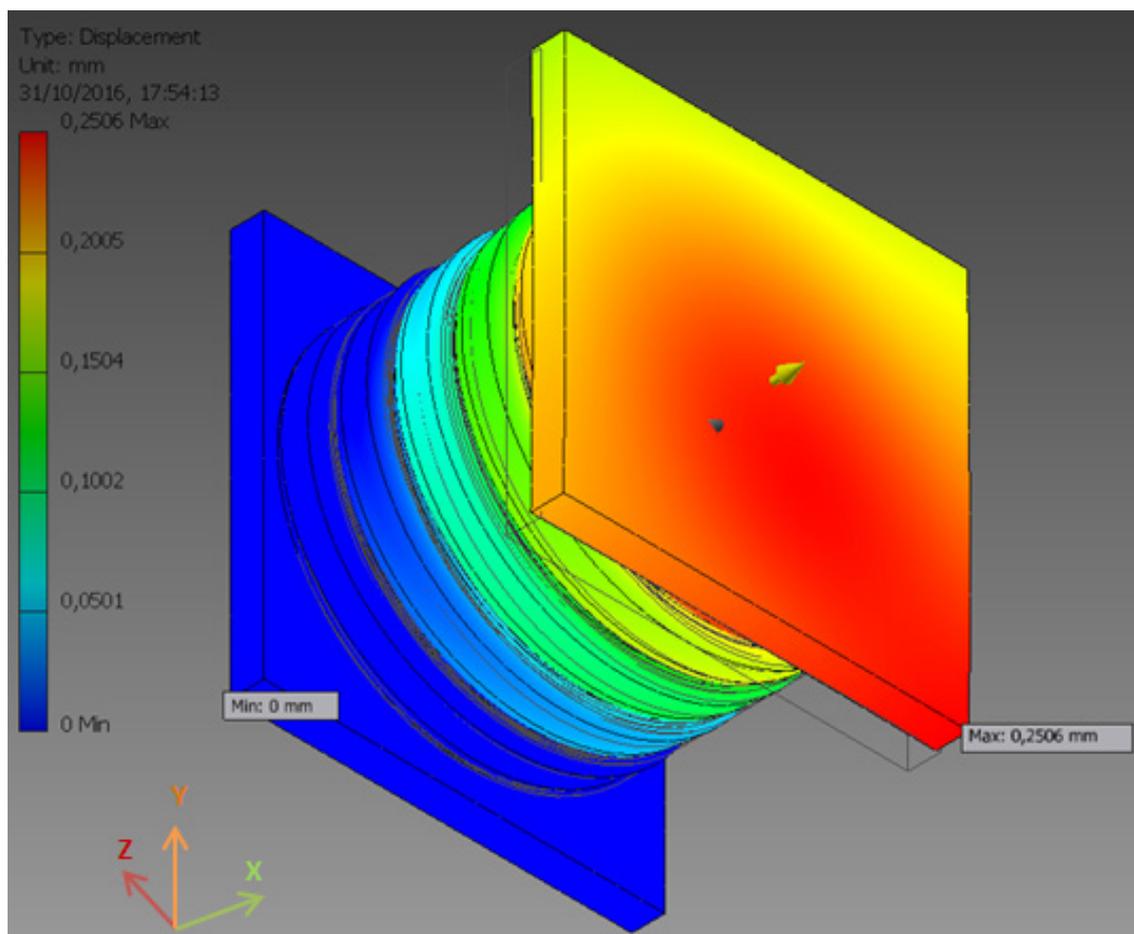
**Tabela 4.** Módulos, máximo e mínimo, de tensões

### 3.2 Análise de deslocamento

Segundo O deslocamento, como o próprio nome já diz, é a quantidade que um corpo tende a se deformar com a aplicação de uma força. No caso da aplicação de carga de tração, o corpo tende a se alongar. O software adotado para a análise de tensão disponibiliza dois tipos de deslocamento: o deslocamento geral e deslocamento que se dá nos três eixos: x, y e z.

Porém, apenas o deslocamento geral será ilustrado, uma vez que, este sozinho, já demonstra o comportamento estrutural da carcaça intertravada com uma carga de tração aplicada em uma de suas extremidades.

A Figura 8 demonstra em cores, do azul (mínimo) ao vermelho (máximo), o deslocamento sofrido pela amostra. Deve-se salientar que o deslocamento se dá de forma mais acentuada na face que sofre o carregamento externo de tração.



**Figura 8.** Gráfico de campo escalar para o deslocamento sofrido pela carcaça intertravada

O módulo de deslocamento máximo obtido foi de 0,2506 mm, detalhado na Tabela 5, com as informações disponibilizadas pelo relatório de análise de estresse, gerado pelo Autodesk Inventor® 2015.

Nome	Mínimo	Máximo
Deslocamento Geral	0 mm	0.250601 mm
Deslocamento X	-0.248606 mm	0.00112781 mm
Deslocamento Y	-0.023277 mm	0.0416777 mm
Deslocamento Z	-0.0375316 mm	0.0212512 mm

**Tabela 5.** Módulos

## 4 | CONCLUSÃO

Como apresentado anteriormente na Tabela 1, a tensão de ruptura do material

aço inoxidável AISI 304 informada foi de 620 MPa, enquanto o valor obtido em teste foi de aproximadamente 620,5 MPa, como demonstrado na Tabela 4.

