



ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE MANGOTES DE
DESCARGA (OFFLOADING)

Gabriel Mattos Gonzalez

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador(es): Luís Volnei Sudati Sagrilo
José Renato Mendes de Sousa

Rio de Janeiro
Dezembro de 2013

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE MANGOTES DE
DESCARGA (OFFLOADING)

Gabriel Mattos Gonzalez

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Luís Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc..

Prof. José Renato Mendes de Sousa., D.Sc.

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.

Dr. Marcos Queija de Siqueira, D.Sc.

Dr. Isafás Quaresma Masetti, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2013

Gonzalez, Gabriel Mattos

Estudo do comportamento estrutural de mangotes de descarga (offloading) / Gabriel Mattos Gonzalez.
– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XVIII, 138 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luis Volnei Sudati Sagrilo

José Renato Mendes de Sousa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/
Programa de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 123 - 126.

1. Análise não-linear. 2. Análise local de dutos flexíveis. 3. Método dos elementos finitos. I. Sagrilo, Luís Volnei Sudati, *et. al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, José Renato Mendes de Sousa e Luís Volnei Sudati Sagrilo, pela amizade, pela paciência, pelo constante incentivo e, acima de tudo, pela confiança nesse caminho.

Aos mestres, Marcos Queija de Siqueira, Gilberto Bruno Ellwanger e Edison Castro Prates Lima, pelos ensinamentos oferecidos ao longo desses anos de trabalho no LACEO (Laboratório de Análise e Confiabilidade de Estruturas Offshore).

A todo o pessoal do LACEO, pela prontidão em ajudar, ensinamentos e companheirismo. Em especial aos amigos Pedro Yuji Kawasaki, Ana Maria Valadão Rebello e Oscar Alfredo Godoy Marroquin pelo apoio em todos os momentos.

Ao Programa de Recursos Humanos da ANP, PRH-02, pelo suporte financeiro, que muito contribuiu para o desenvolvimento do trabalho.

À TRANSPETRO e PETROBRAS, por todo apoio ao desenvolvimento do laboratório e de suas linhas de pesquisas.

Aos meus pais, Marco Vinicio Sosa Gonzalez e Clara Thereza Mattos Gonzalez, à minha irmã, Raphaela Mattos Gonzalez, e à minha amada, Karina Marzano Franco, por estarem sempre ao meu lado e me apoiarem em todas as etapas desse processo. Esse trabalho não existiria sem eles.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE MANGOTES DE
DESCARGA (OFFLOADING)

Gabriel Mattos Gonzalez

Dezembro/2013

Orientadores: Luís Volnei Sudati Sagrilo

José Renato Mendes de Sousa

Programa: Engenharia Civil

Atualmente, é frequente o uso de mangotes na realização das operações de descarregamento (*offloading*) de óleo em áreas *offshore*. Nessa dissertação, estuda-se o comportamento local dessas estruturas pelo emprego de modelos analíticos e numéricos, baseados no método dos elementos finitos. Analisou-se um mangote de 20” submetido a cargas axissimétricas e flexão e calcularam-se, através desses modelos, suas propriedades mecânicas e os esforços resultantes em suas camadas. Os resultados obtidos também foram comparados aos apresentados na literatura técnica. O estudo mostrou boa correlação entre todos os modelos propostos no cálculo das propriedades mecânicas, porém há significativa diferença nos esforços das camadas com a consideração do comportamento hiperelástico do elastômero que compõe a estrutura. Concluiu-se, assim, que é essencial a modelagem desse tipo de comportamento para a correta representação do comportamento mecânico dessas estruturas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF OFFLOADING MARINE HOSES

Gabriel Mattos Gonzalez

December/2013

Advisors: Luís Volnei Sudati Sagrilo

José Renato Mendes de Sousa

Department: Civil Engineering

Nowadays, it is customary the use of marine hoses on discharge operations (*offloading*) of oil in offshore areas. In this dissertation, it is studied the local behavior of these structures through the use of analytical and numerical models, which are based on finite element method. A 20" nominal diameter hose was analyzed by axisymmetric loads and bending loads, as well as were calculated its mechanical properties and the tension on each of its components. These results were also compared to those presented in the technical literature. The study showed good correlation between all the models proposed in the calculation of the mechanical properties, however there was found a significant difference in the response of the layers with consideration of the hyperelastic behavior of elastomer that comprises the structure. Therefore, it is concluded that it is essential to model the consideration of hiperelastic behavior for the correct representation of the mechanical behavior of such structures.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - Introdução	1
I.1 Contextualização do problema	1
I.2 Descrição do trabalho	4
I.3 Organização da dissertação	5
CAPÍTULO II - Descrição dos mangotes	7
II.1 Introdução	7
II.2 Flange	10
II.3 Nipple	11
II.4 <i>Liner</i> e camadas elastoméricas	12
II.5 Cordonéis (<i>plies</i>)	16
II.5.1 Fibras utilizadas	17
II.5.2 Funções estruturais	19
II.6 Enrijecedor à flexão (<i>bend stiffeners</i>)	22
II.7 Flutuadores	24
II.8 Fabricação de mangotes	25
CAPÍTULO III - Modelos numéricos	30
III.1 Introdução	30
III.2 Modelos para análise local de mangotes disponíveis na literatura	30
III.3 Descrição dos Modelos Numéricos	32
III.3.1 Descrição do modelo numérico I	33
III.3.2 Descrição do modelo numérico II	39
III.3.3 Descrição do modelo numérico III	42
III.3.4 Implementação do modelo no programa MCab	46
CAPÍTULO IV - Modelo analítico	47
IV.1 Introdução	47

IV.2	Descrição do modelo de BATISTA et al. (1989)	47
IV.3	Adaptações para consideração de mangotes	51
IV.3.1	Abordagem analítica I	52
IV.3.2	Abordagem analítica II	52
CAPÍTULO V - Estudo de caso		53
V.1	Introdução	53
V.2	Descrição do mangote estudado	53
V.3	Casos de carregamentos estudados	56
V.4	Cálculo das propriedades equivalentes dos modelos	57
V.5	Características dos modelos numéricos	60
V.5.1	Geração das malhas de elementos finitos	60
V.5.2	Condições de contorno e de simetria	63
V.6	Metodologia de aquisição de dados de resposta	65
V.6.1	Flexão (1 - FLE)	66
V.6.2	Tração (2 - TRA)	72
V.6.3	Torção (3 - TOR)	79
V.6.4	Tração e pressão externa (4 – TRA+PE)	86
V.6.5	Tração e pressão interna (5 – TRA+PI)	93
V.6.6	Tração, pressão externa e pressão interna (6 – TRA+PE+PI)	100
V.7	Resultados obtidos para cargas máximas	107
V.7.1	Tração	107
V.7.2	Torção	110
V.7.2	Teste Hidrostático – Pressão interna	113
V.7.3	Flexão	115
CAPÍTULO VI - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros		118
CAPÍTULO VII - Bibliografia		123

ANEXO A - Metodologia de cálculo de rigidez à flexão_____	127
ANEXO B - Modelo analítico para mangotes _____	129

Lista de Figuras

<i>Figura I.1 - Navio plataforma FPSO JK (P-34) no campo de Jubarte, na Bacia de Campos, litoral Sul do Espírito Santo (PETROBRAS, 2008).</i>	1
<i>Figura I.2 – FPSO Captain ao realizar a operação de descarregamento em um Shuttle Tanker no Reino Unido (TEXACO, 2001).</i>	2
<i>Figura I.3 – Exemplos de mangotes de offloading (TRELLOBORG, 2013).</i>	3
<i>Figura I.4 – Armazenamento de linha de mangotes em carretéis (TRELLOBORG, 2013)</i>	4
<i>Figura I.5 – Mangote flutuante em armazenamento livre (TRELLOBORG, 2013)..</i>	4
<i>Figura II.1 – Esquema de mangote de carcaça simples e suas camadas (COSTA, 2007).</i>	8
<i>Figura II.2 – Esquema de mangote de carcaça dupla (COSTA, 2007).</i>	9
<i>Figura II.3 - Esquema simplificado da estrutura de um mangote de carcaça dupla. (a) flange, (b) nipple, (c) primeira carcaça, (d) segunda carcaça, (e) flutuadores, e (f) cobertura (ROESE, et al., 2008).</i>	9
<i>Figura II.4 – Estrutura de flange em porca e parafuso.</i>	11
<i>Figura II.5 – Região de junção do nipple com o elastômero (ROESE, et al., 2008).</i>	12
<i>Figura II.6 – Corda de Cânhamo ilustrando a composição de uma cordoalha em maior escala – filamentos, fios, cordoalha (MCDONNELL, 2006).</i>	17
<i>Figura II.7 - Exemplos de possíveis configurações de fibras em tecidos – Breaker Plies (SINGHA & SINGHA, 2012).</i>	20
<i>Figura II.8 – Representação de mangote com suavização da transição de rigidez (HENRY, 1980).</i>	21
<i>Figura II.9 - Modelo de mangote com enrijecedor em seção quadrada (AMBROSE et al., 1973).</i>	22
<i>Figura II.10 - Moedor da borracha bruta (PREMIER RUBBER CO., 2012).</i>	25
<i>Figura II.11 – Cortador de elastômero em fitas (PREMIER RUBBER CO., 2012).</i>	26
<i>Figura II.12 – Confeção das camadas compósitas poliméricas para reforço, o “coating” (TRELLEBORG, 2011).</i>	26
<i>Figura II.13 – Posicionamento da estrutura de conexão (FLEXOMARINE, 2010).</i>	27
<i>Figura II.14 - Revestimento da camada de liner (FLEXOMARINE, 2010).</i>	27
<i>Figura II.15 – Assentamento das camadas de fibras poliméricas (FLEXOMARINE, 2010).</i>	28
<i>Figura II.16 – Assentamento do espiral metálico realizado manualmente (PREMIER RUBBER CO., 2012).</i>	29
<i>Figura II.17 – Mandril e as diversas camadas do mangote submetidos ao forno para realização da vulcanização (FLEXOMARINE, 2010).</i>	29
<i>Figura III.1 - Elementos de reforço (a)rebar layer e (b) rebar single (em vermelho).</i>	31
<i>Figura III.2 – Modelo numérico I.</i>	33
<i>Figura III.3 – Modelagem do componente flange-nipple.</i>	34
<i>Figura III.4 – Elemento Sólido - C3D8RH (DS SIMULIA, 2010).</i>	35

<i>Figura III.5 – Elemento de Membrana com integração reduzida - M3D4R (DS SIMULIA, 2010).</i>	36
<i>Figura III.6 – Elementos de rebar definidos sobre elementos de membrana.</i>	36
<i>Figura III.7– Enrijecedor à flexão com o perfil circular renderizado.</i>	37
<i>Figura III.8 – Exemplo de constrição do tipo Embedded Regions.</i>	38
<i>Figura III.9 – Modelo numérico II.</i>	39
<i>Figura III.10 – Sistema de coordenadas típico de materiais compósitos (ASSAD et al., 2005).</i>	40
<i>Figura III.11 – Modelo numérico III.</i>	42
<i>Figura III.12 – Elementos de reforço rebar layer (em vermelho).</i>	43
<i>Figura III.13 – Tela principal do programa M Cab.</i>	46
<i>Figura IV.1 - Sistema de referência das tensões e deformações (GEYMAIR, 1990).</i>	49
<i>Figura V.1 – Seção transversal do mangote estudado e suas características (LACEO , 2011).</i>	54
<i>Figura V.2 – Comparação tensão vs. deformação entre o modelo elástico equivalente (EL) e o modelo de Mooney-Rivlin (MR).</i>	55
<i>Figura V.3 – Representação da estrutura de conexão e suas dimensões nos diversos modelos.</i>	56
<i>Figura V.4 – Curva tensão vs. deformação do elastômero e os modelos hiperelásticos que melhor representam seu comportamento.</i>	58
<i>Figura V.5 – Curva tensão (MPa) vs. deformação (mm/mm) das fibras da primeira carcaça (ROESE, et al., 2010).</i>	59
<i>Figura V.6 – Curva tensão (MPa) vs. deformação (mm/mm) das fibras da segunda carcaça (ROESE, et al., 2010).</i>	59
<i>Figura V.7 – Vista isométrica e da seção transversal da malha do modelo numérico I.</i>	61
<i>Figura V.8 - Vista isométrica e da seção transversal da malha do modelo numérico I.</i>	62
<i>Figura V.9 - Vista isométrica e da seção transversal da malha do modelo numérico III.</i>	63
<i>Figura V.10 – (a) Representação do contato tipo MPC utilizado para a transmissão das condições de contorno e aplicação dos carregamentos (b) Condições de contorno aplicadas ao meio do duto .</i>	64
<i>Figura V.11 – Seções de aquisição de dados para as análise axissimétricas.</i>	65
<i>Figura V.12 - Seções de aquisição de dados para as análise de flexão.</i>	65
<i>Figura V.13 – Deslocamento do modelo de mangote submetido à flexão pura.</i>	66
<i>Figura V.14 – Máxima deformação principal.</i>	67
<i>Figura V.15 – Variação da rigidez à flexão com o comprimento do mangote,</i>	67
<i>Figura V.16 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).</i>	70
<i>Figura V.17 – Deslocamento axial do mangote, em mm, quando submetido ao carregamento de tração.</i>	73
<i>Figura V.18 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).</i>	74

<i>Figura V.19 – Deslocamento total do mangote, em mm, quando submetido à torção pura de 25kNm. _</i>	<i>79</i>
<i>Figura V.20 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).</i>	<i>81</i>
<i>Figura V.21 – Deslocamento do mangote quando submetido à combinação de carregamentos de pressão externa e tração.</i>	<i>86</i>
<i>Figura V.22– Deformações radiais na seção do meio do mangote.</i>	<i>87</i>
<i>Figura V.23 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).</i>	<i>88</i>
<i>Figura V.24 – Deslocamento total do mangote quando submetido à combinação dos carregamentos de 40 kN de tração e de 1MPa de pressão interna.</i>	<i>94</i>
<i>Figura V.25 – Deformação radial na seção do meio do duto.</i>	<i>94</i>
<i>Figura V.26 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).</i>	<i>95</i>
<i>Figura V.27 – Deslocamentos do mangote quando submetido à combinação de carregamentos de tração e pressão interna e externa.</i>	<i>101</i>
<i>Figura V.28 – Deformações radiais na seção do meio do mangote.</i>	<i>101</i>
<i>Figura V.29 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).</i>	<i>102</i>
<i>Figura V.30 – Comportamento da rigidez a tração com o aumento do carregamento.</i>	<i>108</i>
<i>Figura V.31 – Diferença na resposta do mangote à torção positiva e negativa.</i>	<i>111</i>
<i>Figura V.32 – Comportamento do mangote com o aumento do carregamento de flexão.</i>	<i>116</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela II.1 – Tipos de elastômeros utilizados na fabricação de dutos de camadas aderentes (LOTVEIT, 2009).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela II.2 – Propriedades inerentes a cada tipo de camada de elastômero (API, 2001).</i>	<i>15</i>
<i>Tabela II.3 – Relação entre IRDH – International Rubber Hardness Degrees – e E – Módulo de Elasticidade em MPa (GENT, 2006).</i>	<i>16</i>
<i>Tabela II.4 – Característica das cordoalhas comerciais no rompimento (MCDONNEL, 2006).</i>	<i>18</i>
<i>Tabela II.5 – Módulo de elasticidade das principais configurações de cordoalhas (MCDONNEL, 2006). ...</i>	<i>18</i>
<i>Tabela II.6 – Propriedades inerentes às camadas de reforço adaptada da API 17K.</i>	<i>21</i>
<i>Tabela II.7 – Propriedade dos aços possivelmente utilizados para a confecção das armaduras dos mangotes (MATWEB, 1996).</i>	<i>23</i>
<i>Tabela II.8 – Características físicas e mecânicas da espuma de poliuretano (MATWEB, 1996).</i>	<i>24</i>
<i>Tabela III.1 – Características dos modelos de referência utilizados como base para a construção dos modelos numéricos de mangote.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela III.2 – Principais modelos constitutivos para elastômeros (HOSS, 2009).</i>	<i>44</i>
<i>Tabela IV.1 – Respectivas contribuições das diversas camadas e às diversas solicitações (BATISTA et al., 1989).....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela V.1 – Principais características das diversas camadas do mangote estudado (TRELLEBORG, 2011).</i>	<i>54</i>
<i>Tabela V.2 – Propriedades físicas dos materiais utilizados no mangote.</i>	<i>54</i>
<i>Tabela V.3 – Carregamentos operacionais.</i>	<i>56</i>
<i>Tabela V.4 – Carregamentos máximos.</i>	<i>57</i>
<i>Tabela V.5 - Constantes de engenharia para os materiais do modelo numérico II.</i>	<i>57</i>
<i>Tabela V.6 - Características físicas dos materiais e da seção de compósito.</i>	<i>60</i>
<i>Tabela V.7 – Condições de contorno* aplicadas no começo e no meio do mangote para a análise com carregamentos operacionais.</i>	<i>63</i>
<i>Tabela V.8 – Condições de contorno* aplicadas no começo e no meio do mangote para análise com carregamentos máximos.</i>	<i>64</i>
<i>Tabela V.9 – Comparação dos diversos modelos numéricos com flange-nipple quanto ao comportamento à flexão.</i>	<i>68</i>
<i>Tabela V.10 – Comparação das tensões adimensionais (máxima e mínima) nas camadas de reforços para os diversos modelos: análise de flexão, carregamento operacional.</i>	<i>71</i>
<i>Tabela V.11 – Comparação das tensões adimensionais axiais (máxima e mínima) nas camadas elastoméricas para os diversos modelos: análise de flexão, carregamento operacional.</i>	<i>71</i>

<i>Tabela V.12 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais (máxima e mínima) para as camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise de flexão, carregamento operacional.</i>	71
<i>Tabela V.13 - Comparação das tensões adimensionais de Von Mises (máxima e mínima) nas camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise de flexão, carregamento operacional.</i>	71
<i>Tabela V.14 – Comparação dos diversos modelos numéricos com flange-nipple quanto ao comportamento à tração.</i>	73
<i>Tabela V.15 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os diversos modelos numéricos: análise de tração, carregamento operacional.</i>	76
<i>Tabela V.16 – Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os diversos modelos numérico: análise de tração, carregamento operacional.</i>	76
<i>Tabela V.17 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais para as camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise de tração, carregamento operacional.</i>	76
<i>Tabela V.18 - Comparação das tensões adimensionais de Von Misses para as camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise de tração, carregamento operacional.</i>	76
<i>Tabela V.19 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforço para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de tração, carregamento operacional.</i>	77
<i>Tabela V.20 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de tração, carregamento operacional.</i>	77
<i>Tabela V.21 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de tração, carregamento operacional.</i>	77
<i>Tabela V.22 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforço para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de tração, carregamento operacional.</i>	78
<i>Tabela V.23 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de tração, carregamento operacional.</i>	78
<i>Tabela V.24 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de tração, carregamento operacional.</i>	78
<i>Tabela V.25 – Comparação dos diversos modelos numéricos com flange-nipple quanto ao comportamento à torção.</i>	80
<i>Tabela V.26 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os diversos modelos numéricos: análise de torção, carregamento operacional.</i>	83
<i>Tabela V.27 – Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise de torção, carregamento operacional.</i>	83
<i>Tabela V.28 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise de torção, carregamento operacional.</i>	83
<i>Tabela V.29 - Comparação das tensões adimensionais de Von Misses nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise de torção, carregamento operacional.</i>	83

<i>Tabela V.30 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de torção, carregamento operacional.</i>	<i>84</i>
<i>Tabela V.31 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de torção, carregamento operacional.</i>	<i>84</i>
<i>Tabela V.32 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de torção, carregamento operacional.</i>	<i>84</i>
<i>Tabela V.33 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de torção, carregamento operacional.</i>	<i>85</i>
<i>Tabela V.34 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de torção, carregamento operacional.</i>	<i>85</i>
<i>Tabela V.35 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de torção, carregamento operacional.</i>	<i>85</i>
<i>Tabela V.36 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.</i>	<i>90</i>
<i>Tabela V.37 – Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.</i>	<i>90</i>
<i>Tabela V.38 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.</i>	<i>90</i>
<i>Tabela V.39 - Comparação das tensões adimensionais de Von Misses nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.</i>	<i>90</i>
<i>Tabela V.40 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforço para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.</i>	<i>91</i>
<i>Tabela V.41 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.</i>	<i>91</i>
<i>Tabela V.42 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.</i>	<i>91</i>
<i>Tabela V.43 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.</i>	<i>92</i>
<i>Tabela V.44 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.</i>	<i>92</i>

<i>Tabela V.45 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.</i>	92
<i>Tabela V.46 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional.</i>	97
<i>Tabela V.47 – Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional</i>	97
<i>Tabela V.48 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional</i>	97
<i>Tabela V.49 - Comparação das tensões adimensionais de Von Misses nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional</i>	97
<i>Tabela V.50 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional</i>	98
<i>Tabela V.51 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional.</i>	98
<i>Tabela V.52 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional</i>	98
<i>Tabela V.53 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional.</i>	99
<i>Tabela V.54 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional.</i>	99
<i>Tabela V.55 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional.</i>	99
<i>Tabela V.56 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os diversos modelos numéricos: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional</i>	104
<i>Tabela V.57 – Comparação das tensões adimensionais axiais para as camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.</i>	104

<i>Tabela V.58 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.</i>	104
<i>Tabela V.59 - Comparação das tensões adimensionais de Von Mises nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.</i>	104
<i>Tabela V.60 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforço para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.</i>	105
<i>Tabela V.61 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.</i>	105
<i>Tabela V.62 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.</i>	105
<i>Tabela V.63 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.</i>	106
<i>Tabela V.64 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.</i>	106
<i>Tabela V.65 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.</i>	106
<i>Tabela V.66 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços: análise de tração, carregamento máximo.</i>	109
<i>Tabela V.67 – Variação no ângulo de assentamento dos cordonéis, em graus: análise de tração, carregamento máximo.</i>	110
<i>Tabela V.68 – Comparação das tensões adimensionais das camadas de reforços: análise de torção positiva e negativa, carregamento máximo.</i>	112
<i>Tabela V.69 - Variação do ângulo de assentamento, em graus: análise de torção positiva e negativa, carregamento máximo.</i>	113
<i>Tabela V.70 – Comparação das tensões adimensionais das camadas de reforços: análise de teste hidrostático, carregamento máximo.</i>	114
<i>Tabela V.71 - Variação do ângulo de assentamento, em graus: análise de teste hidrostático , carregamento máximo.</i>	115
<i>Tabela V.72 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços: análise de flexão, carregamento máximo.</i>	117

Tabela V.73 – Variação no ângulo de assentamento dos cordonéis, em graus: análise de flexão, carregamento máximo. 117

CAPÍTULO I - Introdução

I.1 Contextualização do problema

Na exploração marítima (*offshore*) de petróleo mundial, o Brasil é o país que mais faz uso de unidades flutuantes do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading* - Figura I.1). Atualmente, o país utiliza 31 unidades, 20% de todo o uso mundial, ao passo que a segunda maior utilizadora, a China, possui apenas 17 FPSOs em atividade (World Survey of FPSO Units, 2012). A extensiva utilização de FPSOs na exploração brasileira de petróleo *offshore* demonstra-se comprovadamente eficaz e, conseqüentemente, cresce a altas taxas. Fato esse que pode ser justificado pelas atrativas características inerentes a este tipo de unidade flutuante, a dizer, as capacidades de: realização das atividades de produção, armazenamento e alívio.



Figura I.1 - Navio plataforma FPSO JK (P-34) no campo de Jubarte, na Bacia de Campos, litoral Sul do Espírito Santo (PETROBRAS, 2008).

Essas últimas duas características são aquelas que definem as maiores vantagens na utilização desse tipo de unidade, pois tornam a presença do sistema de escoamento permanente, constituído usualmente por oleodutos rígidos e/ou flexíveis, desnecessária, assim como pode se fazer desnecessária a presença de estruturas auxiliares para armazenamento, tais como monobóias ou unidades FSO (*Floating, Storage and Offloading*). Assim, diminui-se o custo de implantação da unidade de produção, além de também diminuir o número de possíveis pontos de falha no sistema de produção como um todo.

É de extrema importância que tais sistemas de alívio sejam executados da melhor maneira possível, para, assim, diminuir os riscos de derramamento de óleo nos oceanos. A utilização de Navios Tanques Aliviadores (NTAs ou *Shuttle Tankers*) é o método mais utilizado nesta prática, a qual se dá por: emparelhamento, ou aproximação, de um navio com alta capacidade de armazenamento (Figura I.2); utilização de mangotes (*offloading hoses*), para a conexão do NTA com o FPSO, monobóia ou FSO; e bombeio do fluido armazenado para o navio aliviador. Dessa maneira, os mangotes se mostram peças fundamentais para a realização das operações de alívio ou *offloading*.



Figura I.2 – FPSO Captain ao realizar a operação de descarregamento em um Shuttle Tanker no Reino Unido (TEXACO, 2001).

Os mangotes, ilustrados na Figura I.3, podem ser considerados dutos flexíveis de camadas aderentes. As camadas internas desse tipo de duto encontram-se embebidas em uma matriz polimérica, usualmente, um elastômero, e solidarizadas pelo processo de vulcanização deste. Dessa forma, ao contrário dos típicos dutos flexíveis de camadas

não aderentes empregados na indústria petrolífera *offshore* (API, 2002), não há deslizamento relativo entre as camadas internas de um mangote quando esse é submetido aos diferentes esforços de operação.



Figura I.3 – Exemplos de mangotes de *offloading* (TRELLOBORG, 2013).

Os mangotes são, usualmente, compostos por diferentes partes, que podem se encontrar em diferentes arranjos e possuem diferentes funções. As principais partes e suas respectivas funções são: o *flange*, que permite a ligação entre mangotes; o *nipple*, que funciona como ponto de ancoragem para a matriz polimérica e as camadas de reforço; o *liner*, que dá forma e estanqueidade à estrutura; as *plies*, que fornecem rigidez e evitam a propagação de possíveis rasgos no *liner*; o *bend stiffner*, ou enrijecedor à flexão, que fornece rigidez à flexão e resistência aos carregamentos radiais; e os flutuadores, que visam a diminuir a massa específica da linha, a fim de conferir-lhe alguma flutuabilidade (ROESE, et al., 2009).

As operações de alívio são, usualmente, semanais, o que gera a necessidade de armazenamento dos mangotes. Os mangotes podem ser armazenados sobre o casco do FPSO (ou FSO), enrolados em grandes carretéis metálicos (Figura I.4), ou, mais usualmente, podem ser mantidos, por meio de flutuadores, na superfície do mar, como mostra a Figura I.5. Neste caso, uma extremidade do mangote é conectada ao FPSO enquanto a outra, que em operação é conectada ao NTA, é deixada livre. É muito importante notar que só é possível o armazenamento dos mangotes por esse processo se a extremidade livre estiver equipada com uma válvula de vedação, que irá impedir o vazamento de óleo. Outra possibilidade é adotar a configuração de catenária, livre ou auxiliado por colares de flutuação, na qual o duto fica totalmente submerso (COSTA, 2007).



Figura 1.4 – Armazenamento de linha de mangotes em carretéis (TRELLOBORG, 2013)



Figura 1.5 – Mangote flutuante em armazenamento livre (TRELLOBORG, 2013)..

Nesse contexto, é fundamental dispor de ferramentas teóricas para previsão da resposta estrutural dos mangotes considerando diferentes tipos de solicitações para que seu projeto se torne mais eficiente, robusto e seguro.

I.2 Descrição do trabalho

Nessa dissertação, avaliam-se as propriedades mecânicas e as tensões nas diferentes camadas de um mangote de 20'' diâmetro e 10,7m de comprimento submetido a carregamentos axissimétricos e a flexão. Essa avaliação é feita por meio de modelos em elementos finitos, capazes de representar as características estruturais do duto estudado, e, também, mediante a utilização de um modelo analítico já consagrado na literatura (BATISTA et al., 1989), para análise estrutural de dutos flexíveis, que, nesta dissertação, foi adaptado para permitir a avaliação da resposta de mangotes.

Para o desenvolvimento dos modelos numéricos, foi utilizado o pacote comercial *ABAQUS 6.10*®, que permite o desenvolvimento gráfico da estrutura, a geração de malhas elementos finitos e, finalmente, a solução das equações que governam o problema modelado. Foram tomados como base para desenvolvimento do modelo numérico, modelos desenvolvidos para análise de pneus de automóveis, em razão da quase inexistência de modelos disponíveis na literatura técnica para análise de mangotes e da expressiva similaridade na composição das duas estruturas. Tanto os pneus quanto os mangotes são compostos por camadas de reforço – fibras de *nylon*, poliéster, fibras de aramida e/ou cordoalhas de aço – e por armaduras opcionais – espirais ou anéis de aço – embebidas em matriz elastomérica. A partir dessa consideração, foram propostos três modelos numéricos baseados nas hipóteses de PELC (2001), RAO *et al.* (2002, apud ERSAHIN, 2003) e de CHANG (2002, apud ERSAHIN, 2003).

Quanto aos modelos analíticos, foi realizado uma extensa pesquisa bibliográfica e foi notado que nenhum modelo abordava especificamente essa classe de dutos. O modelo proposto por BATISTA *et al.* (1989), no entanto, permite representar tanto dutos flexíveis com camadas aderentes quanto não aderentes, o que o levou a ser tomado como modelo base para o desenvolvimento dos dois modelos propostos aqui. Foi necessário realizar algumas adaptações e considerações ao modelo para que este conseguisse representar especificamente os mangotes.

Além desses modelos, a dissertação apresenta como um de seus resultados, um gerador de malha exclusivo para modelos de mangotes. Esse gerador de malhas foi incorporado à rotina do programa *MCab* (LACEO, 2011). Foi, ainda, desenvolvida uma rotina capaz de pós-processar os dados oriundos das análises realizadas, o que facilita a identificação das solicitações ocorridas nas diversas camadas dos mangotes.

I.3 Organização da dissertação

A organização da presente dissertação se fará da seguinte maneira:

- ✓ Capítulo 2 – Descrição dos mangotes – O intuito principal deste capítulo é apresentar os principais fabricantes de mangotes e descrever seus principais componentes, além de suas principais camadas e funções. Serão também

apresentados os materiais mais utilizados na fabricação dessas estruturas, assim como serão apresentados alguns parâmetros normativos;

- ✓ Capítulo 3 – Modelos numéricos – Neste capítulo, são apresentados os três modelos numéricos desenvolvidos nesta dissertação. Descrevem-se as características inerentes a cada um deles, as suposições e premissas utilizadas na modelagem e suas peculiaridades;
- ✓ Capítulo 4 – Modelo analítico – Neste capítulo, além de discutir os principais modelos analíticos para dutos flexíveis existentes na literatura, foram discutidas as principais características do modelo de BATISTA et al.(1989) e as modificações realizadas para melhor adequar o modelo ao comportamento estrutural axissimétrico dos mangotes. São, também, apresentadas as formulações utilizadas para a realização das análises;
- ✓ Capítulo 5 – Resultados – Neste capítulo são analisados e comparados os resultados dos diversos modelos representativos do mangote de 20”;
- ✓ Capítulo 6 – Conclusão – Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões desse trabalho e, também, são propostas novas vertentes para melhor conhecimento dessa estrutura e aperfeiçoamento dos modelos teóricos.

CAPÍTULO II - Descrição dos mangotes

II.1 Introdução

Já foi mencionado que os mangotes, ou mangueiras de *offloading*, são considerados dutos flexíveis de camadas aderentes. Seu conceito, contudo, diferencia-se um pouco dos dutos flexíveis de camadas aderentes utilizados no escoamento de hidrocarbonetos de poços *offshore* até a unidade de produção (*risers* flexíveis de produção), principalmente no que tange as camadas de reforços estruturais. A estes dutos de produção são, normalmente, atribuídas armaduras de tração, pressão e carcaça intertravada, ou seja, adotam conceito semelhante aos dutos de camadas não aderentes (NORTHCUTT, 2000). Todavia, a principal diferença em relação aos últimos, dutos de camadas aderentes e de camadas não aderentes, acha-se na impossibilidade ou na possibilidade, respectivamente, de movimento relativo entre camadas desses dutos.

Nos mangotes, as armaduras metálicas não estão presentes. Logo, é necessária a utilização de estruturas que lhes forneçam reforço estrutural. As camadas utilizadas são, assim, formadas por tecidos poliméricos, por cordoalhas poliméricas ou por cordoalhas de aço, cuja função é, basicamente, o incremento da resistência estrutural do mangote e da rigidez do mesmo. Pode-se, além dessas, utilizar elementos que incrementem a rigidez radial do duto que, comumente, são formados por hélices ou anéis de aço (OCIMF, 1991).

De acordo com a composição estrutural dos mangotes, esses podem ser classificados em mangotes de carcaça simples ou de carcaça dupla. Por carcaça, entende-se o conjunto de camadas, estruturais e de vedação, que devem possuir propriedades específicas e suportar limites estabelecidos em testes padrões definidos por norma (COSTA, 2007). Com a exceção do contato entre as carcaças, no caso da carcaça

dupla, as camadas não apresentam deslocamentos relativos, pois são aderidas pelo processo de vulcanização do elastômero, que será abordado posteriormente (OCIMF, 1991).

Todos os mangotes devem conter um sistema capaz de detectar vazamento (OCIMF, 1991). Assim, a maior vantagem da utilização de mangotes com carcaça dupla ao invés de estruturas com carcaça simples é a existência de um conjunto adicional de camadas, que irá conter o óleo caso haja falha na carcaça mais interna.

Nas Figura II.1 e Figura II.2 podem ser visualizadas as principais camadas dos mangotes de carcaça simples (Figura II.1) e de carcaça dupla (Figura II.2). A Figura II.3 apresenta, de forma esquemática, a extremidade de um mangote de carcaça dupla.

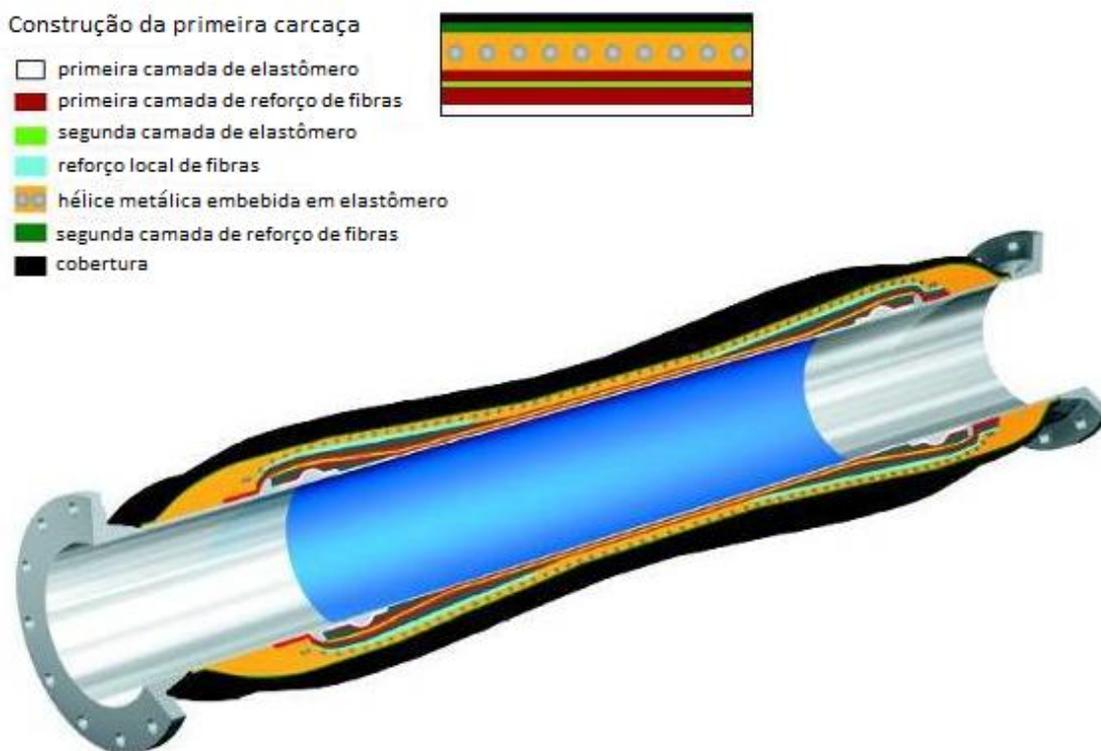


Figura II.1 – Esquema de mangote de carcaça simples e suas camadas (COSTA, 2007).

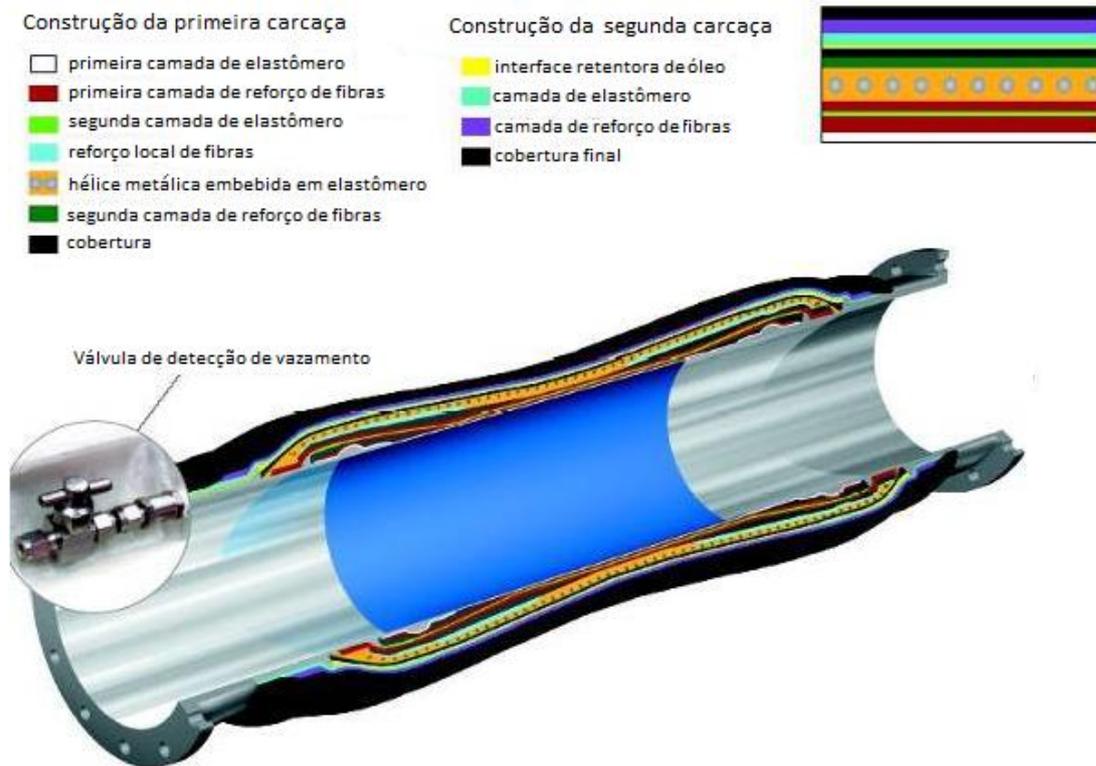


Figura II.2 – Esquema de mangote de carcaça dupla (COSTA, 2007).

