



COPPE/UFRJ

**CORRELAÇÃO NUMÉRICA - EXPERIMENTAL DE DUTOS FLEXÍVEIS SUBMETIDOS A
CARGAS DE TRAÇÃO E TORÇÃO**

Héctor Edison Merino Muñoz

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.

Orientadores: Carlos Magluta

José Renato Mendes de Sousa

Rio de Janeiro

Março de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

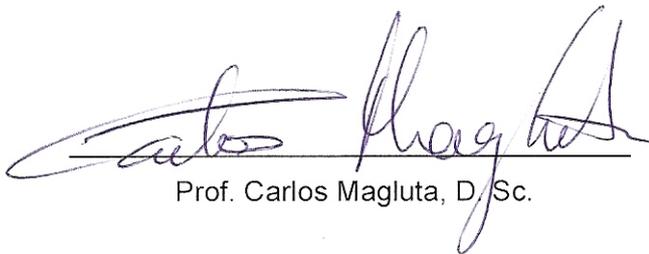
Milhares de livros grátis para download.

CORRELAÇÃO NUMÉRICA - EXPERIMENTAL DE DUTOS FLEXÍVEIS
SUBMETIDOS A CARGAS DE TRAÇÃO E TORÇÃO

Héctor Edison Merino Muñoz

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.

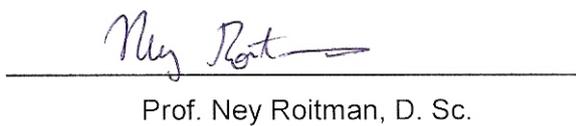
Aprovada por:



Prof. Carlos Magluta, D. Sc.



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



Prof. Ney Roitman, D. Sc.



Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D. Sc.



Dr. Carlos Alberto Duarte de Lemos, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.

MARÇO DE 2009

Muñoz, Héctor Edison Merino

Correlação Numérica - Experimental de Dutos Flexíveis Submetidos a Cargas de Tração e Torção. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIX, 121 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Carlos Magluta

José Renato Mendes de Sousa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 113-117.

1. Dutos Flexíveis. 2. Experimental. 3. Estruturas *Offshore*. I. Magluta, Carlos., *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais, Jorge Merino e Maria Muñoz,
e a minha irmã Jhomira.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, pela bravura e coragem com que criaram quatro filhos diante das adversidades, e nunca deixou-nos faltar o acesso à educação.

Aos orientadores, Magluta e José Renato, ao professor Ney pela amizade e pelos conhecimentos passados ao longo deste trabalho, conhecimentos estes que transcendem o trabalho em si, e que levarei como postura profissional para o resto da minha vida. Obrigado.

Agradeço a todos do LADEPIS (Laboratório de Dinâmica e Processamentos de Imagens e Sinais), a todos os funcionários, e técnicos da COPPE que ajudaram neste trabalho, e, em especial, a Flavio.

Agradeço à ANP (Agência Nacional de Petróleo) pelo auxílio financeiro recebido ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos grandes amigos de turma da Engenharia Civil da COPPE/UFRJ: Diego T, Nelson, Marylin e Flavia por todo apoio, torcida, e a grande amizade que construímos nesta vida.

Finalmente, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que chegasse onde estou; seria impossível citar todas.

A Deus.

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

CORRELAÇÃO NUMÉRICA - EXPERIMENTAL DE DUTOS FLEXÍVEIS SUBMETIDOS A CARGAS DE TRAÇÃO E TORÇÃO

Héctor Edison Merino Muñoz

Março/2009

Orientadores: Carlos Magluta

José Renato Mendes de Sousa

Programa: Engenharia Civil

Dutos flexíveis são estruturas compostas constituídas de várias camadas metálicas e poliméricas concêntricas projetadas para resistir aos diferentes carregamentos aos quais a estrutura é submetida durante sua vida útil. Em geral, as camadas poliméricas outorgam estanqueidade, isolamento e/ou atuam como componente anti-desgaste, enquanto as camadas metálicas resistem ao carregamento estrutural imposto. Neste estudo, um duto flexível é submetido à tração, torção horária e anti-horária considerando diferentes condições de contorno. A resposta a cada uma das cargas aplicadas é prevista através de um modelo numérico tridimensional não linear baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Alguns aspectos destas respostas são discutidos tais como: a distribuição do alongamento e da rotação axial ao longo de várias seções do modelo; e o efeito da restrição ao alongamento e rotação axial na seção extrema do modelo. Os resultados obtidos são comparados com testes experimentais realizados na COPPE/UFRJ. Os testes foram realizados usando uma estrutura metálica capaz de aplicar simultaneamente carregamentos de tração e torção.

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

CORRELATION OF FLEXIBLE PIPES UNDER TENSION AND TORSION LOADS –
NUMERICAL AND EXPERIMENTAL APPROACH

Héctor Edison Merino Muñoz

March / 2009

Advisors: Carlos Magluta
José Renato Mendes de Sousa

Department: Civil Engineering

Flexible pipes are composite structures constituted of several steel and plastic concentric layers designed to meet specific requirements. Typically, the polymeric layers work as sealing, insulating and/or anti-wear components, while the metallic layers withstand the imposed structural loads. In this study a flexible pipe is subjected to tension, clockwise and anti-clockwise torsion considering different boundary conditions and its response to each of the applied loads is predicted with a three-dimensional nonlinear finite element (FE) model. Some aspects of these responses are discussed such as: the distribution of the axial rotations and elongations along the various cross-sections of the model; the effect of restraining the axial rotation and elongation at the extreme sections of the model. The calculated results are compared to the ones measured in experimental tests performed at COPPE/UFRJ. The tests were performed using a metallic frame that is able to apply simultaneously tension and torsion loading.

INDICE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 - Motivação	1
I.2 - Objetivo	3
I.3 - Metodologia	3
I.4 - Estado da arte	4
I.5 - Descrição dos capítulos	5

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DOS DUTOS FLEXÍVEIS

II.1 - Classificação segundo sua forma cons	6
II.2 - trutiva	6
II.3 - Classificação segundo a finalidade	9
II.4 - Classificação segundo a configuração	9
II.5 - Descrição das camadas de um duto flexível de camadas não aderentes	11
II.5.1 - Carcaça intertravada	12
II.5.2 - Camada plástica interna	13
II.5.3 - Armadura de pressão	13
II.5.4 - Camada plástica antidesgaste	14
II.5.5 - Armadura de tração	14
II.5.6 - Camada plástica externa	15
II.5.7 - Camadas adicionais	15

CAPÍTULO III

MODELOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE LOCAL DE DUTOS FLEXÍVEIS DE CAMADAS NÃO-ADERENTES

III.1 - Modelos disponíveis para análise local de dutos flexíveis sob a ação de cargas axissimétricas	17
III.2 - Descrição do modelo numérico	20
III.2.1 - Modelagem da carcaça intertravada e da armadura de pressão	21
III.2.2 - Modelagem das camadas poliméricas	27
III.2.3 - Modelagem das armaduras de tração	28
III.2.4 - Geração das camadas	29
III.2.5 - Contato entre as camadas	29
III.2.6 - Modelagem das não linearidades de material	33
III.2.7 - Aplicações das cargas e condições de contorno	33
III.3 - Descrição do duto flexível do trabalho	34
III.4 - Análises numéricas	36
III.4.1 - Simulação do ensaio de tração	37
III.4.2 - Simulação dos ensaios de torção	43
III.4.3 - Simulação dos ensaios de torção com pré-tração aplicada	53

CAPÍTULO IV

APRESENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS

IV.1 - Avaliação do equipamento e da instrumentação utilizada	61
IV.1.1 - Células de carga	62
IV.1.2 - Flexímetros elétricos	64
IV.1.3 - Extensômetros elétricos	67
IV.2 - Correlação numérico-experimental do equipamento	68

CAPÍTULO V

ENSAIO EXPERIMENTAL DO DUTO FLEXÍVEL

V.1 - Descrição da instrumentação	77
V.1.1 - Células de carga	78
V.1.2 - Flexímetros elétricos.....	78
V.1.3 - Inclínômetros elétricos.....	81
V.1.4 - Sensores sem contato.....	82
V.1.5 - Extensômetros elétricos	84
V.1.6 - Convenção de sinais	85
V.2 - Descrição dos testes realizados.....	85
V.2.1 - Ensaio de tração.....	86
V.2.2 - Ensaio de torção.....	93

CAPÍTULO VI

ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

VI.1 - Correlação numérico-experimental	96
VI.1.1 - Ensaio de tração.....	96
VI.1.2 - Ensaio de torção.....	104

CAPÍTULO VII 108

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....108

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 113

ANEXO A

VERIFICAÇÃO DA FORÇA AXIAL MÍNIMA NECESSÁRIA PARA DIMINUIR OS EFEITOS DE FLEXÃO CAUSADOS PELO PESO PRÓPRIO DO DUTO..... 118

INDICE DE FIGURAS

Figura I.1– Bacias de sedimentos identificadas no mundo (KIRBY, 2006).	1
Figura I.2 – Evolução das profundidades de exploração de petróleo (CLAUSS, 2006).....	2
Figura II.1 – Classificação dos dutos dinâmicos.....	6
Figura II.2 – (a) Duto rígido de perfuração (FIGUEIREDO, 2001), (b) Duto flexível de produção (SOUSA, 2005).	7
Figura II.3 – Duto flexível do tipo aderente (<i>bonded</i>) e não-aderente (<i>unbonded</i>) (FROUFE, 2006).	8
Figura II.4 – (a) Duto flexível de camadas não-aderentes de parede rugosa ou <i>rough bore</i> , (b) Duto flexível de camadas não-aderentes de parede lisa ou <i>smooth bore</i> (NKT, 2009).	8
Figura II.5 – Sistema de dutos flexíveis de Produção (FMC Technologies, 2008).....	9
Figura II.6 – Configurações em catenária de dutos flexíveis (LIMA, 2006).	10
Figura II.7 – Duto flexível de camadas não-aderentes e de parede rugosa (SOUSA, 2005).	11
Figura II.8 – Seção transversal de duas espiras intertravadas (CRUZ, 1996).	12
Figura II.9 – Perfil Z (API RP 17B, 1998).....	14
Figura III.1 – Modelo numérico: (a) vista frontal e (b) vista isométrica.	21
Figura III.2 – Sistema de coordenadas.	23
Figura III.3 – (a) Elemento de casca utilizado para representar a carcaça intertravada, (b) vista isométrica da carcaça intertravada (camada mais interna) e da armadura de pressão com propriedades geométricas expandidas.	27
Figura III.4 – (a) Elemento de pórtico tridimensional utilizado para representar as armaduras de tração, (b) vista isométrica da armadura de tração.	28
Figura III.5 – Representação esquemática da rigidez normal de contato.....	31
Figura III.6 – (a) Elemento utilizado para representar o contato entre as camadas do duto.	32
Figura III.7 – Aplicação das cargas e condições de contorno no modelo proposto: (a) tração atuando em uma extremidade; e (b) deslocamentos e rotações engastados na extremidade oposta.	34
Figura III.8 – Malha elaborada para análise de duto de 4”: (a) e (b) vista isométrica e detalhe de tração aplicada no extremo final em modelo sem restrição à rotação axial;	