Assim, pode-se afirmar que a tensão máxima exercida no material AISI 304 em teste (simulação de es-tresse) é aproximadamente igual ao valor, deste mesmo material, de tensão máxima teórica. A Tabela 4 apresenta a tensão máxima suportada pelo aço inoxidável AISI 304, valor este informado pelo relatório de análise de estresse, disponibilizado pelo software, exposto anteriormente.

O comportamento da amostra em tais condições de tensão foi equivalente ao esperado, uma vez que a face que estava engastada deveria ser o ponto com menor tensão e a face tracionada possuiria o ponto de maior tensão. A partir da distribuição da coloração de teste pelo corpo da carcaça após a aplicação de um carregamento, pode-se afirmar que é equivalente ao deslocamento sofrido pela estrutura.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE TUBO DE CONCRETO. **Avaliação comparativa de desempenho entre tubos rígidos e flexíveis para utilização em obras de drenagem em águas pluviais**. Jaguaré: ABTC, 2016.

BASTIAN, F. L. **Materiais**. In: Curso de Extensão em Tubos Flexíveis e Cabos Umbilicais, Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

BICUDO, R. G. P. **Análise de Instalação de Linhas Flexíveis**. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

CARNEVAL, R. O.; MARINHO, M. G. Flexible line inspection. In: **9ª Conferência Europeia de NDT**, p. 1-11, Berlim, Alemanha, 25-29 Set. 2006.

CLOUGH, R. W. The Finite Element in Plane Stress Analysis. In: **2ª Conferência em Computação Eletrônica da ASCE**, Pittsburgh, Pa., USA, 1960.

CURY, A. A. **Critério de Falha**. Departamento de mecânica aplicada e computacional, Rio de Janeiro, MAC/UFJF, 2016.

FERREIRA, A. B. H. **Aurélio do século XXI: o dicionário da Língua Portuguesa**. 3. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.

FRANCISCO, W. C. **A Petrobrás**. Portal Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/brasil/a-petrobras.htm>>. Acesso em: 15 maio. 2017.

LOPES, D. G. **Avaliação das tensões residuais na montagem de conectores em armaduras de tração de dutos flexíveis**. Dissertação de M. Sc., CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

MACHADO, Z. L.; DUMAY, J. M. Dynamic Production Riser on Enchova Field Offshore Brazil. In: **Offshore Brazil Conference – Latin America Oil Show**, Rio de Janeiro, RJ, Jun.1980.

NORMA API RP 17B. Recommended practice for flexible pipe, 3ª ed, 2002.

OLIVEIRA, I. P. G.; LUZ, T. S. Estudo do processo de fabricação de tubos flexíveis de aço inoxidável duplex UNS 32304 utilizados na indústria de petróleo e gás. **Revista Soldagem & Inspeção**, v. 18, n.

1, p. 02-11, 2013.

PAGOTTO, L. D. **Modelos analíticos e numéricos para análise estrutural axissimétrica de risers flexíveis**. Dissertação de M. Sc., CECS/UFABC, Santo André, SP, Brasil, 2013.

PEREIRA, O. J. B. A. **Introdução ao método de elementos finitos na análise de problemas planos de elasticidade**. Instituto Superior Técnico, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

PEREIRA, I. F.; VIGNOLI, L. L.; MONTEIRO, R. R. J. O. **Análise Estrutural de Carcaças Intertravadas**. Tese de Bel., CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

PORTAL PETROBRAS. **Equipamentos e sistemas submarinos**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conhecacuriosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>>. Acesso em 21 maio 2017.

RIZZO, N. A. S. **Análise da instabilidade das armaduras de dutos flexíveis pelo método de elementos finitos**. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

SANTOS, F. P. **Avaliação dos Efeitos da Pressão Parcial de CO<sub>2</sub> no Processo de Corrosão Fadiga em Armaduras de Tração de Dutos Flexíveis**. Dissertação de M. Sc., CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

SORIANO, H. L. **Método de Elementos Finitos em Análises de Estruturas**. São Paulo: Edusp, 2003.

SOUSA, J. R. M. **Análise numérica de risers flexíveis**. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1999.

SOUSA, J. R. M., **Análise local de linhas flexíveis pelo método de elementos finitos**. Tese de D. Sc., CO-PPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

TARFAOUI, M., GNING, P.B., COLLOMBET, F. Damage Modelling of Impacted Tubular Structures by Using Material Property Degradation Approach. In: Boukharouba T., Elboujdaini M., Pluvinage G. (eds), **Damage and Fracture Mechanics**, p. 227-235. Dordrecht: Springer Science, 2009.

WITZ, J. A. A Case Study in the Cross-section Analysis of Flexible Risers. **Marine Structures**, v. 9, p. 885-904, 1996

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**Franciele Bonatto** Professora assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação e mestrado em engenharia de produção pela UTFPR e doutorado em andamento em Engenharia de Produção pela mesma universidade. Trabalha com os temas: gestão da qualidade, planejamento e controle da produção e cadeia de suprimentos.

**Henrique Ajuz Holzmann** Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**João Dallamuta** Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro de Telecomunicações pela UFPR. Especialista em Inteligência de Mercado pela FAE Business School. Mestre em Engenharia pela UEL. Trabalha com os temas: Inteligência de Mercado, Sistemas Eletrônicos e Gestão Institucional.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-77-2