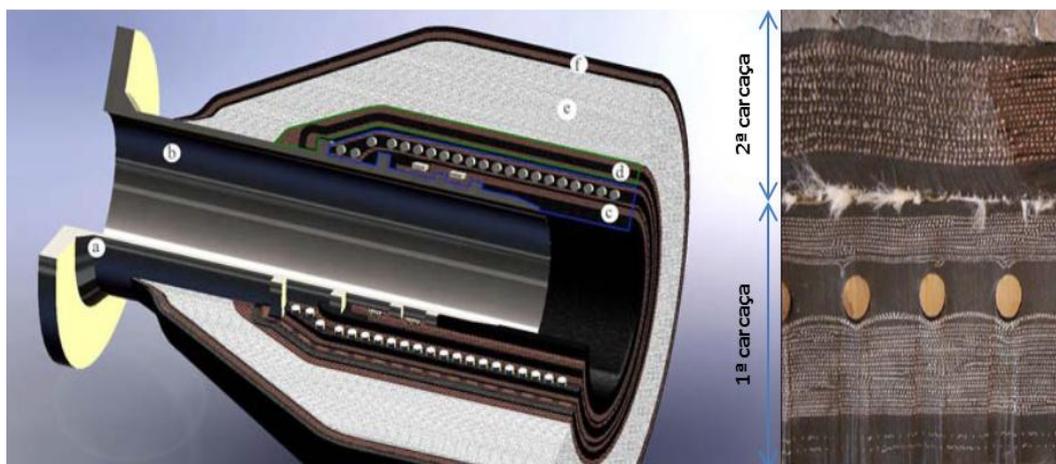


Figura II.3 - Esquema simplificado da estrutura de um mangote de carcaça dupla. (a) flange, (b) nipple, (c) primeira carcaça, (d) segunda carcaça, (e) flutuadores, e (f) cobertura (ROESE, et al., 2008).

Em ambas as estruturas, a primeira carcaça tem, geralmente, suas camadas organizadas da seguinte maneira, da mais interna à mais externa: *liner* (primeira camada de elastômero); camada de reforço com fibras poliméricas (cordoneís), primeira camada de *plies*; hélice metálica, o *bend stiffner* (enrijecedor à flexão); segunda camada de

plies; e cobertura. Todas essas camadas de reforços estão embebidas em uma matriz elastomérica.

Na interface entre a primeira e segunda carcaça, há um tecido polimérico que permite o deslizamento relativo entre elas. Na segunda carcaça, analogamente à primeira, tem-se: *liner*, primeira camada de *plies*; segunda camada de *liner*; e a cobertura. Novamente aqui todas as camadas estão embebidas por uma matriz elastomérica.

No caso dos mangotes flutuantes, após a segunda carcaça, uma camada adicional de poliuretano de baixa densidade – flutuador – é aderida para garantir flutuabilidade à estrutura. Finalmente, essas camadas são envolvidas por uma última camada de cobertura, a qual deve ser resistente às intempéries do ambiente e assinalada por coloração forte (OCIMF, 1991).

No que vem a seguir, as principais camadas e os principais componentes encontrados na primeira e na segunda carcaça de um mangote típico serão discutidos e descritos, assim como seu processo de fabricação.

II.2 Flange

Os mangotes são fabricados como dutos de comprimento padrão, que podem assumir, mais comumente, os comprimentos de 9,1 ou 10,7 metros (OCIMF, 1991). Esses dutos, porém, têm como função ligar embarcações localizadas a distâncias muito maiores do que essas. Desta maneira, é necessário que sejam conectados uns nos outros, a fim de formar uma linha contínua sem que haja vazamentos ou desconexão. Faz-se necessária, então, uma estrutura de conexão resistente e confiável. O *flange*, como indicado na Figura II.4, é a parte do mangote responsável por essa união. Em sua grande maioria, são forjados de aço carbono (ASTM 105) e possuem um *nipple* integrado (ROESE, et al., 2008).



Figura II.4 – Estrutura de flange em porca e parafuso.

As formas de engate dos *flanges* de mangotes são diversas, tais como: macho-fêmea, rosca, porca e parafuso, etc. Pode-se utilizar o sistema de desligamento rápido (*Quick Disconnect System* - QDC) para aplicações em que seja necessária uma desconexão de emergência. No entanto, devido ao seu diâmetro e às operações de *offloading* serem, preferencialmente, realizadas em condições de mar calmo, é tipicamente utilizado o sistema de porcas e parafuso os quais, se bem executados, fornecem vedação satisfatória e confiável para o sistema.

II.3 Nipple

O *nipple* consiste em um segmento de tubo de aço, em geral do mesmo material do *flange*, cuja função fundamental é a ancoragem das diversas camadas do duto. O *nipple* se une ao *flange* por soldagem ou pela produção de uma peça integrada e se liga ao corpo do duto por meio de ações mecânicas e químicas a serem discutidas mais adiante.

A estrutura do *nipple* pode ser produzida durante o processo de manufatura do duto ou pode ser produzida e instalada posteriormente. Essa estrutura tem duas funções principais, a dizer: transmitir cargas axiais e momentos fletores ao duto; e fornecer uma transição de pressão entre o corpo do duto e o *flange* (API, 2002).

Para garantir a adesão do elastômero ao *nipple*, empregam-se processos químicos e mecânicos, como já mencionado. Quimicamente, adesivos de policloropreno (CR) ou resinas epóxi são coladas sobre o *nipple* e na face interna do *liner*. Além disso,

mecanicamente, saliências na peça de aço são utilizadas, em diferentes tamanhos, para garantir o travamento entre o elastômero e o *nipple*, essas são os *anullar ribs* (Figura II.5, elemento *a*). Esse travamento é garantido tanto por amarras de arames tracionadas, que passam por cima de cada camada, como pelo aumento do atrito gerado por essas estruturas proeminentes (Figura 9, elemento *b*).

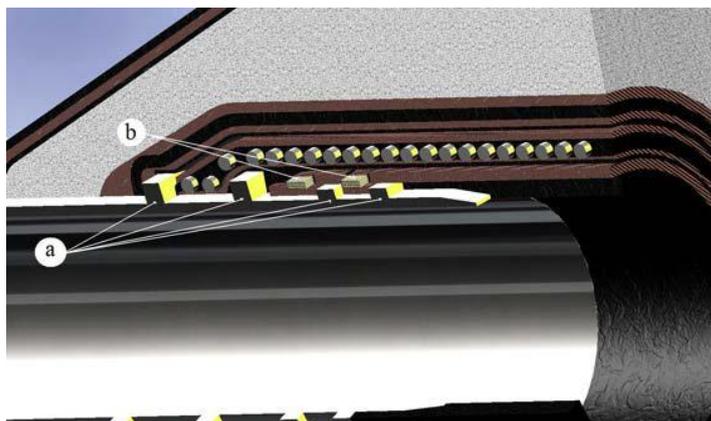


Figura II.5 – Região de junção do nipple com o elastômero (ROESE, et al., 2008).

Usualmente, observa-se grande concentração de tensões entre o fim do *nipple* e o corpo tubular do mangote. Esse fenômeno ocorre devido à grande diferença de rigidez entre os materiais poliméricos e os metálicos.

II.4 *Liner* e camadas elastoméricas

O *liner*, como mencionado, é constituído por uma camada de elastômero sem nenhum tipo de reforço. Uma de suas funções mais importantes é garantir a estanqueidade do mangote, ou seja, o *liner* não deve permitir o vazamento do óleo para o meio externo (NORTHCUTT, 2000). O *liner* deve, ainda, transmitir a pressão imposta pelo óleo transportado às camadas de reforço estrutural e não deve permitir que esse óleo entre em contato com os elementos responsáveis pelo reforço estrutural do mangote, pois esses elementos são, muitas vezes, susceptíveis à corrosão em presença de hidrocarbonetos. O material que constitui o *liner* deve apresentar propriedades elásticas e resiliência adequadas à flexibilidade e complacência requeridas, além de ser capaz de aderir ao material elastomérico envolvente durante o processo de vulcanização.

As outras camadas elastoméricas estão presentes sob a forma de cobertura – responsável pelo contato com o ambiente externo e, conseqüentemente, submetida às ações ambientais, físicas e/ou químicas – e de compósitos – responsável pelo envolvimento do reforço estrutural, com características muito similares às do *liner*. Ambas as camadas devem apresentar características em comum, mecânica e quimicamente. Desse modo, são consideradas como características inerentes a todas as camadas elastoméricas: a capacidade de adesão, a elasticidade, a resistência ao rasgo, a capacidade de compressão, a impermeabilidade a fluidos e a resistência ao óleo escoado e ao envelhecimento.

Os materiais mais empregados na construção do *liner* e das camadas de compósitos, devido à maior similaridade de funções, são os mesmos. Dentre os mais comuns estão: a borracha nitrílica (NBR), a borracha nitrílica hidrogenada (HNBR) e a borracha de policloropreno (CR). Já para a camada de cobertura, podem ser utilizados elastômeros diferentes, visto que as funções e o ambiente a que está exposta difere das do *liner* e das de compósitos. Os principais elastômeros utilizados como cobertura são as borrachas de butadieno estireno (SBR), as borrachas de poliuretano (PUR) e as borrachas de policloropreno (CR). As Tabelas II.1 e II.2 apresentam as principais características desses e de outros elastômeros utilizados na confecção de dutos de camadas aderentes, segundo LOTVEIT (2009) e API 17K (API, 2001).

É relevante ressaltar que as propriedades mecânicas dos elastômeros são garantidas pelo processo de vulcanização. Esse processo consiste na adição de enxofre, sob a presença de catalisadores, a altas temperaturas. O enxofre é adicionado sob a forma sólida de negro de carbono. Logo, quanto maior a adição de enxofre maior a dureza adquirida pelo elastômero pós-vulcanização. Outros fatores que influenciam esse processo são o tempo e a temperatura de realização do mesmo. A influência desses fatores também é direta, ou seja, quanto maior o tempo de exposição, ou a temperatura do processo, maior será a quantidade de enxofre absorvido pelo elastômero e, por conseguinte, maior sua dureza final (CALLISTER, 2000).

Tabela II.1 – Tipos de elastômeros utilizados na fabricação de dutos de camadas aderentes (LOTVEIT, 2009).

Elastômero	Propriedades gerais
Borracha Butílica	Excelente resistência à ação intempérica do clima; baixa permeabilidade a gás e a líquidos; boas propriedades físicas; boa resistência térmica; e nenhuma resistência a derivados de óleo mineral.
Borracha Clorobutílica	Variante da Borracha Butílica.
Polipropileno Clorado (CPE)	Excelente resistência ao ozônio e às variações climáticas; resistência razoável a óleos e compostos aromáticos; excelente resistência ao fogo.
Borracha de Etileno-Propileno (EPDM)	Excelente resistência a ozônio, a produtos químicos, a variação de temperatura e ao envelhecimento, baixa resistência à derivados de petróleo.
Borracha Nitrílica Hidrogenada (HNBR)	Boa resistência aos derivados de óleo mineral, vegetal e animal; boas propriedades mecânicas; boa resistência às intempéries e ao ozônio; e boa impermeabilidade.
Polietileno Clorosulfonado	Excelente resistência a ácidos, a ozônio e a variações climáticas; e limitada resistência a aromáticos.
Borracha Natural	Excelentes propriedades físicas; altamente elástica e flexível; muito resistente à abrasão; baixa resistência aos ácidos, compostos aromáticos e derivados de óleo mineral.
Policloropropeno (CR)	Excelente resistência ao fogo e às intempéries do clima; boa resistência à abrasão; e razoável resistência aos derivados de óleo mineral e ácidos.
Borracha Acrilo-Nitrílica (Nitril, NBR)	Propriedades dependentes da quantidade de <i>acrilonitrila</i> ; excelente resistência a derivados de óleo mineral; boas propriedades mecânicas; boa impermeabilidade; boa resistência ao calor; e baixa resistência ao ozônio e raio ultravioletas.
NVC (NBR/PVC)	Excelente resistência a óleos minerais e seus derivados; boa resistência à ação do meio ambiente; e baixa resistência ao frio.
Borracha de Acrilato	Excelente resistência a óleos minerais a altas temperaturas.
Borracha de Butadieno de Estireno (SBR)	Boas propriedades físicas e resistência à abrasão; baixa resistência aos derivados de óleo mineral; fragilização a alta temperatura; baixo custo de fabricação; e boa resistência a agentes atmosféricos.
Borracha de Silicone	Boa resistência a altas temperaturas, a baixas temperaturas, a ozônio, a intempéries ambientais; e nenhuma resistência ao petróleo.
Borracha Poliuretano (AU e EU)	Excelente processabilidade; resistência ao calor e à chama; boa resistência aos óleos; fraca resistência a ácidos e bases; boa resistência química a óleos e a água; e boa resistência aos agentes atmosféricos, luz solar e ultravioleta, oxigênio e ozônio.

Tabela II.2 – Propriedades inerentes a cada tipo de camada de elastômero (API, 2001).

Características	Testes	Liner	Compostos Incorporados	Cobrimento
Mecânicas / Propriedades Físicas	Resistência à Tração / Alongamento	X	X	X
	Propriedades de Tensão de Relaxação	X		X
	Dureza	X	X	X
	Resistência à Compressão	X	X	X
	Resistência à Pressão Hidrostática			
	Resistência à Abrasão	X		
	Resistência ao Rasgo	X	X	X
	Presença de Vazios	X	X	X
	Adesão	X	X	X
	Densidade	X	X	X
Propriedades Térmicas	Coefficiente de Condutividade Térmica	X	X	X
	Temperatura de Fragilização	X	X	X
Permeabilidade	Permeabilidade de Flúidos	X	X	X
	Resistência à Formação de Bolhas	X		
Compatibilidade e Envelhecimento	Compatibilidade com o Flúido	X	X	X
	Envelhecimento	X	X	X
	Resistência a Ozônio			X
	Inchamento	X		X
	Absorção de Água	X		X

Segundo GENT (2006), as borrachas, quando sujeitas a pequenas deformações, se comportam como um sólido elástico linear isotrópico e, assim como para outros materiais, o módulo de elasticidade pode ser determinado por meio de sua dureza. É comprovada a relação existente entre essas duas propriedades. Essa característica da borracha é descrita como resistência ao entalhe por um objeto não cortante. A Tabela II.3 demonstra as relações entre o grau de dureza da borracha e o módulo de elasticidade equivalente.

Tabela II.3 – Relação entre IRDH – International Rubber Hardness Degrees – e E – Módulo de Elasticidade em MPa (GENT, 2006).

IRHD	E (MPa)
30	1
35	1.2
40	1.5
45	1.9
50	2.3
55	2.9
60	3.6
65	4.5
70	5.5
75	7.5
80	9.5
85	15

II.5 Cordonéis (*plies*)

Plies ou cordonéis são as camadas responsáveis pelo reforço estrutural do mangote. Podem ser divididas, basicamente, em três tipos: *reinforcement*, *breaker* e *shoulder plies*. Essas camadas são usualmente compostas por cordas ou por cordoalhas formadas por fibras sintéticas.

Conceitualmente, vale ressaltar que cada cordoalha é composta por fios e esses, por sua vez, por filamentos, como demonstra a Figura II.6. Portanto, os filamentos são enrolados em um sentido para formarem os fios, que, quando enrolados em sentido contrario, formarão as cordoalhas de fibras sintéticas.

No que vem a seguir, para melhor compreensão dessas camadas, faz-se uma breve descrição das características dessas fibras e cordoalhas sintéticas e, logo após, apresentam-se as funções estruturais de cada uma das *plies*.



Figura II.6 – Corda de Cânhamo ilustrando a composição de uma cordoalha em maior escala – filamentos, fios, cordoalha (MCDONNEL, 2006).

II.5.1 Fibras utilizadas

As fibras sintéticas são constituídas por polímeros estirados em longos filamentos. Os fios, como exposto anteriormente, são formados por um conjunto de fibras entrelaçadas ou, ainda, filamentos contínuos ou vários cabos retorcidos que possuem um aspecto geral cilíndrico, mas, na realidade, têm os diâmetros variando irregularmente ao longo do comprimento. Assim, devido a essas irregularidades, é impraticável medir o diâmetro dos fios, seja a olho nu seja através de aparelhos micrométricos. Como é necessário classificá-los, estabelecendo parâmetros de comparação que possam ser utilizados em transações comerciais ou na fabricação, estabeleceu-se, na indústria têxtil, uma forma indireta de expressar a espessura média de um fio correlacionando-se o peso e o comprimento dos fios. Essa mesma classificação se estende aos demais produtos de fiação como cabos, cordas e cordoalhas e, a esse procedimento, dá-se o nome de titulação.

A titulação dos fios pode ser definida tanto em “*denier*” – massa em gramas de 9000 metros de fibra dividida pelo seu comprimento – como, mais usualmente, em “*decitex*” – massa em gramas de 10000 metros de fibra dividida pelo seu comprimento. Em última análise, a titulação fornece uma medida da densidade linear do fio e está diretamente relacionada à resistência à ruptura. Assim, para obter uma estrutura com maior resistência duas medidas podem ser tomadas: aumentar o número de fios ou escolher material com maior densidade linear.

Outra medida, muito utilizada para a caracterização de fibras é a tenacidade, que é dada pela relação entre a resistência última do fio e uma quantidade de massa. A tenacidade tem como unidade o “centiNewton” por “decitex” – *cN/dtex*. A conversão para tensão admissível à tração é dada pela multiplicação do valor da tenacidade com a massa específica linear.

A Tabela II.4 mostra as principais características de alguns fios sintéticos comerciais, enquanto a Tabela II.5 apresenta os módulos de elasticidade de algumas cordoalhas de fibras sintéticas, utilizados nos modelos numéricos e analíticos.

Tabela II.4 – Característica das cordoalhas comerciais no rompimento (MCDONNEL, 2006).

Densidade Linear (dtex)	Número de Filamentos	Força de Ruptura (N)	Tenacidade (mN/tex)	Alongamento na Ruptura (%)
Nylon 66				
940	140	80	840	18
1880	280	118	628	19.5
Poliéster				
1100	210	94	848	11.2
1440	280	100	694	10.4
Rayon				
1840	1000	96	510	12.8
2840	1350	112	517	12.5
Aramida				
1500	1000	325	2030	4.8

Tabela II.5 – Módulo de elasticidade das principais configurações de cordoalhas (MCDONNEL, 2006).

Cordoalhas	Módulo de Young (MPa)
1500/2 Kevlar	2,48E+04
1000/2 Polyester	3,67E+03
840/2 Nylon	3,48E+03

Os materiais mais utilizados como reforços estruturais das matrizes elastoméricas dos mangotes são o poliéster e o nylon. O poliéster é um polímero que apresenta um grupo funcional *éster* na sua cadeia principal. Ao passo que, o nylon é formado por poliamidas, mais precisamente, pela polimerização de *diaminas ácidos dicarboxílicos*. O módulo de elasticidade do nylon é, normalmente, um pouco menor do que o do poliéster, o que gera a necessidade de uma maior quantidade do primeiro para

geração de um mesmo nível de rigidez que do último. No entanto, este, o poliéster, apresenta menor limite de resistência à tração do que aquele, o *nylon* (CALLISTER, 2000).

No uso desses materiais, um aspecto importante a ser garantido é a adesão entre as fibras e a matriz elastomérica. Essa adesão é promovida por dois processos: os químicos e os mecânicos. Para a ação química, é necessário lançar mão do uso de produtos com ação adesiva, como o *resorcinol-formaldeído-látex* (RFL), que age na vulcanização de modo a garantir formações de fortes cadeias de polímeros. O outro método, a adesão mecânica, é assegurado pelo intertravamento proveniente da penetração do elastômero nas reentrâncias das cordoalhas. Vale mencionar ainda que essa adesão deve ser forte e, por conseguinte, não permitir o descolamento das camadas. Para isso, é usual a suavização das diferenças entre os materiais, como, por exemplo, seus módulos de elasticidade. Assim, uma boa prática é diminuir essa diferença de rigidez dos materiais compósitos, que geralmente é realizada pela inserção de um adesivo com módulo elástico intermediário ao dos materiais em contato.

II.5.2 *Funções estruturais*

Como já mencionado, as cordoalhas podem ser divididas quanto à função estrutural que desempenham no mangote em *reinforcement*, *breaker* e *shoulder plies*.

Os *reinforcement plies* são responsáveis pelo fornecimento de rigidez e resistência mecânica do mangote, enquanto a flexibilidade é fornecida pela matriz elastomérica. Essas cordoalhas envolvem o duto e, geralmente, são assentadas com um ângulo baixo em relação ao seu eixo axial. A variação do ângulo de assentamento implica em mudança da resposta estrutural resultante. Assim, ângulos menores em relação ao eixo do duto irão fornecer maiores rigidezes axial e à flexão, ao passo que ângulos mais elevados fornecem, principalmente, maior resistência a esforços radiais.

Os *breaker plies* possuem como principal função evitar que rasgos no elastômero se propaguem radialmente. Por isso, é usual que as cordoalhas sejam assentadas e organizadas em forma de telas, como mostrado na Figura II.7. Geralmente o *nylon* é o material escolhido para a composição das cordoalhas de reforço, uma vez

que estes são mais resistentes a óleo cru que o poliéster e possuem um maior alongamento na ruptura (CALLISTER, 2000). São posicionados próximos às superfícies livres, entre as carcaças e na interface do elastômero com outra camada, onde, devido à diferença de resistência, o aparecimento do rasgo é mais comum.

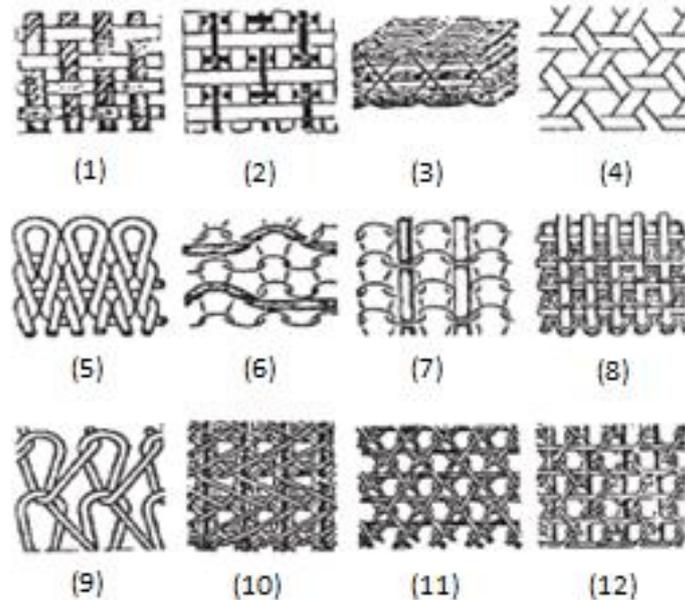


Figura II.7 - Exemplos de possíveis configurações de fibras em tecidos – Breaker Plies (SINGHA & SINGHA, 2012).

Os *shoulder plies* possuem a mesma estrutura das camadas de *reinforcement plies* ressaltadas anteriormente. Contudo, esses são assentados em ângulos ainda menores que os já descritos para as camadas de *reinforcement plies*. Como função principal, pode-se destacar o reforço à rigidez axial com o intuito de atenuar o gradiente de rigidez encontrado na região de transição *nipple*-elastômero. Esse gradiente de rigidez se deve à grande variação de resistência mecânica dos materiais e pode levar à concentração de tensão nessa área. O efeito desse reforço pode ser acentuado pela utilização de camadas cobrindo menores extensões do duto, ou mesmo, alterar o ângulo de assentamento tornando-o mais agudo próximo ao *nipple*. Essa estrutura é ilustrada na Figura II.8.

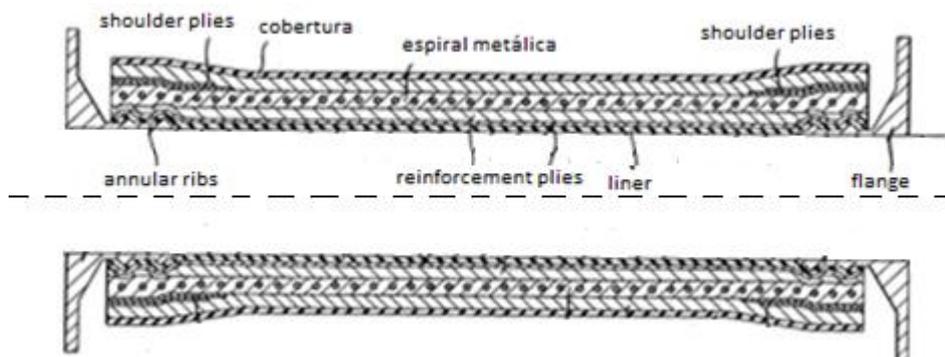


Figura II.8 – Representação de mangote com suavização da transição de rigidez (HENRY, 1980).

Segundo a API 17K (API, 2001), as camadas de reforços estruturais devem ser projetadas de modo a obter resistências axiais, à tração e à compressão, equivalentes àquelas determinadas em projeto. Outro fator de projeto importante é o equilíbrio da estrutura quando solicitada à torção. Deve-se garantir que a interação de tais camadas não contribua para a separação das mesmas, processo conhecido como delaminação. Por fim, as *plies* devem ser submetidas a uma série de testes a fim de caracterizá-las. Esses procedimentos são ressaltados pela norma API 17K (API, 2001) e são aqui expostos na Tabela II.6.

Tabela II.6 – Propriedades inerentes às camadas de reforço adaptada da API 17K.

Características	Testes	Enrijecedor à Flexão	Camadas de Reforços
Propriedades das Ligas	Composição Química	X	X
	Microestrutura	X	
Mecânicas / Propriedades Físicas	Tensão de Escoamento	X	X
	Resistência Última	X	X
	Alongamento	X	X
	Resistência à Fadiga		X
	Resistência à Erosão	X	
Características dos Materiais	Resistência à SSC e HIC		X
	Resistência à Corrosão	X	X
	Resistência à Propagação de Rachaduras		X
	Resistência Química	X	X
	Resistência ao Desgaste		X

II.6 Enrijecedor à flexão (*bend stiffners*)

Os *bend stiffners* ou enrijecedores à flexão são formados, normalmente, por arames de aço assentados helicoidalmente que se estendem ao longo do duto e possuem duas funções: incrementar a resistência à flexão do mangote; e evitar o esmagamento da seção, ou seja, estabilizar a seção transversal do duto, quando essa começa a se tornar elíptica por flexão excessiva.

Na maioria dos casos, são fabricados em aço e a seção da espira é circular, o que diminui a concentração de tensão no contato entre o arame e o elastômero. No entanto, já foram propostos mangotes dotados de enrijecedores com seção transversal quadrada ou retangular, como mostra a Figura II.9. Outra forma usual de apresentação de tal reforço é através de anéis, porém, nesse caso, não há nenhum, ou muito pouco, aumento de rigidez à torção. Por outro lado, nessa configuração, se o mangote for solicitado à torção, não ocorre nenhuma tendência de esmagamento da seção devido ao “fechamento” do enrijecedor, mecanismo presente na utilização do arame assentado helicoidalmente (OCIMF, 1991).

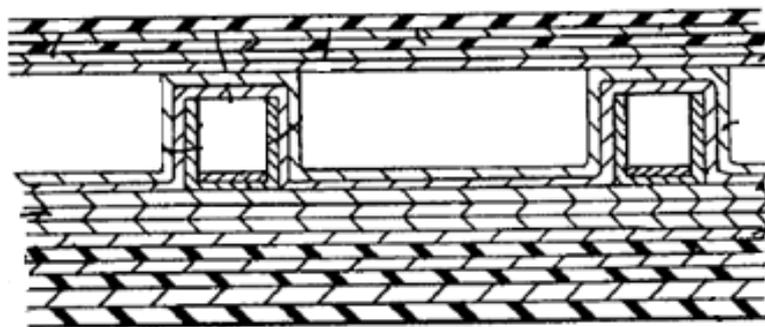


Figura II.9 - Modelo de mangote com enrijecedor em seção quadrada (AMBROSE et al., 1973).

Esses arames possuem alto ângulo de assentamento, perto de 90 graus com o eixo axial do duto e, assim, essa camada não (ou pouco) acrescenta à rigidez axial do duto. Pode, dessa maneira, ser notada alguma similaridade com a carcaça intertravada dos dutos flexíveis de camadas não aderentes, o que de fato é assumido pelo guia OCIMF (1991).

Os materiais permitidos pela API 17B (API, 2002), na confecção de carcaças intertravadas, são os mesmos utilizados para os enrijecedores à flexão, ou seja: aços carbono, inoxidável ferrítico, inoxidável austenítico, ligas à base de níquel e altas ligas (duplex). As principais características mecânicas e físicas dos aços citados pela referida norma são apresentadas na Tabela II.7.

Tabela II.7 – Propriedade dos aços possivelmente utilizados para a confecção das armaduras dos mangotes (MATWEB, 1996).

Tipos	Siglas	Limite de resistência (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)	Poisson	Resistência à corrosão
Aço Carbono	AISI 1045	585	515	200	30	0.3	Baixa
Aço Inoxidável Ferrítico	AISI 409	450	215	200	25	0.3	Boa resistência sob tensão e em meios ácidos e em água do mar
	AISI 430	480	275	200	20	0.3	
Aço Inoxidável Austenítico	AISI 304	520	205	193	40	0.3	Excelente resistência, exceto quando sob tensão; boa aos óxidos e aos carbonetos
	AISI 304L	485	170	193	40	0.3	
	AISI 316	520	205	193	40	0.3	
Aço de Alta Liga	AISI 316L	480	290	193	50	0.29	Excelente resistência
	UNS S31803	860	590	190	30	0.3	
Aço Liga de Níquel	N08825	690	310	206	45	0.42	Excelente resistência

Ainda segundo a API 17B (API, 2002), a escolha do material é condicionada ao tipo de ambiente a que o duto estará submetido, ou seja, a escolha deve concordar com o grau de agressividade do fluido escoante no interior do duto. Com o aumento da agressividade do fluido, a escolha do material deve ir do primeiro material (aço carbono), para fluidos pouco agressivos, ao último material (ligas de aço à base de níquel), para fluidos muito agressivos.

A API 17K (API, 2001) recomenda, para materiais metálicos, uma série de testes e experimentos, a fim de verificar a adequabilidade à situação a que esse deve ser submetida. Como testes, recomenda-se a verificação das seguintes resistências: à

rachaduras induzidas por hidrogênio (HIC), à corrosão, à erosão, à fragilização por hidrogenação e à fadiga.

Por fim, cabe destacar que tanto os enrijecedores à flexão como as camadas de reforço estrutural – as *plies* – devem ser submetidos a uma série de testes a fim de caracterizá-los. Esses testes são indicados na Tabela II.6.

II.7 Flutuadores

Como já mencionado, a composição dos mangotes flutuantes é praticamente a mesma que a dos mangotes submarinos, com exceção da camada de flutuadores. A função primária dessa camada de flutuadores é a redução do peso específico do mangote. Os flutuadores são constituídos de uma espuma polimérica, geralmente o poliuretano (PU), de célula fechada, que não permite a entrada de fluido.

A camada de flutuação deve atender aos requisitos determinados pela OCIMF (1991), a saber:

- Resistir por 24 horas à pressão externa equivalente a 10 metros de profundidade de água, sem que haja colapso desta camada e, conseqüentemente, a diminuição do diâmetro e a perda de flutuabilidade.
- Não absorver água, evitando assim o acréscimo de peso na estrutura.

Na Tabela II.8, pode-se visualizar as principais características mecânicas e físicas das espumas de poliuretano comumente utilizadas como flutuadores.

Tabela II.8 – Características físicas e mecânicas da espuma de poliuretano (MATWEB, 1996).

Densidade (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Alongamento na ruptura (%)	Espuma de Poliuretano		Resistência ao cisalhamento (MPa)	Coeficiente de Poisson	Módulo de elasticidade transversal (GPa)
			Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de escoamento (MPa)			
1.5	0.7 - 38.0	3.2 - 760	10 ⁻⁴ - 3.45	6.6 - 62.0	0.59 - 16.0	0.3 - 0.75	0.01 - 0.87

II.8 Fabricação de mangotes

A fabricação dos mangotes é realizada, atualmente, por diversas companhias, das quais as principais são: *Flexomarine, Dunlop Oil and Marine, Goodyear, Trelleborg, Manulli Rubber, Pirelli e Yokohama*. Para fins didáticos, será descrito nesta seção o procedimento realizado na construção de mangotes de carcaça simples, pois, a segunda carcaça é produzida de maneira análoga à primeira.

Inicialmente, a borracha é recebida pelo fabricante em tiras brutas e ásperas, ou seja, sem nenhum tipo de tratamento térmico. Essa borracha passa, então, por uma máquina, que a tritura e a aquece (Figura II.10). Com o aquecimento, o material é amolecido e, por conseguinte, obtém superfície mais homogênea e lisa. Posteriormente, essa borracha termicamente tratada é enrolada em carretéis, os quais podem ser vistos na Figura II.11. Os carretéis de borracha tratada são submetidos, em sequência, a uma máquina que os corta em determinadas larguras, estabelecidas pelas dimensões do mangote escolhido como diâmetro e comprimento, conforme mostra a Figura II.11.

Após a borracha ser tratada e agrupada em carretéis, devem ser produzidas as camadas de reforços poliméricos, que são responsáveis pelo aumento da rigidez axial da estrutura. Essas camadas são constituídas de um conjunto de fibras poliméricas de alta resistência revestidas pelo elastômero já tratado. Esse processo é conhecido por *coating* e é ilustrado pela Figura II.12.



Figura II.10 - Moedor da borracha bruta (PREMIER RUBBER CO., 2012).



Figura II.11 – Cortador de elastômero em fitas (PREMIER RUBBER CO., 2012).



Figura II.12 – Confeção das camadas compósitas poliméricas para reforço, o "coating" (TRELLEBORG, 2011).

Para a fabricação do mangote, a primeira medida a ser tomada deve ser o assentamento do mandril, ou seja, um tubo metálico de comprimento final compatível com o projetado para o mangote é acomodado em uma máquina capaz de proporcionar a rotação axial do mesmo. A esse tubo serão aplicadas as diversas camadas, o que confere ao tubo metálico a função de molde. É realizada, após o assentamento do tubo, a lubrificação do mesmo, a fim de garantir a fácil desconexão do mangote ao final do processo de fabricação. As primeiras estruturas a serem assentadas no mandril são os dois *flanges-nipples*, que são posicionados em suas extremidades, conforme mostra a Figura II.13.



Figura II.13 – Posicionamento da estrutura de conexão (FLEXOMARINE, 2010).

Com as estruturas de interconexão (*flanges-nipples*) posicionadas, aplica-se a primeira camada de elastômero, manual ou automaticamente. Em ambos os casos, as tiras de elastômero são enroladas de uma ponta a outra do mandril, à medida que este gira axialmente. Essa operação é realizada em sucessivos passos e apenas deve ser interrompida quando a espessura final da primeira camada de *liner* for atingida. A Figura II.14 ilustra esse processo.



Figura II.14 - Revestimento da camada de liner (FLEXOMARINE, 2010).

Após a confecção da primeira camada de elastômero, deve ser feito o assentamento das camadas de reforços. Começa-se pelo assentamento do reforço polimérico, o qual é, usualmente, automatizado, pois é importante ter controle sobre o

ângulo de assentamento das fibras na produção dos mangotes. São, assim, enroladas lâminas de fibras revestidas de elastômero contra-helicoidalmente até que seja atingida a quantidade de reforço determinada em projeto para a especificada camada, como mostra a Figura II.15.

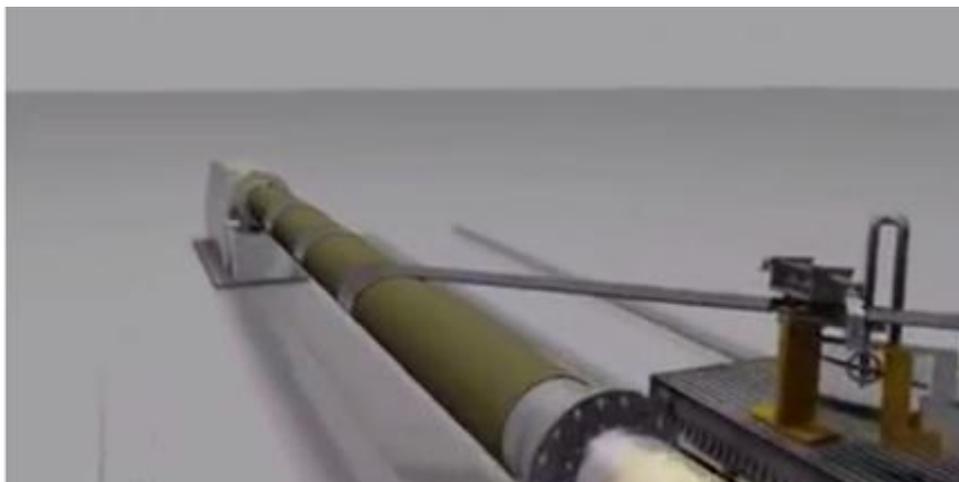


Figura II.15 – Assentamento das camadas de fibras poliméricas (FLEXOMARINE, 2010).

O próximo passo é o assentamento do espiral metálico. Esse componente é geralmente sobreposto à primeira camada de compósito polimérico. A operação é, na maioria das vezes, realizada manualmente (Figura II.16). Após o assentamento do enrijecedor, outro conjunto de lâminas de fibras deve ser colocado sobre o mesmo, a fim de garantir a aderência e a trabalhabilidade do enrijecedor com o restante do mangote. Todas as camadas de fibras são adicionadas ao molde do mesmo modo descrito anteriormente.

Logo após, são aplicadas duas camadas de elastômero finais, da mesma maneira que a primeira camada foi descrita. A diferença existente entre essas camadas de elastômeros são basicamente quanto a sua composição química e sua coloração. A primeira é composta, normalmente, do mesmo elastômero aplicado nas outras camadas aqui descritas e serve como base para a aplicação da espuma de poliuretano, quando o mangote fabricado for flutuante. Já a segunda, é composta por material elastomérico mais resistente à abrasão, à água do mar e às intempéries ambientais e, normalmente, recebe coloração viva, para tornar o mangote mais visível quando em operação, uma vez que este último revestimento elastomérico é responsável pela cobertura do mangote.



Figura II.16 – Assentamento do espiral metálico realizado manualmente (PREMIER RUBBER CO., 2012).

Após a aplicação dessas camadas elastoméricas faz-se a vulcanização, que é realizada dentro de um forno especial à temperatura fixa (Figura II.17). Antes de submeter o mandril ao forno, deve-se adicionar uma camada de *nylon* úmido por cima da última camada de elastômero, que é responsável pela compressão entre as camadas durante a vulcanização e, conseqüentemente, colabora para fornecimento de aderência entre as camadas. Vale ressaltar, que essa camada de *nylon* é removida, dado o fim da vulcanização. Finalmente, retira-se o molde metálico e assim completa-se o processo de fabricação de um mangote de carcaça simples.