(c) e (d) vista isométrica e detalhe de torção horária aplicada no extremo final em modelo sem restrição ao deslocamento axial.....	36
Figura III.9 – Deslocamentos axiais, em mm, devidos à tração de 500kN no duto de 4.0”: (a) rotação axial livre; e (b) rotação axial restringida nas extremidades.....	38
Figura III.10 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto: análise de tração com o extremo final livre à rotação axial.	40
Figura III.11 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto: análise de tração com o extremo final livre à rotação axial.	41
Figura III.12 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto: análise de tração com o extremo final restrito à rotação axial.....	42
Figura III.13 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto: análise de tração com o extremo final restrito à rotação axial.....	42
Figura III.14 –(a) e (b) Deslocamentos tangenciais, em mm, para torção horária de 5kNm em análises, respectivamente, sem e com restrição ao deslocamento axial nas extremidades; (c) e (d) Deslocamentos tangenciais, em mm, para torção anti-horária de 5kNm em análises, respectivamente, sem e com restrição ao deslocamento axial nas extremidades.	44
Figura III.15 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção horária de 5kNm, com o extremo final livre ao alongamento axial.	46
Figura III.16 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção horária de 5kNm, com o extremo final livre ao alongamento axial.	47
Figura III.17 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção horária de 5kNm, com o extremo final restrito ao alongamento axial. ...	47
Figura III.18 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção horária de 5kNm, com o extremo final restrito ao alongamento axial.....	48
Figura III.19 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção anti-horária de 5kNm, com o extremo final livre ao alongamento axial.	48
Figura III.20 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção anti-horária de 5kNm, com o extremo final livre ao alongamento axial.	49
Figura III.21 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção anti-horária de 5kNm, com o extremo final restrito ao alongamento axial.	49
Figura III.22 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção anti-horária de 5kNm, com o extremo final restrito ao alongamento axial.....	50

Figura III.23 – (a) e (b) Deslocamentos tangenciais, em mm, para torção horária de 5kNm, obtidos respectivamente, com pré-cargas axiais de 150kN e 450kN, em análises com restrição ao deslocamento axial nas extremidades; (c) e (d) Deslocamentos tangenciais, em mm, para torção anti-horária de 5kNm, obtidos respectivamente, com pré-cargas axiais de 150kN e 450kN, em análises com restrição ao deslocamento axial nas extremidades	54
Figura IV.1 – Vista geral da Máquina de Tração-Torção.	56
Figura IV.2 – Vista frontal e seção longitudinal do cilindro hidráulico de tração.....	57
Figura IV.3 – (a) Atuador de tração, (b) Atuador de torção.....	57
Figura IV.4 – Bombas hidráulicas utilizada no sistema de (a) tração e (b) torção.	59
Figura IV.5 – “Load Cell 01” no eixo de tração com capacidade de 1000kN na Máquina de Tração-Torção.	60
Figura IV.6 – “Load Cell 02” no eixo de torção com capacidade de 350kN na Máquina de Tração-Torção.	60
Figura IV.7 – Braço de torção da Máquina Tração-Torcão.	61
Figura IV.8 – Esquema do corpo de prova utilizado no equipamento.	62
Figura IV.9 – Corpo de prova montado no equipamento.	62
Figura IV.10 – Célula de carga “MTS 01” com capacidade de 1500kN, utilizada na calibração do “Load Cell 01”.	63
Figura IV.11 – Localização das células de carga utilizadas “MTS 01”, “Load Cell 01 e 02”.	63
Figura IV.12 – Calibração das células de carga na prensa hidráulica.....	64
Figura IV.13 – Flexímetro “Flex 01” para medir o encurtamento na extremidade final do equipamento.....	65
Figura IV.14 – Flexímetro “Flex 02” para medir o encurtamento na extremidade inicial do equipamento.....	65
Figura IV.15 – Localização dos flexímetros elétricos na Máquina de Tração-Torção.....	65
Figura IV.16 – Flexímetro “Flex 03” para medir a abertura transversal do equipamento. 66	66
Figura IV.17 – Flexímetro “Flex 04” para medir a abertura transversal do equipamento.. 66	66
Figura IV.18 – Extensômetro elétrico utilizado na instrumentação do equipamento.....	67
Figura IV.19 – Disposição dos extensômetros nas quatro seções da Máquina de Tração-Torção.....	67
Figura IV.20 – Extensômetro elétrico colado na Máquina de Tração-Torção.	68
Figura IV.21 – Modelo numérico da Máquina de Tração-Torção.....	69

Figura IV.22 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deslocamento axial da Máquina de Tração-Torção.....	69
Figura IV.23 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E01, E02, E03 e E04 na seção 01.	70
Figura IV.24 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E05 e E06 na seção 01.	71
Figura IV.25 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E07, E08, E09 e E10 na seção 01.	71
Figura IV.26 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E11, E12 e E13 na seção 01.....	72
Figura IV.27 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E14 e E15 na seção 02.	72
Figura IV.28 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E16 e E17 na seção 02.	73
Figura IV.29 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E18 e E19 na seção 03.	73
Figura IV.30 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E20 e E21 na seção 03.	74
Figura IV.31 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E22, E23 e E24 na seção 04.....	74
Figura IV.32 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E25, E26 e E27 na seção 04.....	75
Figura V.1 – Instrumentação utilizada no ensaio do duto flexível de 4".	77
Figura V.2 – (a) “ <i>Load Cell 01</i> ” utilizado para medir a força de tração; (b) “ <i>Load Cell 02</i> ” utilizado para medir a força de torção.....	78
Figura V.3 – Flexímetro “ <i>Flex 05</i> ” utilizado para medir o avanço do eixo de tração da Máquina de Tração-Torção.....	79
Figura V.4 – Flexímetro “ <i>Flex 06</i> ” utilizado para medir o avanço do eixo de torção da Máquina de Tração-Torção.....	79
Figura V.5 – Posicionamento do duto na Máquina de Tração-Torção.	80
Figura V.6 – Flexímetro “ <i>Flex 07</i> ” utilizado para medir a flecha do duto com o aumento da carga.	80
Figura V.7 – Inclinômetro “ <i>Inc 01</i> ” utilizado para medir a rotação do duto no extremo final.	81

Figura V.8 – Inclinômetro “ <i>Inc 02</i> ” utilizado para medir a rotação do duto no extremo inicial.....	81
Figura V.9 – Inclinômetro “ <i>Inc 03</i> ” utilizado para medir a rotação do braço de torção.....	82
Figura V.10 – Esquema dos sensores indutivos.....	83
Figura V.11 – Montagem dos sensores indutivos no duto flexível.....	83
Figura V.12 – Localização dos extensômetros tri axiais na camada plástica externa.....	84
Figura V.13 – Extensômetro triaxial colado na camada plástica externa.....	84
Figura V.14 – Convenção dos sinais adotados nos testes.....	85
Figura V.15 – Ciclos de carga típicos nos ensaios de tração.....	87
Figura V.16 – Alongamento axial típico obtido nos ensaios de tração com o extremo final livre e restrito à rotação axial.....	88
Figura V.17 – Rotação axial obtida no ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial.....	88
Figura V.18 – Torque obtido no ensaio de tração com o extremo final restrito à rotação axial.....	88
Figura V.19 – Variação radial típica dos ensaios de tração com o extremo final livre e restrito à rotação axial.....	88
Figura V.20 – Flecha do duto vs força axial aplicada.....	89
Figura V.21 – Variação da flecha vs força axial: ensaio de tração com o extremo livre à rotação axial.....	90
Figura V.22 – Variação da flecha vs alongamento axial: ensaio de tração com o extremo livre à rotação axial.....	90
Figura V.23 – Variação da flecha vs força axial: ensaio de tração com o extremo restrito à rotação axial.....	90
Figura V.24 – Variação da flecha vs alongamento axial: ensaio de tração com o extremo restrito à rotação axial.....	90
Figura V.25 – Rotação do braço de torção e rotação axial do duto vs força axial aplicada.....	92
Figura V.26 – Rotação do braço de torção e rotação axial do duto vs alongamento axial aplicado.....	92
Figura V.27 – Pré-carregamento típico nos ensaios de torção.....	93
Figura V.28 – Ciclos de carregamento típicos nos ensaios de torção.....	94
Figura V.29 – Variação da rotação do braço de torção e da rotação axial do duto com o tempo para o ensaio de torção horária.....	94

Figura V.30 – Variação da rotação do braço de torção e da rotação axial do duto com o tempo para o ensaio de torção anti-horária.....	95
Figura VI.1 – Alongamento axial vs força axial aplicada no ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial.....	96
Figura VI.2 – Alongamento axial vs força axial aplicada: tração com o extremo final restrito à rotação axial.....	97
Figura VI.3 – Alongamento axial vs rotação axial: tração com o extremo final livre à rotação axial.....	98
Figura VI.4 – Alongamento axial vs torque: tração com o extremo final restrito à rotação axial.....	99
Figura VI.5 – Alongamento axial vs variação radial: tração com o extremo final livre à rotação axial.....	100
Figura VI.6 – Alongamento axial vs variação radial: tração com o extremo final restrito à rotação axial.....	101
Figura VI.7 – Deformação axial na camada plástica externa vs força axial aplicada no ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial.....	102
Figura VI.8 – (a) Esquema do conector no extremo do duto, (b) Conector no extremo inicial do duto depois do ensaio de tração.....	104
Figura VI.9 – Rotação axial vs momento de torção aplicado no ensaio de torção horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.....	104
Figura VI.10 – Rotação axial vs momento de torção aplicado: torção anti-horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.....	105
Figura VI.11 – Variação radial vs rotação axial aplicado no caso de torção horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.....	107
Figura VI.12 – Força axial vs rotação axial aplicado no caso de torção horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.....	107

INDICE DE TABELAS

Tabela II.1 – Propriedades mecânicas dos aços constituintes da carcaça intertravada (BASTIAN, 2000).....	12
Tabela II.2 – Propriedades mecânicas dos materiais constituintes da camada plástica interna (BERGE <i>et al.</i> , 1992).	13
Tabela II.3 – Propriedades mecânicas dos aços constituintes das armaduras de pressão (BERGE <i>et al.</i> , 1992).....	14
Tabela II.4 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados na fabricação da armadura de tração (BERGE <i>et al.</i> , 1992).	15
Tabela II.5 – Propriedades mecânicas da fibra de aramida utilizada na fabricação da fita de reforço à compressão (HERAKOVICH, 1998, DUPONT, 1992).....	16
Tabela III.1 – Características do duto flexível de 4”.....	35
Tabela III.2 – Rigidez à tração do duto, relação entre a rotação axial e o alongamento unitário, e a relação entre a variação radial e o alongamento unitário, na análise de tração com a rotação axial livre nos extremos.....	38
Tabela III.3 – Rigidez à tração do duto, relação entre o torque axial e o alongamento unitário, e a relação entre a variação radial e o alongamento unitário, no análise de tração com a rotação axial restrita nos extremos.	39
Tabela III.4 – Rigidez à torção, relação entre o alongamento axial ou força axial e a rotação axial, e a relação entre a variação radial e rotação axial, nas simulações de torção horária e anti-horária com ou sem restrição ao deslocamento axial.....	45
Tabela III.5 –Tensões nas armaduras metálicas do duto flexível de 4” para os diferentes carregamentos de tração e torção considerando livre deslizamento entre as camadas do duto.	53
Tabela III.6 – Relações entre momento de torção e giro axial, força axial e rotação axial e variação radial e rotação axial do duto sob torção horária com pré-cargas de 150kN, 300kN e 450kN e com deslocamento axial nos extremos restringidos..	55
Tabela III.7 – Relações entre momento de torção e giro axial, força axial e rotação axial e variação radial e rotação axial do duto sob torção anti-horária com pré-cargas de 150kN, 300kN e 450kN e com deslocamento axial nos extremos restringidos.	55
Tabela IV.1 – Características dos cilindros hidráulicos de tração e torção.	57

Tabela IV.2 – Máquina de Tração-Torção: Tipos de Carregamento e Condições de Contorno.....	58
Tabela IV.3 – Comparação das deformações experimentais e numéricas	76
Tabela VI.1 – Comparação das deformações axiais, diagonais e transversais na camada plástica externa, experimentais e numéricas, no ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial.	103
Tabela VI.2 – Comparação das deformações axiais, diagonais e transversais na camada plástica externa, experimentais e numéricas, no ensaio de tração com o extremo final restrito à rotação axial.	103
Tabela VI.3 – Rigidez à torção experimental para o caso de torção horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.....	105
Tabela VI.4 – Rigidez à torção experimental para o caso de torção anti-horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.	106

GLOSSÁRIO RESUMIDO

Árvore de Natal – É um equipamento constituído por um conjunto de válvulas, cuja principal função é permitir o controle do poço de produção ou injeção.

Completação – Operação executada após a perfuração, que visa iniciar ou garantir a produção de um poço. A *completação* pode ser seca, quando a árvore de Natal se situa na plataforma, ou submarina, quando a *Árvore de Natal* é instalada na cabeça do poço no fundo do mar.

Encruamento – Quando o aço é laminado ou forjado a quente, os grãos se deformam, mas recristalizam-se imediatamente, originando novos grãos. Neste estado, as propriedades do aço são alteradas. Em geral, a tenacidade, a resistência à tração e a dureza aumentam e a ductilidade diminui.

Flowline – Duto flexível o qual é assentado no fundo do mar para conduzir óleo e/ou gás ou, ainda, serve para injetar água no poço produtor.

Manifold – Conjunto de válvulas, atuadores e controladores que recebe a produção de um grupo de poços e o exporta através de um duto único.

Offshore: Termo utilizado na indústria de petróleo referente à produção de petróleo no mar ou lagoa.

Onshore: Termo utilizado na indústria de petróleo referente à produção de petróleo em terra.

Riser – Duto de aplicação dinâmica. Liga os dutos assentados no fundo do mar ao sistema flutuante de produção.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 - Motivação

A indústria do petróleo é uma das mais importantes no presente panorama econômico e seus insumos, os hidrocarbonetos, representam a maior fonte de energia disponível na atualidade. Aproximadamente 20% da produção de petróleo e gás ocorre nas áreas *offshore*. A Figura I.1 mostra a localização das principais bacias sedimentares ao redor do globo e, por conseqüência, a localização das potenciais fontes de hidrocarbonetos.

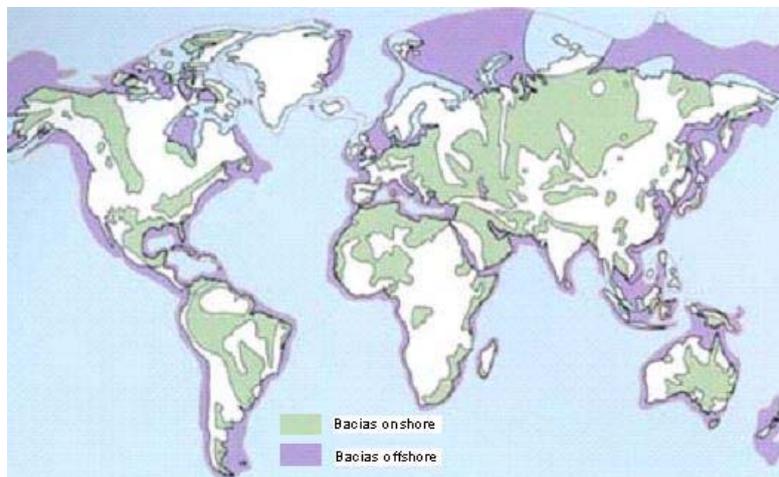


Figura I.1– Bacias de sedimentos identificadas no mundo (KIRBY, 2006).

Na procura por novos campos de petróleo e/ou gás, a indústria petrolífera está operando em águas cada vez mais profundas. Os sistemas de produção já trabalham em profundidades superiores a 2000m, e, provavelmente, atingirão maiores valores nos próximos anos. Para dar uma idéia deste processo, a Figura I.2 mostra a evolução das profundidades alcançadas por plataformas *offshore* em um período de 60 anos.

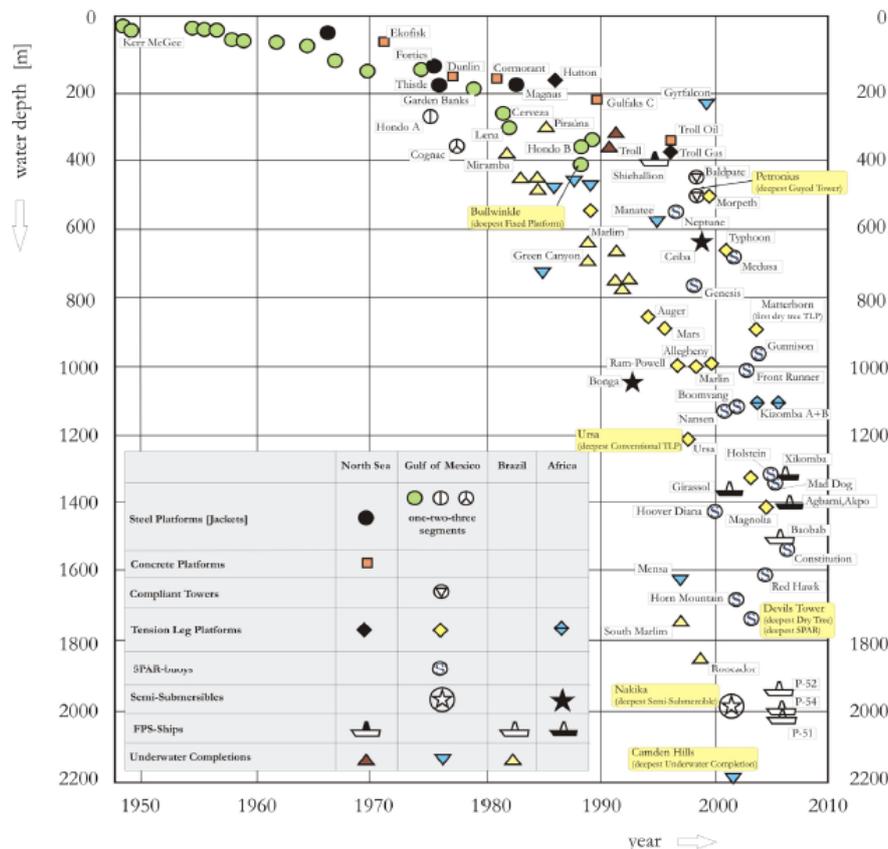


Figura I.2 – Evolução das profundidades de exploração de petróleo (CLAUSS, 2006).

Com o aumento da profundidade de instalação das plataformas petrolíferas, também cresce a importância de alguns componentes estruturais como é o caso dos dutos de produção, os quais representam um dos maiores desafios tecnológicos da indústria do petróleo.

Existem dois tipos de dutos para o transporte de fluidos na indústria petrolífera: os dutos estáticos ou *flowlines*, os quais são assentados no fundo do mar para escoar óleo e/ou gás do poço até o *manifold* e/ou para injetar água nos poços; e os dutos dinâmicos ou *risers*, que são amplamente empregados pela indústria de petróleo e gás no transporte de fluidos do fundo do mar até as unidades flutuantes de produção. É por esse motivo que os *risers* estão diretamente associados à viabilidade técnica e econômica do projeto. Estes dutos podem ser rígidos ou flexíveis e maiores detalhes serão apresentados no capítulo II.