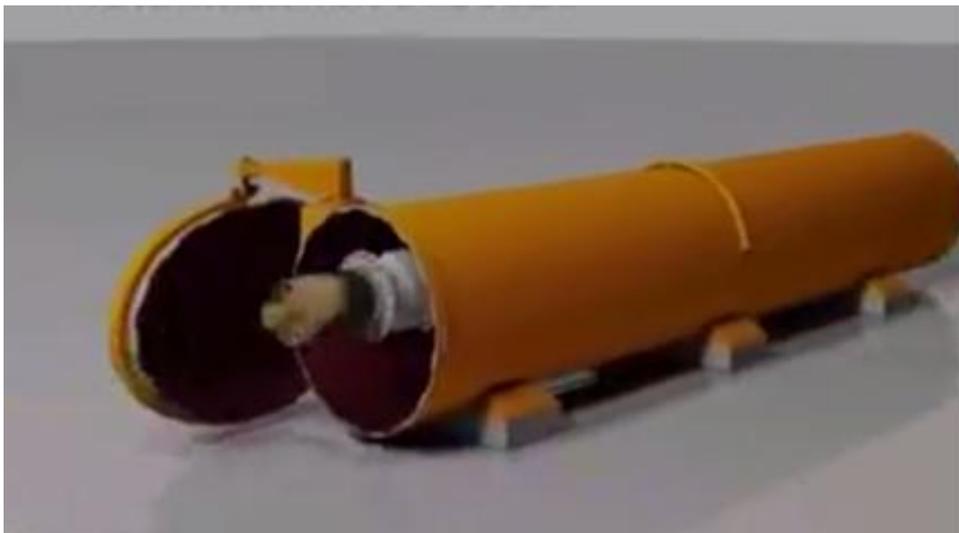


Figura II.17 – Mandril e as diversas camadas do mangote submetidos ao forno para realização da vulcanização (FLEXOMARINE, 2010).

CAPÍTULO III - Modelos numéricos

III.1 Introdução

Conforme apresentado na seção anterior, o mangote é uma estrutura composta por diversas camadas de reforços poliméricos e de aço aderidas por vulcanização em uma matriz elastomérica. Por isso, e pelo fato da literatura técnica apresentar poucas fontes de referência, a análise local dessas estruturas é um grande desafio.

A análise local tem como objetivos principais: o cálculo das propriedades mecânicas da estrutura; a estimativa das cargas-limite; e a obtenção das tensões e das deformações nas diferentes camadas da estrutura. Desse modo, esta seção visa à apresentação dos modelos de elementos finitos para a análise local de mangotes já desenvolvidos na literatura e a descrição dos modelos propostos nessa dissertação.

III.2 Modelos para análise local de mangotes disponíveis na literatura

Há poucos modelos disponíveis na literatura voltados para a análise local de mangotes. Dois modelos foram encontrados: o de ANTAL, *et. al.* (2003) e o de ROESE, *et. al.*(2010).

ANTAL *et al.* (2003) elaborou um modelo numérico tridimensional baseado no método dos elementos finitos para o estudo de uma mangueira de 6'' projetada sobre os critérios normativos da API 17K (API, 2001). Nesse modelo, o elastômero foi representado por elementos finitos sólidos isoparamétricos de 8 nós com comportamento hiperelástico modelado pela formulação de *Mooney-Rivlin* (MOONEY, 1940). As camadas de reforço foram modeladas por elementos finitos contínuos, contidos no interior dos elementos sólidos que compõem a matriz elastomérica e

completamente aderidos a eles. Esses elementos são conhecidos como elementos de *rebar* e são esquematicamente apresentados na Figura III.1(a) (LACEO , 2011). O material empregado para as fibras é assumido isotrópico com comportamento elástico e bilinear, ou seja, a resposta à tração é diferente da resposta à compressão. O enrijecedor à flexão também é modelado com elementos de *rebar*, mas são utilizados elementos unifilares como os apresentados na Figura III.1(b). Finalmente, assumiu-se que o material desse enrijecedor possui comportamento elástico e linear, além de ser isotrópico.

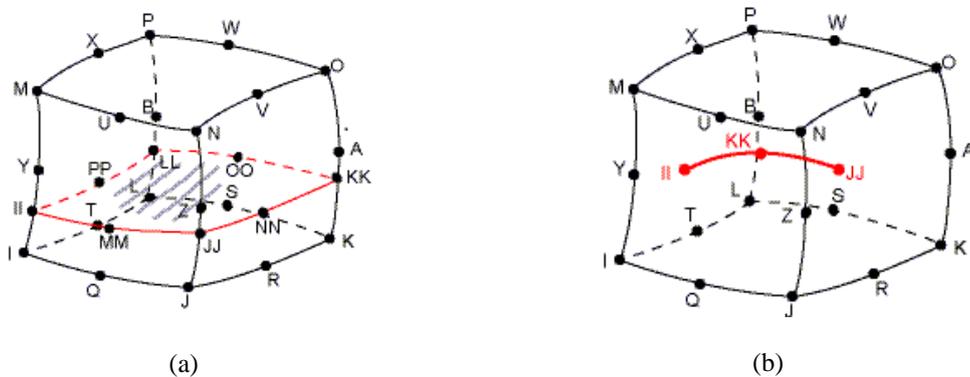


Figura III.1 - Elementos de reforço (a)rebar layer e (b) rebar single (em vermelho).

ROESE et al. (2010) desenvolveu um modelo numérico semelhante ao de ANTAL et al. (2003) para analisar a resposta estrutural de um mangote de 20". As principais diferenças entre esses modelos residem na representação do comportamento das fibras, que foi simulado através do modelo hiperelástico de *Marlow* (DS SIMULIA, 2010), e na modelagem dos elementos de reforços, a qual foi utilizada elementos de viga para a representação do enrijecedor à flexão e de elementos de membrana associados a seções de *rebar* para a representação dos cordoneis. O elastômero foi modelado pela formulação de *Mooney-Rivlin* (MOONEY, 1940) e aos demais materiais foram atribuídas características elásticas lineares isotrópicas. Esse modelo foi elaborado no programa *ABAQUS*®.

Por outro lado, devido à similaridade existente entre a composição dos pneus automotivos e a dos mangotes, as técnicas de modelagem destes, os mangotes, podem ser similares às adotadas para a modelagem daqueles, os pneus. Nesse sentido, tem-se

como principal benefício à existência na literatura de vários modelos numéricos voltados para análise de pneus automotivos.

A Tabela III.1 apresenta, resumidamente, as principais características dos modelos numéricos voltados para a análise pneus automotivos propostos por PELC (2000), RAO et al. (2002, apud ERSAHIN, 2003) e por CHANG (2002, apud ERSAHIN, 2003). Esses modelos serão utilizados como bases para a construção dos modelos numéricos propostos nessa dissertação e, doravante, serão denominados modelos de referência.

Tabela III.1 – Características dos modelos de referência utilizados como base para a construção dos modelos numéricos de mangote.

Características	CHANG (2002)	PELC (2000)	RAO et al. (2002)
Elemento usado na modelagem do elastômero	Sólido isoparamétrico de 8 nós com formulação híbrida	Sólido isoparamétrico de 8 nós com formulação híbrida	Sólido isoparamétrico de 8 nós com formulação híbrida
Elemento usado na modelagem dos cordonéis	Membrana de 4 nós e integração reduzida – Seção de <i>rebar</i>	Sólido isoparamétrico de 8 nós com formulação híbrida – Compósito	Elementos de <i>rebar</i> – <i>Layer</i>
Elemento usado na modelagem dos arames	Viga tridimensional	Sólido isoparamétrico de 8 nós com formulação híbrida – Compósito	Elementos de <i>rebar</i> - <i>Single</i>
Técnica de modelagem	Seção de <i>rebar</i>	Lei dos compósitos	Elementos de <i>rebar</i>
Contato entre as camadas	Aderidas	-	-
Material do elastômero	Elástico, linear e isotrópico	Elástico, linear e isotrópico	Hiperelástico - <i>Mooney-Rivlin</i>
Material dos cordonéis	Elástico, linear e isotrópico	Elástico, linear e anisotrópico	Elástico, linear e isotrópico
Material dos arames	Elástico, linear e isotrópico	Elástico, linear e anisotrópico	Elástico, linear e isotrópico

III.3 Descrição dos Modelos Numéricos

Nesta dissertação, foram desenvolvidos três modelos numéricos para a análise local de mangotes. Esses modelos são denominados modelos I, II e III e fundamentam-se nos trabalhos de CHANG (2002, apud ERSAHIN, 2003), PELC (2000) e RAO

(2002, apud ERSAHIN, 2003), respectivamente. Para o desenvolvimento de todos os modelos numéricos, empregou-se o programa computacional *ABAQUS 6.10*®.

III.3.1 Descrição do modelo numérico I

Esse modelo foi fundamentado no trabalho de CHANG (2002, apud ERSAHIN, 2003). Assim, os elementos utilizados na modelagem e as concepções dos materiais adotadas foram idênticas às aquelas apresentadas para o modelo de referência, na Tabela III.1. A Figura III.2 apresenta uma vista geral desse modelo.

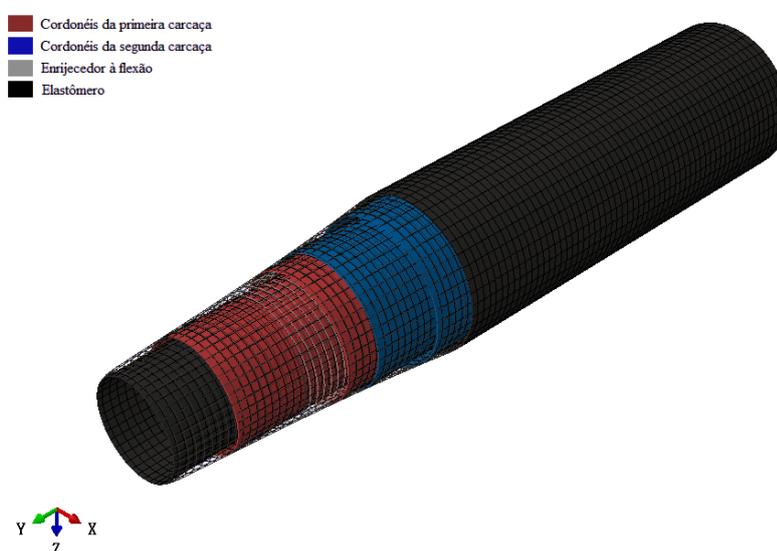


Figura III.2 – Modelo numérico I.

Nesta seção, será detalhada a modelagem do *flange-nipple*, das camadas elastoméricas, das camadas de reforços poliméricos da primeira carcaça e da segunda carcaça, do enrijecedor à flexão e das interações existentes entre os diversos elementos.

III.3.1.1 Modelagem do flange-nipple

A modelagem dessas estruturas de conexão foi realizada por elementos de casca de quatro nós, cada qual com seis graus de liberdade (translações nos eixos X, Y e Z

globais e rotações em torno desses mesmos eixos), integração reduzida e interpolação linear. No programa *ABAQUS 6.10*®, esses elementos são chamados de *S4R*. Esse elemento, tomando por base a razão entre a espessura e o comprimento da superfície modelada, escolhe internamente a teoria de casca a ser utilizada, ou seja: a teoria de *Kirchhoff-Love* (cascas delgadas) ou a teoria de *Reissner-Mindlin* (cascas espessas).

Cabe destacar que, devido à inexistência de informações detalhadas sobre o *flange-nipple*, o modelo aqui proposto não considera os *anular ribs* e nem a variação de espessura presentes no *nipple*. Procura-se, apenas, gerar um componente rígido para fixação das camadas do mangote, conforme pode ser visto na Figura III.3.

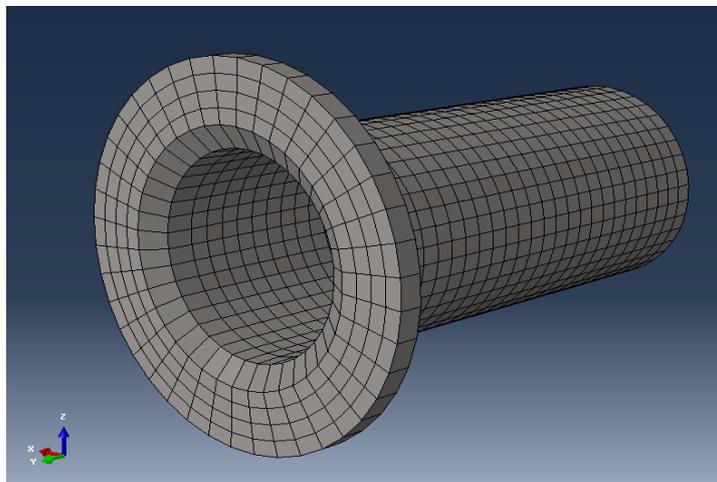


Figura III.3 – Modelagem do componente flange-nipple.

III.3.1.2 Modelagem da camada elastomérica

As camadas elastoméricas são modeladas através de elementos sólidos tridimensionais hexaédricos de oito nós, formulação híbrida e interpolação linear. No *ABAQUS 6.10*®, esse elemento é denominado *C3D8RH*, onde “C” estampa a continuidade do elemento, “3D” a tridimensionalidade, “8” o número de nós, “R” indica integração reduzida e “H” indica formulação híbrida ou mista u-p (deslocamento e pressão). Cada nó desse elemento apresenta três graus de liberdade: translações nas direções X, Y e Z globais. A Figura III.4 apresenta, esquematicamente, esse elemento e sua aplicação no modelo proposto.

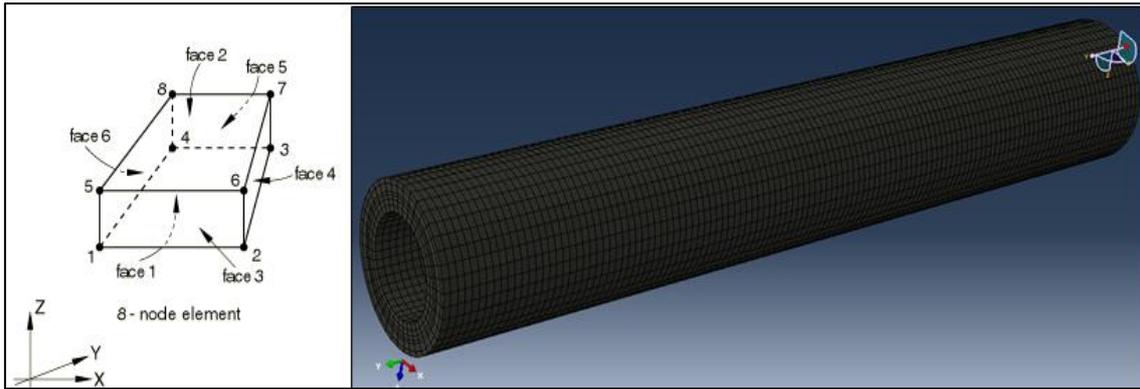


Figura III.4 – Elemento Sólido - C3D8RH (DS SIMULIA, 2010).

Os elementos contínuos de interpolação linear são caracterizados por apresentarem deformações volumétricas essencialmente constantes, o que pode gerar o problema de travamento volumétrico ou o problema de travamento por cisalhamento (BATHE, 1996). No modelo aqui proposto, o possível travamento volumétrico é prevenido com a utilização da formulação mista u-p (BATHE, 1996). Já a integração reduzida previne a possível ocorrência do travamento por cisalhamento (DS SIMULIA, 2010). Por outro lado, ao utilizar a integração reduzida em elementos de interpolação linear, é necessário empregar um método para controlar o efeito ampulheta (DS SIMULIA, 2010). No modelo aqui proposto, foi utilizado o método chamado *Enhanced Stiffness Control* (DS SIMULIA, 2010).

III.3.1.3 Modelagem da camada de reforço polimérico

Tanto as camadas de reforços poliméricos da primeira carcaça como as da segunda carcaça foram modeladas com elementos de membrana denominados, no programa *ABAQUS 6.10®*, de *M3D4R*. Esses elementos são tridimensionais, possuem quatro nós e três graus de liberdade cada: translações em relação aos eixos globais X, Y e Z. Além disso, no uso desses elementos, emprega-se integração reduzida com *Enhanced Stiffness Control* para evitar o efeito ampulheta. A Figura III.5 apresenta esse elemento e sua aplicação no modelo proposto.

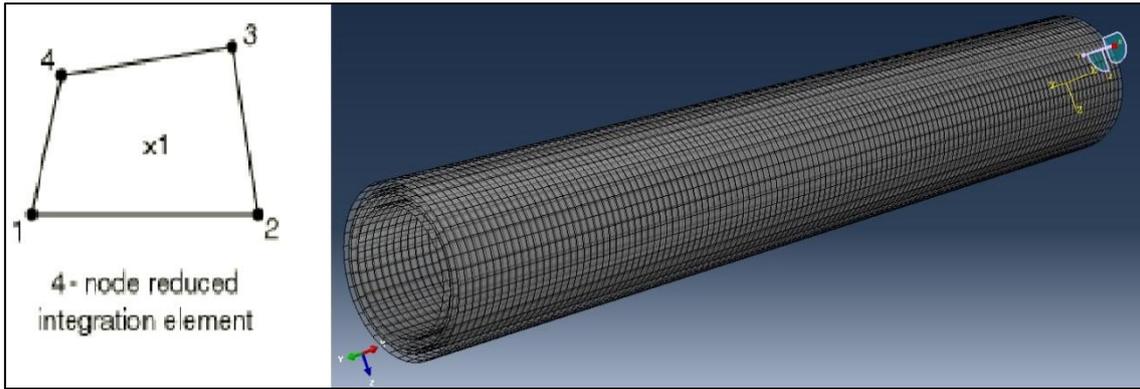


Figura III.5 – Elemento de Membrana com integração reduzida - M3D4R (DS SIMULIA, 2010).

O uso de elementos de membrana para modelagem dessas camadas se justifica pela baixa rigidez à flexão e, ao contrário, boa rigidez no plano de assentamento das fibras de reforço.

A respeito dos reforços, o artifício numérico utilizado foi a adoção de seções para os elementos de membrana, contendo os *rebars layers* (Figura III.6). Esse artifício é recomendado pelo *ABAQUS 6.10*® para a representação de reforços estruturais, pois garantem menor esforço computacional. Após definidas as seções, o programa utiliza a *Regra da Mistura* (MCDONNEL, 2006) para o cálculo dos parâmetros de uma casca ortotrópica equivalente. Com esses, são calculadas as matrizes de rigidez dessas cascas equivalentes e, posteriormente, associados aos respectivos elementos de membrana (DS SIMULIA, 2010).

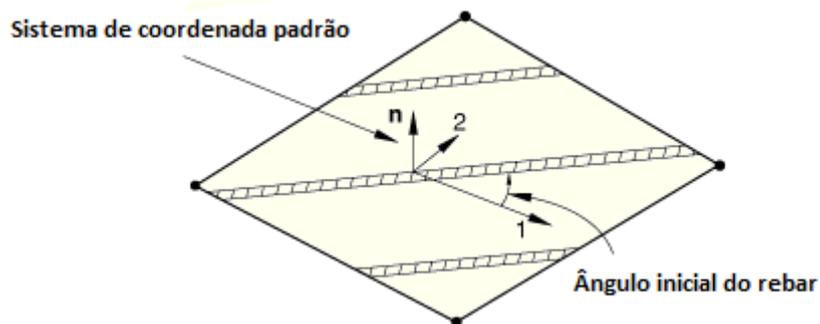


Figura III.6 – Elementos de rebar definidos sobre elementos de membrana.

Para definir completamente tais seções, é necessário conhecer detalhes das camadas a serem representadas, tais como: a espessura de cada camada; a área de seção

transversal da fibra de reforço; o espaçamento entre cada fibra; a definição de um sistema de coordenadas locais para a orientação dos *rebars*; e o ângulo de assentamento das fibras. Com esses parâmetros são definidos completamente as seções de rebar.

É interessante ressaltar, ainda, que nessa abordagem não há maior controle sobre o número de lâminas de reforço geradas em cada seção, pois esse artifício assume o espaçamento radial entre as lâminas de reforço igual ao espaçamento entre cada uma das fibras. Desse modo, as lâminas de *rebars* são igualmente espaçadas radial e tangencialmente, o que pode gerar excesso de lâminas e não o número exato verificado na estrutura real.

III.3.1.4 Modelagem do enrijecedor à flexão

O enrijecedor à flexão foi modelado por elementos de viga tridimensional denominados, no programa *ABAQUS 6.10*®, de *B31*. O enrijecedor é gerado a partir da equação de uma espiral, definida em função do seu ângulo de assentamento (α) e do seu raio médio (r). Esse componente pode ser visualizado na Figura III.7.

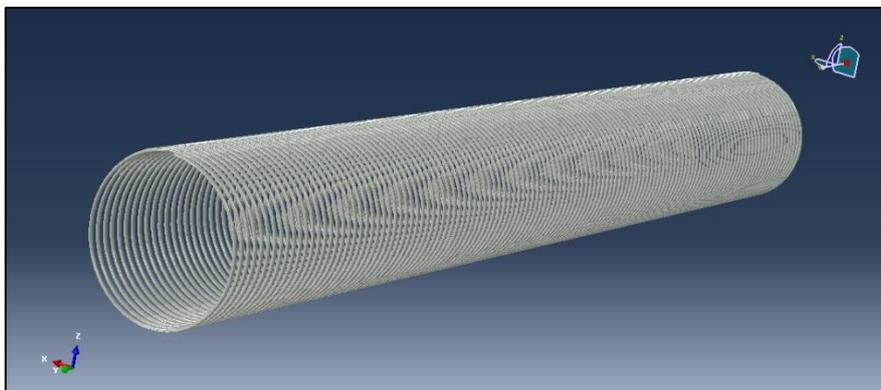


Figura III.7– Enrijecedor à flexão com o perfil circular “renderizado”.

Os elementos utilizados, *B31*, são formulados pela teoria de *Thimoshenko* e apresentam dois nós, com seis graus de liberdade cada (três translações em relação aos eixos X, Y e Z e três rotações em torno desses mesmos eixos), interpolação linear e três pontos de integração.

III.3.1.5 Interação entre os componentes

As interações entre os diversos componentes do duto são dadas pela constrição *Embedded Region* (regiões de adesão), ao passo que o *flange-nipple* é relacionado ao corpo do duto por uma constrição chamada *Mesh Tie* (acoplamento entre os graus de liberdade das superfícies em contato).

Foi proposta a utilização da técnica de restrição chamada *Embedded Regions*, pois essa é usada para modelar estruturas que são fabricadas embutidas umas nas outras. Esse é o caso do mangote, que apresenta o elastômero vulcanizado envolvendo as camadas de reforços. Segundo o manual do programa computacional *ABAQUS 6.10*® (DS SIMULIA, 2010), essa constrição pode ser utilizada para modelagem de estruturas reforçadas em geral e admite a utilização de elementos sólidos como hospedeiro e elementos de casca, de placa, de membrana ou de viga, como hóspedes ou embutidos.

A Figura III.8 é apresentada para explicar essa constrição. Nessa figura, são ilustrados quatro elementos, dois sólidos (hospedeiros), um pórtico e uma membrana (embutidos). A constrição é aplicada de modo a relacionar os graus de liberdade do nó do elemento embutido aos nós da face mais próxima do elemento hospedeiro (por exemplo, nó A com a face *abcde*). Essa relação é aplicada através de fatores de ponderação, que, por sua vez, são determinados com base nas distâncias relativas entre os nós.

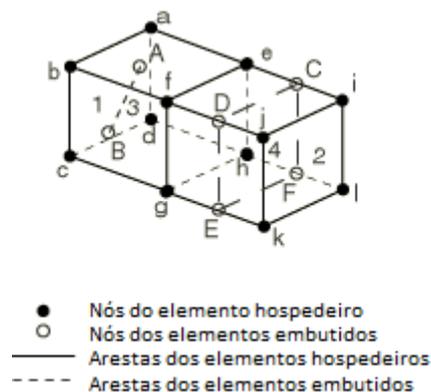


Figura III.8 – Exemplo de constrição do tipo *Embedded Regions*.

Já a relação conhecida por *Mesh Tie*, é comumente utilizada para representação de duas superfícies que começam a análise juntas e assim permanecem durante toda sua execução. Essa constrição é responsável por “amarrar” os nós das duas superfícies em contato, o que garante um acoplamento dos graus de liberdade, tanto de translações como de rotações.

A formulação para detecção de contato adotada por essa constrição é do tipo nó-superfície. Devem ser escolhidas, então, duas superfícies para a verificação do contato, a superfície mestre (superfície do *nipple*) e a superfície escrava (superfície interna do elastômero). Os nós da superfície escrava terão seus graus de liberdades acoplados aos nós da superfície mestra.

III.3.2 Descrição do modelo numérico II

Nesta abordagem, a modelagem do *flange-nipple* e das camadas elastoméricas é feita de acordo com o proposto para o modelo numérico I. Por outro lado, as camadas de reforço são representadas tomando por base as equações propostas por PELC (2000), provenientes de extensão da *Regra da Mistura* (MCDONNEL, 2006) para materiais compósitos. Essas equações foram utilizadas para calcular as propriedades dos materiais equivalentes ao compósito aplicadas a elementos sólidos. As equações de PELC (2000) e suas considerações são apresentadas mais detalhadamente a seguir.

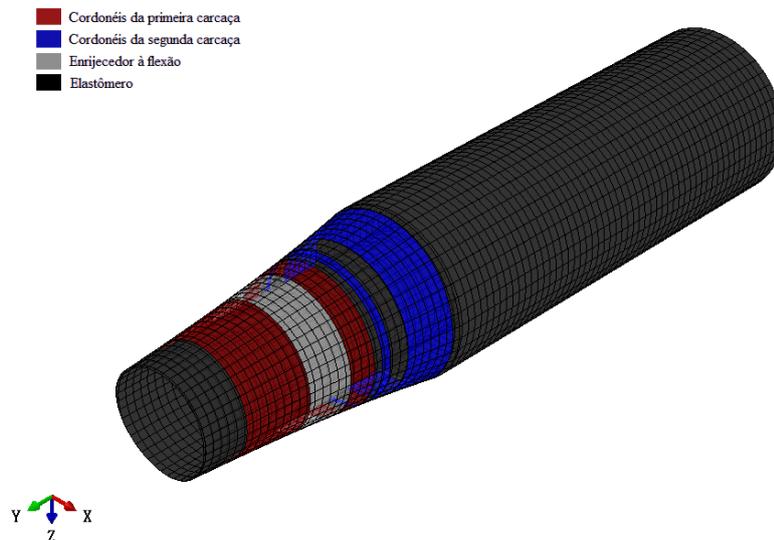


Figura III.9 – Modelo numérico II.

III.3.2.1 Modelagem das camadas de reforço – cordonéis e enrijecedor à flexão

As camadas de reforços foram modeladas com elementos sólidos contínuos de oito nós, cada um com três graus de liberdade, interpolação linear, integração reduzida e formulação híbrida, ou seja, empregou-se o elemento *C3D8RH*, já apresentado na seção III.3.1.2.

Nessa abordagem, as camadas de elementos responsáveis pela representação dos reforços são consideradas anisotrópicas com os seus parâmetros de engenharia (E_1 , E_2 , E_3 , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{12} , G_{13} , G_{23}) calculados a partir da *Regra da Mistura* (MCDONNELL, 2006) considerando as adaptações propostas por PELC (2000). Nessa abordagem, a direção principal (direção 1) é dada pelo assentamento das fibras, enquanto a direção 2 é tomada no plano de assentamento das fibras, mas perpendicularmente à direção 1, e a direção 3 é adotada no sentido da espessura do elemento. A Figura III.10 ilustra essas direções.

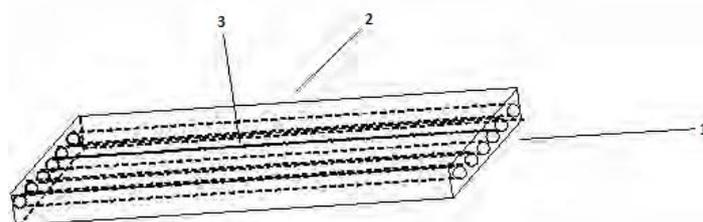


Figura III.10 – Sistema de coordenadas típico de materiais compósitos (ASSAD et al., 2005).

De acordo com PELC (2000), o módulo de elasticidade na direção principal, E_1 , é dado por:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.1)$$

onde E_f é o módulo de elasticidade do material de reforço; V_f é o volume relativo da fibra, ou seja, o volume de fibra dividido pelo volume total do elemento; E_m é o módulo de elasticidade do material elastomérico; e V_m é o volume relativo do material elastomérico, ou seja, o volume de material elastomérico dividido pelo volume total do elemento.

Já os módulos de elasticidade nas direções 2 e 3 são dados por:

$$E_2 = \frac{E_m(1 + 2V_f)}{(1 - V_f)} \quad (3.2)$$

$$E_3 = E_2 \quad (3.3)$$

Os módulos de elasticidade transversais (G_{12} , G_{13} , G_{23}) são calculados por meio do módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* do material elastomérico para a combinação de direção 12, ou seja:

$$G_{12} = G_m = \frac{E_1}{2(1 + \nu_{12})} \quad (3.4)$$

Para as direções 13 e 23, PELC (2000), propõe:

$$G_{13} = G_{23} = 3G_{12} \quad (3.5)$$

Já o coeficiente de *Poisson*, por se tratar de material praticamente incompressível, assume o valor de 0,499 para as direções 12 e 13, enquanto, para a direção 23, tem-se.

$$\nu_{23} = 0.98 - \nu_{12} \quad (3.6)$$

É importante ressaltar que o corpo do mangote é modelado como um duto sólido com seção transversal circular. A esse duto são atribuídas camadas de compósitos ao longo da espessura da parede do duto, recurso disponível no *ABAQUS 6.10®*. Assim, são criadas camadas diferentes baseadas na divisão de camadas do duto a ser modelado, às quais são atribuídas as características dos materiais que as representam, ou seja, elastômero (elástico linear isotrópico) ou reforço (elástico linear anisotrópico).

III.3.2.2 Interação entre os componentes

Nenhum elemento de contato, ou de constrição, foi necessário nesse modelo, além do utilizado para a ligação do *flange-nipple* e do corpo do duto (*Mesh Tie*). Isso, pois todas as camadas do duto foram descritas em um único elemento geométrico e definidas por apenas um tipo de elemento finito sólido, o *C3D8RH*.

III.3.3 Descrição do modelo numérico III

O modelo numérico III (Figura III.11) foi motivado pelo trabalho exposto por RAO (2002, apud ERSAHIN, 2003). Os elementos e as principais características do modelo de referência são encontrados na Tabela III.1. A representação do *flange-nipple* é feita de forma análoga ao modelo numérico I, porém a modelagem do elastômero e das camadas de reforço é distinta. Assim, nessa seção descreve-se apenas a modelagem desses componentes.

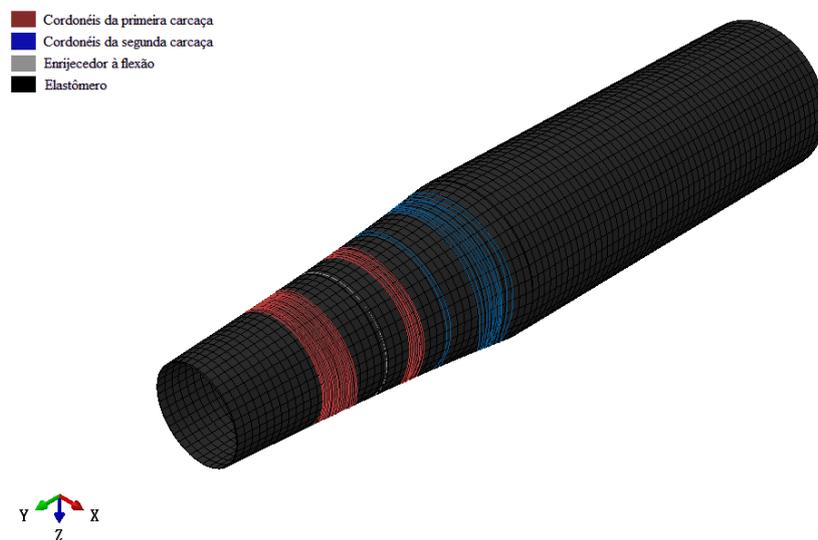


Figura III.11 – Modelo numérico III.

III.3.3.1 Modelagem das camadas elastoméricas

Para a modelagem das camadas elastoméricas, foi tomada abordagem semelhante à do primeiro modelo, ou seja, empregou-se o elemento *C3D8RH*.

Apesar de esse elemento ser idêntico ao utilizado no modelo numérico I, a concepção do material empregado não foi a mesma. Nessa abordagem, supõe-se que o material possui comportamento **hiperelástico**. Foram estudadas, nessa dissertação, diferentes equações constitutivas (Tabela III.2) e, mais adiante, no estudo de caso, será discutida a aplicação dessas equações na modelagem de um mangote de descarga.

III.3.3.1 Modelagem das camadas de reforços poliméricos

Para a representação dos reforços poliméricos embebidos em meio elastomérico, são utilizados elementos finitos do tipo *rebar layer*, como o exposto na Figura III.12. Esses devem ser definidos dentro de um elemento sólido e sua utilização é mais complexa e computacionalmente mais onerosa do que a abordagem proposta no modelo numérico I (DS SIMULIA, 2010).

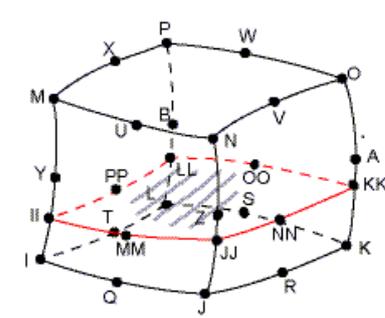


Figura III.12 – Elementos de reforço rebar layer (em vermelho).

Tabela III.2 – Principais modelos constitutivos para elastômeros (HOSS, 2009).

<p><i>Arruda-Boyce</i></p>	$W = \mu \sum_{i=0}^N \left(C_i / \lambda_L^{2i-2} \right) (I_1^i - 3^i)$	<p>Adequado para representação de apenas um resultado experimental e para deformações de até 300%</p>
<p><i>Yeoh</i></p>	$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_i - 3)^i$	<p>Pode ser utilizado com dois, três ou cinco termos. Os dois últimos representam melhor grandes deformações, ao passo que o primeiro melhor representa as deformações de até 20%. Além disso, os modelos de maior ordem ajustam-se melhor a dados experimentais.</p>
<p><i>Van der Waals</i></p>	$W = \mu \left[-(\lambda_m^2 - 3)(\ln(\eta - 1) + \eta) - 2/3 a \left(\frac{I_x - 3}{2} \right)^{3/2} \right]$ <p>onde: $\eta = \sqrt{\frac{(I_x - 3)}{(\lambda_m^2 - 3)}} \quad ; \quad I_x = (1 - \beta)I_1 + \beta I_2$</p> <p>e μ, λ_m, a e β são constantes do material.</p>	<p>Utiliza uma base logarítmica para seu desenvolvimento. Apresenta bons resultados apenas para a modelagem do silicone. Deve-se ainda ajustar o ensaio de tração para conseguir um resultado dentro do esperado.</p>
<p><i>Ogden</i></p>	$W = \sum_{i=1}^N \mu / \alpha_i (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} - 3)$	<p>Utiliza os alongamentos para traçar a curva de energia de deformação. O modelo de três termos produz estruturas muito rígidas para o cisalhamento e tração biaxial. Capaz de se ajustar à tração e à compressão e é também o que melhor representa o comportamento a este último carregamento.</p>
<p><i>Neo-Hookeano</i></p>	$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3)$	<p>Mais simples de todos. Empregabilidade limitada a deformações da ordem de 40%. Não capta o efeito de enrijecimento. Logo, não deve ser usado para deformações maiores do que 100%.</p>
<p><i>Polinomial</i></p>	$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j$	<p>Grande flexibilidade a escolha da ordem do polinômio a ser adotado. Porém, deve-se evitar a utilização de polinômios de ordem maior que três, pois acarretaria em inserção de erros. Adequa-se bem a dados experimentais.</p>
<p><i>Mooney-Rivlin</i></p>	$W = C_{01} (I_1 - 3) + C_{10} (I_2 - 3)$	<p>Pode ser utilizado com dois, três ou cinco parâmetros. A representação com dois parâmetros não apresenta bons resultados à compressão quando comparados a dados experimentais. Extremamente popular nas aplicações de engenharia.</p>

Nessa abordagem, não se faz necessária a inserção dos elementos de membrana utilizados no modelo I. Cada lâmina de reforço é inserida como um elemento finito adequadamente posicionado no interior do elemento sólido. Esse posicionamento é dado pela altura relativa da lâmina com relação à altura do elemento sólido. Esse parâmetro serve ainda como constrição para os elementos de *rebar layer*, não permitindo a alteração desse valor relativo mesmo após a deformação. Existe, ainda, a possibilidade de orientação dos reforços de acordo com sua direção de assentamento e posição relativa dentro dos elementos sólidos de origem.

Assim, essa técnica permite que se tenha um maior controle sobre a geração dos reforços e sobre o seu posicionamento no interior do elemento, fato que não ocorre quando se utiliza elementos de membrana (modelo I).

III.3.3.2 Modelagem do enrijecedor à flexão

O enrijecedor à flexão é modelado utilizando a mesma técnica apresentada para os reforços desse modelo, ou seja, utilização de elementos de *rebar* inseridos em elementos sólidos. Todavia, os elementos utilizados são os *rebar single* (Figura III.1(b)) representados por um pórtico espacial a ser definido dentro de um elemento sólido isoparamétrico.

Esses reforços são definidos como barras individuais no interior dos elementos sólidos, os quais determinam os pontos de integração dos elementos de reforço. Assim, para a modelagem do enrijecedor, é necessário indicar uma série de parâmetros, a citar: a área da seção transversal do enrijecedor; o material que o compõe; o conjunto de elementos dentro dos quais o enrijecedor estará contido; a identificação das faces que contêm o reforço; e o posicionamento relativo do reforço em relação à face do elemento, tanto de entrada e como de saída.

III.3.3.3 Interação entre os componentes

Como no modelo I, no modelo proposto é utilizada a constrição do tipo *Mesh Tie* para a ligação do *flange-nipple* ao corpo do duto. O corpo do mangote é, como no modelo II, descrito com um único elemento geométrico e definido apenas por um tipo de elemento sólido (*C3D8RH*), não sendo necessária a utilização de constrições entre as camadas. Contudo, elementos de *rebars* são inseridos nos elementos sólidos e esses são restringidos automaticamente pelo programa, que os considera fixos a sua posição inicial relativa, sem a necessidade, assim, de especificar qualquer interação entre eles.

III.3.4 Implementação do modelo no programa M Cab

Para geração da malha de elementos finitos do modelo numérico III, foi desenvolvido, por solicitação da empresa TRANSPETRO, uma interface gráfica em linguagem orientada objeto denominada *MCab* (LACEO, 2011). Essa interface é capaz de gerar malhas de elementos finitos para mangotes típicos e sua tela principal é apresentada na Figura III.13.

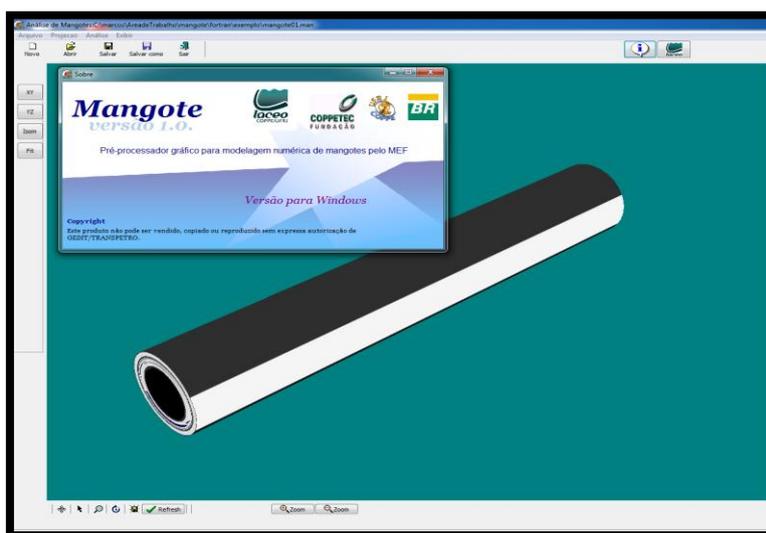


Figura III.13 – Tela principal do programa M Cab.