1.2 - Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal calibrar um modelo numérico, a partir de resultados de ensaios experimentais, de maneira a permitir que seja possível prever o comportamento estrutural de um duto flexível de camadas não-aderentes. Aqui, um duto flexível de 4" submetido aos carregamentos de tração e torção horária e anti-horária, considerando diferentes condições de contorno, é analisado através de um modelo tridimensional, não linear, baseado no método dos elementos finitos (MEF). Os resultados deste modelo são comparados aos obtidos nos testes experimentais, nos quais foram utilizados um pórtico metálico capaz de aplicar simultaneamente cargas de tração e de torção.

1.3 - Metodologia

Para atingir os objetivos propostos, foram realizados testes experimentais no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ em um duto flexível de camadas não-aderentes de 4" empregando um pórtico metálico.

Inicialmente, foi feita a calibração das células de carga da estrutura com a ajuda de um corpo de prova metálico chegando até uma carga axial máxima 400kN e uma torção máxima de 60kNm. Em seguida, foram realizados os ensaios de tração e torção para se conhecer a resposta de um duto flexível sob tração pura ou sob tração e torção combinadas e considerando diferentes condições de contorno: com e sem os extremos livres à rotação axial; e com os extremos restritos ao deslocamento axial, respectivamente. Monitorou-se a força aplicada, os deslocamentos e rotações axiais, assim como a variação do deslocamento radial no duto flexível. Finalmente, calibrou-se um modelo numérico para análise da resposta da estrutura a estes tipos de solicitações e seus resultados foram comparados aos ensaios experimentais realizados.

I.4 - Estado da arte

Cabe ressaltar que, quando os dutos trabalham em águas profundas e/ou ultra-profundas, as cargas ambientais são muito intensas. Assim, podem acontecer falhas estruturais, que eventualmente geram vazamento de petróleo no mar, produzindo resultados catastróficos no sentido econômico e ambiental. Nesse caso, uma alternativa é o uso de dutos flexíveis, os quais são projetados para resistir a grandes movimentos e cargas devida a sua grande flexibilidade.

Dentro deste contexto, é necessário entender o comportamento estrutural do duto flexível e, em especial, a distribuição de tensões e deformações ao longo de suas camadas. Para esta tarefa, existem, basicamente, dois tipos de modelos para análise da resposta a carregamentos axissimétricos: os analíticos, que, em geral, desenvolveram-se a partir do modelo proposto por FERET & BOURNAZEL (1987); e os numéricos, que, em geral, baseiam-se no método dos elementos finitos (MEF) para modelar as camadas do duto flexível.

WITZ (1996) aponta que a rigidez à tração prevista por diferentes modelos analíticos para um duto de 2.5" foram muito próximas à rigidez medida experimentalmente. Ao contrário, as previsões dos modelos analíticos para a torção não foram muito acuradas em comparação à média experimental. Essas diferenças são, segundo WITZ (1996), devidas às hipóteses assumidas pelos modelos analíticos considerados, os quais, dentre outras, não consideram perda de contato entre as camadas e consideram a hipótese de seções transversais planas após o carregamento.

Por outro lado, alguns modelos numéricos foram comparados, no caso do carregamento de tração, aos modelos analíticos e os resultados obtidos apresentam excelente concordância (SOUSA, 2005). O comportamento à torção, porém, ainda não foi detalhadamente abordado. Apenas SOUSA (2005) apresentou uma breve comparação de um modelo numérico baseado no MEF com os resultados apresentados por WITZ (1996). Apesar da razoável correlação entre resultados numéricos e experimentais, algumas dúvidas sobre os ensaios realizados por WITZ (1996) foram levantadas tais como as pequenas cargas de torção aplicadas e a validade, portanto, das curvas torque-torção obtidas.

Deste modo, na tentativa de dirimir essas dúvidas, o principal objetivo deste trabalho é a correlação do modelo numérico para análise local de dutos flexíveis pelo MEF proposto por SOUSA (2005) aos resultados de ensaios experimentais realizados na COPPE/UFRJ para um duto flexível de camadas não-aderentes e de parede rugosa de diâmetro interno 4”.

1.5 - Descrição dos capítulos

O presente trabalho está dividido em capítulos, conforme especificado a seguir:

- No capítulo II, apresenta-se a classificação de alguns tipos de dutos e também se descreve detalhadamente a estrutura interna de um típico duto flexível de camadas não-aderentes.
- No capítulo III, descreve-se sucintamente o modelo numérico baseado no método dos elementos finitos para a análise da resposta de dutos flexíveis submetidos a cargas de tração e torção.
- No capítulo IV, apresenta-se a descrição dos testes do equipamento utilizado nos ensaios, bem como a sua instrumentação e calibração.
- No capítulo V, discutem-se os diferentes aspectos dos ensaios realizados com o duto flexível de 4”.
- No capítulo VI, analisam-se os resultados obtidos pelo ensaio experimental e se comparam estes aos valores obtidos através do modelo numérico descrito no capítulo III.
- No Capítulo VII, as conclusões gerais do trabalho são apontadas e pesquisas futuras são propostas.

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DOS DUTOS FLEXÍVEIS

Dada a importância dos dutos para a indústria de petróleo e com o intuito de trazer um maior nível de informação para este trabalho, será apresentada, neste capítulo, uma descrição geral dos dutos dinâmicos e algumas possíveis classificações.

A Figura II.1 mostra, de forma resumida, a classificação dos dutos dinâmicos, sendo apresentado nos próximos itens uma descrição mais detalhada de cada um dos pontos apresentado nesta figura.

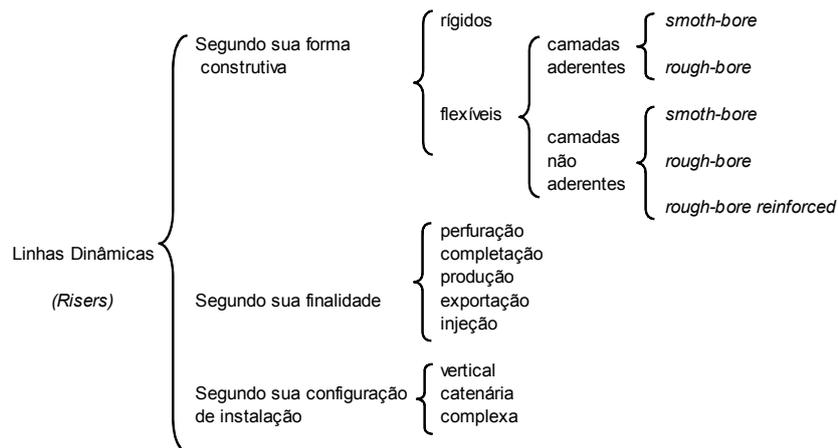


Figura II.1 – Classificação dos dutos dinâmicos.

II.1 - Classificação segundo sua forma construtiva

Os dutos dinâmicos podem ser de dois tipos de acordo com o material empregado na sua fabricação: rígidos ou flexíveis. Os dutos rígidos (Figura II.2a) são usualmente formados por aço, mas também podem ser feitos de titânio ou compósitos. Os dutos flexíveis (Figura II.2b) são compostos por camadas intercaladas de diferentes materiais, como aço e materiais poliméricos.

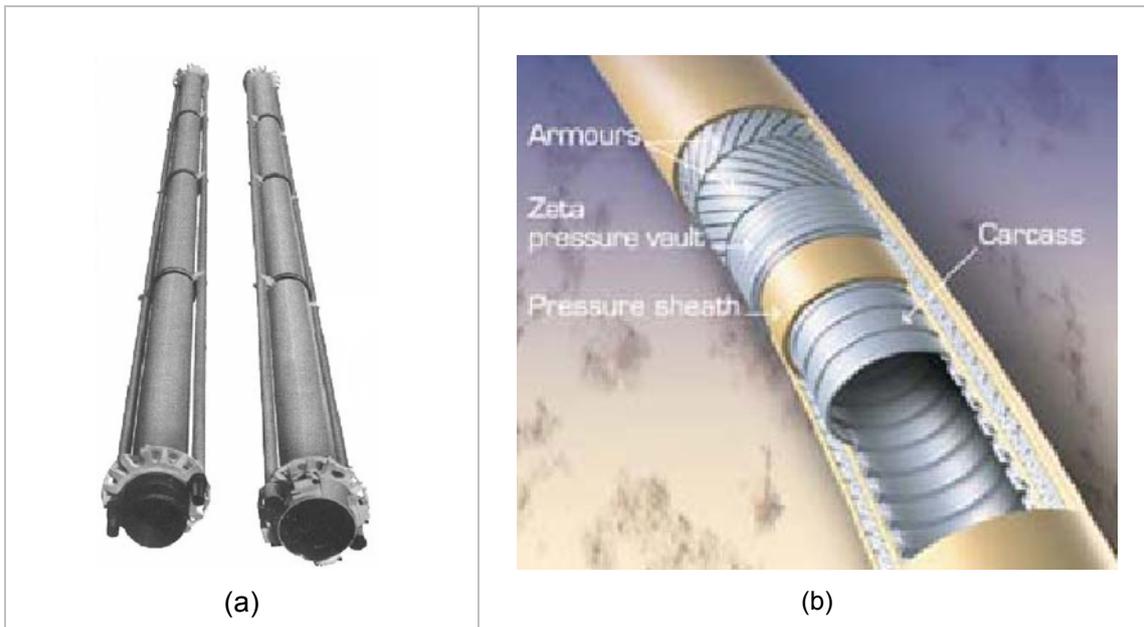


Figura II.2 – (a) Duto rígido de perfuração (FIGUEIREDO, 2001), (b) Duto flexível de produção (SOUSA, 2005).

Os dutos flexíveis em comparação aos dutos rígidos apresentam vantagens tais como maior flexibilidade, pré-fabricação, capacidade de armazenamento de grandes comprimentos em carretéis, custos de instalação e transporte mais baixos, possibilidade de uso em unidades de produção altamente complacentes, assim como facilidade de serem desinstaladas e reinstaladas em outros campos de produção. As desvantagens que apresentam os dutos flexíveis são: custo médio elevado e grande número de variáveis (atrito, folgas, etc.) para a sua análise estrutural.