CAPÍTULO IV - Modelo analítico

IV.1 Introdução

Neste capítulo, são propostos dois modelos analíticos para a análise local de mangotes. Ambos se baseiam no modelo clássico de BATISTA et al. (1989), que é utilizado na análise local tanto de dutos flexíveis de camadas não aderentes quanto aderentes submetidos a cargas axissimétricas. Esse modelo, porém, nada estabelece a respeito da análise de mangotes. Assim, nesta dissertação, foi necessário adaptá-lo.

O primeiro modelo proposto nesta dissertação trata as camadas de reforço polimérico como equivalentes às armaduras de tração, enquanto o segundo modelo considera as mesmas camadas como elastoméricas compósitas. Esses modelos foram implementados em planilhas eletrônicas com o uso do programa *MATCAD v14.0*® (vide anexo B).

No que vem a seguir, inicialmente, descreve-se sucintamente o modelo proposto por BATISTA et al. (1989) e, a seguir, apresentam-se as adaptações feitas a esse modelo para viabilizar a análise de mangotes.

IV.2 Descrição do modelo de BATISTA et al. (1989)

O modelo de BATISTA et al. (1989) é voltado para a análise de cargas axissimétricas e se baseia nas seguintes hipóteses:

- A estrutura trabalha dentro do regime das pequenas deformações;
- Todas as camadas do duto são submetidas às mesmas deformações e rotação axiais;

- Todas as deformações são lineares e as seções permanecem planas quando deformadas;
- Todos os materiais são solicitados dentro do regime elástico e linear;
- Não há perda de contato entre as camadas;
- A superposição de efeitos é válida.

Esse modelo permite a representação de um número arbitrário de camadas poliméricas, N , e um também arbitrário de camadas de reforço metálicas, M . Assim, nesse modelo, há $6N + 6M + 2$ incógnitas, a saber (Figura 4.1):

$$\text{Deformação axial:} \quad 1 \text{ incógnita} \quad \varepsilon_z = \delta L / L \quad (4.1)$$

$$\text{Deformação angular:} \quad 1 \text{ incógnita} \quad \gamma_{xz} = \delta \phi / L \quad (4.2)$$

$$\text{Deformação radial:} \quad N + M \text{ incógnitas} \quad \varepsilon_{y_i} = \delta a_i / a_i \quad (4.3)$$

$$\text{Raio externo final:} \quad 1 \text{ incógnita} \quad a_{ext. final} \quad (4.4)$$

$$\text{Pressões de contato entre camadas:} \quad N + M - 1 \text{ incógnitas} \quad P c_i \quad (4.5)$$

$$\text{Variação de espessura relativa das camadas:} \quad N + M \text{ incógnitas} \quad \varepsilon_{x_i} = \delta e_i / e_i \quad (4.6)$$

$$\text{Tensões nos reforços:} \quad 2N \text{ incógnitas} \quad \sigma t_i, \sigma n_i \quad (4.7)$$

$$\text{Ângulo de assentamento final dos reforços:} \quad N \text{ incógnitas} \quad \alpha_i \quad (4.8)$$

$$\text{Tensões no elastômero:} \quad 3M \text{ incógnitas} \quad \sigma L_i, \sigma a_i, \sigma \theta_i \quad (4.9)$$

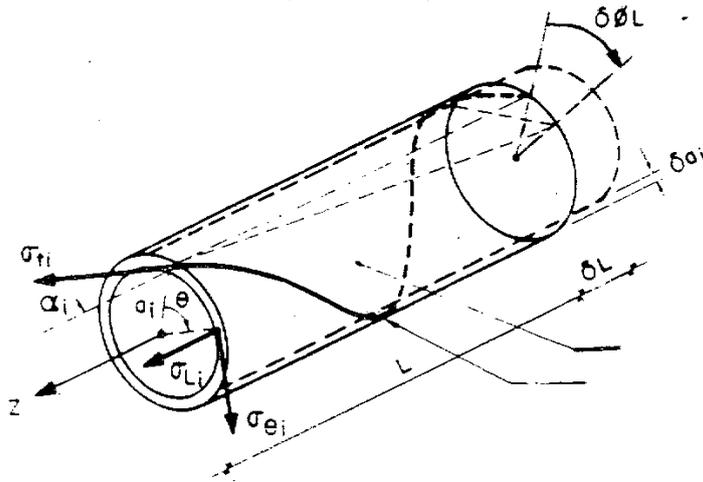


Figura IV.1 - Sistema de referência das tensões e deformações (GEYMAYR, 1990).

Para a determinação de todas as $6N + 6M + 2$ incógnitas, é necessário calcular apenas $N + M + 2$ incógnitas, tidas como principais, a saber: a deformação axial das camadas, Eq. (4.1); a deformação angular, Eq. (4.2); e as deformações radiais em cada camada, Eq. (4.3). Todas as outras $5N + 5M$ incógnitas podem ser determinadas mediante relações que envolvem as incógnitas principais. A determinação das incógnitas principais se faz por meio da resolução de um sistema de equações de igual dimensão apresentado no próprio trabalho de BATISTA et al.(1989) ou, ainda, em GEYMAYR (1990) ou SOUSA (1995).

O modelo de análise proposto por BATISTA et al. (1989) é composto por dois tipos de equações: equações de equilíbrio entre forças axiais, momentos de torção e pressões radiais, somando 3 equações; e equações de compatibilidade de deformações radiais em cada interface do duto ($N + M - 1$ equações).

As equações de equilíbrio têm a forma geral:

$$R_{s,*}(\sigma_{t_j}, \alpha_j) + R_{m,*}(\sigma_L, \sigma_\theta) + R_{b,*}(Pc_j, \tau_j) = F_* \quad (4.10)$$

onde R_s e R_m são as contribuições das armaduras metálicas e das camadas poliméricas na resistência ao carregamento aplicado; R_b é a contribuição das forças no contorno do modelo, que, no caso de dutos de camadas aderentes, corresponde às forças impostas pelas tensões cisalhantes devido ao elastômero confinado entre os arames de uma

armadura metálica; F é a resultante dos esforços aplicados ao duto; j representa o índice referente à camada analisada. O símbolo $*$ substitui os sub-índices: z , utilizado para as equações de forças axiais; ϕ , empregado para as equações de equilíbrio de momentos de torção; e r , utilizado para as equações de equilíbrio de forças radiais. A Tabela 4.1 lista cada uma dessas parcelas.

Tabela IV.1 – Respectivas contribuições das diversas camadas e às diversas solicitações (BATISTA et al., 1989).

$R_{a,*}$	$* = z$	$* = \phi$	$* = r$
$a = s$	$\sum_{j=1}^N n_j \sigma_{t_j} A_j \cos(\alpha_j)$	$\sum_{j=1}^N n_j \sigma_{t_j} A_j a_j \sin(\alpha_j) + n_j J_j G_j \cos^2(\alpha_j) \delta\phi$	$\frac{n_j \sigma_{t_j} A_j \cos(\alpha_j)}{L_j}$
$a = m$	$\sum_{j=1}^M \sigma_{L_j} A_{m_j}$	$\sum_{j=1}^M G_{m_j} J_{m_j} V_{m_j} \delta\phi$	$\frac{1}{2} \sigma_{\theta_j} e_j$
$a = b$	$\sum_{j=1}^N n_j \tau_{L_j} e_j l_j \cos(\alpha_j)$	$\sum_{j=1}^N n_j \tau_{L_j} e_j l_j a_j \sin(\alpha_j)$	$n_j \tau_{L_j} e_j l_j \cos(\alpha_j)$
F_b	$F + \beta\pi(P_{int} a_{int}^2 - P_{ext} a_{ext}^2)$	T	$P_{c_j}(a_j - e_j/2) - P_{c_{j+1}}(a_{j+1} - e_{j+1}/2)$

Na Tabela 4.1, tem-se que: n é o número de arames da camada de reforço; A e A_m são, respectivamente, as áreas transversais da seção do arame e da camada elastomérica; L e l são o comprimento do duto analisado e o comprimento do reforço, respectivamente; G e G_m são o módulo de elasticidade transversal dos arames e do elastômero, respectivamente; J e J_m são o momento de inércia polar da seção de reforço e da camada polimérica, respectivamente; F , T , P_{int} e P_{ext} são a força axial, o momento de torção, a pressão interna e a pressão externa impostas ao duto.

Segundo GEYMAYR (1990), as tensões nas camadas poliméricas podem ser expressas por:

- Tensão axial:
$$\sigma_{L_j} = \frac{E_j}{(1 - \nu_j^2)} [\varepsilon_z + \varepsilon_y \nu_j] \quad (4.11)$$

- Tensão circunferencial:
$$\sigma_{\theta_j} = \frac{E_j}{(1 - \nu_j^2)} [\varepsilon_y + \varepsilon_z \nu_j] \quad (4.12)$$

As tensões nas armaduras helicoidais são representadas por duas parcelas: uma axial e outra referente à tensão cisalhante entre o elastômero e as armaduras. Têm-se, portanto (GEYMAYR, 1990):

- Tensão axial:
$$\sigma_{t_j} = E [\varepsilon_z \cos^2(\alpha_j) + \varepsilon_y \sin^2(\alpha_j) + a. \delta\phi. \sin(\alpha_j) \cos(\alpha_j)] \quad (4.13)$$

- Tensão cisalhante (elastômero):
$$\tau_{L_j} = G_m \left[(\varepsilon_z - \varepsilon_y) \sin(\alpha_j) \cos(\alpha_j) + \frac{1}{2} a. \delta\phi. \cos(2 \alpha_j) \right] \quad (4.14)$$

Substituindo as Eqs. (4.11) a (4.14) nos termos apresentados na Tabela 4.2 e considerando a Eq. (4.10), têm-se as três equações de equilíbrio de esforços.

Finalmente, têm-se as $N + M - 1$ equações de compatibilidade de deformações radiais, dadas por:

$$(\delta a_{i+1} + a_{i+1}) - (\delta a_i + a_i) = (\delta e_i + e_i) \quad (4.15)$$

onde $i = 1$ a $N + M - 1$.

A resolução desse conjunto de equações deve ser dada em função das incógnitas destacadas como principais e, a partir dessas, torna-se possível o cálculo das demais incógnitas.

No que vem a seguir, serão apresentadas as duas abordagens propostas para a representação dos mangotes através do modelo analítico de BATISTA et al. (1989).

IV.3 Adaptações para consideração de mangotes

Como os mangotes são dotados de fibras sintéticas embebidas na matriz elastomérica no lugar das camadas de reforço estrutural metálico, duas abordagens são propostas nesta dissertação tomando por base o modelo de BATISTA et al. (1989).

A primeira abordagem é a definição das fibras como camadas de reforço equivalentes às armaduras metálicas. Para a segunda abordagem, as mesmas camadas de reforços são consideradas camadas poliméricas reforçadas, as quais são definidas apenas pelos módulos de elasticidade equivalentes obtidos por meio de simplificação da *Regra da Mistura de Compósitos* (MCDONNEL, 2006).

Assim, foi possível a implementação de ambos os modelos em planilhas eletrônicas no *software MATHCAD v14.0*®. A seguir, detalham-se essas abordagens.

IV.3.1 *Abordagem analítica I*

Na primeira abordagem, admitiu-se que as camadas de reforço polimérico equivalem-se, em comportamento, à armadura de tração de um duto flexível típico, porém composta por uma quantidade muito grande de arames (número de fibras) e material de baixo módulo de elasticidade. Assim, foi necessário estimar para cada seção transversal de reforço do duto o número de fibras, o qual é admitido metade assentada a ângulo α e metade assentada a $-\alpha$.

O enrijecedor à flexão foi modelado diretamente considerando sua seção transversal circular e seu elevado ângulo de assentamento. Por fim, as demais camadas do mangote podem ser modeladas diretamente pelo modelo proposto por BATISTA et al. (1989).

IV.3.2 *Abordagem analítica II*

Na segunda abordagem, as camadas de reforço são modeladas através da *Regra da Mistura dos Compósitos*, dada pelas Eqs. (3.1) a (3.9). Para essas camadas, calcula-se o módulo de elasticidade na direção da fibra através da Eq. (3.1).

Quanto ao enrijecedor de flexão e as demais camadas, foi adotado o mesmo procedimento descrito na abordagem anterior.

CAPÍTULO V - Estudo de caso

V.1 Introdução

Neste capítulo, o comportamento estrutural de um mangote de 20", submetido a diferentes condições de carregamento, é analisado através dos diferentes modelos teóricos propostos e, ainda, por meio de comparação entre esses modelos e valores encontrados na literatura técnica.

Os resultados serão apresentados em duas seções, que se dividem segundo os tipos de análises realizadas: primeiro, os carregamentos operacionais e, posteriormente, os carregamentos máximos (obtidos na literatura como máximos à ruptura ou à operação). Para esta situação – análise de carregamentos máximos – apenas o modelo numérico III é levado em consideração.

No que vem a seguir, a estrutura analisada, os casos de carregamento e as respostas obtidas são detalhadamente apresentados.

V.2 Descrição do mangote estudado

No estudo de caso proposto, foi escolhido um mangote de linha principal com 10,7m de comprimento e 20" de diâmetro nominal. Os detalhes de suas camadas – como quantidade, espessura, presença ou não de reforços e espaçamento entre os mesmos – foram obtidos por análise gráfica da Figura V.1.

Na Tabela V.1, apresentam-se outros detalhes das camadas tais como: materiais, número de lâminas e ângulo de assentamento dos reforços. A Tabela V.2 lista algumas propriedades físicas dos materiais que compõem o mangote.

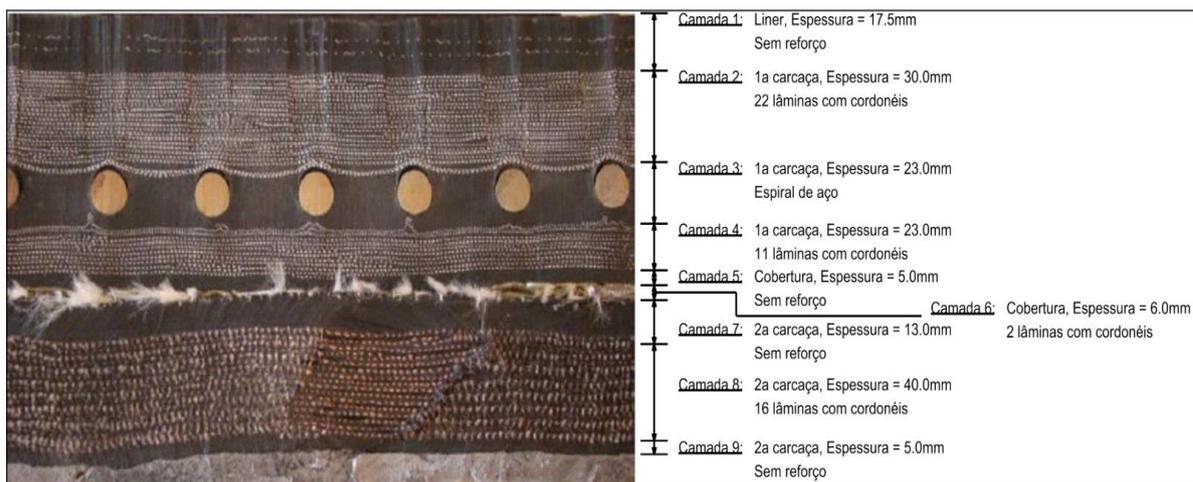


Figura V.1 – Seção transversal do mangote estudado e suas características (LACEO, 2011).

Tabela V.1 – Principais características das diversas camadas do mangote estudado (TRELLEBORG, 2011).

Camada [†]	Nome	Espessura (mm)	Reforço	Número de lâminas	Número de fibras	Área da seção (mm ²)	Ângulo
1	Liner	17,5	-	-	-	-	-
2 [‡]	Cordonel-1	30,0	Nylon 66	22	29402	0,126	+45°/-45°
3	Enrijecedor	23,0	Aço	1	1	56,25	+88,9°
4 [‡]	Cordonel-2	15,0	Nylon 66	11	16827	0,126	+45°/-45°
5	Cobertura	5,0	-	-	-	-	-
6 [‡]	Cordonel-3	6,0	Poliéster	2	14556	0,126	+45°/-45°
7	Elastômero-1	13,0	-	-	-	-	-
8 [‡]	Cordonel-4	40,0	Poliéster	16	15421	0,126	+45°/-45°
9	Elastômero-2	5,0	-	-	-	-	-

[†] Vide definições das camadas na Figura 5.1; [‡] Espaçamento entre codornéis de 1,05mm.

Tabela V.2 – Propriedades físicas dos materiais utilizados no mangote.

Material [†]	Módulo de elasticidade (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento máximo (%)	Coefficiente de Poisson
Aço AISI 304 ⁽¹⁾	193000	520,00	40,00	0,29
Borracha nitrílica (NBR) ⁽²⁾	6,50	12,4	450,00	0,50 [†]
Poliéster 120 SMC ⁽³⁾	3500	89,7	13,00	0,42
Nylon 66 ⁽³⁾	3500	94,5	19,00	0,42

⁽¹⁾ API (2001); ⁽²⁾ FLEXOMARINE (2013); ⁽³⁾ TRELLEBORG (2013).
[†] Para efeito de modelagem, considera-se 0,499.

Deve-se destacar que, apesar de na construção usual de mangotes serem utilizados reforços de materiais diferentes na primeira e na segunda carcaça, no mangote

estudado, ambas as carcaças foram consideradas compostas por materiais com as mesmas constantes elásticas, já que o *nylon* e o poliéster possuem constantes elásticas muito próximas.

Já o módulo de elasticidade do elastômero, apresentado na Tabela V.2, foi obtido de duas maneiras, a saber: através do modelo hiperelástico de *Mooney-Rivlin* ($C_{10} = 1.806$ MPa, $C_{01} = 0.805$ MPa) (ROESE, et al., 2009); e por verificação do grau de dureza, $IRHD = 67$ (GENT, 2006), da borracha escolhida (Tabela II.3). Ambas as maneiras levaram à determinação do mesmo valor de módulo de elasticidade equivalente, como pode ser observado na Figura 5.2. Nessa figura, verificou-se que a curva hiperelástica tensão vs deformação do elastômero é linear até, aproximadamente, 1% de deformação.

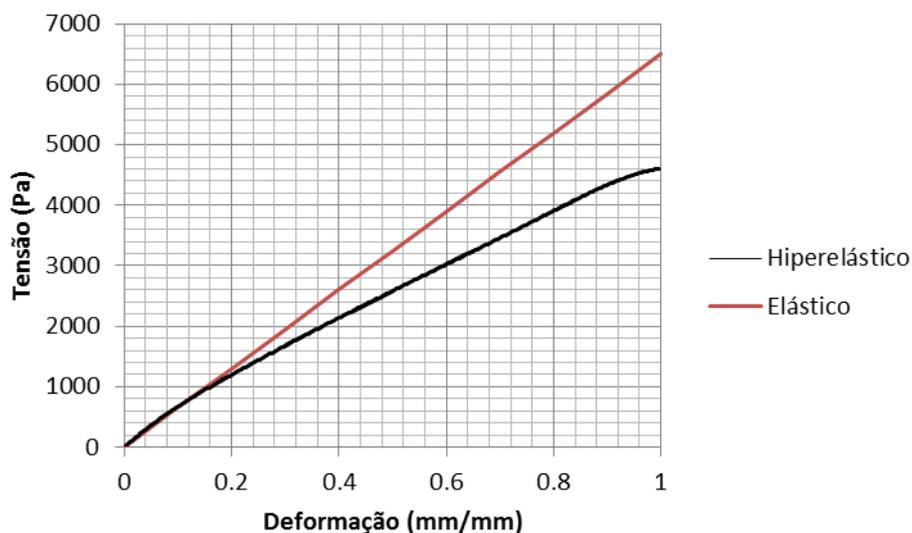


Figura V.2 – Comparação tensão vs. deformação entre o modelo elástico equivalente (EL) e o modelo de *Mooney-Rivlin* (MR).

Por fim, resta apresentar as características geométricas do componente *flange-nipple*, as quais aparecem na Figura V.3. O material adotado para esse componente foi o aço inoxidável AISI304, cujas características podem ser visualizadas na Tabela II.7.

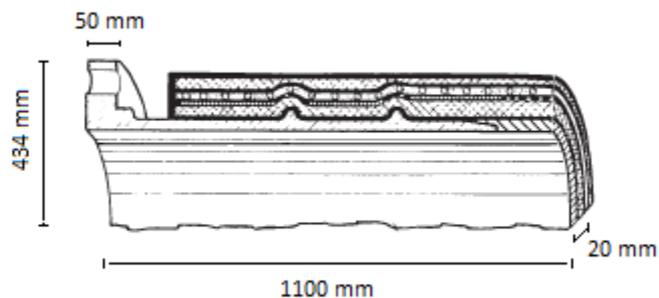


Figura V.3 – Representação da estrutura de conexão e suas dimensões nos diversos modelos.

V.3 Casos de carregamentos estudados

Nesta dissertação, o mangote de 20” foi submetido, inicialmente, aos casos de carregamento operacionais indicados na Tabela V.3. Logo após, foram considerados os casos de carregamento máximos indicados na Tabela V.4. As análises com carregamentos máximos foram realizadas com o objetivo de melhor compreender o comportamento estrutural do mangote, principalmente quando submetidos a maiores deformações, e ponderar o efeito da concentração de tensão que ocorre na região de transição *nipple*-elastômero.

Tabela V.3 – Carregamentos operacionais.

Casos de Carregamentos	Flexão (kNm)	Tração (kN)	Torção (kNm)	Pressão Externa (MPa)	Pressão Interna (MPa)
1 (FLE)	60	-	-	-	-
2 (TRA)	-	40	-	-	-
3 (TOR)	-	-	25	-	-
4 (TRA+PE)	-	40	-	1,0	-
5 (TRA+PI)	-	40	-	-	1,0
6 (TRA+PE+PI)	-	40	-	1,0	1,0

Tabela V.4 – Carregamentos máximos.

Casos de Carregamentos	Tração (kN)	Flexão (kNm)	Torção (kNm)	Pressão Externa (MPa)	Pressão Interna (MPa)
1 (TRA)	1279	-	-	-	-
2 (FLE)	-	122	-	-	-
3 (TOR+/-)	-	-	+/-50	-	-
4 (HID)	-	-	-	-	1,5

V.4 Cálculo das propriedades equivalentes dos modelos

Como indicado anteriormente, os modelos numéricos II e III, além do modelo analítico II, demandam o cálculo de propriedades equivalentes.

Para o cálculo das constantes de engenharia equivalentes do modelo numérico II, todos os materiais (as fibras poliméricas de *nylon* 66, o elastômero de NBR e a espira metálica de aço AISI304) foram considerados com comportamento elástico, linear, além de serem assumidos isotrópicos. Empregando as Eqs. (3.1) a (3.7) e utilizando as propriedades físicas desses materiais, indicadas na Tabela V.2, pôde obter-se as constantes das camadas anisotrópicas equivalentes. Os valores dessas constantes são apresentados na Tabela V.5 para cada camada de reforço.

Tabela V.5 - Constantes de engenharia para os materiais do modelo numérico II.

Camada [†]	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₃ (MPa)	v ₁₂	v ₁₃	v ₂₃	G ₁₂ (MPa)	G ₁₃ (MPa)	G ₂₃ (MPa)
Cordonel-1	97,88	7,021	7,021	0,5	0,5	0,955	2,5	7,5	7,5
Enrijeecedor	140,701	7,279	7,279	0,5	0,5	0,962	2,5	7,5	7,5
Cordonel-2	97,88	7,021	7,021	0,5	0,5	0,955	2,5	7,5	7,5
Codornel-3	47,89	6,734	6,734	0,5	0,5	0,929	2,5	7,5	7,5
Codornel-4	56,16	6,781	6,781	0,5	0,5	0,937	2,5	7,5	7,5

[†] Vide definições das camadas na Figura 5.1.

O elastômero, no modelo numérico III, foi caracterizado por dados experimentais de teste uniaxial de tração e de compressão da borracha nitrílica obtidos na página eletrônica *matweb* (MATWEB, 1996). Esses dados foram ajustados a

diversos modelos hiperelásticos (*Arruda Boyce, Mooney-Rivlin, Neo-Hookeano, Ogden Polinomial, Van Der Waals, Yeoh*), a fim de garantir a melhor representação possível. Foi escolhido, dessa maneira, o modelo de *Arruda-Boyce*, pois esse apresenta maior correlação com os dados do teste uniaxial obtido (Figura V.4). Ademais, a formulação escolhida é capaz de representar o enrijecimento da borracha em grandes deformações, o que não é captado por modelos mais tradicionalmente utilizados, como o de *Mooney-Rivlin*.

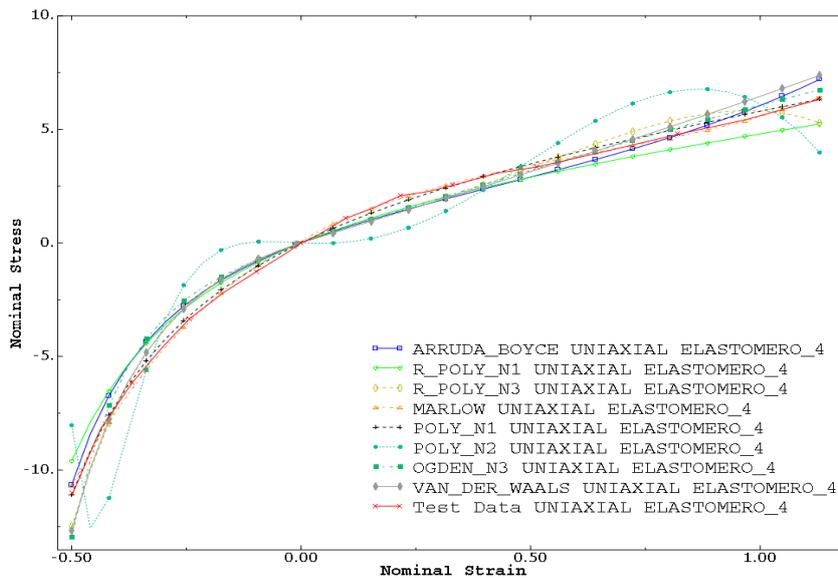


Figura V.4 – Curva tensão vs. deformação do elastômero e os modelos hiperelásticos que melhor representam seu comportamento.

Analogamente ao elastômero, as fibras poliméricas são representadas pelas equações hiperelásticas, porém, nesse caso, é utilizado o modelo de *Marlow*. Esse modelo, dentre os considerados (*Marlow, Polinomial e Ogden*), foi o que melhor se ajustou ao comportamento experimental, com se pode observar nas Figura V.5 e 5.6 (MATWEB, 1996). É importante notar que as fibras da primeira e segunda carcaça apresentam comportamento diferente à tração para esse modelo, conforme pode ser observado através da Figura V.5 e da Figura V.6.

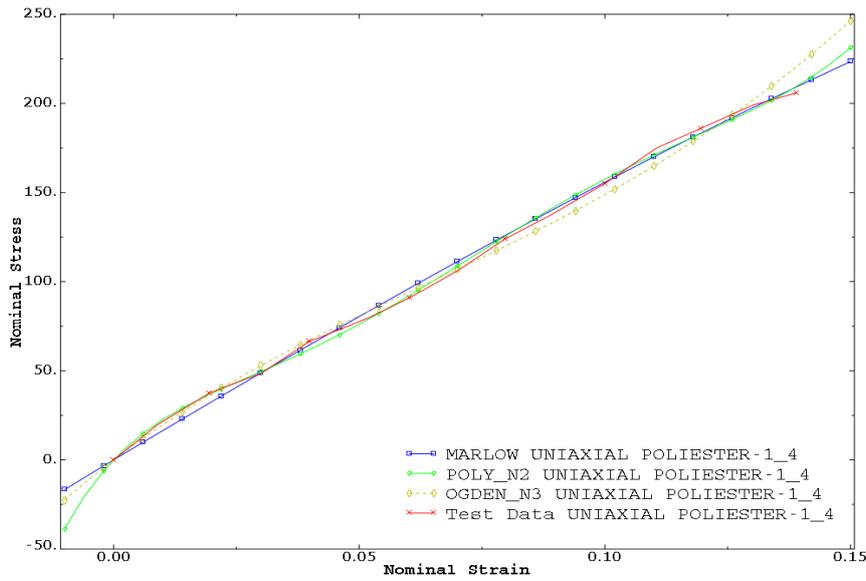


Figura V.5 – Curva tensão (MPa) vs. deformação (mm/mm) das fibras da primeira carcaça (ROESE, et al., 2010).

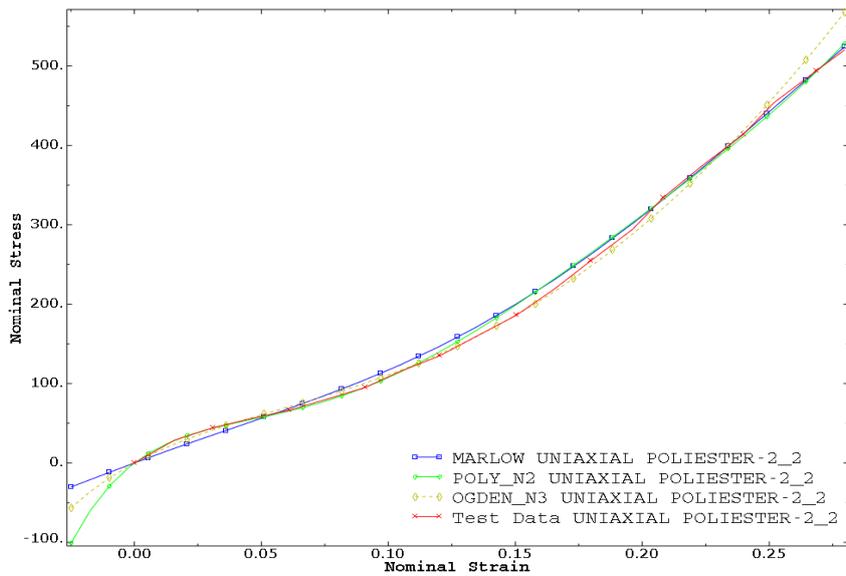


Figura V.6 – Curva tensão (MPa) vs. deformação (mm/mm) das fibras da segunda carcaça (ROESE, et al., 2010).

No modelo analítico II, módulos de elasticidade equivalentes ao módulo principal das seções de compósito são atribuídos às camadas de reforço do duto. Empregando as Eqs. (3.1) a (3.7), a Tabela V.6 ilustra as razões volumétricas das fibras (V_f) e do elastômero (V_m) e os módulos de elasticidades das fibras (E_f), dos elastômeros (E_m), das seções de compósitos equivalentes (E_{comp}) e o coeficiente de *Poisson* (ν) adotados pelo modelo.

Tabela V.6 - Características físicas dos materiais e da seção de compósito.

Camada [†]	V_f	V_m	E_f (MPa)	E_m (MPa)	E_{comp} (MPa)	ν
Cordonel-1	0,026	0,974	3500	6,5	97,88	0,5
Enrijecedor	0,044	0,956	$2 \cdot 10^5$	6,5	140,701	0,5
Cordonel-2	0,026	0,974	3500	6,5	97,88	0,5
Cordonel-3	0,012	0,988	3500	6,5	47,89	0,5
Cordonel-4	0,014	0,986	3500	6,5	56,16	0,5

[†] Vide definições das camadas na Figura 5.1.

V.5 Características dos modelos numéricos

Nesta seção, são apresentadas as malhas de elementos finitos adotadas em cada um dos modelos numéricos. Para essa escolha, foi levada em consideração a tricotomia entre tempo computacional, qualidade da resposta e quantidade de memória (SOUSA, 1999), a qual proporciona a criação de modelos mais robustos, eficientes e menos onerosos computacionalmente.

V.5.1 Geração das malhas de elementos finitos

V.5.1.1 Malha do modelo numérico I

A malha de elementos finitos do modelo I tira partido da concentricidade das camadas, permitindo que camadas adjacentes compartilhem os mesmos nós (casamento de malha). Desse modo, a malha foi gerada com N divisões circunferenciais, M longitudinais e K ao longo da espessura.

Em busca da eficiência no uso da técnica de construção adotada, fez-se o número de divisões ao longo da espessura, K , igual ao número de camadas de reforço mais uma. Isto garante que os elementos de membrana, responsáveis pelo reforço polimérico, e os elementos de viga tridimensional, responsáveis pelo enrijecedor à flexão, sejam assentados sobre os nós do elastômero em sua devida posição. Assim, diminui-se o

gasto computacional, ao facilitar a detecção e os ajustes das restrições executadas pelo programa *ABAQUS 6.10®*.

Nesta dissertação, foi interessante adotar a malha com $N=40$, $M=125$ e $K=6$. Com esta medida, cada seção de elemento longitudinal irá representar um passo completo do enrijecedor, o que facilita ainda mais a identificação da restrição tipo *Embedded* aplicada entre os elementos sólidos e de viga, pois apenas um elemento de pórtico é inserido em cada elemento sólido. Desse modo, a malha adotada apresenta um total de 56280 elementos, 61763 nós e 125770 graus de liberdade e pode ser visualizada na Figura V.7.

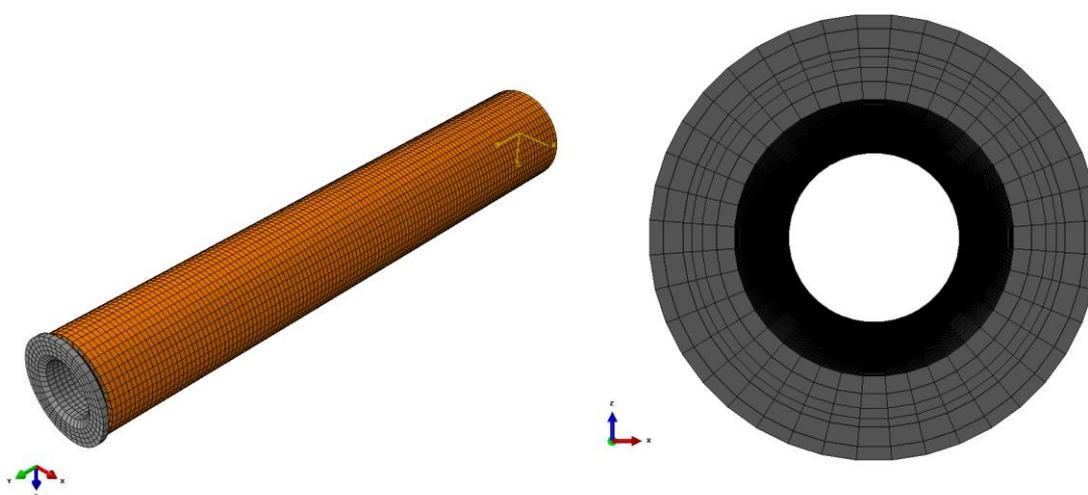


Figura V.7 – Vista isométrica e da seção transversal da malha do modelo numérico I.

V.5.1.2 Malha do modelo numérico II

Na geração da malha de elementos finitos do modelo II, foram utilizadas as mesmas premissas com relação à concentricidade das camadas do modelo I. Todavia, o número de divisões radiais é escolhido de maneira diferente. Para essas divisões radiais, foi considerado o número total de camadas e não apenas o número de camadas de reforços, como no modelo I. Dessa maneira, proporciona-se melhor adequação das seções de compósitos às camadas de elementos finitos.

Sendo assim, os números de divisões escolhidas do duto são dados por: $N=40$ (divisões circunferenciais); $M=125$ (divisões ao longo do eixo do mangote); e $K=9$ (divisões radiais). Esse número de divisões forneceu um modelo com 46280 elementos,

51722 nós e 155172 graus de liberdade. A malha gerada pode ser visualizada na Figura V.8.

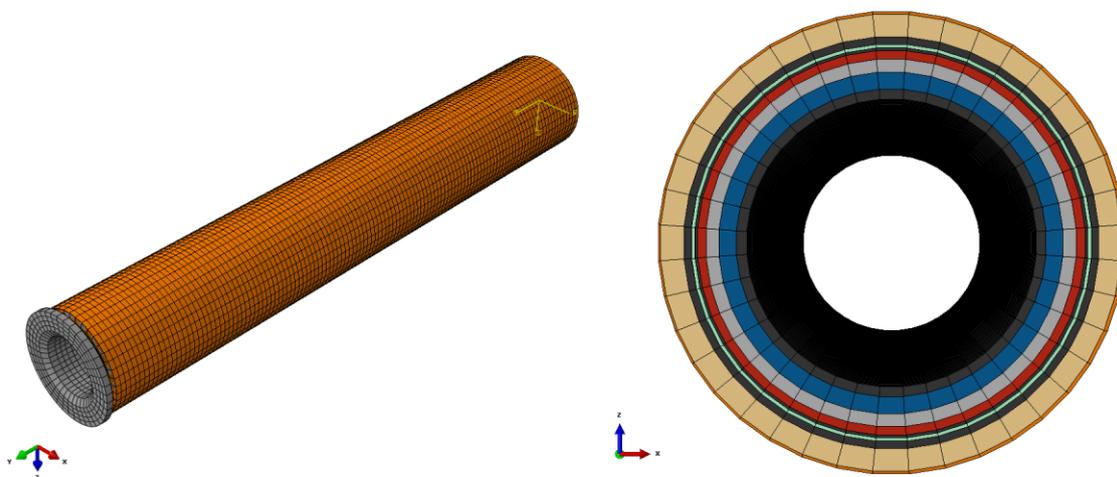


Figura V.8 - Vista isométrica e da seção transversal da malha do modelo numérico I.

V.5.1.3 Malha do modelo numérico III

Na geração da malha de elementos finitos do modelo III, o duto foi dividido em sua espessura radial de modo que cada camada fosse modelada por uma camada de elementos finitos com espessura igual à da camada considerada.

Tirando partido, mais uma vez, da concentricidade das camadas, a malha foi gerada a partir de N divisões circunferenciais, M divisões longitudinais e K divisões ao longo da espessura. A fim de tornar as análises eficientes e precisas, foi garantido que o número de divisões ao longo da espessura, K , fosse o mesmo que o número de camadas, tal como no modelo II. Isto garante que os elementos de reforço, *single* e *layer*, possam ser assentados corretamente dentro dos elementos finitos sólidos, conforme acontece no duto real.

A malha foi escolhida com números de divisões iguais a $N=40$, $M=125$ e $K=9$. O número de elementos foi de 71280, de nós foi de 51722 e o de graus de liberdade foi de 173886. A malha gerada pode ser visualizada na Figura V.9.

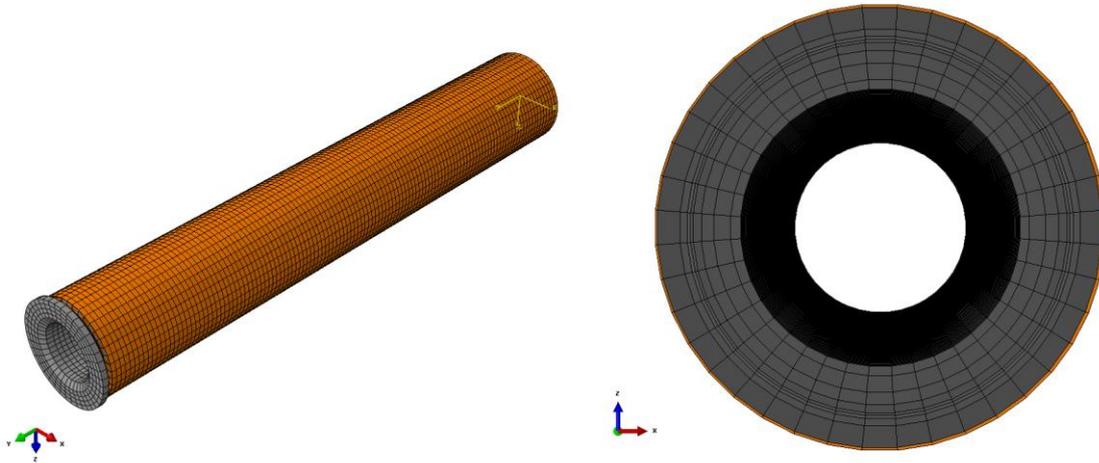


Figura V.9 - Vista isométrica e da seção transversal da malha do modelo numérico III.