Os dutos flexíveis podem ser de dois tipos: de camadas aderentes (*bonded*) e de camadas não-aderentes (*unbonded*). Os dutos flexíveis de camadas aderentes têm como principal característica a vulcanização de seus componentes metálicos em uma matriz de elastômero impedindo o deslizamento entre as camadas. Por outro lado, os dutos flexíveis de camadas não-aderentes se caracterizam pelo livre deslizamento de suas camadas umas em relação às outras. Desta forma, nas interfaces das camadas, surgem tensões de atrito que podem gerar desgaste. A Figura II.3 ilustra as camadas típicas destes dois tipos de dutos flexíveis.

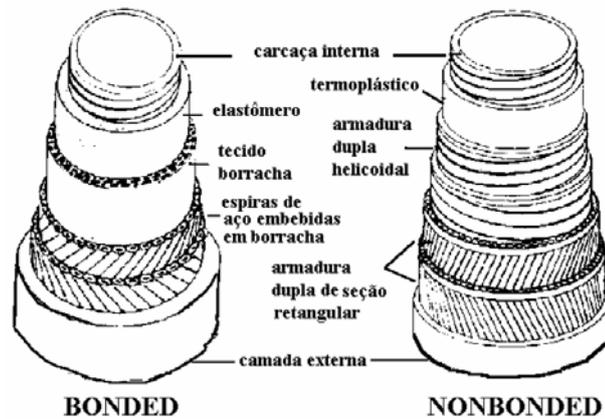


Figura II.3 – Duto flexível do tipo aderente (*bonded*) e não-aderente (*unbonded*) (FROUFE, 2006).

Ainda podemos fazer outra classificação dos dutos flexíveis de camadas não-aderentes: dutos de parede rugosa ou *rough bore* e dutos de parede lisa ou *smooth bore*. Os dutos de parede rugosa (Figura II.4a) possuem como camada interna uma estrutura metálica disposta de modo helicoidal, denominada carcaça intertravada, e são utilizados para o transporte de gases ou fluidos que contenham fases gasosas. A carcaça intertravada evita o colapso da estrutura em virtude de uma queda da pressão interna do duto flexível. Este tipo de duto pode possuir, ainda, uma armadura de pressão, caracterizando o duto de parede rugosa com reforço à pressão. Os dutos de parede lisa (Figura II.4b) não possuem carcaça intertravada. São utilizados no transporte de fluidos que não possuem gases que poderiam permear através das camadas poliméricas, neste tipo de estrutura, são a camada mais interna e a camada acima da armadura de pressão.

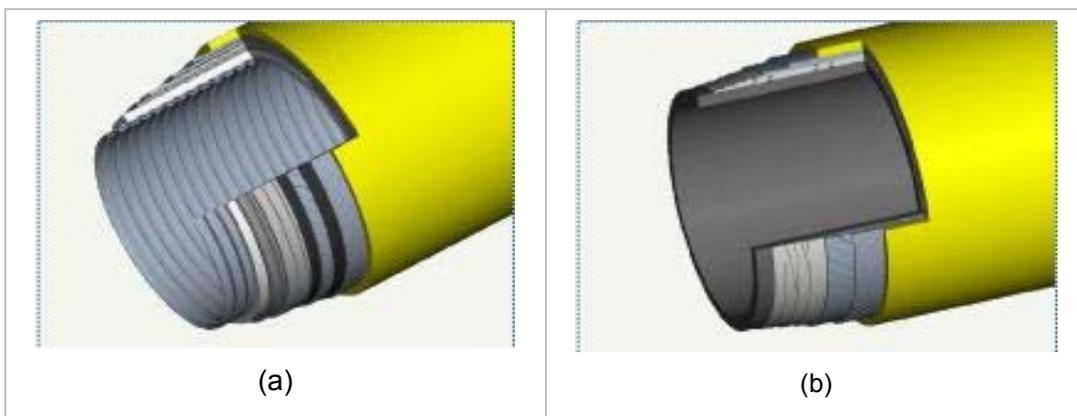


Figura II.4 – (a) Duto flexível de camadas não-aderentes de parede rugosa ou *rough bore*, (b) Duto flexível de camadas não-aderentes de parede lisa ou *smooth bore* (NKT, 2009).

II.2 - Classificação segundo a finalidade

Outra forma de classificação dos dutos é de acordo com sua finalidade. Podem-se ter dutos de perfuração, *completação*, produção e injeção. Os dutos de perfuração e *completação* apresentam geometria vertical e o material que os constituem, em geral, é o aço, mas também pode ser feito de titânio ou compósitos. Os dutos de produção ou injeção apresentam tipicamente geometria em catenária, muito embora também possam ser verticais, e são rígidos ou flexíveis. A Figura II.5 mostra um sistema de dutos de produção fazendo a ligação da árvore de natal molhada (ANM) até o *manifold* submarino de produção (MSP), e do MSP até o sistema flutuante.

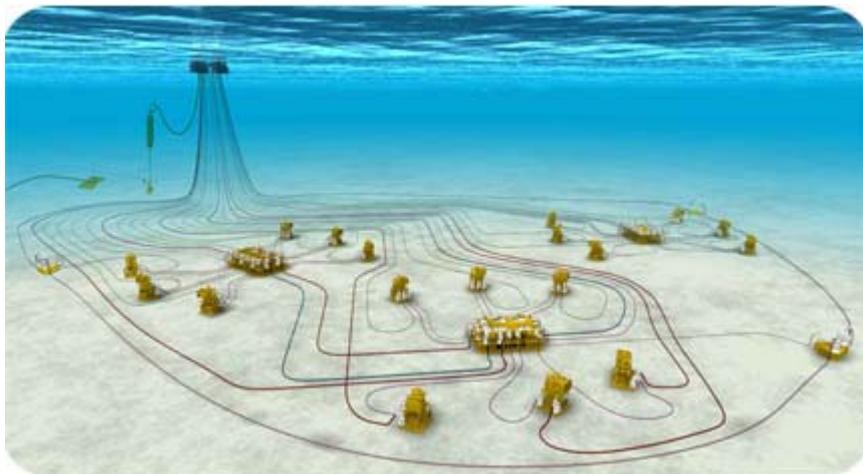


Figura II.5 – Sistema de dutos flexíveis de Produção (FMC Technologies, 2008).

II.3 - Classificação segundo a configuração

Pode-se ainda ter outra classificação dos dutos, de acordo com sua configuração de instalação: verticais e em catenária.

Na configuração vertical, aplica-se uma força de tração no extremo superior (topo) com a finalidade de manter o duto sempre tracionado, evitando a sua flambagem.

Na configuração em catenária, as extremidades superiores e inferiores não estão no mesmo alinhamento vertical, assim os dutos podem assumir diferentes configurações em catenária como “*Steep Wave*”, “*Lazy Wave*”, “*Steep S*”, “*Lazy S*”, dentre outras (Figura II.6). Estas configurações possuem seções intermediárias com elementos, tais como bóias com ou sem sustentação de cabos de aço, que não só aliviam o peso suportado pelo sistema flutuante como também impõem forças de restauração ao sistema quando esse é submetido a solicitações laterais.

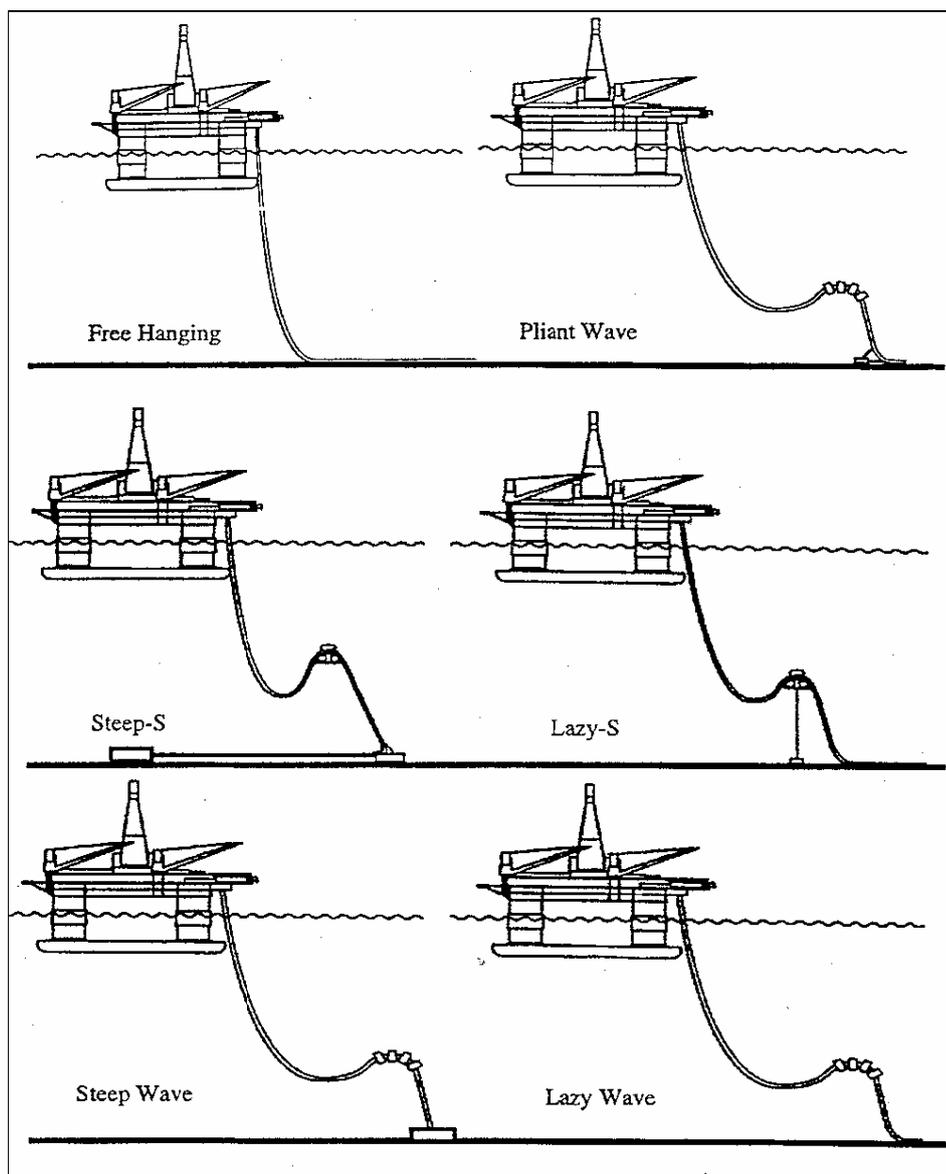


Figura II.6 – Configurações em catenária de dutos flexíveis (LIMA, 2006).