V.5.2 Condições de contorno e de simetria

As condições de contorno foram impostas a ambas as extremidades dos modelos de modo a garantir a simetria em relação à seção intermediária do duto em todos os modelos e de maneira a permitir a aplicação dos carregamentos sem que qualquer hipostaticidade fosse admitida. A seguir, podem-se visualizar essas condições para cada caso de carregamento na Tabela V.7 e na Tabela V.8.

Tabela V.7 – Condições de contorno* aplicadas no começo e no meio do mangote para a análise com carregamentos operacionais.

Casos de Carregamentos	Ponto do começo do mangote						Ponto do meio do mangote					
	UX	UY	UZ	URX	URY	URZ	UX	UY	UZ	URX	URY	URZ
1 (FLE)	0	-	0	0	0	-	-	0	-	0	-	0
2 (TRA)	0	-	0	0	0	0	-	0	-	0	-	0
3 (TOR)	0	-	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0
4 (TRA+PE)	0	-	0	0	0	0	-	0	-	0	-	0
5 (TRA+PI)	0	-	0	0	0	0	-	0	-	0	-	0
6 (TRA+PE+PI)	0	-	0	0	0	0	-	0	-	0	-	0

* Os zeros representam a restrição do referido grau de liberdade; UX, UY e UZ correspondem às restrições nas direções X, Y e Z globais, enquanto RX, RY e RZ correspondem às restrições das rotações em torno desses eixos.

Tabela V.8 – Condições de contorno* aplicadas no começo e no meio do mangote para análise com carregamentos máximos.

Casos de Carregamentos	Ponto do começo do mangote						Ponto do meio do mangote					
	UX	UY	UZ	URX	URY	URZ	UX	UY	UZ	URX	URY	URZ
1 (TRA)	0	-	0	0	0	0	-	0	-	0	-	0
2 (TOR+/-)	0	-	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0
3 (HID)	0	-	0	0	0	0	-	0	-	0	-	0
4 (FLE)	0	-	0	0	0	-	-	0	-	0	-	0

* Os zeros representam a restrição do referido grau de liberdade; UX, UY e UZ correspondem às restrições nas direções X, Y e Z globais, enquanto RX, RY e RZ correspondem às restrições das rotações em torno desses eixos.

Por um lado, as condições de contorno e as cargas, na extremidade do *flange-nipple*, são aplicadas em um ponto de referência criado no eixo central do duto, que é acoplado rigidamente aos nós da seção transversal considerada, como indicado na Figura V.10(a); por meio da restrição *Multi-Points Constraint*, ou MPC. Por outro, as condições de contorno na seção intermediária do mangote são aplicadas diretamente aos nós dessa seção, como indicado na Figura V.10(b).

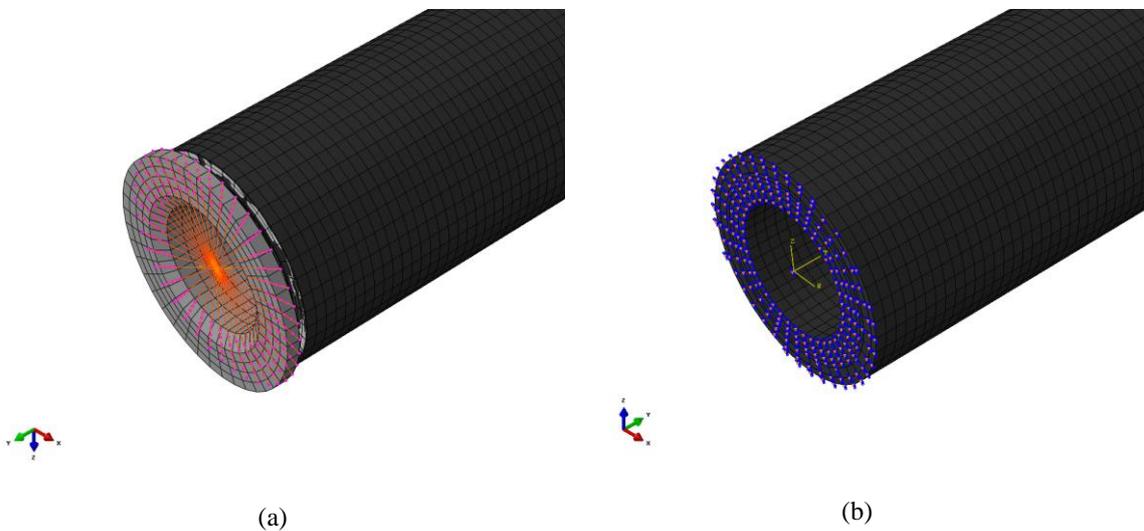


Figura V.10 – (a) Representação do contato tipo MPC utilizado para a transmissão das condições de contorno e aplicação dos carregamentos (b) Condições de contorno aplicadas ao meio do duto .

V.6 Metodologia de aquisição de dados de resposta

Para a realização de aquisição de dados de resposta nos carregamentos axissimétricos, foram escolhidas três seções transversais ao longo do duto para a coleta de dados e o pós-processamento dos mesmos. Essas seções foram escolhidas a 2,0, 2,5 e 3,0 metros da extremidade inicial do duto, conforme mostra a Figura V.11. As seções foram escolhidas desse modo, pois permitem a dispersão dos efeitos das condições de contorno impostas e da alta rigidez da estrutura de conexão (*flange-nipple*). Os resultados apresentados foram obtidos através da média dos valores das três seções.

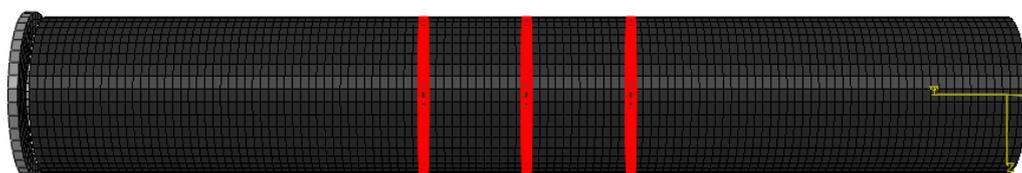


Figura V.11 – Seções de aquisição de dados para as análise axissimétricas.

Já para o carregamento de flexão, foi realizado procedimento diferente, pois a resposta do mangote a esse carregamento não se manifesta constante ao longo de seu comprimento. Dessa forma, os valores do meio do mangote, ou seja, a 5 metros do começo, são analisados, pois esses foram os maiores valores. Essa seção de referência pode ser vista na Figura V.12.

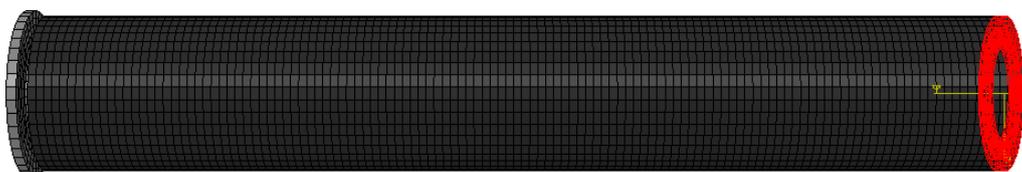


Figura V.12 - Seções de aquisição de dados para as análise de flexão.

Ademais, as tensões ou deformações obtidas, a menos se especificadas de forma contrária, são apresentadas de forma adimensional nas tabelas de resultados. Para tanto, é efetuada a divisão do respectivo resultado por seu valor admissível, apresentados na

Tabela V.2. Esses parâmetros adimensionais são denominados *tensões* (ou *deformações*) *adimensionais*.

V.6.1 Flexão (1 - FLE)

Inicialmente, a Figura V.13 apresenta os deslocamentos totais calculados através do modelo numérico III para o momento fletor de 60kNm, enquanto a Figura V.14 apresenta a distribuição das máximas deformações principais. Deformadas semelhantes foram obtidas, também, com os modelos numéricos I e II. É importante destacar que os modelos analíticos não são considerados nessa análise, pois tratam apenas da resposta a cargas axissimétricas.

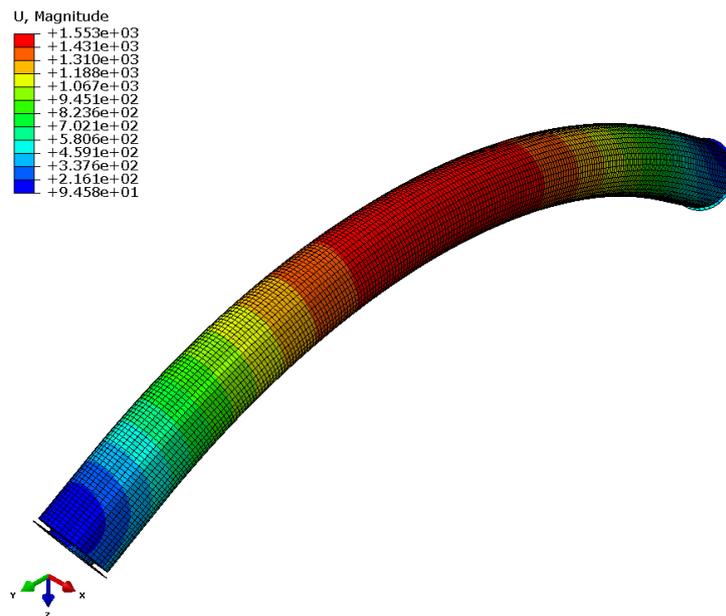


Figura V.13 – Deslocamento do modelo de mangote submetido à flexão pura.

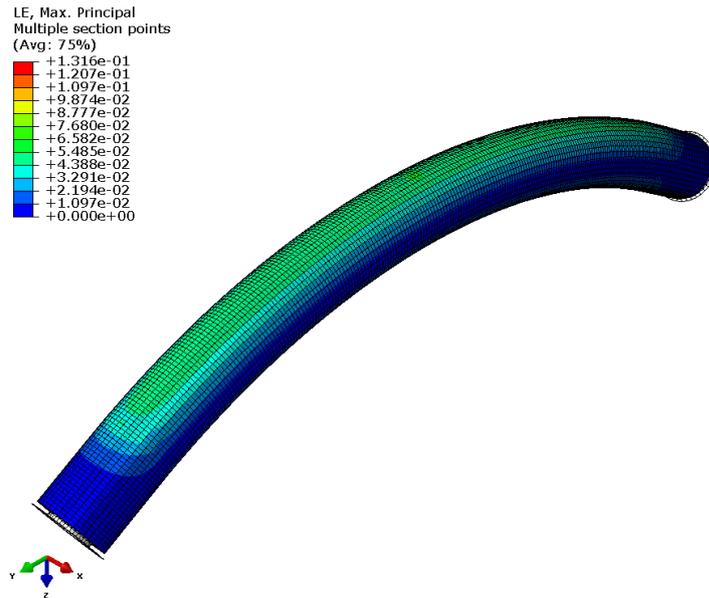


Figura V.14 – Máxima deformação principal.

A Figura V.15 ilustra a variação da rigidez à flexão ao longo do mangote calculada através dos diferentes modelos numéricos propostos nessa dissertação. Essas rigidezes foram calculadas com a metodologia proposta no guia OCIMF (1991). Nota-se, nessa figura, que valores de rigidez bastante elevados são observados nas extremidades dos mangotes e, além disso, esses valores diminuem rapidamente até atingir o valor mínimo em sua seção intermediária. Essa grande variação é atribuída ao componente de conexão, que, por ser de aço, adiciona uma rigidez muito grande às extremidades do duto e influem na rigidez ao longo do corpo tubular.

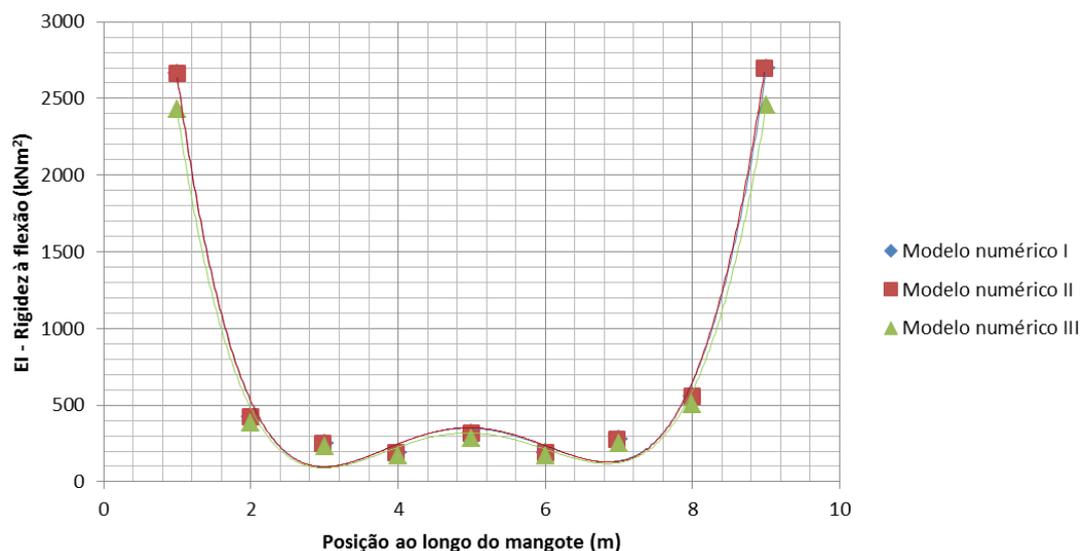


Figura V.15 – Variação da rigidez à flexão com o comprimento do mangote,

É relevante mencionar que o guia da OCIMF (1991) sugere, como rigidez à flexão do mangote, o valor calculado na seção intermediária do duto, o que torna possível eliminar o efeito do enrijecimento local devido à presença do *nipple*. Para efeito de comparação, a Tabela V.9 apresenta os raios de curvatura calculados na seção central do mangote, a rigidez à flexão estimada pelo fabricante (FLEXOMARINE, 2013) e a rigidez calculada pelos modelos numéricos considerando o método proposto pela OCIMF (1991). É possível verificar, ainda, os desvios que cada modelo apresenta em relação ao valor do fabricante.

Tabela V.9 – Comparação dos diversos modelos numéricos com flange-nipple quanto ao comportamento à flexão.

Modelo	Raio de curvatura (m)	EI (kNm ²) [†]	Desvio (%)
Fabricante*	-	270,00	-
Numérico I	5,23	313,61	13,91
Numérico II	4,86	291,85	6,97
Numérico III	4,57	286,10	5,13

*(FLEXOMARINE,2013); [†] (OCIMF,1991)

Em primeiro lugar, ao observar a Tabela V.9, nota-se que todos os modelos apresentaram resultados satisfatórios e o modelo numérico I apresentou o maior desvio em relação ao valor indicado pelo fabricante. Essa diferença pode estar associada a três aspectos:

- Como a camada elastomérica é responsável, em grande parte, pela resposta do duto à flexão, a correta modelagem de sua rigidez é fundamental. No modelo numérico I, o elastômero é modelado como um material com relação tensão vs deformação elástica, linear e o material também é assumido isotrópico. Essa hipótese, como discutido na Seção V.2, é válida apenas até a deformação de 1% e esse valor limite é excedido, como se pode verificar na Figura V.2.
- Além disso, como o modelo numérico I assume que o material tem resposta linear, a diferença entre a resposta à tração e à compressão também não é simulada.
- O modelo numérico I simula um número maior de lâminas do que a existente no duto real induzindo, portanto, uma maior rigidez à flexão.

A Figura V.16 apresenta a distribuição das deformações nas camadas puramente elastoméricas, as forças nos elementos de reforço da primeira carcaça (Cordonel-1 e Cordonel-2) e da segunda carcaça (Cordonel-3 e Cordonel-4), além da tensão axial no enrijecedor à flexão. Esses resultados foram obtidos com o modelo numérico III.

Percebe-se, nessas figuras, que a resposta do modelo nas camadas de reforço não é uniforme e há concentração de tensões na região de transição entre o *flange-nipple* e o corpo tubular.

Da Tabela V.10 à Tabela V.13, é indicada a resposta das diversas camadas previstas pelos diferentes modelos de análise. A Tabela V.10 apresenta a relação entre a força nos cordonéis e a força admissível dos mesmos, além das mesmas relações para as tensões axiais no enrijecedor à flexão. Além dessas, são indicadas as tensões axiais no enrijecedor à flexão. A Tabela V.11, a Tabela V.12 e a Tabela V.13 indicam as relações entre tensões axiais, circunferências e de Von Mises com a tensão máxima admissível de cada material. Os valores das tensões são obtidos conforme abordado no item V.6 desta dissertação.

Inicialmente, essas tabelas indicam que os valores obtidos estão abaixo dos seus respectivos limites. Além disso, pode-se ainda observar significativa dispersão entre as respostas previstas pelos modelos numéricos. Os modelos numéricos I e II apresentam razoável concordância nas deformações e tensões previstas para as camadas elastoméricas, mas ambos diferem significativamente da resposta prevista pelo modelo numérico III. Os resultados previstos por esses dois modelos são maiores do que as estimadas pelo modelo III. Essas diferenças podem ser atribuídas as hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos I e II com relação ao comportamento dos materiais.

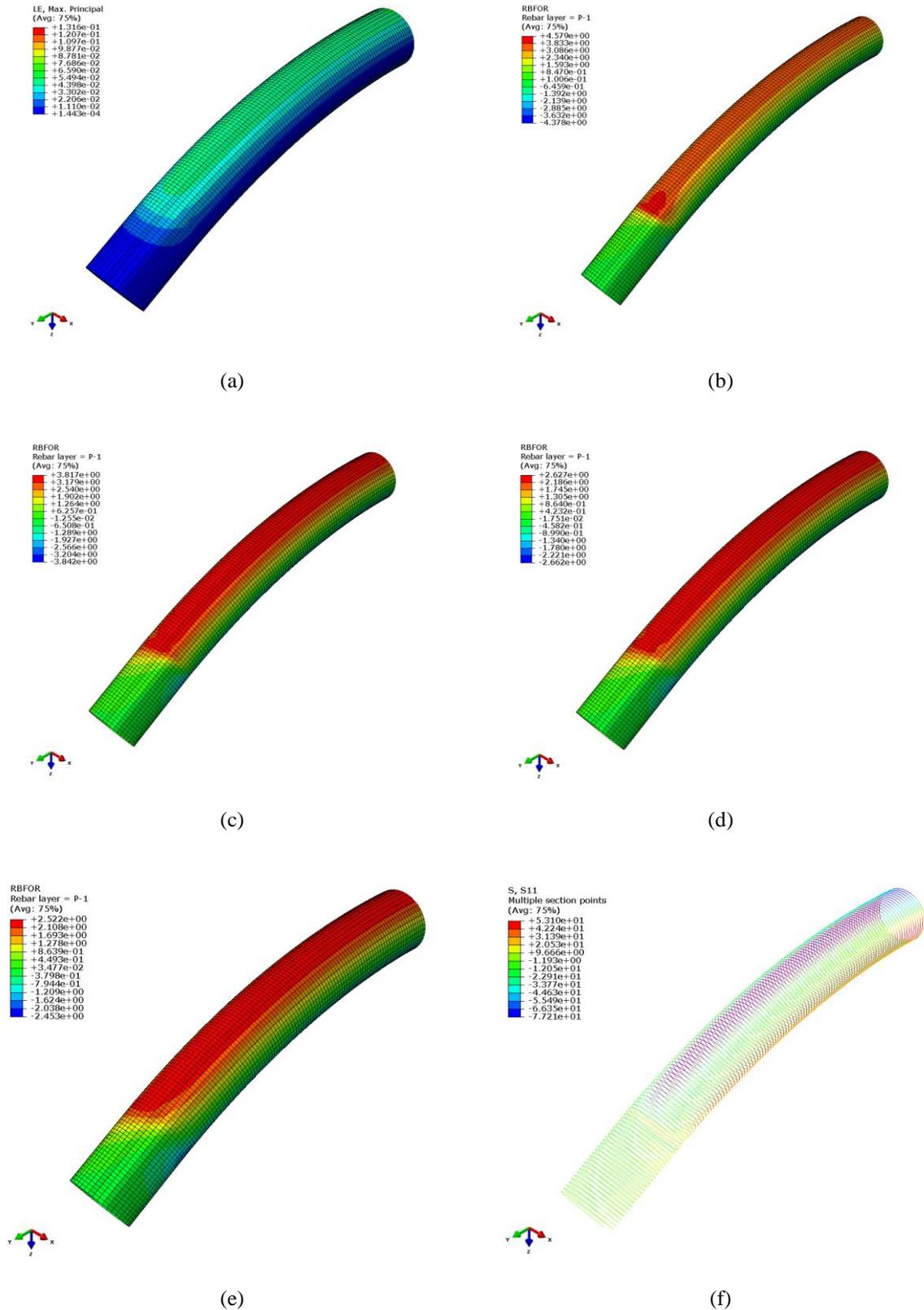


Figura V.16 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).

Tabela V.10 – Comparação das tensões adimensionais (máxima e mínima) nas camadas de reforços para os diversos modelos: análise de flexão, carregamento operacional.

Camada	Numérico I		Numérico II		Numérico III		Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Cordonel-1	48,20%	-45,70%	55,90%	-56,10%	24,70%	-24,37%	-19,37%	47,71%	56,19%
Cordonel-2	47,90%	-46,60%	53,70%	-53,60%	23,81%	-23,21%	-13,57%	50,24%	56,85%
Cordonel-3	49,20%	-47,80%	46,80%	-47,00%	20,60%	-19,80%	3,28%	58,35%	56,93%
Cordonel-4	48,40%	-47,10%	46,70%	-45,90%	19,80%	-19,50%	3,03%	58,84%	57,56%
Enrijecedor	5,30%	-8,90%	6,30%	-10,70%	7,40%	-12,70%	-19,55%	-41,16%	-18,08%

Tabela V.11 – Comparação das tensões adimensionais axiais (máxima e mínima) nas camadas elastoméricas para os diversos modelos: análise de flexão, carregamento operacional.

Camada	Numérico I		Numérico II		Numérico III		Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	0,41%	-0,41%	0,40%	-0,40%	0,20%	-0,22%	2,44%	48,78%	47,50%
Cobertura	0,43%	-0,44%	0,45%	-0,40%	0,17%	-0,20%	2,22%	57,51%	56,11%
Elastômero-1	0,45%	-0,45%	0,42%	-0,40%	0,18%	-0,20%	8,89%	57,78%	53,57%
Elastômero-2	0,45%	-0,45%	0,40%	-0,42%	0,19%	-0,18%	8,89%	58,89%	54,82%

Tabela V.12 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais (máxima e mínima) para as camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise de flexão, carregamento operacional.

Camada	Numérico I		Numérico II		Numérico III		Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	2,43%	-2,27%	2,28%	-2,14%	1,32%	-1,33%	5,95%	43,54%	39,98%
Cobertura	2,00%	-2,00%	1,95%	-1,78%	1,21%	-1,31%	6,75%	37,00%	32,18%
Elastômero-1	1,76%	-1,79%	1,74%	-1,70%	1,01%	-1,12%	3,08%	40,02%	38,04%
Elastômero-2	1,39%	-1,49%	1,58%	-1,34%	0,69%	-0,83%	-1,80%	47,33%	47,19%

Tabela V.13 - Comparação das tensões adimensionais de Von Mises (máxima e mínima) nas camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise de flexão, carregamento operacional.

Camada	Numérico I		Numérico II		Numérico III		Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	0,11%	4,04%	0,11%	4,27%	0,07%	2,71%	-2,85%	34,64%	36,45%
Cobertura	0,15%	4,20%	0,14%	4,51%	0,09%	3,02%	-0,36%	34,05%	34,38%
Elastômero-1	0,21%	4,27%	0,19%	4,32%	0,11%	3,04%	4,18%	38,21%	35,87%
Elastômero-2	0,23%	4,60%	0,20%	4,40%	0,11%	3,21%	8,70%	41,20%	36,02%

Nota-se, no entanto, uma equivalência qualitativa nas respostas das camadas de reforço nos modelos II e III, uma vez que, para ambos, as solicitações na primeira carcaça (Cordonéis-1 e Cordonéis-2) são maiores que as da segunda (Cordonéis-3 e Cordonéis-4). Ademais, pode-se notar que essas variações ocorrem na mesma proporção para os dois modelos. Esse fato deve-se à modelagem, pois somente nestes dois últimos modelos é levada em consideração a distribuição radial dos estratos de reforços, ou seja, a quantidade correta de lâminas de tecido polimérico utilizada por camada. O primeiro modelo, por sua vez, usa como distribuição radial o mesmo espaçamento definido como tangencial (1,05 mm).

Ainda sobre as camadas de reforços, percebe-se que os resultados obtidos para o enrijecedor à flexão são bastante concordantes e, ainda mais, o comportamento é bem próximo do esperado em todos os modelos.

Por fim, as solicitações no elastômero apresentam boa correlação apenas entre os dois primeiros modelos e apresentam significativos desvios quanto ao terceiro, o que confirma que o material elastomérico só pode ser bem representado por um sólido elástico linear isotrópico para pequenas deformações (até 1%).

V.6.2 Tração (2 - TRA)

Inicialmente, a Figura V.17 apresenta a distribuição dos deslocamentos axiais ao longo do mangote solicitado por uma tração de 40kN. Esses deslocamentos foram obtidos através do modelo numérico III. As distribuições obtidas com os demais modelos numéricos têm aspecto bastante similar.

Na Figura V.17, nota-se que o trecho do mangote ligado ao *flange-nipple* se comporta como um corpo rígido e, fora dessa região, os deslocamentos axiais diminuem proporcionalmente.

Além disso, para o nível de carregamento adotado, foi observada uma linearidade da resposta com o incremento do carregamento. Os valores de rigidez axial calculados através dos modelos numéricos e analíticos são apresentados na Tabela V.14 junto com o valor indicado pelo fabricante.

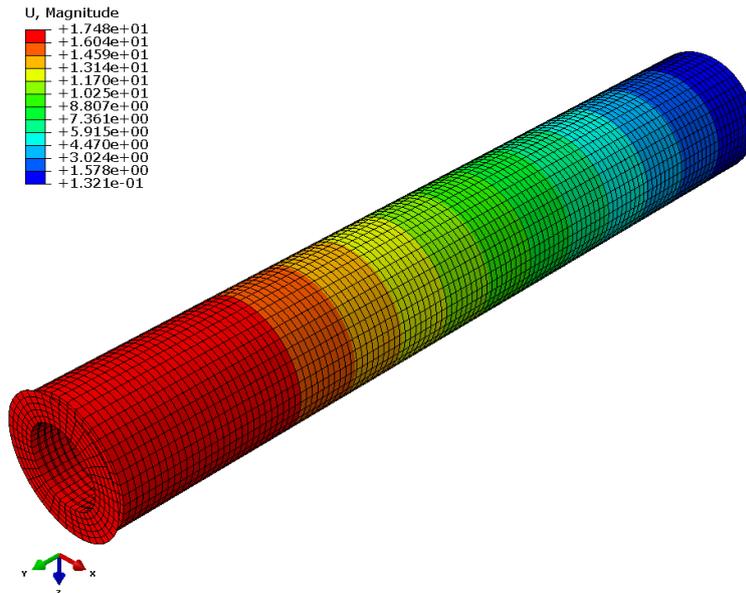


Figura V.17 – Deslocamento axial do mangote, em mm, quando submetido ao carregamento de tração.

Tabela V.14 – Comparação dos diversos modelos numéricos com flange-nipple quanto ao comportamento à tração.

Modelos com flange-nipple	Deformação (%)	Rigidez Axial - EA (MN)	Desvio (%)
Fabricante*	-	12,00	0,00
Numérico I	0,30	13,52	-12,67
Numérico II	0,30	13,51	-12,58
Numérico III	0,34	11,83	1,42
Analítico I	0,35	11,54	3,83
Analítico II	0,34	11,75	2,08

* (FLEXOMARINE, 2013)

A Tabela V.14 aponta boa correlação entre os valores teóricos e o valor de rigidez indicado pelo fabricante. Os modelos numéricos apresentaram diferenças entre +12,7% e -1,5% sendo que o melhor resultado foi indicado pelo modelo numérico III. Os modelos analíticos indicaram valores praticamente idênticos e entre 2,1% e 3,8% inferiores ao valor do fabricante.

A Figura V.18 apresenta a distribuição das deformações nas camadas puramente elastoméricas, as forças nos elementos de reforço da primeira carcaça (Cordonel-1 e Cordonel-2) e da segunda carcaça (Cordonel-3 e Cordonel-4), além da tensão axial no enrijecedor à flexão. Esses resultados foram obtidos com o modelo numérico III.

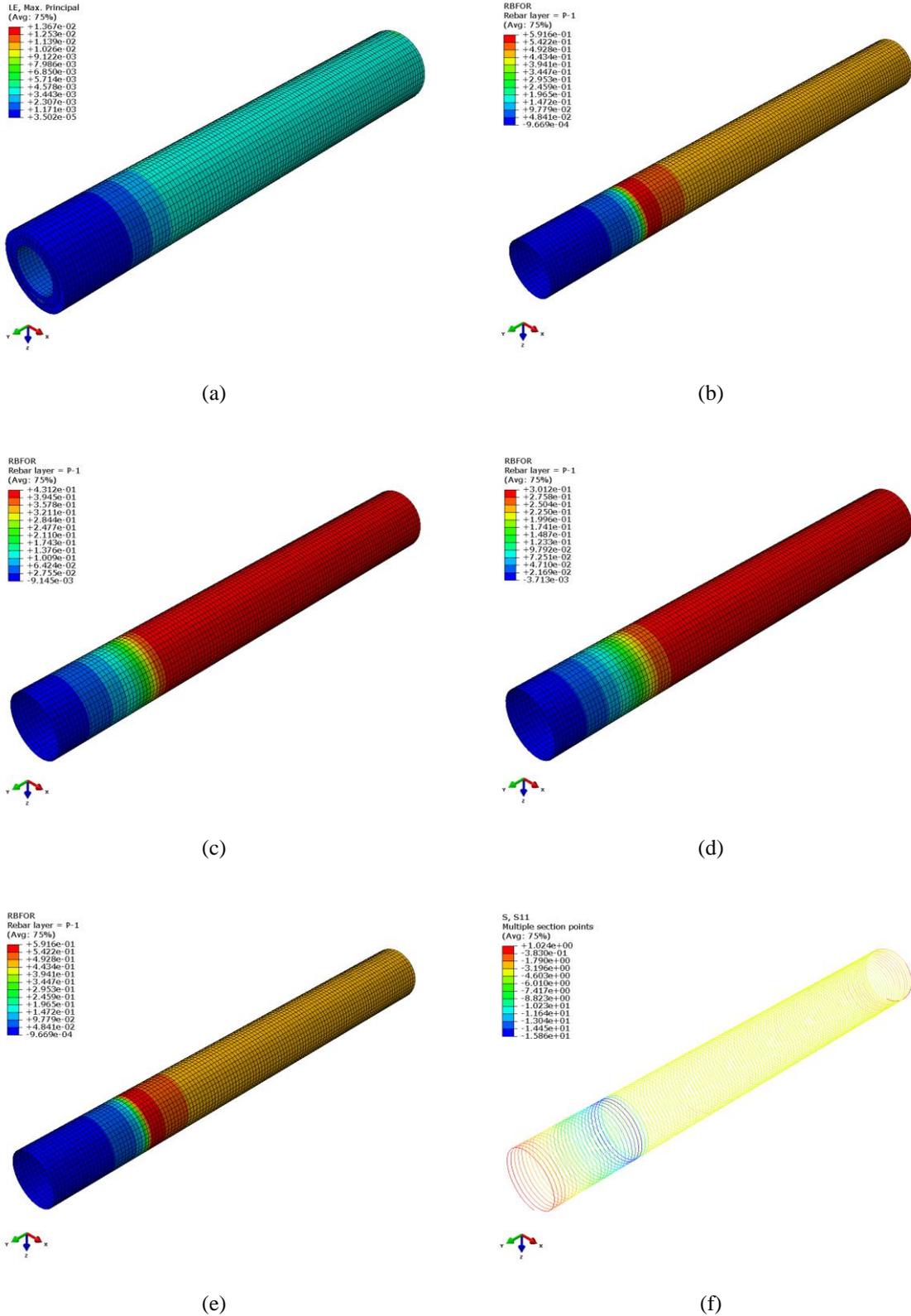


Figura V.18 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).

A Figura V.18 indica que a resposta de todas as camadas, fora da região de conexão, é constante. Além disso, há uma mudança no campo de tensões e deformações na região de transição entre o corpo tubular e o *flange-nipple*.

Da Tabela V.15 a Tabela V.18 é indicada a resposta das diversas camadas previstas pelos diferentes modelos numéricos de análise. A Tabela V.15 apresenta a relação entre a força nos cordonéis e a força admissível dos mesmos, além das mesmas relações para as tensões axiais no enrijecedor à flexão. A Tabela V.16, a Tabela V.17 e a Tabela V.18 indicam as relações entre tensões axiais, circunferências e de Von Mises com a tensão máxima admissível de cada material. Os valores das tensões são obtidos conforme abordado no item V.6 desta dissertação.

Da Tabela V.19 à Tabela V.24 as mesmas respostas são indicadas, porém considerando os modelos analíticos. Comparam-se as respostas obtidas por esses modelos com as previstas por seus respectivos modelos numéricos análogos.

Primeiramente, nota-se que essas tabelas indicam que os valores obtidos estão abaixo dos seus respectivos limites.

Da Tabela V.15 à Tabela V.18, observar-se expressiva dispersão entre as respostas previstas pelos modelos numéricos. Os modelos numéricos I e II apresentam razoável concordância nas tensões e deformações previstas para as camadas elastoméricas, mas ambos diferem significativamente da resposta prevista pelo modelo numérico III. Essas diferenças devem ser atribuídas tanto às hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos I e II com relação ao comportamento dos materiais quanto à diferença de rigidez obtida pelos modelos.

Nota-se, no entanto, uma equivalência qualitativa nas respostas das camadas de reforço nos modelos II e III, uma vez que, para ambos, as solicitações na primeira carcaça (Cordonéis-1 e Cordonéis-2) são maiores que as da segunda (Cordonéis-3 e Cordonéis-4). Ademais, pode-se notar que essas variações ocorrem na mesma proporção para os dois modelos. Esse fato deve-se à modelagem, pois somente nestes dois últimos modelos é levada em consideração a distribuição radial dos estratos de reforços, ou seja, a quantidade correta de lâminas de tecido polimérico utilizada por camada. O primeiro modelo, por sua vez, usa como distribuição radial o mesmo espaçamento definido como tangencial (1,05 mm).

Tabela V.15 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os diversos modelos numéricos: análise de tração, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Cordonel-1	6,71%	7,21%	4,20%	-7,45%	-37,41%	41,75%
Cordonel-2	5,82%	6,50%	3,70%	-11,68%	-36,43%	43,08%
Cordonel-3	5,92%	3,98%	2,00%	32,77%	-66,22%	49,75%
Cordonel-4	5,39%	3,65%	1,90%	32,28%	-64,75%	47,95%
Enrijecedor	-0,49%	-0,45%	-0,44%	8,16%	-10,20%	2,22%

Tabela V.16 – Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os diversos modelos numérico: análise de tração, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	0,63%	0,51%	0,42%	19,05%	-33,33%	17,65%
Cobertura	0,60%	0,51%	0,39%	15,00%	-35,00%	23,53%
Elastômero-1	0,57%	0,50%	0,37%	12,28%	-35,09%	26,00%
Elastômero-2	0,56%	0,50%	0,36%	10,71%	-35,71%	28,00%

Tabela V.17 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais para as camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise de tração, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	0,33%	0,34%	0,23%	-3,03%	-30,30%	32,35%
Cobertura	0,29%	0,32%	0,19%	-10,34%	-34,48%	40,63%
Elastômero-1	0,25%	0,28%	0,17%	-12,00%	-32,00%	39,29%
Elastômero-2	0,25%	0,26%	0,16%	-4,00%	-36,00%	38,46%

Tabela V.18 - Comparação das tensões adimensionais de Von Misses para as camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise de tração, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	0,55%	0,50%	0,34%	9,09%	-38,18%	32,00%
Cobertura	0,53%	0,50%	0,31%	5,66%	-41,51%	38,00%
Elastômero-1	0,49%	0,45%	0,29%	8,16%	-40,82%	35,56%
Elastômero-2	0,48%	0,45%	0,27%	6,25%	-43,75%	40,00%

Tabela V.19 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforço para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de tração, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Cordonel-1	2,22%	2,25%	1,26%
Cordonel-2	2,13%	2,19%	2,48%
Cordonel-3	1,09%	1,16%	6,79%
Cordonel-4	1,28%	1,33%	3,91%
Enrijecedor	-0,24%	-0,23%	-6,25%

Tabela V.20 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de tração, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Liner	0,31%	0,34%	6,96%
Cobertura	0,30%	0,30%	0,37%
Elastômero-1	0,30%	0,28%	-8,22%
Elastômero-2	0,30%	0,28%	-8,71%

Tabela V.21 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de tração, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Liner	0,33%	0,39%	16,51%
Cobertura	0,31%	0,32%	2,69%
Elastômero-1	0,30%	0,31%	2,92%
Elastômero-2	0,26%	0,30%	17,28%

Tabela V.22 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforço para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de tração, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII -AI
Cordonel-1	6,83%	4,49%	6,89%	34,29%	0,94%	-53,61%
Cordonel-2	5,84%	3,79%	5,98%	35,03%	2,51%	-57,77%
Cordonel-3	5,95%	2,10%	6,10%	64,68%	2,53%	-190,31%
Cordonel-4	5,43%	1,89%	5,80%	65,19%	6,76%	-206,67%
Enrijecedor	-0,42%	-0,41%	-0,45%	2,44%	7,14%	-9,76%

Tabela V.23 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de tração, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII -AI
Liner	0,59%	0,35%	0,65%	40,84%	9,65%	-85,35%
Cobertura	0,54%	0,33%	0,61%	39,11%	12,09%	-84,07%
Elastômero-1	0,51%	0,30%	0,59%	41,64%	15,20%	-97,39%
Elastômero-2	0,48%	0,27%	0,57%	44,23%	18,63%	-112,71%

Tabela V.24 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de tração, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII -AI
Liner	0,30%	0,20%	0,28%	51,22%	-7,69%	-39,59%
Cobertura	0,26%	0,16%	0,28%	61,46%	8,52%	-75,22%
Elastômero-1	0,18%	0,12%	0,19%	51,75%	2,53%	-55,58%
Elastômero-2	0,18%	0,12%	0,20%	53,48%	10,24%	-69,20%

Ainda sobre as camadas de reforços, é possível notar que os resultados obtidos para os cordonéis da primeira carcaça, nos modelos I e II, e para o enrijecedor à flexão, em todos os modelos, são bastante correlatos. O comportamento desses componentes é bastante próximo do esperado.