Conforme apontado anteriormente, a característica básica de um duto flexível de camadas não-aderentes é o fato de suas camadas poderem deslizar livremente entre si. Este tipo de duto atualmente é o mais usado nas instalações petrolíferas brasileiras por se adaptarem melhor a movimentos da plataforma mais severos. Por este motivo, o presente trabalho tratará do estudo desse tipo de duto apresentando, a seguir, uma descrição detalhada de cada uma das camadas que o constituem.

II.4 - Descrição das camadas de um duto flexível de camadas não aderentes

Os dutos flexíveis de camadas não-aderentes (Figura II.7) são compostos por diversas camadas independentes que interagem entre si. Assim, cada uma pode ser projetada para atender a fins específicos. As camadas mais comuns deste tipo de duto são apresentadas a seguir.



Figura II.7 – Duto flexível de camadas não-aderentes e de parede rugosa (SOUSA, 2005).

II.4.1 - Carcaça intertravada

Formada por uma ou duas fitas de aço carbono inoxidável ou aço liga de alta resistência, com seção transversal complexa (Figura II.8), enrolada em espiral de pequeno passo com ângulo de assentamento próximo a 90°. Tem como funções prevenir o colapso por queda abrupta de pressão, resistir a cargas radiais e à abrasão causada pelo fluido transportado.



Figura II.8 – Seção transversal de duas espiras intertravadas (CRUZ, 1996).

A Tabela II.1 apresenta as principais características de alguns dos tipos de aços utilizados na fabricação da carcaça intertravada (BASTIAN, 2000).

Tabela II.1 – Propriedades mecânicas dos aços constituintes da carcaça intertravada (BASTIAN, 2000).

Tipo de aço	Tensão de	Ruptura	
	Escoamento (MPa)	Tensão (MPa)	Deformação (%)
*304 / 304 L	310	620	30
*316 / 316 L	310	620	30 / 40
**409	205	380	20
**430	205	450	22
***UNS S31803	450	620	25

(*) Aço inoxidável austenítico

(**) Aço inoxidável ferrítico

(***) Aço inoxidável Duplex

Convém destacar que as propriedades apresentadas na Tabela II.1 não consideram o efeito do encruamento do aço durante o processo de fabricação da carcaça intertravada.

II.4.2 - Camada plástica interna

Tem como função manter a estanqueidade do duto. Utiliza-se, para sua fabricação, materiais termoplásticos como a poliamida 11 (PA 11) ou “nylon 11”, mais em condições de carregamentos menos severos pode ser utilizado polietileno de alta densidade (HDPE) ou ainda o polifluoreto de vinilideno (PVDF). A Tabela II.2 mostra as propriedades mecânicas de alguns polímeros utilizados em dutos flexíveis de camadas não-aderentes.

Tabela II.2 – Propriedades mecânicas dos materiais constituintes da camada plástica interna (BERGE *et al.*, 1992).

Denominação	Tipo	Massa Específica (g/cm ³)	Limite de Resistência (MPa)	Deformação Última (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Rilsan	PA 11	1.06	28	60	380
BENSO P40 TL					
Finatileno	HDPE	0.95	16	14	585
3802N	PVDF	1.77	23	63	785

As propriedades mostradas na Tabela II.2 correspondem à temperatura de 20° C. Esta menção é importante, visto que as propriedades dos polímeros mudam com a variação da temperatura.

II.4.3 - Armadura de pressão

Camada helicoidal formada por um ou dois arames de aço carbono com baixo, médio ou alto teor, usualmente em forma de Z (Figura II.9), com ângulo de assentamento próximo a 90°. Tem como função resistir à pressão interna e/ou externa ou lançamento.



Figura II.9 – Perfil Z (API RP 17B, 1998).

A Tabela II.3 apresenta as principais características dos aços utilizados na fabricação das armaduras de pressão (BERGE *et al.*, 1992).

Tabela II.3 – Propriedades mecânicas dos aços constituintes das armaduras de pressão (BERGE *et al.*, 1992).

Especificação	Denominação	Acabamento	Limite de Resistência (MPa)	Deformação Última (%)
AFNOR	FM 15	Trefilado a frio	784	-
AFNOR	FM 35	Trefilado a frio	850	6.0

II.4.4 - Camada plástica antidesgaste

Camada polimérica que tem a função de minimizar o desgaste entre as armaduras metálicas e a armadura de pressão. O material constituinte destas camadas geralmente é PA11, PA12, HDPE, XLPE (Polietileno reticulado) ou PVDF. As propriedades mecânicas de alguns destes polímeros são mostradas na Tabela II.2.

II.4.5 - Armadura de tração

Usualmente são compostas por duas ou quatro camadas constituídas por arames de aço carbono de seção transversal geralmente retangular com forma achatada ou arredondada, assentados contra-helicamente em ângulos entre 20° e 60°. Tem como função resistir a cargas axiais e pressão interna. A Tabela II.4 apresenta as principais características dos aços utilizados na fabricação das armaduras de tração (BERGE *et al.*, 1992).

Tabela II.4 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados na fabricação da armadura de tração (BERGE *et al.*, 1992).

Especificação	Denominação	Acabamento	Limite de Resistência (MPa)	Deformação Última (%)
AFNOR	FM 60	Trefilado a frio	1373	-
AFNOR	FM 72	Trefilado a frio	1500	1.0

II.4.6 - Camada plástica externa

Camada polimérica constituída por PA11, PA12 ou HDPE. Tem como função proteger ao duto contra corrosão, abrasão e danos externos, além de ajudar no isolamento térmico. As propriedades mecânicas de alguns destes polímeros são mostradas na Tabela II.2.

II.4.7 - Camadas adicionais

Adicionalmente às camadas apresentadas nos itens anteriores, podem se encontrar outras camadas poliméricas nos dutos flexíveis:

- *Camada isolante*: camada polimérica de Poliuretano (PU), Polipropileno (PP) ou policloreto de vinila (PVC). Tem como função isolar termicamente o duto flexível e garantir o escoamento.
- *Fita de reforço à compressão*: camada polimérica de fibra de aramida (*kevlar*®). Previne a expansão radial excessiva das armaduras de tração do duto flexível quando essa é solicitada por cargas compressivas axiais. Algumas das propriedades mecânicas deste polímero são mostradas na Tabela II.5.

Tabela II.5 – Propriedades mecânicas da fibra de aramida utilizada na fabricação da fita de reforço à compressão (HERAKOVICH, 1998, DUPONT, 1992).

Material	Massa Específica (g/cm ³)	Limite de Resistência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Módulo de Elasticidade (GPa)
kevlar®	1.44	3620	0.34	124

CAPÍTULO III

MODELOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE LOCAL DE DUTOS FLEXÍVEIS DE CAMADAS NÃO-ADERENTES

Os primeiros modelos propostos para a análise local de dutos flexíveis eram baseados em formulações analíticas, isto é, em equações de continuidade e equilíbrio e, alguns utilizaram teorias de vigas curvas para uma melhor representação dos arames das armaduras metálicas.

A evolução da capacidade de processamento dos micro-computadores começou a viabilizar a análise de dutos flexíveis através de métodos numéricos como o método dos elementos finitos (MEF) levando a outro conjunto de modelos. O uso deste método permitiu a elaboração do modelo numérico para análise local de dutos flexíveis proposto por SOUSA (2005), o qual será descrito a seguir.

III.1 - Modelos disponíveis para análise local de dutos flexíveis sob a ação de cargas axissimétricas

O problema da avaliação da resposta estrutural local dos dutos flexíveis tem sido tratado na literatura com modelos analíticos e numéricos assim como também com testes experimentais. A maioria deles foram desenvolvidos para prever a resposta para moderadas cargas axissimétricas ou de flexão.

Pelo lado dos modelos analíticos, FERET & BOURNAZEL (1987) formularam um conjunto de equações lineares que avalia a resposta de dutos flexíveis compostos por camadas tubulares concêntricas e armaduras helicoidais. WITZ & TAN (1992) propuseram um modelo analítico não linear voltado para a determinação do comportamento estrutural à tração e torção de dutos flexíveis. O modelo considera que as camadas poliméricas são tubos de paredes finas e permite a avaliação do deslocamento

radial, da variação de espessura, das deformações e tensões em cada camada do duto flexível. Recentemente, CUSTÓDIO & VAZ (2002) e SAEVIK & BRUASETH (2005) propuseram modelos analíticos capazes de considerar não linearidades geométricas, de material e de contato nas análises de cabos umbilicais. Estes autores também apresentaram em forma detalhada resultados de ensaios experimentais em cabos umbilicais submetidos a cargas axissimétricas.

Pelo lado dos modelos numéricos, RIBEIRO *et al.* (2003), baseando-se nos trabalhos anteriores de CRUZ (1996) e SOUSA (1999), apresentaram um modelo tridimensional em elementos finitos para estudar a resposta dos dutos flexíveis submetidos a carregamentos de tração ou compressão axial puros. O modelo consistiu em um sanduíche de cascas finas concêntricas as quais representam a carcaça intertravada, a armadura de pressão e todas as camadas poliméricas. Os arames da armadura de tração foram modelados com elementos de pórtico tridimensionais. A interação entre as camadas foi estabelecida com molas não lineares. Recentemente, BAHTUI *et al.* (2008) estudaram a resposta de um duto flexível com cinco camadas (três camadas poliméricas e um par de armaduras de tração) submetido à tração pura com um detalhado modelo tridimensional em elementos finitos. Neste modelo, as camadas são representadas com elementos sólidos isoparamétricos de oito nós. Elementos de contato são definidos entre cada camada e não é considerado o contato entre os arames de uma mesma armadura metálica. O atrito entre as camadas é considerado. Segundo os autores, boa concordância entre o modelo proposto e modelos analíticos foi encontrada, mas o modelo exigiu grande esforço computacional. Além disso, as análises apresentadas não consideram a presença da carcaça intertravada e/ou da armadura de pressão as quais poderiam provavelmente levar a um modelo ainda mais complexo.