Os modelos numéricos apresentam, em geral, menores níveis de tensão do que os modelos analíticos, o que caracteriza este último como mais conservativo. Foi observado que as dispersões obtidas entre os modelos numéricos e seus analíticos análogos são pequenas, com exceção do modelo numérico III. Esse apresenta concepções de modelagem diferentes, tanto sobre a quantidade de reforços quanto sobre os modelos de materiais adotados.

Dessa maneira os modelos que obtiveram menores dispersões foram os modelos numérico II e analítico II, seguidos pelos numérico I e analítico I e, enfim, o numérico III e analítico I, os quais não apresentaram boa correlação.

V.6.3 Torção (3 - TOR)

A Figura V.19 apresenta a distribuição dos deslocamentos totais ao longo do mangote solicitado por uma torção de 25kNm. Esses deslocamentos foram obtidos através do modelo numérico III. As distribuições obtidas com os demais modelos numéricos têm aspecto bastante semelhante.

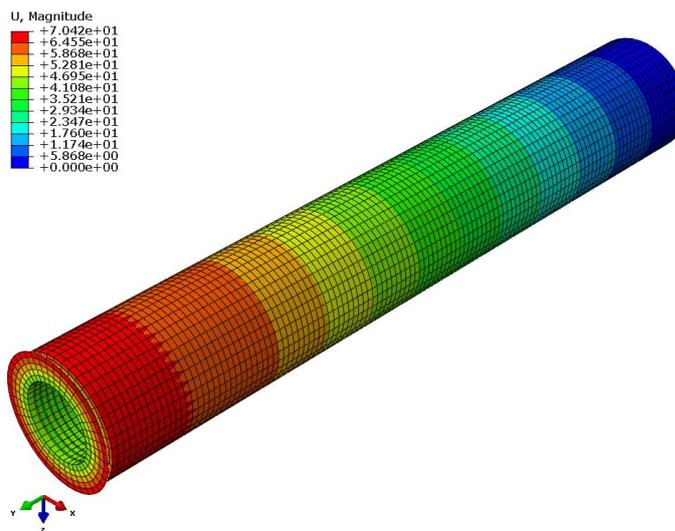


Figura V.19 – Deslocamento total do mangote, em mm, quando submetido à torção pura de 25kNm.

Na Figura V.19, percebe-se, como na análise de tração, que o trecho do mangote ligado ao *flange-nipple* se comporta como um corpo rígido e, fora dessa região, os deslocamentos diminuem proporcionalmente. Além disso, a variação do ângulo de torção é linear com o momento imposto. Desse modo, os valores de rigidez à torção calculados através dos modelos numéricos e analíticos são apresentados na Tabela V.25 junto com um valor de referência.

A Tabela V.25 aponta boa correlação entre os valores teóricos e o valor de rigidez de referência. Os modelos numéricos apresentaram diferenças entre +8,35% e +0,68% sendo que o melhor resultado foi indicado pelo modelo numérico III. Os modelos analíticos indicaram valores entre 6,85% e 10,18% inferiores ao valor do fabricante. Os valores dos modelos analíticos mostraram-se correlatos, uma vez que a estrutura *flange-nipple* incrementam a rigidez em torno de 20% e esses modelos não a levaram em consideração.

Tabela V.25 – Comparação dos diversos modelos numéricos com *flange-nipple* quanto ao comportamento à torção.

Modelos com <i>flange-nipple</i>	Rotação Axial (rad)	Rigidez Torsional - GJ (kNm ²)	Desvio (%)
Fabricante*	-	520,00	-
Numérico I	0,0225	563,42	8,35
Numérico II	0,0219	546,23	5,04
Numérico III	0,0209	523,52	0,68
Analítico I	0,0186	484,37	-6,85
Analítico II	0,0183	467,06	-10,18

* (ROESE, et al., 2009)

A Figura V.20 apresenta a distribuição das deformações nas camadas puramente elastoméricas, as forças nos elementos de reforço da primeira carcaça (Cordonel-1 e Cordonel-2) e da segunda carcaça (Cordonel-3 e Cordonel-4), além da tensão axial no enrijecedor à flexão. Esses resultados foram obtidos com o modelo numérico III.

Essa figura indica que a resposta de todas as camadas, fora da região de conexão, é constante. Além disso, há uma mudança no campo de tensões e deformações na região de transição entre o corpo tubular e o *flange-nipple*.

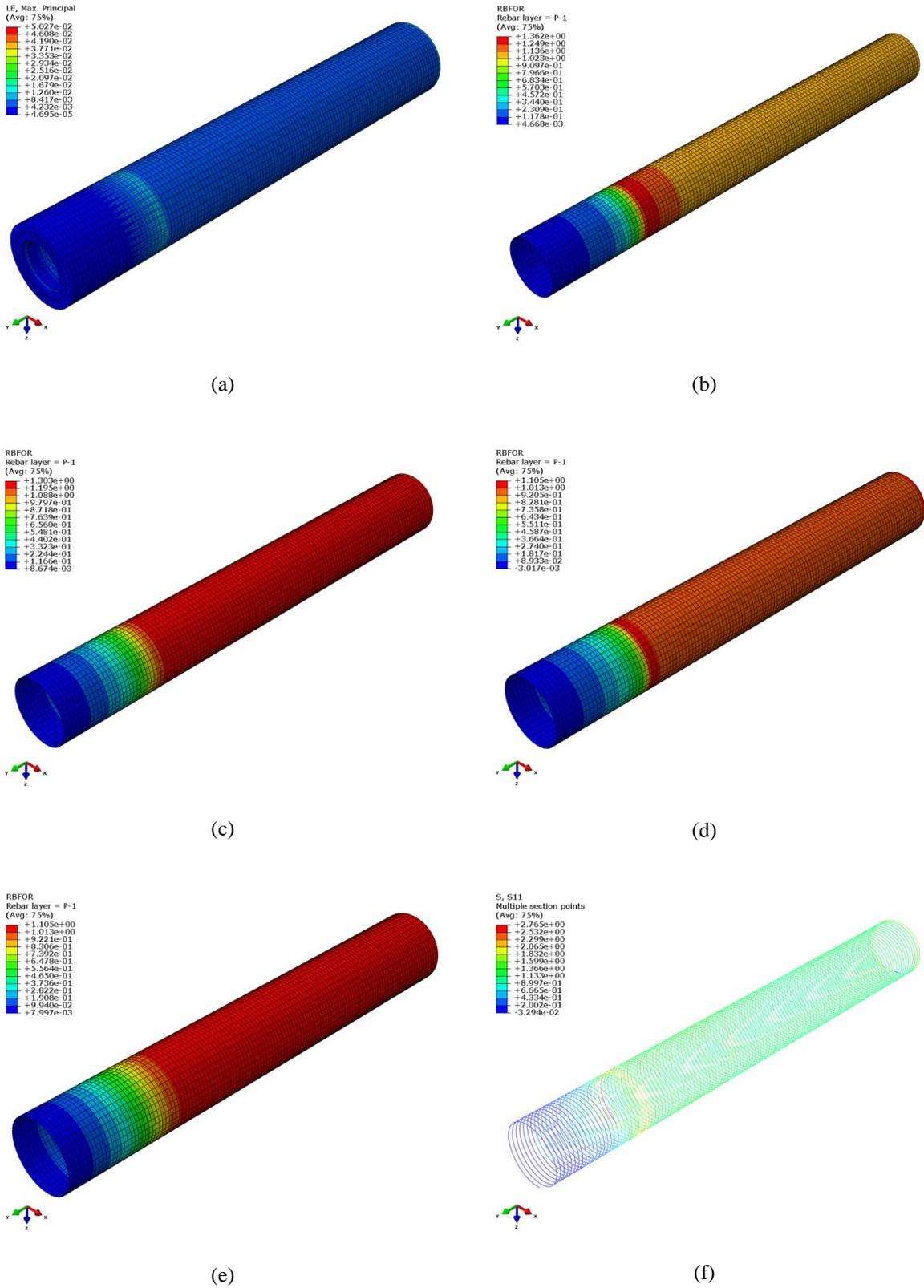


Figura V.20 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).

Da Tabela 5.26 à Tabela V.29 a resposta das diversas camadas previstas pelos diferentes modelos numéricos de análise é indicada. A Tabela 5.26 apresenta a razão entre a força nos cordoneis e a força máxima admissível para os mesmos, a mesma razão é calculada para as tensões axiais no enrijecedor à flexão. A Tabela V.27, a Tabela V.28 e a Tabela V.29 indicam as relações entre tensões axiais, circunferências e de Von Misses com a tensão máxima admissível de cada material. Os valores das tensões são obtidos conforme abordado no item V.6 desta dissertação.

Da Tabela V.30 à Tabela V.35, as mesmas respostas são indicadas, porém considerando os modelos analíticos. Comparam-se as respostas obtidas por esses modelos com as previstas pelos respectivos modelos numéricos análogos.

Primeiramente, nota-se que essas tabelas indicam que os valores obtidos estão bastante abaixo dos seus respectivos limites, principalmente no que tange o elastômero.

Da Tabela 5.26 à Tabela V.29, observa-se expressiva dispersão entre as respostas previstas para as camadas de reforços pelos modelos numéricos. No entanto, os modelos numéricos apresentam razoável concordância nas respostas previstas para as camadas elastoméricas. Isso, pois, para o carregamento de 25kNm, o nível de deformação do mangote foi muito pequeno (inferior à 1%), o que prova que a adoção de materiais elásticos lineares para representação do elastômero pode ser considerado adequado.

Nota-se, também para esse carregamento, uma equivalência qualitativa nas respostas das camadas de reforço nos modelos II e III, uma vez que, para ambos, as solicitações na primeira carcaça (Cordonéis-1 e Cordonéis-2) são maiores que as da segunda (Cordonéis-3 e Cordonéis-4). Ademais, pode-se notar que essas variações ocorrem na mesma proporção para os dois modelos. Acredita-se que esse fato esteja relacionado com as particularidades das modelagens, as mesmas já discutidas para os carregamentos anteriores.

Ainda sobre as camadas de reforços, é possível notar que os resultados obtidos para os cordoneis da primeira carcaça, nos modelos I e II, e para o enrijecedor à flexão, em todos os modelos, são bastante correlatos. O comportamento desses componentes é bastante próximo do esperado.

Tabela V.26 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os diversos modelos numéricos: análise de torção, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Cordonel-1	24,42%	25,43%	10,39%	-4,14%	-57,44%	59,13%
Cordonel-2	28,58%	28,31%	12,12%	0,93%	-57,59%	57,19%
Cordonel-3	31,64%	16,89%	7,24%	46,62%	-77,12%	57,13%
Cordonel-4	35,21%	16,81%	7,90%	52,26%	-77,56%	53,00%
Enrijecedor	0,24%	0,25%	0,22%	-6,38%	-6,38%	12,00%

Tabela V.27 – Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise de torção, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	0,065%	0,058%	0,050%	10,63%	-22,96%	13,79%
Cobertura	0,059%	0,058%	0,045%	2,37%	-23,73%	21,88%
Elastômero-1	0,051%	0,048%	0,043%	6,86%	-15,45%	9,22%
Elastômero-2	0,040%	0,035%	0,041%	12,03%	2,23%	-16,20%

Tabela V.28 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise de torção, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	0,065%	0,060%	0,058%	7,86%	-10,63%	3,01%
Cobertura	0,073%	0,062%	0,060%	15,76%	-18,60%	3,37%
Elastômero-1	0,077%	0,065%	0,061%	15,37%	-19,71%	5,13%
Elastômero-2	0,089%	0,074%	0,064%	17,39%	-27,99%	12,83%

Tabela V.29 - Comparação das tensões adimensionais de Von Misses nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise de torção, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	0.052%	0.050%	0.044%	4.78%	-16.25%	12.05%
Cobertura	0.055%	0.053%	0.050%	3.80%	-9.24%	5.65%
Elastômero-1	0.058%	0.057%	0.051%	2.92%	-12.03%	9.38%
Elastômero-2	0.061%	0.060%	0.052%	1.32%	-13.84%	12.69%

Tabela V.30 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de torção, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Cordonel-1	25,43%	26,89%	5,75%
Cordonel-2	28,31%	29,50%	4,20%
Cordonel-3	16,89%	17,72%	4,91%
Cordonel-4	16,81%	18,53%	10,23%
Enrijecedor	0,25%	0,22%	-12,00%

Tabela V.31 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de torção, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Liner	0,058%	0,062%	6,90%
Cobertura	0,058%	0,062%	6,77%
Elastômero-1	0,048%	0,046%	-2,74%
Elastômero-2	0,035%	0,033%	-6,22%

Tabela V.32 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise de torção, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Liner	0,065%	0,067%	3,75%
Cobertura	0,073%	0,086%	18,19%
Elastômero-1	0,077%	0,093%	20,98%
Elastômero-2	0,089%	0,096%	7,50%

Tabela V.33 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de torção, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Cordonel-1	24,42%	10,39%	27,82%	57,44%	13,92%	-167,65%
Cordonel-2	28,58%	12,12%	30,58%	57,59%	7,00%	-152,28%
Cordonel-3	31,64%	7,24%	33,62%	77,12%	6,26%	-364,36%
Cordonel-4	35,21%	7,90%	35,90%	77,56%	1,95%	-354,41%
Enrijecedor	0,24%	0,22%	0,30%	6,82%	27,66%	-36,36%

Tabela V.34 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de torção, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Liner	0.071%	0.051%	0.078%	26.15%	10.77%	-50.00%
Cobertura	0.062%	0.043%	0.071%	32.20%	15.25%	-70.00%
Elastômero-1	0.054%	0.043%	0.062%	19.61%	13.73%	-41.46%
Elastômero-2	0.042%	0.062%	0.051%	-60.00%	22.50%	23.44%

Tabela V.35 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise de torção, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Liner	0,065%	0,058%	0,068%	10,63%	1,69%	-13,79%
Cobertura	0,073%	0,060%	0,072%	18,60%	-1,50%	-21,01%
Elastômero-1	0,077%	0,061%	0,091%	19,71%	13,71%	-41,62%
Elastômero-2	0,089%	0,064%	0,092%	27,99%	5,62%	-46,67%

Pela análise das Tabela V.30 à Tabela V.32, foi possível concluir que, apesar de menor grau de concordância do que o apresentado à tração, os modelos numérico II e analítico II apresentam comportamento equivalente para torção. Atribui-se a discrepância observada à representação tridimensional adotada no modelo numérico. Essa abordagem permite melhor representação das relações de interações entre as camadas, as quais possuem maior significância para o carregamento de torção. O modelo analítico II, tanto na determinação das respostas das camadas de reforços como na determinação das tensões axiais do elastômero, apresenta resultados conservativos com relação ao seu numérico análogo.

Por fim, ao observar a Tabela V.33 é possível ressaltar ao comportamento do modelo numérico I e do modelo analítico I que além de apresentarem boa correlação,

ambos conferem conduta esperada à torção de um duto de parede espessa, ou seja, as camadas mais externas são sujeitas a maiores esforços quando submetidos à torção. No entanto, esse comportamento não acontece no modelo III, onde as fibras mais solicitadas são as da primeira carcaça (Cordonéis-1 e Cordonéis-2) e as dispersões são maiores. Isso pode ser explicado pela diferente densidade de fibras nas camadas de reforços do modelo numérico III.

V.6.4 Tração e pressão externa (4 – TRA+PE)

A Figura V.21 apresenta a distribuição dos deslocamentos axiais ao longo do mangote solicitado por uma tração de 40kN e pressão externa de 1.0MPa. Esses deslocamentos foram obtidos através do modelo numérico III. As distribuições obtidas com os demais modelos numéricos têm aspecto bastante semelhante.

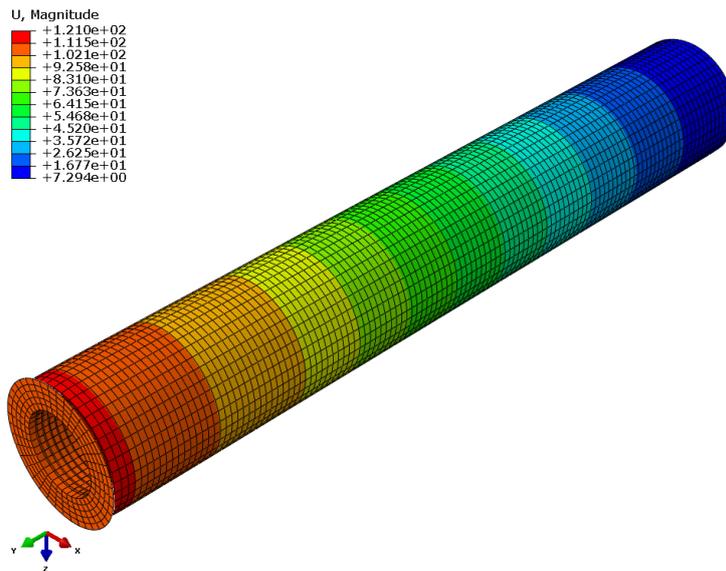


Figura V.21 – Deslocamento do mangote quando submetido à combinação de carregamentos de pressão externa e tração.

Como na análise de tração pura, percebe-se que a distribuição dos deslocamentos é praticamente constante sobre o *flange-nipple*. Por outro lado, esses deslocamentos diminuem proporcionalmente ao longo do corpo tubular. Além disso, a variação do alongamento axial e da contração radial são lineares com o carregamento imposto.

Desse modo, a Figura V.22 ilustra as deformações radiais na seção do meio do duto da qual se pode obter a contração radial.

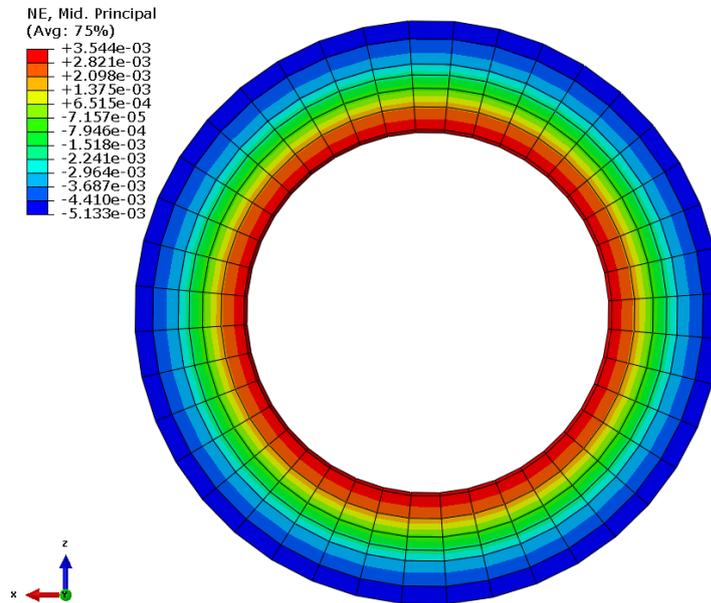


Figura V.22– Deformações radiais na seção do meio do mangote.

A Figura V.23 apresenta a distribuição das deformações nas camadas puramente elastoméricas, as forças nos elementos de reforço da primeira carcaça (Cordonel-1 e Cordonel-2) e da segunda carcaça (Cordonel-3 e Cordonel-4), além da tensão axial no enrijecedor à flexão. Esses resultados foram obtidos com o modelo numérico III.

Essa figura indica que a resposta de todas as camadas, fora da região de conexão, é constante. Além disso, há uma mudança no campo de tensões e deformações na região de transição entre o corpo tubular e o *flange-nipple*.

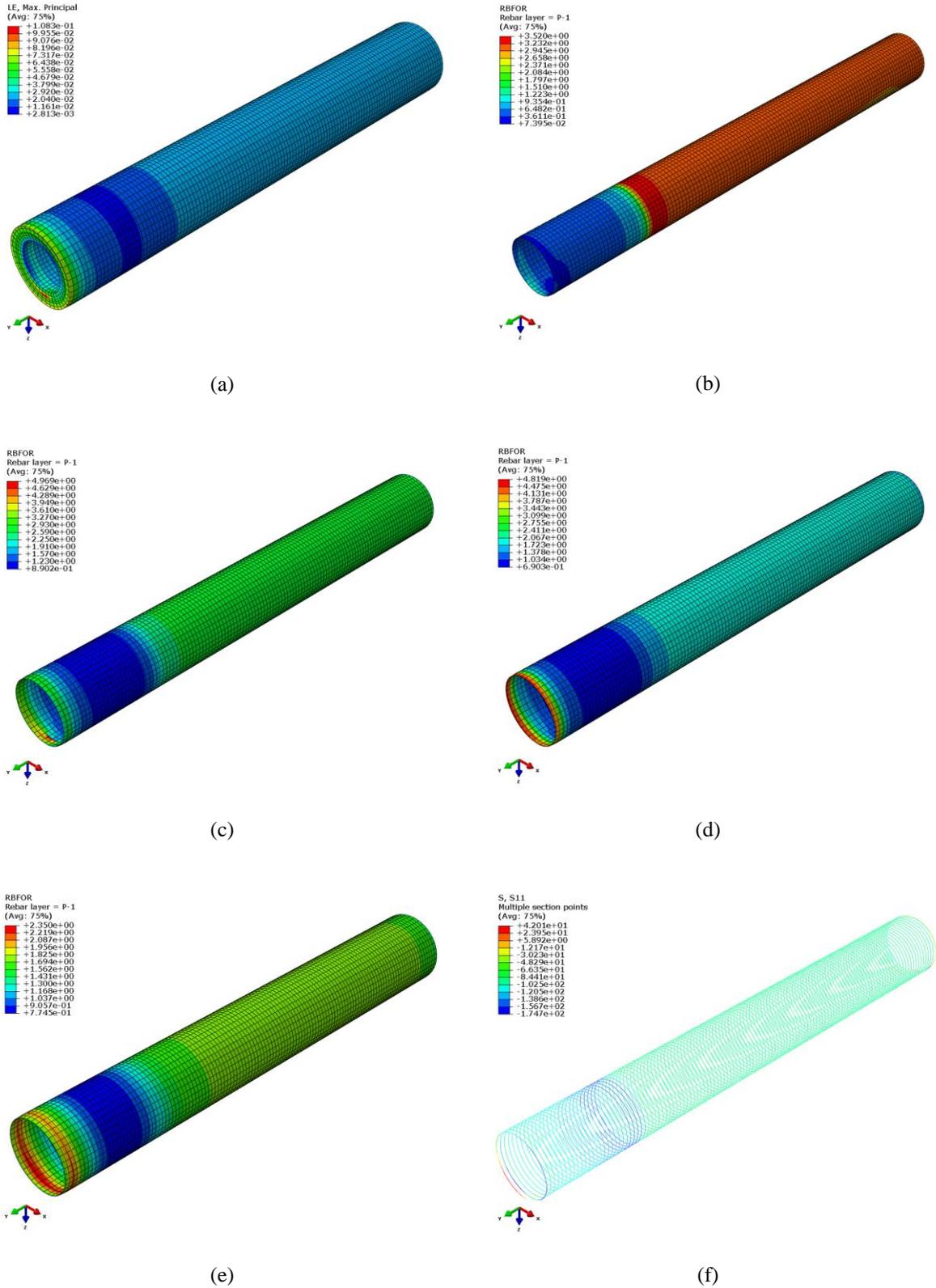


Figura V.23 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carga (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carga (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).

Da Tabela V.36 à Tabela V.39 a resposta das diversas camadas previstas pelos diferentes modelos numéricos de análise é apresentada. A Tabela V.36 apresenta a relação entre a força nos cordoneis e a força admissível dos mesmos, o mesmo é apresentado para as tensões axiais no enrijecedor à flexão. A Tabela V.37, a Tabela V.38 e a Tabela V.39 indicam as relações entre tensões axiais, circunferências e de Von Misses com a tensão máxima admissível do elastômero. Os valores das tensões são obtidos conforme abordado no item V.6 desta dissertação.

Da Tabela V.40 à Tabela V.45, as mesmas respostas são indicadas, porém considerando os modelos analíticos. Comparam-se as respostas obtidas por esses modelos com as previstas pelos respectivos modelos numéricos análogos.

O comportamento do mangote apresentou-se dentro do esperado e não obteve em nenhuma de suas camadas solicitações próximas à de ruptura, conforme pôde ser notado pela análise das tabelas apresentadas.

Houve, ainda, uma boa conformidade entre os modelos numéricos, com exceção a suas limitações e diferenças inerentes aos modelos, já mencionadas anteriormente. Os modelos numéricos I e II apresentam razoável concordância nas tensões e deformações previstas para as camadas elastoméricas e para as camadas de reforços da primeira carcaça, mas ambos diferem significativamente da resposta prevista pelo modelo numérico III. Essas diferenças devem ser atribuídas tanto às hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos I e II com relação ao comportamento dos materiais quanto à diferença de rigidez obtida pelos modelos.

Nota-se, no entanto, uma equivalência qualitativa nas respostas das camadas de reforço nos modelos II e III, uma vez que, para ambos, as solicitações na primeira carcaça (Cordonéis-1 e Cordonéis-2) são maiores que as da segunda (Cordonéis-3 e Cordonéis-4). Ademais, pode-se notar que essas variações ocorrem na mesma proporção para os dois modelos. Esses fatos estão associados às concepções de modelagens e acredita-se serem os mesmos dos ressaltados anteriormente.

Tabela V.36 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Cordonel-1	46,34%	47,70%	22,64%	-2,93%	-51,14%	52,54%
Cordonel-2	41,52%	44,30%	19,89%	-6,70%	-52,10%	55,10%
Cordonel-3	42,50%	21,77%	14,59%	48,78%	-65,68%	33,00%
Cordonel-4	40,41%	25,73%	13,98%	36,33%	-65,40%	45,67%
Enrijecedor	-17,80%	-16,80%	-18,10%	5,62%	1,69%	-7,74%

Tabela V.37 – Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	3,79%	3,35%	2,36%	11,54%	-37,68%	29,55%
Cobertura	3,62%	3,33%	2,11%	8,04%	-41,73%	36,64%
Elastômero-1	3,52%	3,31%	2,09%	5,97%	-40,57%	36,80%
Elastômero-2	3,41%	3,30%	2,01%	3,23%	-41,06%	39,09%

Tabela V.38 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	2,00%	2,07%	1,24%	-3,50%	-38,00%	40,10%
Cobertura	1,47%	1,95%	0,92%	-33,11%	-37,20%	52,82%
Elastômero-1	1,32%	1,84%	0,82%	-39,16%	-37,98%	55,43%
Elastômero-2	1,10%	1,80%	0,72%	-63,79%	-34,49%	60,00%

Tabela V.39 - Comparação das tensões adimensionais de Von Misses nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	3,21%	3,80%	2,05%	-18,38%	-36,14%	46,05%
Cobertura	3,05%	3,57%	1,87%	-17,05%	-38,69%	47,62%
Elastômero-1	2,92%	3,44%	1,82%	-17,81%	-37,67%	47,09%
Elastômero-2	2,83%	3,17%	1,82%	-11,91%	-35,69%	42,53%

Tabela V.40 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforço para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Cordonel-1	47,70%	57,05%	19,60%
Cordonel-2	44,30%	51,08%	15,30%
Cordonel-3	21,77%	25,39%	16,62%
Cordonel-4	25,73%	26,10%	1,46%
Enrijecedor	-16,80%	-25,61%	52,47%

Tabela V.41 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Liner	3,41%	3,20%	-6,16%
Cobertura	3,44%	3,20%	-6,98%
Elastômero-1	3,45%	3,20%	-7,25%
Elastômero-2	3,49%	3,20%	-8,31%

Tabela V.42 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Liner	2,21%	2,30%	4,07%
Cobertura	2,09%	2,30%	10,05%
Elastômero-1	2,03%	2,30%	13,30%
Elastômero-2	2,09%	2,30%	10,05%

Tabela V.43 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Cordonel-1	44,01%	28,30%	46,56%	35,70%	5,79%	-64,52%
Cordonel-2	39,48%	25,79%	41,58%	34,67%	5,31%	-61,21%
Cordonel-3	39,12%	14,72%	40,03%	62,37%	2,33%	-171,96%
Cordonel-4	37,10%	13,83%	46,16%	62,72%	24,42%	-233,77%
Enrijecedor	-17,80%	-18,10%	-23,70%	-1,66%	33,15%	-30,94%

Tabela V.44 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Liner	2,09%	1,29%	2,31%	38,13%	10,53%	-78,65%
Cobertura	1,72%	1,12%	2,31%	34,88%	34,30%	-106,25%
Elastômero-1	1,41%	0,84%	2,31%	40,28%	63,83%	-174,35%
Elastômero-2	1,25%	0,80%	2,31%	36,16%	84,80%	-189,47%

Tabela V.45 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão externa, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Liner	3,81%	2,32%	3,14%	39,11%	-17,51%	-35,47%
Cobertura	3,60%	2,31%	2,90%	35,78%	-19,50%	-25,35%
Elastômero-1	3,49%	2,24%	2,78%	35,80%	-20,32%	-24,11%
Elastômero-2	3,38%	2,08%	3,04%	38,44%	-10,03%	-46,15%

Ainda sobre as camadas de reforços, é possível notar que os resultados obtidos para os cordonéis da primeira carcaça, nos modelos I e II, e para o enrijecedor à flexão, em todos os modelos, são bastante correlatos. O comportamento desses componentes é bastante próximo do esperado, no qual o componente mais solicitado seria a espira, uma vez que essa é a principal responsável pela resistência aos carregamentos radiais..

Outro fato observado é que a camada de reforços mais externa do modelo I e do III são menos solicitadas que as outras. Isso ocorre, pois os elementos de *rebar* apenas respondem a esforços em seu plano médio. O oposto ocorre ao modelo numérico II, o qual a representação adotada garante maior resistência aos esforços radiais, presentes devido à pressão sobre a camada externa.

Os modelos numéricos e os modelos analíticos apresentam semelhança razoável para essa combinação de carregamentos. A concordância com o terceiro modelo numérico é, contudo, prejudicada pelas premissas de modelagem desse modelo, tal como a escolha dos materiais. A maior concordância foi obtida entre os modelos numérico II e analítico II, conforme pode ser observado. Por fim, os modelos analíticos apresentaram-se, de um modo geral, conservativos com relação aos seus análogos numéricos.

Dessa maneira os modelos que obtiveram menores dispersões foram os modelos numérico II e analítico II, seguidos pelos numérico I e analítico I e, enfim, o numérico III e analítico I, os quais não apresentaram boa correlação.

V.6.5 Tração e pressão interna (5 – TRA+PI)

A Figura V.24 apresenta a distribuição dos deslocamentos axiais ao longo do mangote solicitado por uma tração de 40kN e pressão interna de 1.0MPa. Esses deslocamentos foram obtidos através do modelo numérico III. As distribuições obtidas com os demais modelos numéricos têm aspecto bastante semelhante.

Como na análise de tração pura, percebe-se que a distribuição dos deslocamentos é praticamente constante sobre o *flange-nipple*. Por outro lado, esses deslocamentos diminuem proporcionalmente ao longo do corpo tubular. Além disso, a variação do alongamento axial e da expansão radial são lineares com o carregamento imposto. Desse modo, as deformações radiais são apresentadas por meio da Figura V.25 e pode-se confirmar o relatado anteriormente.

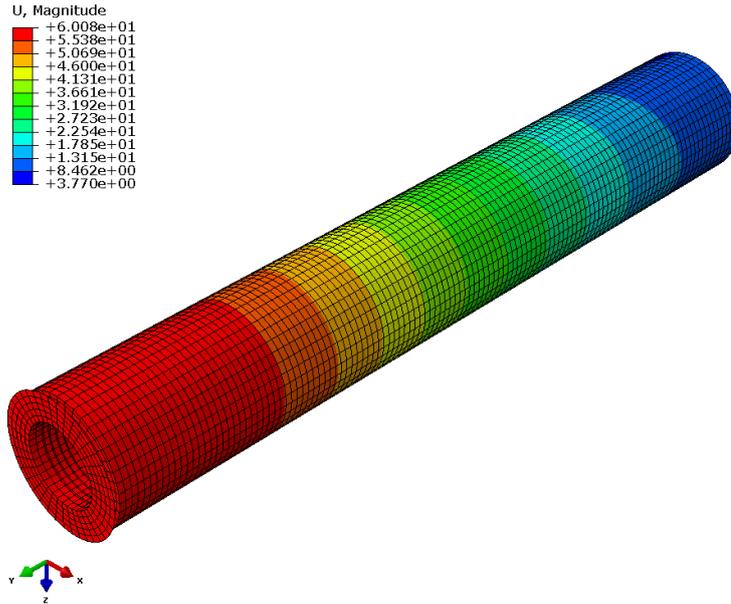


Figura V.24 – Deslocamento total do mangote quando submetido à combinação dos carregamentos de 40 kN de tração e de 1MPa de pressão interna.

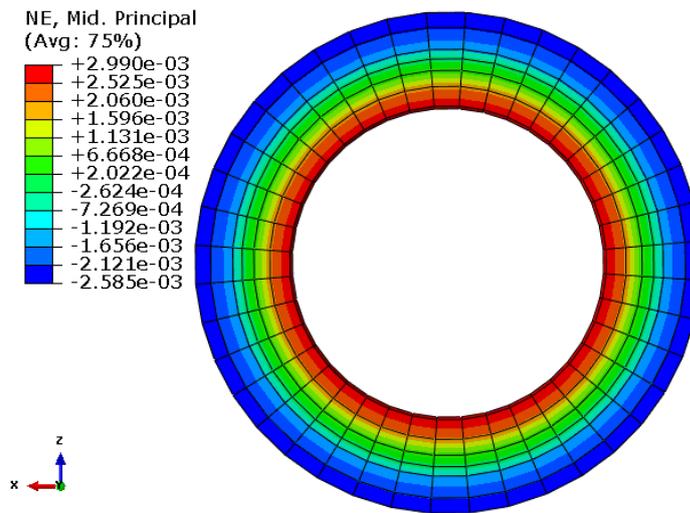


Figura V.25 – Deformação radial na seção do meio do duto.

A Figura V.26 apresenta a distribuição das deformações nas camadas puramente elastoméricas, as forças nos elementos de reforço da primeira carcaça (Cordonel-1 e Cordonel-2) e da segunda carcaça (Cordonel-3 e Cordonel-4), além da tensão axial no enrijecedor à flexão. Esses resultados foram obtidos com o modelo numérico III.

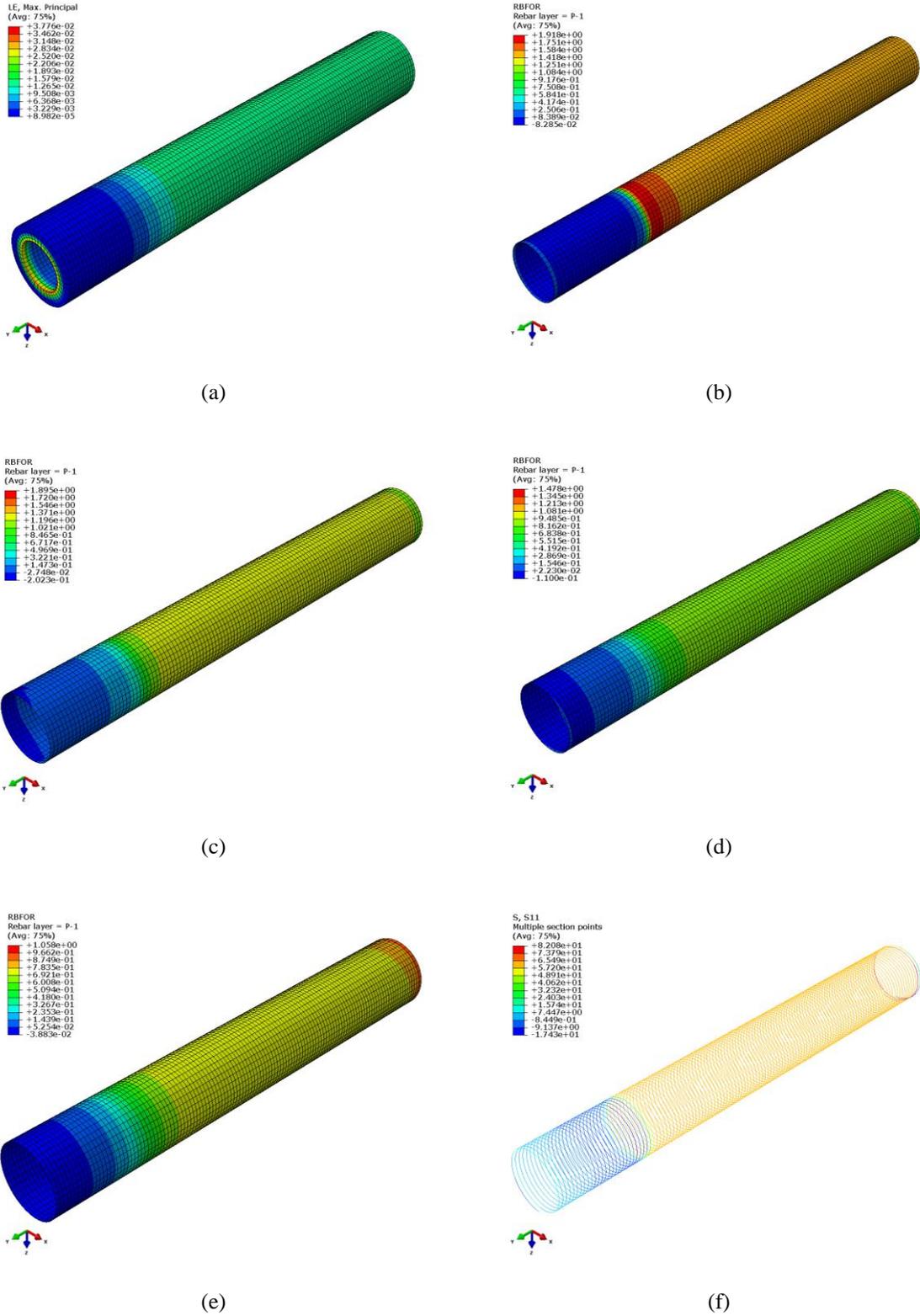


Figura V.26 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).

Pôde-se observar através dessa figura que a resposta de todas as camadas, fora da região de conexão, é constante, exceto na região de transição entre o corpo tubular e o flange-nipple onde há uma mudança no campo de tensões e deformações

Da Tabela V.46 à Tabela V.49 a resposta das diversas camadas previstas pelos diferentes modelos numéricos de análise é indicada. A Tabela V.46 apresenta a razão entre a força nos cordonéis obtidas e a força máxima admissível dos mesmos, a mesma razão é expressa para as tensões axiais no enrijecedor à flexão. A Tabela V.47, a Tabela V.48 e a Tabela V.49 indicam as relações entre tensões axiais, circunferências e de Von Misses com a tensão máxima admissível de cada material. Os valores das tensões são obtidos conforme abordado no item 0 desta dissertação.

Da Tabela V.50 à Tabela V.55, são indicadas as mesmas respostas, porém considerando os modelos analíticos. Comparam-se as respostas obtidas por esses modelos com as previstas pelos respectivos modelos numéricos análogos.

Primeiramente, observa-se que os valores obtidos nestas tabelas estão bastante abaixo dos seus respectivos limites.

De modo geral, é notada significativa dispersão entre as respostas previstas pelos modelos numéricos através da Tabela V.46, da Tabela V.47, da Tabela V.48 e da Tabela V.49. Os modelos numéricos I e II apresentam razoável concordância nos resultados apresentados para as camadas elastoméricas, mas ambos diferem significativamente da resposta prevista pelo modelo numérico III. Essas discrepâncias podem ser relacionadas tanto às hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos I e II com relação ao comportamento dos materiais quanto às diferenças de rigidez obtida pelos modelos.

Todavia, nota-se equivalência qualitativa nas respostas das camadas de reforço nos modelos II e III, uma vez que, para ambos, as solicitações na primeira carcaça (Cordonéis-1 e Cordonéis-2) são maiores que as da segunda (Cordonéis-3 e Cordonéis-4). Ademais, pode-se notar que essas variações ocorrem na mesma proporção para os dois modelos. Esse fato deve-se à modelagem e considera-o o mesmo do relatado para os casos anteriores.

Tabela V.46 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Cordonel-1	22,46%	23,74%	12,40%	-5,70%	-44,79%	47,77%
Cordonel-2	21,81%	23,02%	10,53%	-5,55%	-51,72%	54,26%
Cordonel-3	20,41%	16,71%	7,51%	18,13%	-63,20%	55,06%
Cordonel-4	18,73%	13,30%	7,03%	28,99%	-62,49%	47,18%
Enrijecedor	12,10%	9,70%	11,60%	19,83%	-4,13%	-19,59%

Tabela V.47 – Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	2,15%	1,98%	1,32%	7,91%	-38,60%	33,33%
Cobertura	1,93%	1,68%	1,24%	13,13%	-35,88%	26,19%
Elastômero-1	1,88%	1,82%	1,25%	3,08%	-33,47%	31,36%
Elastômero-2	1,78%	1,71%	1,21%	3,93%	-32,02%	29,24%

Tabela V.48 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	1,21%	1,62%	0,81%	-34,16%	-33,06%	50,10%
Cobertura	0,94%	0,48%	0,63%	49,05%	-32,98%	-31,55%
Elastômero-1	0,82%	0,64%	0,50%	21,57%	-39,02%	22,25%
Elastômero-2	0,70%	0,39%	0,38%	44,29%	-45,71%	2,56%

Tabela V.49 - Comparação das tensões adimensionais de Von Misses nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	1,82%	1,81%	1,22%	0,64%	-32,79%	32,36%
Cobertura	1,73%	1,69%	1,12%	2,49%	-35,09%	33,43%
Elastômero-1	1,70%	1,79%	1,07%	-5,34%	-37,15%	40,34%
Elastômero-2	1,62%	1,66%	0,98%	-2,28%	-39,63%	40,98%

Tabela V.50 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Cordonel-1	23,74%	26,14%	10,11%
Cordonel-2	23,02%	23,17%	0,65%
Cordonel-3	16,71%	14,22%	-14,90%
Cordonel-4	13,30%	11,22%	-15,64%
Enrijecedor	9,70%	10,36%	6,80%

Tabela V.51 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Liner	1,94%	1,90%	-2,06%
Cobertura	1,77%	1,90%	7,34%
Elastômero-1	1,66%	1,90%	14,67%
Elastômero-2	1,58%	1,90%	20,25%

Tabela V.52 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Liner	1,89%	1,18%	-37,41%
Cobertura	0,51%	0,34%	-32,16%
Elastômero-1	0,63%	0,55%	-12,97%
Elastômero-2	0,31%	0,32%	2,82%

Tabela V.53 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Cordonel-1	24,17%	15,73%	23,59%	34,91%	-2,38%	-49,97%
Cordonel-2	20,56%	14,21%	21,21%	30,89%	3,16%	-49,26%
Cordonel-3	20,98%	7,22%	21,57%	65,59%	2,81%	-198,75%
Cordonel-4	19,09%	6,65%	21,42%	65,19%	12,22%	-222,35%
Enrijecedor	12,52%	11,43%	13,05%	9,54%	4,23%	-14,17%

Tabela V.54 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Liner	1,61%	1,30%	1,80%	19,25%	11,80%	-38,46%
Cobertura	1,50%	1,20%	1,80%	20,11%	20,00%	-50,20%
Elastômero-1	1,44%	1,11%	1,80%	22,69%	25,26%	-62,02%
Elastômero-2	1,33%	1,09%	1,80%	18,03%	35,31%	-65,08%

Tabela V.55 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Liner	0,92%	0,71%	1,01%	22,91%	9,12%	-41,55%
Cobertura	0,87%	0,44%	0,86%	49,60%	-1,49%	-95,45%
Elastômero-1	0,61%	0,42%	0,62%	30,69%	2,31%	-47,62%
Elastômero-2	0,50%	0,40%	0,51%	20,77%	2,04%	-28,79%

Ainda sobre as camadas de reforços, é possível notar que os resultados obtidos para os cordonéis da primeira carcaça, nos modelos I e II, e para o enrijecedor à flexão, nos modelos I e III, são bastante correlatos. O comportamento deste componente, enrijecedor à flexão, é bastante próximo do esperado, ou seja, é solicitado mais intensamente em todos os modelos. Nesse sentido, a tensão na espira, em relação ao valor da tensão nas camadas de fibra, varia diferentemente para cada modelo, a dizer: de 3 a 4 vezes para o modelo I; de 2 a 5 vezes para o modelo III; e de 5 a 10 vezes para o modelo III.

Ao observar a Tabela V.50, a Tabela V.51 e a Tabela V.52 nota-se que o modelo analítico II não apresentou resultados conservativos para as fibras da segunda carcaça, quando comparado ao modelo numérico II. Foi atribuída a isso, a falta de representação das condições anisotrópicas e a interação entre as camadas assumidas pelo modelo analítico. No entanto, os resultados para os cordonéis e para solicitação axial do elastômero apresentaram-se em concordância.

Foi observada razoável aproximação entre os modelos numérico I e analítico I, principalmente no que tange as respostas das camadas de reforços. Contudo, foi notada expressiva diferença nas respostas das diversas camadas entre os modelos numérico III e analítico I.

Dessa maneira os modelos que melhor se aproximaram das respectivas abordagens analíticas análogas foram: o modelo numérico II, seguido pelo modelo numérico I e, enfim, o numérico III, os quais não apresenta boa correlação.

V.6.6 *Tração, pressão externa e pressão interna (6 – TRA+PE+PI)*

A Figura V.27 apresenta a distribuição dos deslocamentos axiais ao longo do mangote solicitado por uma tração de 40kN, pressão interna de 1,0MPa e pressão externa de 1,0MPa. Esses deslocamentos foram obtidos através do modelo numérico III. As distribuições obtidas com os demais modelos numéricos têm aspecto bastante semelhante.

Como nas análises axissimétricas anteriores, percebe-se que a distribuição dos deslocamentos é praticamente constante sobre o *flange-nipple*. Por outro lado, esses deslocamentos diminuem proporcionalmente ao longo do corpo tubular. Além disso, a variação do alongamento axial e da expansão radial são lineares com o carregamento imposto. Desse modo, a Figura V.28 ilustra a deformação radial experimentada pela seção transversal do meio do mangote.

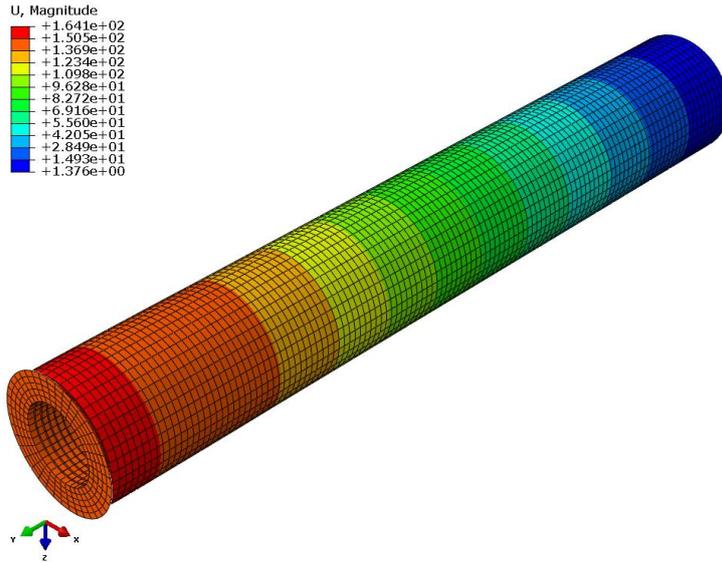


Figura V.27 – Deslocamentos do mangote quando submetido à combinação de carregamentos de tração e pressão interna e externa.

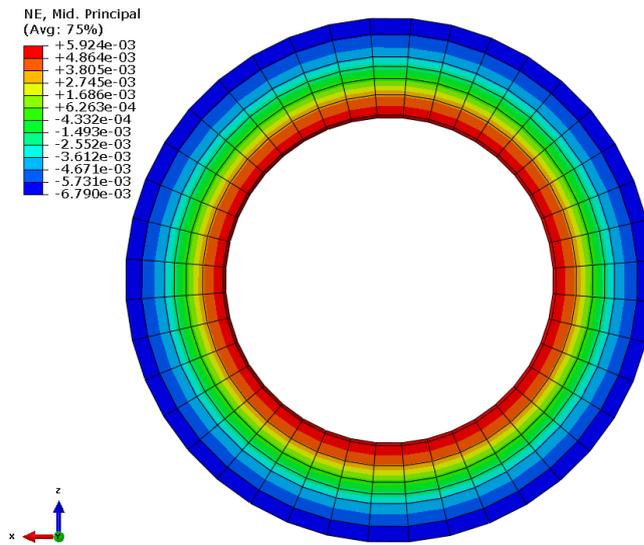


Figura V.28 – Deformações radiais na seção do meio do mangote.

A Figura V.29 apresenta a distribuição das deformações nas camadas puramente elastoméricas, as forças nos elementos de reforço da primeira carcaça (Cordonel-1 e Cordonel-2) e da segunda carcaça (Cordonel-3 e Cordonel-4), além da tensão axial no enrijecedor à flexão. Esses resultados foram obtidos com o modelo numérico III.

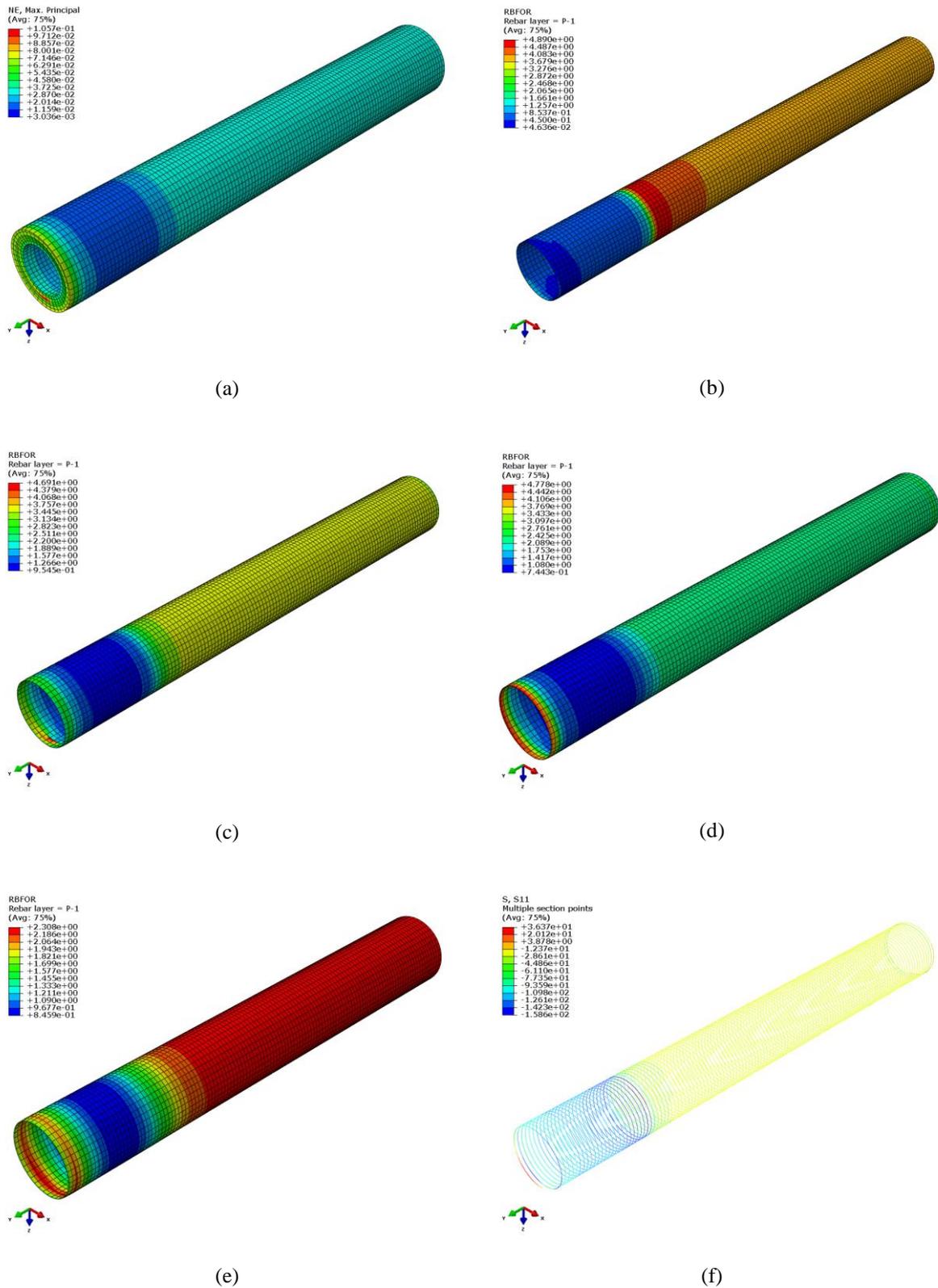


Figura V.29 – Mangote com flange-nipple: (a) Deformação axial do elastômero (mm/mm); (b) e (c) força nos elementos de rebar da primeira carcaça (N); (d) e (e) força nos elementos de rebar da segunda carcaça (N); e (f) tensão axial no enrijecedor à flexão (MPa).

Da Tabela V.56 à Tabela V.59 a resposta das diversas camadas previstas pelos diferentes modelos numéricos de análise é indicada. A Tabela V.56 apresenta a relação entre a força obtida para os cordonéis e a força limite dos mesmos. Ainda na mesma tabela, são apresentadas as razões entre as tensões axiais no enrijecedor à flexão e a tensão admissível de ruptura do aço. A Tabela V.57, a Tabela V.58 e a Tabela V.59 indicam as relações entre tensões axiais, circunferências e de Von Misses com a tensão máxima admissível de cada material. Os valores das tensões são obtidos conforme abordado no item 0 desta dissertação.

Da Tabela V.60 à Tabela V.65, podem-se obter as mesmas respostas, porém considerando os modelos analíticos. Comparam-se as respostas obtidas por esses modelos com as previstas pelos respectivos modelos numéricos análogos.

Primeiramente, nota-se que essas tabelas indicam que os valores obtidos estão abaixo dos seus respectivos limites. Essas tabelas sugerem, também, que a combinação de carregamentos estudadas nesta seção foi a que solicitou mais severamente os componentes do mangote.

Da Tabela V.15 à Tabela V.18, observar-se expressiva dispersão entre as respostas previstas pelos modelos numéricos. Os modelos numéricos I e II apresentam razoável concordância nas deformações previstas para as camadas elastoméricas, mas ambos diferem significativamente da resposta prevista pelo modelo numérico III. Essas diferenças devem ser atribuídas tanto às hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos I e II com relação ao comportamento dos materiais quanto à diferença de rigidez obtida pelos modelos.

Nota-se, no entanto, uma equivalência qualitativa nas respostas das camadas de reforço nos modelos II e III, uma vez que, para ambos, as solicitações na primeira carcaça (Cordonéis-1 e Cordonéis-2) são maiores que as da segunda (Cordonéis-3 e Cordonéis-4). Ademais, pode-se notar que essas variações ocorrem na mesma proporção para os dois modelos. Acredita-se que esses fatos estejam relacionados com as diferentes abordagens das modelagens, as quais já foram discutidas.

Tabela V.56 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os diversos modelos numéricos: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional .

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Cordonel-1	62,12%	69,40%	38,06%	-11,72%	-38,73%	45,16%
Cordonel-2	54,83%	63,84%	32,94%	-16,43%	-39,92%	48,40%
Cordonel-3	53,11%	45,31%	23,78%	14,68%	-55,23%	47,52%
Cordonel-4	50,32%	45,19%	22,07%	10,19%	-56,14%	51,16%
Enrijecedor	-16,05%	-15,68%	-14,40%	2,31%	-10,28%	8,16%

Tabela V.57 – Comparação das tensões adimensionais axiais para as camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	6,67%	7,10%	4,12%	-6,42%	-38,23%	41,96%
Cobertura	6,22%	6,70%	3,84%	-7,67%	-38,26%	42,66%
Elastômero-1	6,14%	6,31%	3,69%	-2,79%	-39,92%	41,55%
Elastômero-2	5,91%	5,99%	3,57%	-1,34%	-39,68%	40,47%

Tabela V.58 – Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	3,70%	3,61%	2,22%	2,48%	-40,04%	38,51%
Cobertura	3,62%	4,13%	1,59%	-13,92%	-56,20%	61,55%
Elastômero-1	3,59%	4,02%	1,49%	-12,02%	-58,39%	62,86%
Elastômero-2	2,99%	3,26%	1,29%	-9,14%	-56,65%	60,28%

Tabela V.59 - Comparação das tensões adimensionais de Von Mises nas camadas elastoméricas dos diversos modelos numéricos: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico II	Numérico III	Desvio NI -NII	Desvio NI -NIII	Desvio NII -NIII
Liner	5,79%	5,22%	3,53%	9,86%	-38,99%	32,32%
Cobertura	5,41%	4,24%	3,34%	21,61%	-38,15%	21,10%
Elastômero-1	5,29%	4,27%	3,30%	19,37%	-37,73%	22,78%
Elastômero-2	4,99%	4,21%	3,29%	15,69%	-34,17%	21,92%

Tabela V.60 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforço para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Cordonel-1	69,40%	74,15%	6,83%
Cordonel-2	63,84%	62,09%	-2,73%
Cordonel-3	45,31%	43,66%	-3,66%
Cordonel-4	45,19%	39,90%	-11,68%
Enrijecedor	-15,68%	-19,91%	26,95%

Tabela V.61 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Liner	7,71%	7,30%	-5,34%
Cobertura	7,32%	6,47%	-11,68%
Elastômero-1	7,11%	6,34%	-10,86%
Elastômero-2	5,65%	7,25%	28,34%

Tabela V.62 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para o modelo numérico II e o modelo analítico II: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico II	Analítico II	Desvio NII -AII
Liner	5,06%	5,09%	0,65%
Cobertura	4,97%	5,02%	0,97%
Elastômero-1	4,86%	5,01%	3,13%
Elastômero-2	4,51%	4,98%	10,34%

Tabela V.63 - Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Cordonel-1	76,41%	44,59%	72,37%	41,64%	-5,29%	-62,29%
Cordonel-2	66,62%	42,78%	65,32%	35,79%	-1,95%	-52,70%
Cordonel-3	67,50%	32,74%	64,49%	51,49%	-4,46%	-96,96%
Cordonel-4	62,61%	26,23%	61,38%	58,10%	-1,96%	-134,01%
Enrijecedor	-16,90%	-14,10%	-18,60%	19,86%	10,06%	-31,91%

Tabela V.64 - Comparação das tensões adimensionais axiais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Liner	5,49%	4,36%	3,45%	20,60%	-37,29%	21,02%
Cobertura	5,10%	4,16%	3,43%	18,40%	-32,71%	17,54%
Elastômero-1	4,90%	4,00%	3,45%	18,41%	-29,56%	13,67%
Elastômero-2	4,80%	3,90%	3,26%	18,81%	-32,06%	16,32%

Tabela V.65 - Comparação das tensões adimensionais circunferenciais nas camadas elastoméricas para os modelos numéricos I e III e o analítico I: análise combinada de tração, pressão externa e pressão interna, carregamento operacional.

Camada	Numérico I	Numérico III	Analítico I	Desvio NI -NIII	Desvio NI -AI	Desvio NIII - AI
Liner	3,06%	2,45%	3,19%	20,19%	4,13%	-30,47%
Cobertura	2,53%	2,41%	3,18%	4,71%	25,61%	-31,82%
Elastômero-1	1,81%	1,55%	3,18%	14,63%	75,25%	-105,29%
Elastômero-2	1,71%	1,55%	3,18%	9,56%	85,67%	-105,29%

Ainda sobre as camadas de reforços, é possível notar que os resultados obtidos para os cordonéis da primeira carcaça, nos modelos I e II, e para o enrijecedor à flexão, em todos os modelos, são bastante correlatos. O comportamento desses componentes é bastante próximo do esperado, no qual o enrijecedor à flexão seria o componente mais solicitado seguido dos cordonéis da primeira carcaça.

Os modelos numéricos apresentam, em geral, menores níveis de tensão do que os modelos analíticos, o que caracteriza este último como mais conservativo. Foi observado que as dispersões obtidas entre os modelos numéricos e seus analíticos análogos são pequenas, com exceção do modelo numérico III. Esse apresenta

concepções de modelagem diferentes, tanto sobre a quantidade de reforços quanto sobre os modelos de materiais adotados.

V.7 Resultados obtidos para cargas máximas

Como mencionado anteriormente, essas análises foram realizadas com o objetivo de melhor compreender o comportamento estrutural do mangote submetido a cargas próximas das admissíveis e, também, ponderar o efeito da concentração de tensão, que ocorre na região de transição *nipple*-elastômero, para os mais diversos carregamentos.

Ademais, essas análises foram realizadas empregando apenas o modelo numérico III, que, conforme discutido anteriormente, apresentou melhores resultados quando comparados aos valores de referência. Esse modelo também garante enfoque mais real e detalhado do problema, pois permite que:

- As camadas de fibra sejam especificadas uma a uma quanto a sua posição relativa dentro do elemento sólido.
- Os materiais de reforços sejam considerados hiperelásticos e expressos por dados de testes uniaxiais de tração.
- O material do elastômero seja, também, representado por modelo hiperelástico, o de *Arruda-Boyce*, o qual permite a representação do endurecimento da borracha ocorrido às grandes deformações.

V.7.1 Tração

O carregamento de tração limite considerado nesta seção foi aquele apresentado por NORTH CUTT (2000) como necessário à ruptura do mangote, ou seja, 1279 kN. Com essa análise, foram verificadas as respostas nas diversas camadas e, conseqüentemente, comparadas aos valores limites existentes na literatura para cada tipo de material.

Inicialmente, a Figura 5.32 ilustra a variação da rigidez à tração com o carregamento imposto.

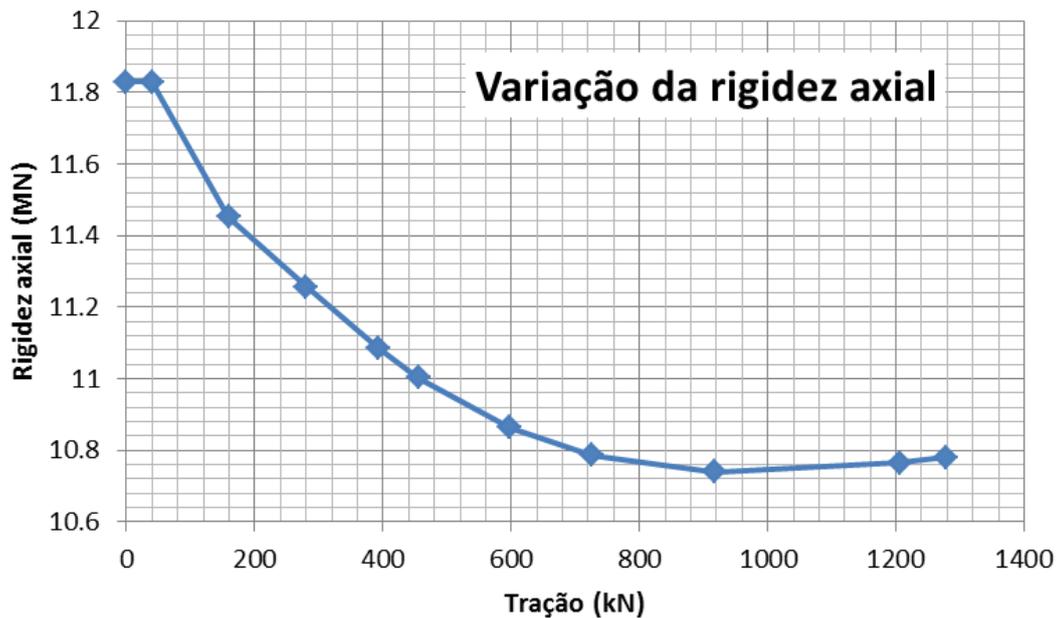


Figura V.30 – Comportamento da rigidez a tração com o aumento do carregamento.

Pode-se notar, por observação da Figura V.30, que a rigidez axial da estrutura sofreu pequeno decréscimo (aproximadamente 5%) com o aumento do carregamento. Inicialmente, obteve-se uma rigidez de 11,83 MN para o carregamento de 40 kN, ao passo que foi observado, já no primeiro incremento, um decaimento da rigidez (11,45 MN). Ao longo da análise a rigidez continua experimentando decaimento (10,74MN), situação que só será alterada ao atingir carregamentos maiores que 920kN. Para carregamentos dessa magnitude, o mangote apresentou um pequeno aumento, atingindo o valor final de aproximadamente 10,78 MN. É possível, ainda, atribuir esse aumento da rigidez à variação do ângulo de assentamento das fibras.

Tabela V.66 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços: análise de tração, carregamento máximo.

Camada	Centro	Nipple	Desvio
Cordonel-1	115%	142%	23,49%
Cordonel-2	102%	98%	-3,72%
Cordonel-3	73%	65%	-11,65%
Cordonel-4	69%	55%	-19,04%
Enrijecedor	-19%	-103%	455,36%

Ainda é notado que o alongamento máximo da estrutura, aproximadamente 12%, corresponde a quase cinco vezes o valor recomendado pela OCIMF (1991) como máximo alongamento operacional (2,5%). Com base nisso e na análise realizada, é possível estimar a magnitude do carregamento máximo de operação (aproximadamente 280 kN).

Pela Tabela V.66 observa-se que os cordonéis da primeira carcaça (Cordonel-1 e Cordonel-2) apresentam solicitações maiores do que o limite de ruptura do *nylon 66*. A primeira camada de reforço, o Cordonel-1, apresenta, para o meio do duto e para a região próxima ao *nipple*, solicitações 14,7% e 42,2 % maiores que a força de ruptura do *nylon 66*, respectivamente. Já para a segunda camada, apenas o meio do duto apresenta solicitação 2,1% maior que o limite de ruptura à tração, uma vez que nessa região, pelo distanciamento do *nipple*, não é notada a concentração de tensão. Ainda na análise dessa tabela, é possível verificar que o espiral metálico experimenta tensões maiores do que as tensões limites à tração (515 MPa) na região do *nipple*, o que verificaria o rompimento, também, dessa estrutura.

Para a segunda carcaça, não é observado solicitações maiores que as de rompimento dos cordonéis. Essas solicitações têm seus valores variando entre 55 e 73% do valor da tração admissível do poliéster. Vale ressaltar que não se notou a concentração de tensão devido à presença do *nipple* para a segunda carcaça.

A Tabela V.67 apresenta as variações nos ângulos de assentamento dos cordonéis. A maior variação apresentada acontece na região de transição entre o *nipple* e o elastômero da primeira camada de reforço. Essa região já foi destacada anteriormente por apresentar elevadas concentrações de tensões. A ocorrência desse fenômeno é justificada pela diferença de rigidez dos materiais e é manifestada no mangote com a mudança de orientação dos cordonéis. Mencionado isso, a ampla

utilização dos *shoulder plies* é explicada, pois esses componentes são conjuntos de lâminas de reforços poliméricos que tem como principal função atenuar a transição de rigidez.

Tabela V.67 – Variação no ângulo de assentamento dos cordonéis, em graus: análise de tração, carregamento máximo.

Camada	Centro	Nipple	Desvio
Cordonel-1	4,47	6,44	30,62%
Cordonel-2	5,48	3,18	-72,04%
Cordonel-3	5,66	3,49	-62,28%
Cordonel-4	6,03	3,70	-62,97%

Por fim, verifica-se que o carregamento de 1279 kN é maior do que o necessário para atingir a situação de falha do mangote. Essa situação foi estabelecida pelo rompimento de qualquer um de seus componentes poliméricos ou pelo escoamento de qualquer estrutura metálica.

Considerando, portanto, os valores-limite apresentados e os valores calculados, estima-se como carga de tração limite da estrutura o valor de 598kN, caso se considerem os esforços e tensões calculados na região do *nipple*. Caso sejam assumidos apenas os valores calculados na seção intermediária do duto, tem-se uma carga limite de 726kN. Por fim, o OCIMF (1991) fornece em seu guia uma tabela que relaciona os carregamentos últimos e os diâmetros nominais dos mangotes, desse modo assume-se para um mangote de 20’’ uma carga limite de tração de 750kN.

Deve-se destacar, contudo, que o nipple foi modelado de forma simplificada nesse trabalho e, conforme demonstrado, deve ser considerado de modo adequado, pois se trata de uma região crítica da estrutura.

5.7.2 Torção

Para a torção, foram realizadas duas análises, que visam a determinar a diferença de comportamento entre os sentidos de solicitação e determinar o possível carregamento crítico de torção para o mangote. Os carregamentos foram de +50kNm e -50kNm, uma vez que não foi encontrado na literatura menção a carregamento crítico para esse caso.

O gráfico da Figura V.31 mostra a variação da deformação angular com o momento de torção, para os dois sentidos de solicitação. O primeiro fato interessante a ser notado é relativo ao comportamento aproximadamente linear que ambos os carregamentos apresentaram. Nota-se, ainda, que a rigidez à torção no sentido anti-horário (negativo), $523\text{kNm}^2/\text{rad}$, é levemente superior à rigidez à torção no sentido horário (positivo), $507\text{kNm}^2/\text{rad}$.

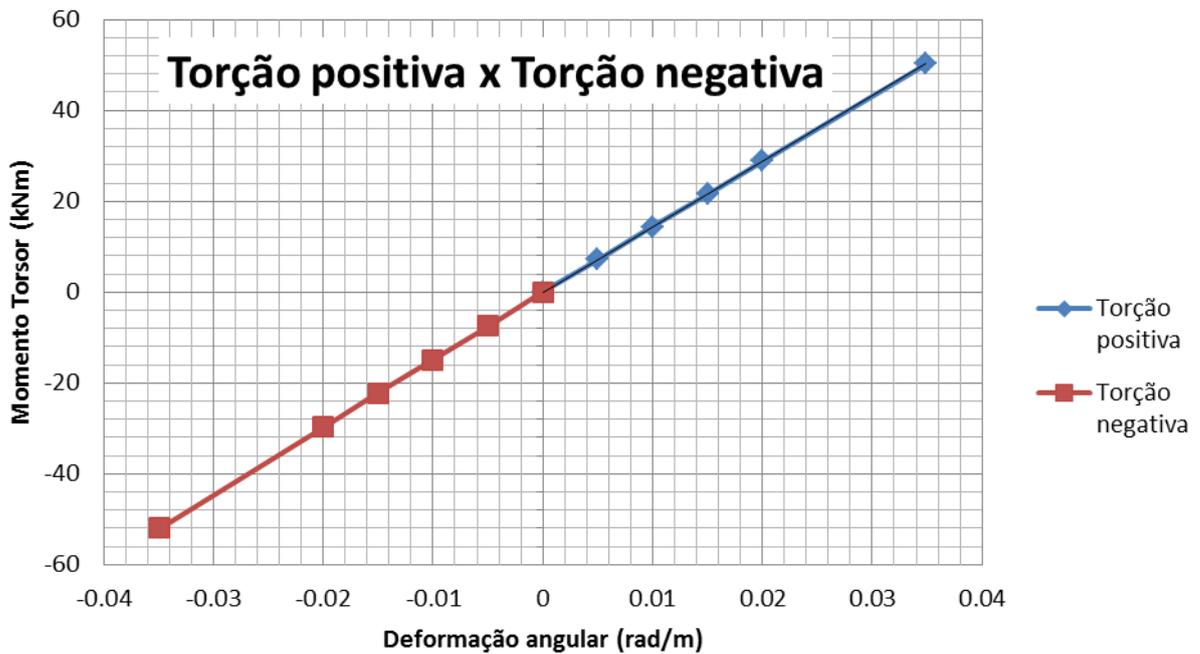


Figura V.31 – Diferença na resposta do mangote à torção positiva e negativa.

Conforme realizado para a tração, são apresentados na Tabela V.68 as forças nos cordoneis e a tensão axial no enrijecedor à flexão no centro do mangote, e na região de influência do *flange-nipple* (a 200 mm do término do *nipple*) para ambos os casos de torção. Apresenta-se, também, uma comparação com as cargas ou tensões admissíveis para cada camada.

Tabela V.68 – Comparação das tensões adimensionais das camadas de reforços: análise de torção positiva e negativa, carregamento máximo.

Camada	Centro		Nipple		Desvio - Positivo	Desvio - Negativo
	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa		
Cordonel-1	18%	-18%	22%	-22%	-25,35%	-26,79%
Cordonel-2	21%	-21%	20%	-20%	4,45%	4,49%
Cordonel-3	17%	-16%	16%	-16%	5,38%	5,41%
Cordonel-4	18%	-18%	17%	-17%	9,27%	9,27%
Enrijeecedor	1%	-1%	3%	-3%	-405,15%	-429,74%

Primeiramente, foi observado que nenhum componente apresentou solicitação próxima à de ruptura (cordonéis) ou à de escoamento (enrijeecedor à flexão) para o carregamento aplicado. As maiores solicitações notadas não chegaram a 30% do limite de tração do *nylon* 66, para os cordonéis da primeira camada; a 20% do limite de tração do poliéster, para os cordonéis da segunda camada; e a 8% do escoamento do aço AISI304, para a espira.

Não obstante, foi observada uma variação significativa de tensão na região de transição *nipple*-elastômero, em comparação à seção central, para o enrijeecedor à flexão. Essa concentração pode ser expressa por 4,3 e 4,0 vezes o valor na seção intermediária do duto para os carregamentos anti-horário e horário, respectivamente. Era de se esperar que a concentração de tensão, e mesmo as tensões no enrijeecedor à flexão, para a torção anti-horária fossem maiores que para a horária, porque o primeiro carregamento (anti-horário) proporciona o esmagamento das camadas internas do duto, comprimindo radialmente o enrijeecedor contra o *nipple*.

Foi notado, ainda, que a primeira camada de cordonéis apresenta alteração no seu comportamento devido à diferença de rigidez encontrada naquela região. Todavia, essa influência é mais branda que a ressaltada na análise de tração. Desse modo, tanto para a torção horária como para a anti-horária, as tensões apresentam seus valores aumentados por um valor próximo a 25% do valor do meio do duto nessa camada.

A Tabela V.69 ilustra as variações nos ângulos de assentamento dos cordonéis para as regiões do centro do duto e de transição do *nipple* e, ainda, subdivide-se para os carregamentos de torção positiva (coluna da esquerda) e negativa (coluna da direita). A maior variação apresentada acontece na região do centro do mangote para o Cordonel-4.

Essa região é a região mais solicitada para carregamentos de torção, por ser a região mais externa da seção.

Tabela V.69 - Variação do ângulo de assentamento, em graus: análise de torção positiva e negativa, carregamento máximo.

Camada	Centro		Nipple		Desvio - Positivo (%)	Desvio - Negativo (%)
	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa		
Cordonel-1	-0,56	0,59	-0,71	0,77	20,77	23,75
Cordonel-2	-0,66	0,69	-0,64	0,66	-2,82	-4,25
Cordonel-3	-0,68	0,72	-0,66	0,70	-2,56	-2,87
Cordonel-4	-0,76	0,80	-0,68	0,71	-12,17	-12,41

Novamente, o efeito da diferença de rigidez dos materiais do *nipple* e do elastômero irá influenciar a primeira camada de cordonel, ou seja, a mais próxima dessa transição. Essa influência é expressa, na Erro! Fonte de referência não encontrada., pela mudança de orientação dos cordonéis. Assim, os valores desse incremento na rotação são de 20%, para a torção positiva, e de 23%, para a torção negativa. Nas outras camadas de reforço, não ocorreram aumento da variação angular próximo à região de transição *nipple*-elastômero.

Em conclusão, é possível prever a magnitude do carregamento de torção que levaria o mangote à ruptura ao assumir que o comportamento à torção se dá de maneira linear até esse limite. Essa magnitude é de aproximadamente 230kNm. Pode-se, ainda, prever que os primeiros componentes a atingirem o critério de ruptura serão os cordonéis da primeira carcaça (Cordonel-1 e Cordonel-2).

V.7.2 Teste hidrostático – Pressão interna

A OCIMF (1991) recomenda que os mangotes passem por testes de pressão hidrostática, que é reproduzido, nesta dissertação, utilizando o modelo numérico III. Tal teste é utilizado para a verificação de vazamentos no duto e é realizado posicionando-se o mangote horizontalmente e, a seguir, enchendo-o de água até que a pressão máxima de 1,5 MPa seja atingida. Como tentativa de reproduzir essa situação, foi aplicado na

parede interna do modelo o referido valor de pressão e uma tração equivalente (efeito de tampa) foi calculada, 304,02kN, a fim de correlacionar os resultados com a condição de ensaio, na qual o duto está fechado.

Analogamente ao realizado para os casos de carregamentos anteriores, são apresentados na Tabela V.70 os resultados das solicitações no centro do mangote e na região de transição do *nipple* (a 200 mm do término do mesmo) para os cordonéis e o enrijecedor à flexão.

Tabela V.70 – Comparação das tensões adimensionais das camadas de reforços: análise de teste hidrostático, carregamento máximo.

Camada	Centro	Nipple	Desvio
Cordonel-1	41%	51%	24,9%
Cordonel-2	35%	32%	-7,23%
Cordonel-3	25%	22%	-11,66%
Cordonel-4	23%	19%	-17,87%
Enrijecedor	15%	14%	-5,2%

Novamente, foi observado que nenhum componente apresentou solicitação próxima à de ruptura (cordonéis) ou à de escoamento (espiral metálico) para o carregamento aplicado. As maiores solicitações notadas chegaram a 50% do limite de tração do *nylon 66*, para os cordonéis da primeira carcaça; a 27% do limite de tração do poliéster, para os cordonéis da segunda carcaça; e a 37% do escoamento do aço AISI304, para a espira.

Quanto ao efeito das diferenças de rigidez na região de transição *nipple*-elastômero, apenas a primeira camada de cordonel manifestou concentração de tensão. A força, na região do *nipple*, assume valor aproximadamente 25% maior que o observado na seção intermediária do duto. As outras camadas de cordonel, bem como o enrijecedor à flexão, apresentam redução em suas solicitações quando próximo à região do *nipple*.

A Tabela V.71 ilustra as variações nos ângulos de assentamento dos cordonéis para as regiões do centro do duto e de transição *nipple*-elastômero na simulação do teste hidrostático. A maior variação é obtida na região de transição do *nipple* para o Cordonel-1, devido à concentração de tensão desenvolvida pela diferença de rigidez dos

materiais. Nessa mesma camada, para o centro do mangote, a variação do ângulo de assentamento é a menor dentre todas as camadas de reforços.

Tabela V.71 - Variação do ângulo de assentamento, em graus: análise de teste hidrostático , carregamento máximo.