Além dos trabalhos teóricos citados, existem dois trabalhos experimentais que merecem ser mencionados: o estudo apresentado por WITZ (1996) e, recentemente, o trabalho de RAMOS Jr *et al.* (2008).

WITZ (1996) realizou um interessante estudo no qual a rigidez axial e à torção de um duto flexível de 2.5" foram obtidas experimentalmente considerando diferentes condições de contorno nos extremos do duto. A rigidez à flexão também foi estimada experimentalmente com diferentes níveis de pressão interna. O autor descreveu

detalhadamente as camadas internas do duto e propôs um “teste cego” a diferentes instituições. Esse teste consistia na avaliação da resposta estrutural do duto flexível de 2.5” através dos modelos teóricos empregados por cada uma das instituições sem que se conhecesse de antemão a resposta experimental. De uma maneira geral, os resultados fornecidos pelos modelos teóricos apresentaram boa concordância com os resultados experimentais no que diz respeito à resposta estrutural à tração e à torção do duto. Os resultados relativos à flexão, no entanto, foram muito dispersos. WITZ (1996) indica que a consideração principal para prever corretamente o comportamento estrutural local de um duto flexível é ter em conta a interação entre todas suas camadas. Além disso, um estudo considerando carregamentos combinados de tração, torção, pressão e flexão foram sugeridos assim como mais ensaios para corroborar os resultados experimentais apresentados.

RAMOS Jr. *et al.* (2008) apresentaram recentemente um conjunto de ensaios experimentais de um duto flexível de 2.5”, a fim de estudar sua resposta à tração e torção. O duto foi submetido à tração com e sem pressão interna e com diferentes condições de contorno nos seus extremos. A estrutura interna do duto flexível é detalhadamente descrita e os resultados experimentais foram comparados aos resultados de um modelo analítico. Os autores indicam que o modelo analítico empregado previu adequadamente a rigidez axial do duto e a deformação média nos arames da armadura de tração externa. No entanto, o torque ou rotação no duto derivado da tração aplicada tem um comportamento altamente não linear e, portanto, o modelo analítico utilizado não conseguiu avaliar de forma satisfatória estes valores. Parte das diferenças entre os resultados foi atribuída à incapacidade dos modelos analíticos de representar o atrito interno entre as camadas. Além disso, a estrutura estudada se mostrou torque balanceada e a pressão interna não afetou a rigidez axial do duto.

Apesar da sua eficiência computacional, os modelos analíticos assumem um conjunto de simplificações que podem interferir na resposta global do duto flexível. De acordo com CUSTÓDIO & VAZ (2002), essas simplificações podem ser agrupadas em quatro grupos:

1. Regularidade da geometria inicial.
2. Redução para a análise das seções planas.
3. Desconsideração dos efeitos de cortante e atrito interno.
4. Linearidade da resposta.

Nesta dissertação, um modelo tridimensional não linear baseado no MEF capaz de modelar o duto flexível com diferentes tipos de carregamentos mecânicos é empregado na comparação com os resultados experimentais que serão posteriormente apresentados. Este modelo considera todas as camadas do duto assim como as possíveis interações entre elas. Não linearidades geométricas, de material e de contato, incluindo atrito também podem ser consideradas. Pelo exposto anteriormente, das quatro simplificações mencionadas, o modelo empregado mantém apenas a primeira. No que vem a seguir, esse modelo será sucintamente descrito.

III.2 - Descrição do modelo numérico

O modelo para análise local de dutos flexíveis baseado no MEF é capaz de modelar todas as camadas do duto flexível e possíveis interações entre elas, assim como carregamentos e condições de contorno quaisquer. Imperfeições no duto flexível, tais como *ovalizações* ou folgas entre as camadas, também podem ser modeladas.

Em linhas gerais, o modelo de elementos finitos é constituído por elementos de:

- *Casca ortotrópica*: para a modelagem da carcaça intertravada e da armadura de pressão. Uma analogia entre pórticos tridimensionais e cascas ortotrópicas permite a simplificação dos complexos perfis metálicos utilizados na construção dessas camadas. Propriedades físicas e geométricas equivalentes são calculadas e empregadas na modelagem.
- *Casca isotrópica ou ortotrópica*: para a simulação do comportamento das camadas poliméricas, dependendo do tipo de camada.
- *Pórtico espacial*: para a representação dos arames da armadura de tração.
- *Contato*: que garantem a interação entre as camadas do duto.

O modelo pode ser gerado a partir de um programa denominado *RISERTOOLS* (SOUSA, 2005) que gera automaticamente malhas de elementos finitos de um duto flexível qualquer para análise através do programa ANSYS®. Maiores detalhes sobre os aspectos teóricos podem ser obtidos em SOUSA (2005), GADÉA *et al.* (2007) ou SOUSA *et al.* (2008). Uma vista geral desse modelo é apresentada na Figura III.1. A figura ilustra a malha de elementos finitos gerada para a análise local de um duto flexível, assumindo um comprimento total equivalente a dois passos da hélice descrita pelos arames da armadura externa de tração.

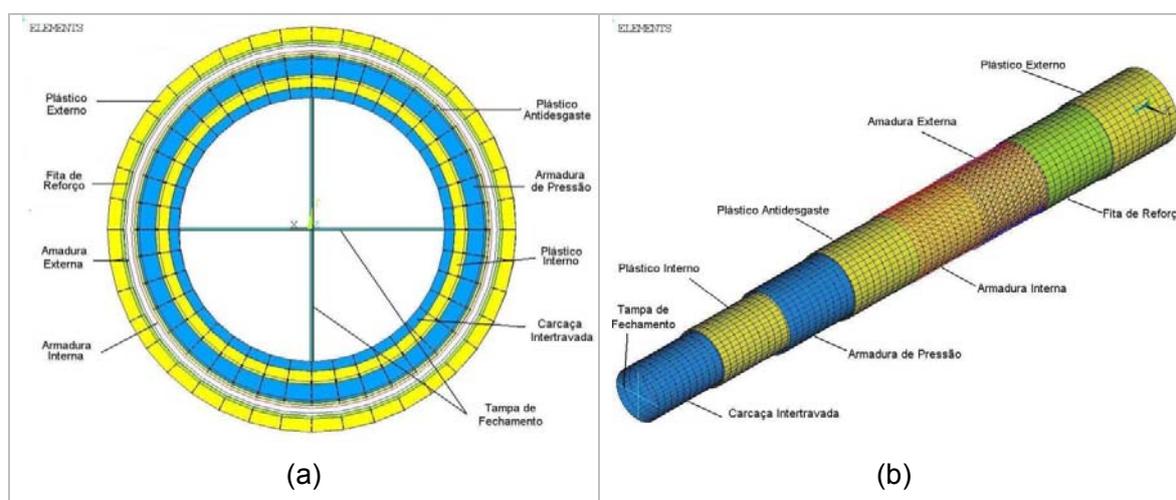


Figura III.1 – Modelo numérico: (a) vista frontal e (b) vista isométrica.

III.2.1 - Modelagem da carcaça intertravada e da armadura de pressão

A carcaça intertravada e a armadura de pressão, como apontado no item II.4, são constituídas por um ou mais arames com seção transversal bastante complexa (Figuras II.8 e II.9), enrolados em torno do eixo central do duto flexível seguindo uma hélice de pequeno passo. A construção de um modelo em elementos finitos com sólidos tridimensionais para representar a carcaça intertravada e a armadura de pressão, é por si só, uma tarefa árdua e de elevado custo computacional (BAHTUI *et al.*, 2008), devido ao grande número de graus de liberdade envolvidos. Assim, uma alternativa capaz de reduzir o número de graus de liberdade, e ao mesmo tempo, modelar adequadamente essas camadas é necessária.

HOBBS & RAOOF (1982) e RAOOF & HOBBS (1984) trataram o problema de estabelecer as propriedades mecânicas de cabos de aço, desenvolvendo um modelo no qual as várias camadas de arames helicoidais foram substituídas por cascas ortotrópicas equivalentes. Baseando-se nesta abordagem, vários problemas relacionados à resposta estática e dinâmica de cabos de aço foram estudados com sucesso (KRAINCANIC, 1995). Assim, nesta dissertação, uma analogia entre arames helicoidais e cascas ortotrópicas também é estabelecida considerando elementos finitos apropriados, de acordo com o exposto por SOUSA (2005). A idéia principal é assegurar que ambas as estruturas (arame helicoidal e casca ortotrópica) tenham as mesmas rigidezas e tensões nas fibras extremas (interior e exterior).

Analogia entre arames helicoidais e cascas ortotrópicas

Tendo em vista as folgas existentes nessas camadas e o elevado ângulo de assentamento dos arames ($\approx 90^\circ$) que as constituem, estabelecem-se duas hipóteses (SOUSA, 2005):

1. O atrito interno na carcaça intertravada e na armadura de pressão é desprezível.
2. Não há interação entre a direção de assentamento dos arames e a direção normal a elas tanto na carcaça intertravada como na armadura de pressão.

Adicionalmente, mais duas hipóteses são assumidas:

3. As espessuras da carcaça intertravada e da armadura de pressão são pequenas em comparação ao diâmetro interno de cada camada.
4. As deformações cisalhantes são desprezadas, isto é, admite-se que a normal à superfície média antes da deformação permanece normal após a deformação.