Camada	Centro	Nipple	Desvio (%)
Cordonel-1	1,10	1,34	21,82
Cordonel-2	1,28	1,23	-3,90
Cordonel-3	1,33	1,25	-6,01
Cordonel-4	1,42	1,29	-9,15

Por fim, pôde-se antever o valor da pressão que levaria o mangote à ruptura (aproximadamente 3MPa), o qual possui magnitude bastante menor do que aquela indicada por NORTH CUTT (2000) (9,5MPa). Pode-se, ainda, prever que os primeiro componentes a atingirem a falha serão os cordonéis da primeira carcaça (Cordonel-1 e Cordonel-2), seguido da espira metálica e, posteriormente, dos cordonéis da segunda carcaça (Cordonel-3 e Cordonel-4).

V.7.3 Flexão

Para a análise do carregamento máximo de flexão, foi utilizado o Guia OCIMF (1991), o qual determina o raio de curvatura mínimo que o mangote pode experimentar. O modelo foi submetido a um raio de curvatura igual a quatro vezes o diâmetro nominal do mangote, ou seja, a 2,032 m. O processo de flexão foi realizado de maneira progressiva, o que permitiu a verificação da influência da diminuição do raio de curvatura na rigidez à flexão. Além disso, foi possível a comparação das solicitações e variações de ângulo de assentamento das diversas camadas de reforço do mangote.

A Figura 5.34 compara a variação do raio de curvatura na seção central do mangote e, também, a rigidez à flexão associada, com o momento fletor imposto.

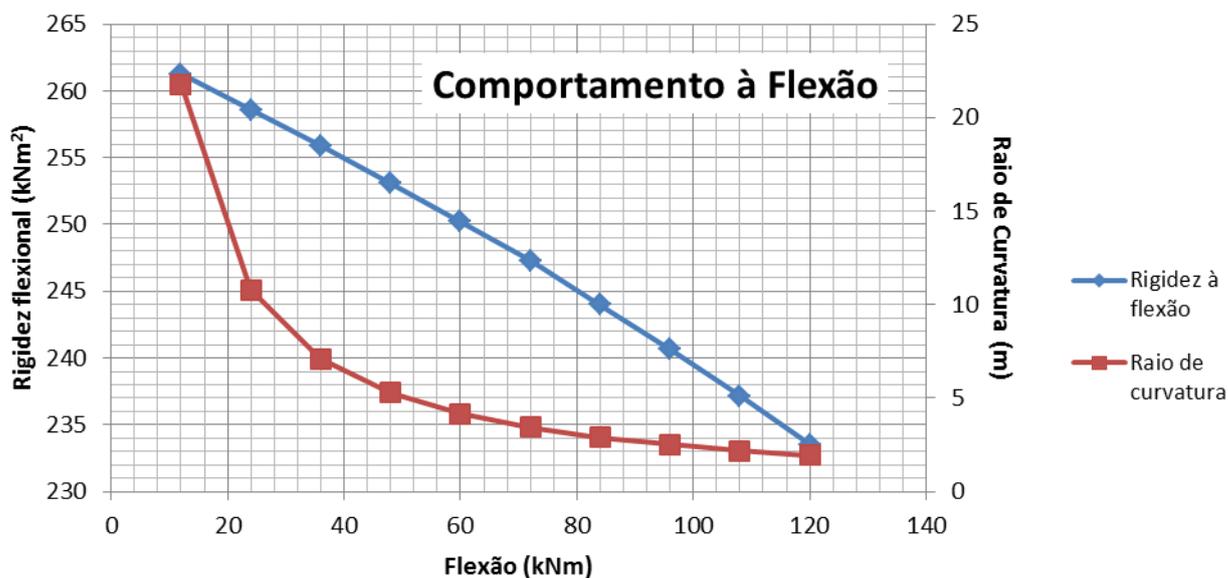


Figura V.32 – Comportamento do mangote com o aumento do carregamento de flexão.

Primeiramente, a Figura 5.34 indica que, com o aumento do carregamento de flexão, o raio de curvatura diminui de forma assintótica induzindo uma redução aproximadamente linear na rigidez à flexão. Considerando o raio de curvatura aplicado, houve um decréscimo de 10,6% em relação ao valor inicial da rigidez à flexão, ao passo que o raio de curvatura sofre uma diminuição de 14,3%.

As solicitações das camadas de reforços são apresentadas na Tabela V.72. Em primeira análise, é possível observar que as forças nas diversas camadas de cordoneis não atingem o valor máximo para as fibras poliméricas. É interessante notar, também, que o Cordonel-1 foi a única camada a apresentar forças maiores na região de influência do *nipple* em comparação àquelas observadas na seção intermediária. As solicitações das demais camadas de cordoneis aumentam à medida que se afastam do *flange-nipple*, e, opostamente, a diferença da tensão última das fibras e das solicitações das mesmas aumenta para as camadas mais externas.

Tabela V.72 – Comparação das tensões adimensionais nas camadas de reforços: análise de flexão, carregamento máximo.

Camada	Centro		Nipple		Desvio - Positivo	Desvio - Negativo
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima		
Cordonel-1	55%	-53%	77%	-74%	-40,09%	-40,03%
Cordonel-2	58%	-57%	54%	-54%	6,59%	6,32%
Cordonel-3	42%	-41%	36%	-36%	13,25%	12,45%
Cordonel-4	40%	-39%	36%	-35%	9,69%	10,98%
Enrijecedor	42%	-33%	35%	-23%	17,08%	28,86%

Foi observado, todavia, que o enrijecedor à flexão apresentou níveis de tensão maiores do que aqueles apontados como de escoamento do material adotado. Por conseguinte, a premissa do raio de curvatura mínimo dada pela OCIMF (1991) foi notada coerente com o modelo numérico, porém não conservadora, uma vez que a sollicitação encontrada foi pouco maior que o escoamento do aço. Deve-se lembrar, ainda, que os *shoulder plies* não foram modelados. Esses componentes são responsáveis pela diminuição do fator de concentração de tensão nos demais componentes do mangote.

A Tabela V.73 apresenta as rotações dos ângulos de assentamento dos cordonéis. Por meio dela, é possível notar que a primeira camada de reforço foi a única que sofreu variação do ângulo de assentamento maior na região de transição do *nipple* para o elastômero, ao passo que todas as outras camadas de reforço apresentaram menores rotações para essa mesma região, conforme acontece com as sollicitações (Tabela V.73). Pode-se observar que as sollicitações apresentadas pelos cordonéis mostraram-se maiores para a tração, ao passo que as rotações foram obtidas maiores para a compressão.

Tabela V.73 – Variação no ângulo de assentamento dos cordonéis, em graus: análise de flexão, carregamento máximo.

Camada	Variação do Ângulo de Assentamento					
	Centro		Nipple		Desvio (%)	
Cordonel-1	1,85	-2,03	2,23	-2,34	17,06	13,50
Cordonel-2	2,35	-2,54	2,22	-2,46	-6,04	-3,26
Cordonel-3	2,61	-2,83	2,31	-2,59	-12,78	-9,38
Cordonel-4	3,14	-3,39	2,84	-3,07	-10,46	-10,40

CAPÍTULO VI - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Esse trabalho teve como objetivo principal o estudo do comportamento estrutural de um mangote de *offloading*. Foram, com esse intuito, propostos três modelos numéricos e dois modelos analíticos.

Os modelos numéricos baseiam-se no método dos elementos finitos e foram desenvolvidos no programa *ABAQUS 6.10*®. Esses modelos levam em consideração a geometria tridimensional do duto, a interação entre camadas e a presença dos elementos de conexão nas extremidades (*flange-nipple*), porém têm custo computacional relativamente elevado. As principais características desses modelos são:

- Modelo numérico I: utiliza abordagem sugerida pelo programa *ABAQUS 6.10*® para modelagem de estruturas reforçadas (seções de rebar associadas a elementos de membrana e inseridos no interior de elementos sólidos). São utilizados elementos sólidos, de membrana e de viga para a modelagem dos diversos componentes do mangote e todos os materiais são considerados em seu regime elástico linear;
- Modelo numérico II: é baseado nas equações de PELC (2000). Para a modelagem, são utilizados apenas elementos sólidos, aos quais são atribuídos modelos de materiais elásticos lineares isotrópicos (camadas puramente elastoméricas) ou elásticos lineares anisotrópicos (camadas de reforços);
- Modelo numérico III: baseia-se na concepção de modelagem de RAO et al. (2002), a qual utiliza elementos finitos de rebar (*single* para o enrijecedor e *layers* para os cordonéis) para a representação dos reforços do mangote. Além desses elementos, são utilizados elementos sólidos para a modelagem do corpo do duto e suas diversas camadas. Por fim, os materiais do

elastômero e das fibras foram tratados pelas equações hiperelásticas de *Arruda-Boyce* e *Marlow*, respectivamente.

Os modelos analíticos baseiam-se no modelo clássico proposto por *BATISTA et al.* (1988) para análise de dutos flexíveis, porém, se por um lado esses modelos demandam menor custo computacional, por outro, os efeitos da tridimensionalidade, da presença da estrutura de conexão, o *flange-nipple*, e de carregamentos não axissimétricos não são considerados. As principais características dos modelos analíticos propostos são:

- Modelo analítico I: considera as camadas de reforço polimérico equivalentes às armaduras de tração de *risers* flexíveis;
- Modelo analítico II: considera as camadas de reforço compostos poliméricos com módulo de elasticidade calculado pela *Regra da Mistura*.

No estudo de caso proposto por esta dissertação, os modelos teóricos foram empregados na análise estrutural de um mangote de 20". Foram analisados dez casos de carregamento, os quais foram divididos em dois grupos:

- Os carregamentos para análise prévia do comportamento do mangote, denominados carregamentos operacionais, que incluíram flexão, tração pura, torção pura, tração combinada com pressão interna, tração combinada com pressão externa e tração combinada com pressão interna e externa.
- Os chamados carregamentos máximos, que visavam um entendimento do comportamento do duto quando cargas com magnitude próximas dos seus valores-limite são impostas. Nesse caso de carregamento, consideraram-se tração pura, torção pura, flexão e pressão interna (teste hidrostático).

Para a primeira classe de carregamentos, foram empregados e comparados, quando possível, todos os modelos teóricos propostos. No segundo caso de carregamento, foi considerado apenas um dos modelos teóricos (modelo numérico III).

As principais conclusões obtidas por meio da análise dos resultados são:

- Os modelos numéricos I e II devem ser utilizados, preferencialmente, em análises locais iniciais, onde o objetivo principal é a obtenção dos valores das rigidezes;

- O modelo numérico III, por sua vez, é mais adequado para análise de tensões e deformações do duto e suas diversas camadas, ou seja, para uma análise mais detalhada. Esse modelo foi o que apresentou maior custo computacional devido a não linearidade física e geométrica apresentada nas análises;
- Os modelos analíticos foram compatíveis com os respectivos modelos numéricos e sua utilização pode ser vinculada às atividades de pré-projeto, uma vez que se demonstrou conservador quando comparado aos modelos numéricos;
- Quanto ao comportamento estrutural do duto, tanto pelos modelos numéricos, como pelos analíticos, pôde-se notar que, de maneira geral, os cordonéis são responsáveis pela reação axial do mangote e o enrijecedor à flexão é responsável por conter carregamentos radiais e impedir o esmagamento da seção transversal do mangote;
- A estrutura de conexão incrementa as rigidezes do mangote, como já era esperado. Por um lado, a rigidez à flexão do duto em geral é a menos afetada, pois essa é considerada, para fins de projeto, como a rigidez na seção intermediária do duto. Por outro lado, a rigidez axial é mais sensível à presença de tal estrutura.
- As tensões e deformações no elastômero, axiais e circunferenciais, para todas as camadas e casos de carregamentos foram baixas. Ainda, foi notado que os maiores níveis de tensões no elastômero foram obtidos para as regiões de contato com os cordonéis;
- O mangote apresenta uma pequena diferença na rigidez à torção quanto ao sentido da torção. Todavia, pode-se considerar que o duto responde de maneira idêntica tanto à torção no sentido horário quanto no sentido anti-horário;
- O mangote apresentou uma variação de sua rigidez com o aumento dos carregamentos de tração e de flexão. Para o primeiro carregamento, a rigidez decresceu de maneira assintótica, ao passo que, para o segundo, a mesma grandeza diminuiu praticamente de modo linear;

- Sobre a rigidez axial, pôde-se observar que o decréscimo ocorreu desde 40kN até 920kN. Após 920kN, notou-se um pequeno aumento na rigidez até o fim da análise;
- Os valores apresentados pela OCIMF (1991) para tração de ruptura e raio mínimo de curvatura foram coerentes com as solicitações apresentadas pelo mangote;
- Os mangotes apresentam elevada concentração de tensão na região de transição do *nipple* para o corpo tubular. Foi avaliado que os valores de concentração de tensão são maiores para a flexão, aproximadamente 40%, do que para a tração e a torção, entre 20-25% do valor da seção intermediária do duto;

Ademais, a modelagem analítica apresentou-se satisfatória para análises prévias e conhecimento do comportamento estrutural do duto. Acredita-se, no entanto, que a modelagem em elementos finitos é uma ferramenta mais eficiente na representação do comportamento estrutural dos mangotes.

Apesar da proposta do trabalho ter sido executada com valia, as sugestões para trabalhos futuros são diversas, como:

- Buscar informações pertinentes à construção dos mangotes, a dizer: o número de camadas, espessura relativa entre as camadas, diâmetro dos reforços, espaçamento entre os mesmos, ângulo de assentamento, croqui do *nipple*, etc. para a execução de novas análises com parâmetros reais;
- Obter dados experimentais já realizados, ou mesmo realizá-los, para os diversos tipos de carregamentos, a fim de viabilizar a comparação de medidas experimentais com os valores obtidos em análises com os modelos teóricos;
- Caracterizar experimentalmente os diversos materiais dos componentes do mangote, para que se possa alimentar os modelos teóricos de modo mais adequado;
- Realizar estudos de otimização da estrutura como, por exemplo, substituir os componentes convencionais por outros feitos de materiais mais leves e que garantam a mesma segurança ou, ainda, avaliar a influência do ângulo de assentamento no comportamento local à tração, torção e flexão e,

consequentemente, buscar uma configuração que incremente a resposta estrutural do mangote;

- Propor modelos analíticos que consigam representar os efeitos da estrutura de conexão;
- Considerar as propriedades reológicas e o envelhecimento da borracha e a influência desses parâmetros na resposta estrutural dos mangotes.

CAPÍTULO VII - Bibliografia

AMBROSE et al., JOHN. 1973. *US 3717180* United State of America, 1973.

ANTAL, SÁNDOR, NAGY, TIBOR e BOROS, ANDRÁS. 2003. *Improvement of bonded flexible pipes acc. to new API Standard 17K.* Houston : Offshore Tecnology Conference, 2003.

API. 2002. *API 17B, Recomendated Practice for Flexible Pipe.* Washington D.C. : API Publishing Services,, 2002.

— . **2001.** *API 17K, Specification for Bonded Flexible Pipes.* Washington D.C. : API Publishing Services, 2001.

ASSAD et al., M. C. 2005. *Mechanics of Cord-Rubber Composite Material.* [A. do livro] National Highway Traffic Safety Administration. *The Pneumatic Tyres.* Akron : The University of Akron, 2005, pp. 105 - 185.

BATHE, KLAUSS-JURGEN. 1996. *Finite Element Procedures.* New Jersey : Prentice Hall, 1996.

BATISTA et al., RONALDO. 1989. Local mechanical behaviour of multilayered flexible risers. [A. do livro] COPPE - Federal University of Rio de Janeiro. *OFFSHORE ENGINEERING.* Rio de Janeiro : COPPE - Federal University of Rio de Janeiro, 1989, pp. 494 - 510.

CAETANO, MÁRIO J. L. 2011. www.ctb.com.pt. *Ciência e Tecnologia da Borracha.* [Online] 2011. [Citado em: 2 de Fevereiro de 2013.] <http://www.rubberpedia.com/borrachas/borracha-pu.php>.

CALLISTER, WILLIAM D. Jr. 2000. *Ciência dos Materiais: Uma Introdução.* Utah, USA : LTC, 2000.

CHIAVERINI, VICENTE. 1985. *Tecnologia Mecânica - Vol. I.* São Paulo : Makron, 1985.

COSTA, ANA PAULA SANTOS. 2007. *Estudo de uma nova concepção de linhas de mangotes para transferência de óleo no mar.* Rio de Janeiro : Dissertação de Mestrado - COPPE - UFRJ, 2007.

DS SIMULIA. 2010. Abaqus 6.10 Online Documentation. [Online] 2010. <http://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus610/Documentation/docs/v6.10>.

ERSAHIN, MEHMET AKİF. 2003. *Finite Element Analysis of Cornering Characteristics of Rotating Tires*. Ankara, Túrquia : Tese de doutorado, 2003.

FLEXOMARINE, [art.]. 2010. *Details of construction of the hose*. FLEXOMARINE, 2010.

—. **2013.** Product Catalogue - Hoses for Offshore Loading and Discharge Operations. www.flexomarine.com.br. [Online] 2013. [Citado em: 15 de Janeiro de 2013.] <http://www.flexomarine.com.br/catalogo/>.

GENT, ALAN NEVILLE. 2006. Mechanical Properties of Rubber. [A. do livro] National Highway Traffic Safety Administration. *The Pneumatic Tire*. Akron : US Department of Transportation, 2006, pp. 28 - 77.

GERE, JAMES M. 2004. *Mechanics of Materials*. s.l. : Cengage Learning, 2004.

GEYMAYR, JOSÉ ANTÔNIO BORAGIN. 1990. *FRAES - Protótipo de Sistema Especialista para Análise do Comportamento Mecânico Local de Risers Flexíveis*. Rio de Janeiro : COPPE - UFRJ, 1990.

GOMES, MORATO MANUEL. 2008. Rubberpedia. www.rubberpedia.com. [Online] 2008. <http://www.rubberpedia.com/>.

HENRY, B. 1980. *US 4192351* Califórnia, United States of America, 1980.

HOSS, LEONARDO. 2009. Modelos Constitutivos Hiperelásticos para Materiais Imcompressíveis: Ajuste, Comparação e Proposta de um Novo Modelo . *Dissertação aprovada pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre : PROMEC/UFRGS, 2009.

LACEO . 2011. *Análise de configurações alternativas para a linhas de transferência de óleo em terminais oceânicos*. RIO DE JANEIRO : COPPE/UFRJ, 2011.

LOTVEIT, SVEIN ARE. 2009. *State of the art Bonded Flexible Pipes*. Asker, Norway : 4Subsea, 2009.

MATWEB. 1996. www.matweb.com. [Online] 1996. [Citado em:]

MCDONNEL, E. T. 2006. Tire Cords and Cord-to-Rubber Bonding. [A. do livro] National Highway Traffic Safety Administration. *The Pneumatic Tires*. Brecksville : US Department of Transportation, 2006, pp. 80 - 105.

MING-LIANG e SHANTI. 1993. Deformation mechanism and fibre toughening of nylon 6,6. *Polymer*. 1993.

MOONEY, M. 1940. *A Theory of Large Elastic Deformation*. s.l. : American Institute of Physics, 1940.

NOOJI, SIEBE. 2006. Feasibility of IGW Technology in Offloading Hoses. *Master's Dissertation*. s.l. : TU Delft, June de 2006.

NORTHCUTT, VAL M. 2000. Bonded Flexible Pipe. *Offshore Engineering*. 2000, pp. 1407-1412.

OCIMF. 1991. *Guide to Purchasing, Manufacturing and Testing of Loading and Discharge Hoses for Offshore Moorings*. Londres - Inglaterra : Witherby & CO. LTDA, 1991.

PELC, OLSZTYN J. 2000. Material Model in CordRubber Structures. *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe*. 2000, pp. 561-565.

PETROBRAS. 2008. Memória Petrobras. *memoria.petrobras.com.br*. [Online] 2 de Setembro de 2008. <http://memoria.petrobras.com.br/acervo/primeiro-oleo-extraido-da-camada-pre-sal#.UiiXIhukpn8>.

PREMIER RUBBER CO. 2012. www.premierrubber.com. [Online] 2012. [Citado em:]

ROESE, PEDRO, et al. 2008. *Desenvolvimento conceitual de mangotes de offloading - Relatório 1*. Porto Alegre : UFRGS - PETROBRAS, 2008.

—. **2009.** *Desenvolvimento conceitual de mangotes de offloading - Relatório 2*. Porto Alegre : UFRGS - PETROBRAS, 2009.

—. **2009.** *Desenvolvimento conceitual de mangotes de offloading - Relatório 3*. Porto Alegre : UFRGS - PETROBRAS, 2009.

—. **2009.** *Desenvolvimento conceitual de mangotes de offloading - Relatório 4*. Porto Alegre : UFRGS - PETROBRAS, 2009.

—. 2010. *Desenvolvimento conceitual de mangotes de offloading - Relatório final*. Porto Alegre : UFRGS - TRANSPETRO, 2010.

SCHULTHESS, ERNEST. 1946. *US 2661026* United States of America, 1946.

SINGHA & SINGHA, M. K. 2012. Applications of Textiles in Marine Products. *Scientific and Academic Publishing*. 2012.

SOM HOSES. 2010. www.somhoses.com.tr. *Som Hoses*. [Online] 2010. [Citado em: 12 de Setembro de 2013.] <http://www.somhoses.com.tr/introduction.htm>.

SOUSA, JOSÉ RENATO MENDES DE. 2005. *Análise Local de Dutos Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos*. Rio de Janeiro : Tese de Doutorado aprovada pela COPPE - UFRJ, 2005.

—. 1999. *Análise Numérica de Riser Flexível*. Rio de Janeiro : Dissertação de Mestrado aprovada pela COPPE/UFRJ, 1999.

TEXACO. 2001. www.offshore-technology.com. *Offshore Technology*. [Online] Maio de 2001. <http://www.offshore-technology.com/projects/texaco/texaco7.html>.

THIMOSHENKO, STEPHEN. 1989. *Theory of plates and shell*. New York : s.n., 1989.

TI, CHAKRA BAR. 2005. *Handbook of Offshore Engineering - Vol.1*. Plainfield, Illinois, USA : ELSEVIER, 2005.

TRELLEBORG, [prod.]. 2011. *Technology leader within dredging hoses - Trelleborg Infrastructure*. TRELLEBORG, 2011. <http://www.trelleborg.com/dredging>.

TRELLOBORG. 2013. Trelloborg Oil and Marine Products. <http://www.trelleborg.com/>. [Online] 2013. <http://www.trelleborg.com/en/Products-and-Solutions/Offshore-Oil-and-Gas/Oil-and-Marine-Hoses/>.

WITZ, J. e TAN, Z. 1992. On the Axial-Torsional Structural Behaviour of Flexible. *Marine Structures*. 1992, pp. 205 - 227.

World Survey of FPSO Units. **OFFSHORE MAGAZINE. 2012.** 2012, Offshore Magazine.

ANEXO A - Metodologia de cálculo de rigidez à flexão

Este anexo tem como objetivo apresentar a metodologia recomendada pelo OCIMF (2009) para a avaliação da rigidez flexional de mangotes de *offloading*. Esse guia sugere a realização de um ensaio (Figura A.1) e, posteriormente, a aplicação do método a ser discutido para a obtenção da rigidez do duto.



Figura A.1– Ensaio de flexão orientado pelos procedimentos do OCIMF (FLEXOMARINE, 2010).

Antes da realização desse ensaio, o qual consiste na flexão do duto até seu raio de curvatura mínimo, devem ser feitas marcações equidistantes em 500 mm ao longo da linha de centro do mangote.

Após a flexão do duto, o guia sugere que considere três pontos a partir do meio do duto, inicialmente espaçados de $\frac{1}{2}$ m, e se meça a distância entre suas extremidades (C) e a altura (H) na parte central do mesmo, conforme mostra a Figura A.2. Com esses

dados e com as formulações A.1, A.2 e A.3, pode-se estimar a rigidez à flexão do mangote.

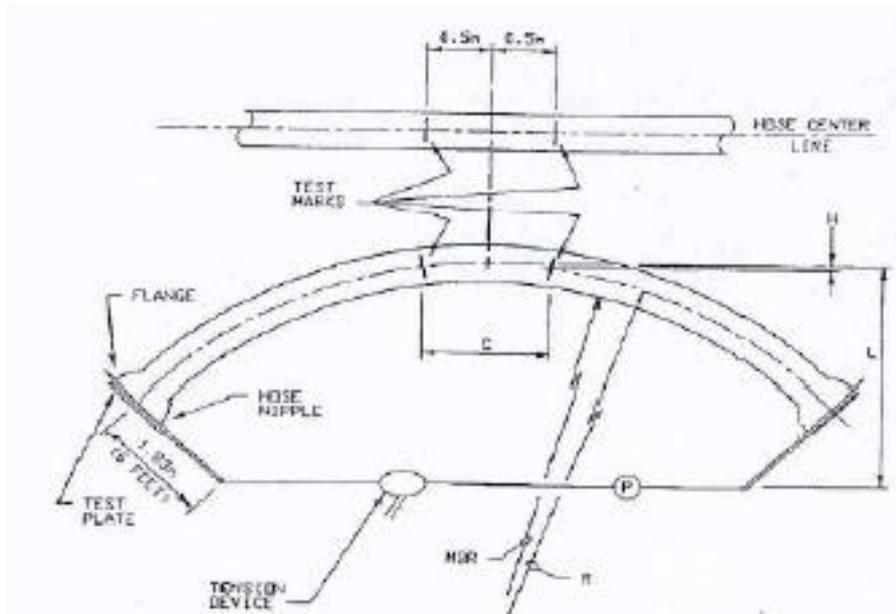


Figura A.2- Desenho esquemático do mangote em ensaio de flexão para determinação do raio de curvatura e rigidez (Norma OCIMF).

$$R = \frac{C^2 + 4H^2}{8H} \quad (\text{A.1})$$

$$M = P \cdot L \quad (\text{A.2})$$

$$EI = M \cdot 1/R \quad (\text{A.3})$$

onde:

M ; Momento fletor;

R : Raio de curvatura;

P : Força no cabo que mantém o duto fletido;

L : Distancia do ponto de aplicação do cabo ao centro da seção central;

H : Distancia vertical entre os pontos deformados;

C : Distancia horizontal entre os dois pontos, originalmente à 1m de distância.

ANEXO B - Modelo analítico para mangotes

Nesta seção serão apresentadas as formulações utilizadas para a obtenção das tensões nas camadas dos mangotes pelos modelos analíticos I e II.

1. DADOS INICIAIS

- Número de camadas

Número de camadas de reforços	Nr := 5
Número de camadas elastoméricas	Ne := 4
Comprimento do tubo	L := 5000

- Características físicas e geométricas das camadas:
-

Cordonéis-1:

	<i>Analítico I</i>	<i>Analítico II</i>
Coefficiente β	$\beta_1=1; \beta_2=0$	$\beta_1=1; \beta_2=0$
Raio médio da camada	a= 286.5	a=286.5
Espessura da camada	e=30	e=30

Número de fios	$n=2.73e4$	-
Diâmetro dos fios	$d=0.40$	-
Ângulo de assentamento	$\alpha=+45^\circ/-45^\circ$	$\alpha=45^\circ$
Área da seção transversal	$A=1.26e-1$	$A=5.40e4$
Módulo de elasticidade longitudinal	$E=3.50e3$	$E=97.88$
Coefficiente de Poisson	$\nu=0.42$	$\nu=0.50$
Módulo de elasticidade transversal	$G=1.17e3$	$G=2.50$
Momento de inércia	$I= 1.26e-3$	$I= 2.22e9$
Tensão de ruptura	$\sigma_y=94.50$	$\sigma_y=94.50$

Cordonéis-2:

	<i>Analítico I</i>	<i>Analítico II</i>
Coefficiente β	$\beta_1=1; \beta_2=0$	$\beta_1=1; \beta_2=0$
Raio médio da camada	$a= 332.00$	$a= 332.00$
Espessura da camada	$e=15.00$	$e=15.00$
Número de fios	$n=1.58e4$	-
Diâmetro dos fios	$d=0.40$	-
Ângulo de assentamento	$\alpha=+45^\circ/-45^\circ$	$\alpha=45^\circ$
Área da seção transversal	$A=1.26e-1$	$A=3.13e4$
Módulo de elasticidade longitudinal	$E=3.50e3$	$E=97.88$
Coefficiente de Poisson	$\nu=0.42$	$\nu=0.50$

Módulo de elasticidade transversal	$G=1.17e3$	$G=2.50$
Momento de inércia	$I= 1.26e-3$	$I=1.73e9$
Tensão de ruptura	$\sigma_y=94.50$	$\sigma_y=94.50$

Cordonéis-3:

	<i>Analítico I</i>	<i>Analítico II</i>
Coefficiente β	$\beta_1=1; \beta_2=0$	$\beta_1=1; \beta_2=0$
Raio médio da camada	$a=347.50$	$a= 347.50$
Espessura da camada	$e=6.00$	$e=6.00$
Número de fios	$n=3.01e3$	-
Diâmetro dos fios	$d=0.40$	-
Ângulo de assentamento	$\alpha=+45^\circ/-45^\circ$	$\alpha=45^\circ$
Área da seção transversal	$A=1.26e-1$	$A=1.31e4$
Módulo de elasticidade longitudinal	$E=3.50e3$	$E=47.89$
Coefficiente de Poisson	$\nu=0.42$	$\nu=0.50$
Módulo de elasticidade transversal	$G=1.17e3$	$G=2.50$
Momento de inércia	$I= 1.26e-3$	$I=7.91e8$
Tensão de ruptura	$\sigma_y=94.50$	$\sigma_y=94.50$

Cordonéis-4:

	<i>Analítico I</i>	<i>Analítico II</i>
Coeficiente β	$\beta_1=1; \beta_2=0$	$\beta_1=1; \beta_2=0$
Raio médio da camada	a= 383.50	a=383.50
Espessura da camada	e=40.00	e=40.00
Número de fios	n=2.66e4	-
Diâmetro dos fios	d=0.40	-
Ângulo de assentamento	$\alpha=+45^\circ/-45^\circ$	$\alpha=45^\circ$
Área da seção transversal	A=1.26e-1	A=9.64e4
Módulo de elasticidade longitudinal	E=3.50e3	E=56.16
Coeficiente de Poisson	$\nu=0.42$	$\nu=0.50$
Módulo de elasticidade transversal	G=1.17e3	G=2.50
Momento de inércia	I= 1.26e-3	I=7.11e9
Tensão de ruptura	$\sigma_y=94.50$	$\sigma_y=94.50$

Enrijecedor:

	<i>Analítico I</i>	<i>Analítico II</i>
Coeficiente β	$\beta_1=1; \beta_2=0$	$\beta_1=1; \beta_2=0$
Raio médio da camada	a= 313.00	a=313.00
Espessura da camada	e=23.00	e=23.00
Número de fios	n=1	n=1
Diâmetro dos fios	d=15.00	d=15.00

Ângulo de assentamento	$\alpha=88.86^\circ$	$\alpha=88.86^\circ$
Área da seção transversal	$A=176.72$	$A=176.72$
Módulo de elasticidade longitudinal	$E=1.93e5$	$E=1.93e5$
Coefficiente de Poisson	$\nu=0.29$	$\nu=0.29$
Módulo de elasticidade transversal	$G=7.48e4$	$G=7.48e4$
Momento de inércia	$I=2.49e3$	$I=2.49e3$
Tensão de ruptura	$\sigma_y=520.00$	$\sigma_y=520.00$

Liner:

	<i>Analítico I</i>	<i>Analítico II</i>
Coefficiente β	$\beta_1=0; \beta_2=1$	$\beta_1=0; \beta_2=1$
Raio médio da camada	$a=262.75$	$a=262.75$
Espessura da camada	$e=17.50$	$e=17.50$
Área da seção transversal	$A=2.89e4$	$A=2.89e4$
Módulo de elasticidade longitudinal	$E=6.50$	$E=6.50$
Coefficiente de Poisson	$\nu=0.50$	$\nu=0.50$
Módulo de elasticidade transversal	$G=3.83$	$G=3.83$
Momento de inércia	$I=9.98e8$	$I=9.98e8$

Cobertura:

	<i>Analítico I</i>	<i>Analítico II</i>
Coeficiente β	$\beta_1=0; \beta_2=1$	$\beta_1=0; \beta_2=1$
Raio médio da camada	a=342.00	a=342.00
Espessura da camada	e=5.00	e=5.00
Área da seção transversal	A=1.07e4	A=1.07e4
Módulo de elasticidade longitudinal	E=6.50	E=6.50
Coeficiente de Poisson	$\nu=0.50$	$\nu=0.50$
Módulo de elasticidade transversal	G=3.83	G=3.83
Momento de inércia	I=6.28e8	I=6.28e8

Elastômero-1:

	<i>Analítico I</i>	<i>Analítico II</i>
Coeficiente β	$\beta_1=0; \beta_2=1$	$\beta_1=0; \beta_2=1$
Raio médio da camada	a=357.00	a=357.00
Espessura da camada	e=13.00	e=13.00
Área da seção transversal	A=2.92e4	A=2.92e4
Módulo de elasticidade longitudinal	E=6.50	E=6.50
Coeficiente de Poisson	$\nu=0.50$	$\nu=0.50$
Módulo de elasticidade transversal	G=3.83	G=3.83
Momento de inércia	I=1.86e9	I=1.86e9

Elastômero-2:

	<i>Analítico I</i>	<i>Analítico II</i>
Coefficiente β	$\beta_1=0; \beta_2=1$	$\beta_1=0; \beta_2=1$
Raio médio da camada	a= 406.00	a=406.00
Espessura da camada	e=5.00	e=5.00
Área da seção transversal	A=1.28e4	A=1.28e4
Módulo de elasticidade longitudinal	E=6.50	E=6.50
Coefficiente de Poisson	$\nu=0.50$	$\nu=0.50$
Módulo de elasticidade transversal	G=3.83	G=3.83
Momento de inércia	I=4.01e8	I=4.01e8

2. MONTAGEM DO SISTEMA DE EQUAÇÕES

As equações que formam o sistema são compostas por duas equações de equilíbrio entre componentes de forças internas e externas; M (número de camadas) equações de equilíbrio das pressões radiais entre as camadas; M-1 equações de compatibilidade entre deformações radiais das camadas. Logo, são:

$$NT:=2.M+1$$

- Equações 1 a 9: Continuidade de raios de interface das camadas.

$$i := 1..(M - 1)$$

$$j := 2..M$$

$$K_{i,1} := \frac{e_i}{L} \cdot \sin(\alpha_i)^2$$

$$K_{i,i+1} := -1 + \frac{e_i}{a_i} \cdot \cos(\alpha_i)^2$$

$$K_{j-1,j+1} := 1 - \frac{e_j}{a_j} \cdot \cos(\alpha_j)^2$$

$$K_{i,M+2} := \frac{-a_i}{L} \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \cos(\alpha_i)$$

$$K_{i,M+4+i} := \frac{\beta_{2_i} e_i}{E_i}$$

- Equação 10: Equilíbrio de forças axiais.

$i := 1..M$

$$K_{M,1} := \sum_{i=1}^M \left[\beta_{1_i} \cdot \frac{n_i \cdot E_i \cdot A_i}{L} \cdot \cos(\alpha_i)^3 + \beta_{2_i} \cdot \frac{E_i \cdot A_i}{[1 - (v_i)^2]} \cdot \frac{1}{L} - \frac{n_i \cdot e_i \cdot l_i \cdot Gm_i \cdot \cos(\alpha_i)^2 \cdot \sin(\alpha_i)}{L} \right]$$

$$K_{M,i+1} := \left[\beta_{1_i} \cdot \frac{n_i \cdot E_i \cdot A_i}{a_i} \cdot \sin(\alpha_i)^2 \cdot \cos(\alpha_i) + \beta_{2_i} \cdot \frac{E_i \cdot A_i}{[1 - (v_i)^2]} \cdot \frac{v_i}{a_i} + \frac{n_i \cdot e_i \cdot l_i \cdot Gm_i \cdot \cos(\alpha_i)^2 \cdot \sin(\alpha_i)}{a_i} \right]$$

$$K_{M,M+2} := \left[\sum_{i=1}^M \left(n_i \cdot A_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \cos(\alpha_i)^2 + \frac{n_i \cdot e_i \cdot l_i \cdot Gm_i \cdot a_i \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \cos(2\alpha_i)}{2} \right) \right]$$

- Equação 11: Equilíbrio de momentos torsores:

$$K_{M+1,1} := \sum_{i=1}^M \left(\frac{n_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i \cdot \cos(\alpha_i)^2 \cdot \sin(\alpha_i)}{L} - \frac{n_i \cdot e_i \cdot l_i \cdot Gm_i \cdot a_i \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \sin(\alpha_i)^2}{L} \right)$$

$$K_{M+1,i+1} := \beta_{1_i} \cdot n_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot \sin(\alpha_i)^3 + \left(n_i \cdot e_i \cdot l_i \cdot Gm_i \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \sin(\alpha_i)^2 \right)$$

$$K_{M+1,M+2} := \sum_{i=1}^M \left[\beta_{1_i} \left[n_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot (a_i)^2 \cdot \sin(\alpha_i)^2 \cdot \cos(\alpha_i) + n_i \cdot G_i \cdot J_i \cdot \cos(\alpha_i)^2 \right] + \beta_{2_i} \left[\frac{n_i \cdot e_i \cdot l_i \cdot Gm_i \cdot (a_i)^2 \cdot \cos(2\alpha_i) \cdot \sin(\alpha_i)}{2} + Gm_i \cdot J_i \cdot Vm_i \right] \right]$$

- Equações 12 a 20: Equilíbrio das forças radiais.

$$i := 1..(M) \quad j := 2..M+1$$

$$K_{i+M+1,1} := \left[\beta_{1_i} \cdot \frac{n_i \cdot A_i \cdot E_i}{2\pi \cdot a_i \cdot L} \cdot \sin(\alpha_i)^2 \cdot \cos(\alpha_i) + \beta_{2_i} \cdot \frac{e_i \cdot E_i \cdot v_i}{[1 - (v_i)^2] \cdot L} - \frac{n_i \cdot e_i \cdot l_i \cdot Gm_i \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \sin(\alpha_i)^2}{L} \right]$$

$$K_{i+M+1,M+2} := \left(\beta_{1_i} \cdot \frac{n_i \cdot E_i \cdot A_i}{2\pi} \cdot \sin(\alpha_i)^3 + n_i \cdot e_i \cdot l_i \cdot Gm_i \cdot a_i \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \cos(2\alpha_i) \right)$$

$$K_{i+M+1,i+1} := \left[\beta_{1_i} \cdot \frac{n_i \cdot A_i \cdot E_i}{2\pi \cdot (a_i)^2} \cdot \sin(\alpha_i)^3 \cdot \tan(\alpha_i) + \beta_{2_i} \cdot \frac{e_i \cdot E_i}{[1 - (v_i)^2] \cdot a_i} + \frac{n_i \cdot e_i \cdot l_i \cdot Gm_i \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \sin(\alpha_i)^2}{a_i} \right]$$

3. CÁLCULO DAS TENSÕES NAS CAMADAS

- Tensão nas camadas de reforços

$$\sigma_{t_i} := E_i \cdot \left(\frac{\delta a_i}{a_i} \cdot \sin(\alpha_i)^2 + \frac{\delta \phi}{2} \cdot a_i \cdot \sin(2\alpha_i) + \frac{\delta L}{L} \cdot \cos(\alpha_i)^2 \right)$$

- Tensão nas camadas elastoméricas

$$\sigma_{L_i} := \frac{E_i}{[1 - (v_i)^2]} \cdot \left(\frac{\delta L}{L} + v_i \cdot \frac{\delta a_i}{a_i} \right)$$

$$\sigma_{\theta_i} := \frac{E_i}{[1 - (v_i)^2]} \cdot \left(\frac{\delta a_i}{a_i} + v_i \cdot \frac{\delta L}{L} \right)$$