Considerando as hipóteses 1 a 4, a carcaça intertravada e a armadura de pressão podem ser vistas como cascas ortotrópicas. Por isso, considerando os eixos coordenados mostrados na Figura III.2, estabelecem-se as seguintes relações tensão - deformação:

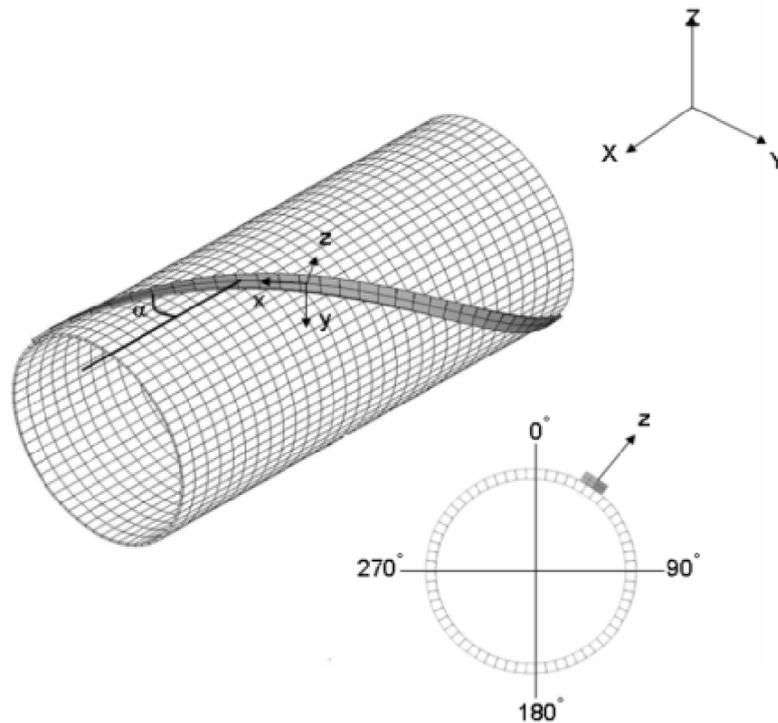


Figura III.2 – Sistema de coordenadas.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{s_x} = \frac{E_{s_x}}{1 - \nu_{s_{xy}} \cdot \nu_{s_{yx}}} \cdot \varepsilon_{s_x} + \frac{E_{s_x} \cdot \nu_{s_{yx}}}{1 - \nu_{s_{xy}} \cdot \nu_{s_{yx}}} \cdot \varepsilon_{s_y} \\ \sigma_{s_y} = \frac{E_{s_y} \cdot \nu_{s_{xy}}}{1 - \nu_{s_{xy}} \cdot \nu_{s_{yx}}} \cdot \varepsilon_{s_x} + \frac{E_{s_y}}{1 - \nu_{s_{xy}} \cdot \nu_{s_{yx}}} \cdot \varepsilon_{s_y} \\ \tau_{s_{xy}} = G_{s_{xy}} \cdot \gamma_{s_{xy}} \end{array} \right. \quad (\text{III.1})$$

onde σ_s e τ_s são, respectivamente, as tensões normal e de cisalhamento na casca; ε_s e γ_s são, respectivamente, sua elongação e distorção angular; E_s , G_s e ν_s são, nessa ordem, o módulo de Young, o módulo de elasticidade transversal e o coeficiente de Poisson do material que constitui a casca; e os subscritos x e y indicam a direção para a qual os valores mencionados são referidos.

Segundo as hipóteses 1 e 2, os arames da carcaça intertravada e da armadura de pressão não resistem a carregamentos normais à direção de assentamento (direção do eixo x) e, conseqüentemente, pode ser assumido que $E_{s_y} = 0$ e $v_{s_{yx}} = v_{s_{xy}} = 0$. Desse modo na Eq. (III.1) se tem:

$$\sigma_{s_x} = E_{s_x} \cdot \varepsilon_{s_x}, \sigma_{s_y} = 0, \tau_{s_{xy}} = G_{s_{xy}} \cdot \gamma_{s_{xy}} \quad (\text{III.2})$$

Considerando a Eq. (III.2), as rigidezas da casca ortotrópica equivalente de acordo com TIMOSHENKO & WOINOWSKY KRIEGER (1959) é dada por:

$$(EA)_s = h_s \cdot E_{s_x}, (EI)_s = \left(\frac{h_s^3}{12}\right) \cdot E, (GJ)_s = \left(\frac{h_s^3}{3}\right) \cdot G_{s_{xy}} \quad (\text{III.3})$$

onde $(EA)_s$, $(EI)_s$ e $(GJ)_s$ são respectivamente, a membrana, rigidez flexional e a rigidez torsional da casca ortotrópica e h_s é sua espessura.

As rigidezas de um arame helicoidal, de acordo com TIMOSHENKO & WOINOWSKY KRIEGER (1959), são dadas por:

$$(EA)_t = \left(\frac{A \cdot n_t}{L_p}\right) \cdot E, (EI)_t = \left(\frac{I_{eq} \cdot n_t}{L_p}\right) \cdot E, (GJ)_t = \left(\frac{J \cdot n_t}{L_p}\right) \cdot G \quad (\text{III.4})$$

onde $(EA)_t$, $(EI)_t$ e $(GJ)_t$ são respectivamente as rigidezas axial, de flexão e de torção do arame; E e G são os módulos de Young e de elasticidade transversal do material que constitui o arame; n_t é o numero de arames na camada considerada, a qual é, geralmente, 1 para a carcaça intertravada e 1 ou 2 para a armadura de pressão; A e J são a área da seção transversal e a constante de torção do arame; e L_p é o passo do arame:

$$L_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{\tan(\alpha)} \quad (\text{III.5})$$

sendo R o raio médio da camada e α é o ângulo do assentamento do arame.

Recentemente, SOUZA (2002), baseado em uma série de ensaios experimentais, propôs que o momento de inércia equivalente do arame, I_{eq} , seja estimado através:

$$I_{eq} = 12 \cdot n_t \cdot \frac{I_y^2}{L_p} \cdot \frac{1 - \nu^2}{h^3} \quad (III.6)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson do material que constitui o arame e h é sua altura; I_y é o menor momento de inércia da seção transversal do arame.

Igualando as Eqs. (III.3) e (III.4) e considerando a Eq. (III.6), as propriedades físicas e geométrica equivalentes da casca ortotrópica são:

$$h_s = \sqrt{12 \cdot \frac{I_{eq}}{A}}, \quad E_{s_x} = \left(\frac{n_t \cdot A}{L_p \cdot h_s} \right) \cdot E, \quad G_{s_{xy}} = \left(\frac{3 \cdot n_t \cdot J}{L_p \cdot h_s^3} \right) \cdot G \quad (III.7)$$

Neste ponto, a relação tensão - deformação da casca ortotrópica é definida pelas Eqs. (III.2) e (III.7). Assim, as rigidezas dos arames helicoidais e da casca ortotrópica são iguais. No entanto, a equivalência entre as rigidezas do arame helicoidal e da casca ortotrópica não implica na equivalência entre as tensões. De acordo com TIMOSHENKO & WOINOWSKY KRIEGER (1959), as tensões na fibra extrema (externa e interna) da casca ortotrópica são:

$$\sigma_{s_x}^m = \frac{N_x}{h_s}, \quad \sigma_{s_x}^b = \frac{6 \cdot M_y}{h_s^2}, \quad \tau_{s_{xy}} = \frac{6 \cdot M_{xy}}{h_s^2} \quad (III.8)$$

onde $\sigma_{s_x}^m$, $\sigma_{s_x}^b$ e $\tau_{s_{xy}}$ são respectivamente, a tensão de membrana, tensão de flexão e tensão de cisalhamento nas fibras extremas da casca ortotrópica; N_x é a força normal atuante na direção x ; M_y é o momento fletor em y ; e M_{xy} é o momento de torção.

A tensão na fibra extrema do arame helicoidal, de acordo com TIMOSHENKO & WOINOWSKY KRIEGER (1959), pode ser obtida por:

$$\sigma_{t_x}^n = \frac{L_p \cdot N_x}{n_t \cdot A}, \quad \sigma_{t_x}^b = \frac{L_p \cdot h \cdot M_y}{2 \cdot n_t \cdot I_{eq}}, \quad \tau_{t_{xy}} = \frac{L_p \cdot t \cdot M_{xy}}{n_t \cdot J} \quad (\text{III.9})$$

onde $\sigma_{t_x}^n$, $\sigma_{t_x}^b$ e $\tau_{t_{xy}}$ são respectivamente, a tensão normal, tensão flexional e tensão de cisalhamento na fibra extrema dos arames; t é a espessura da fita metálica ou dos fios que formam os arames da carcaça intertravada e o da armadura de pressão.

Dividindo cada relação de tensão nas Eqs. (III.8) e (III.9), a relação entre a tensão na fibra extrema da camada dos arames helicoidais e da casca ortotrópica equivalente pode ser deduzida. Essas relações são chamadas de fatores de correção de tensão e são dadas por:

$$f_{c_m}^\sigma = \frac{L_p \cdot h_s}{n_t \cdot A}, \quad f_{c_b}^\sigma = \frac{L_p \cdot h}{n_t \cdot A}, \quad f_{c_s}^\sigma = \frac{L_p \cdot t}{n_t \cdot J} \cdot \frac{h_s^2}{6} \quad (\text{III.10})$$

sendo $f_{c_m}^\sigma$, $f_{c_b}^\sigma$ e $f_{c_s}^\sigma$, respectivamente, o fator de correção de tensões de membrana, de flexão e de cisalhamento.

Uma vez que as tensões são calculadas com o modelo proposto, a tensão na fibra extrema dos arames da carcaça intertravada e da armadura de pressão são expressas por:

$$\sigma_{t_x} = f_{c_m}^\sigma \cdot \sigma_{s_x}^m \pm f_{c_b}^\sigma \cdot \sigma_{s_x}^b, \quad \tau_{t_{xy}} = f_{c_s}^\sigma \cdot \tau_{s_{xy}} \quad (\text{III.11})$$

onde os sinais \pm se referem à fibra externa ou interna do arame.

Também é possível reescrever as Eqs. (III.8) e (III.9) em termos da deformação, para estabelecer os fatores de correção de deformações:

$$f_{c_m}^\varepsilon = 1, \quad f_{c_b}^\varepsilon = \frac{h}{h_s}, \quad f_{c_s}^\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \frac{t}{h_s} \quad (\text{III.12})$$

onde $f_{c_m}^\varepsilon$, $f_{c_b}^\varepsilon$ e $f_{c_s}^\varepsilon$ são respectivamente, fator de correção de deformações de membrana, de flexão e de corte.

As deformações na fibra extrema dos arames pode ser calculada com a Eq. (III.11) substituindo a tensão pela deformação relacionada.

Tomando por base a teoria proposta, a carcaça intertravada e a armadura de pressão podem ser representadas, por exemplo, com o elemento SHELL181 (elemento de casca não linear) do programa ANSYS® considerando propriedades ortotrópicas. Esse elemento é apresentado na Figura III.3 e possui quatro nós com seis graus de liberdade por nó: deslocamentos nas direções x , y e z e rotações em torno dos mesmos eixos.

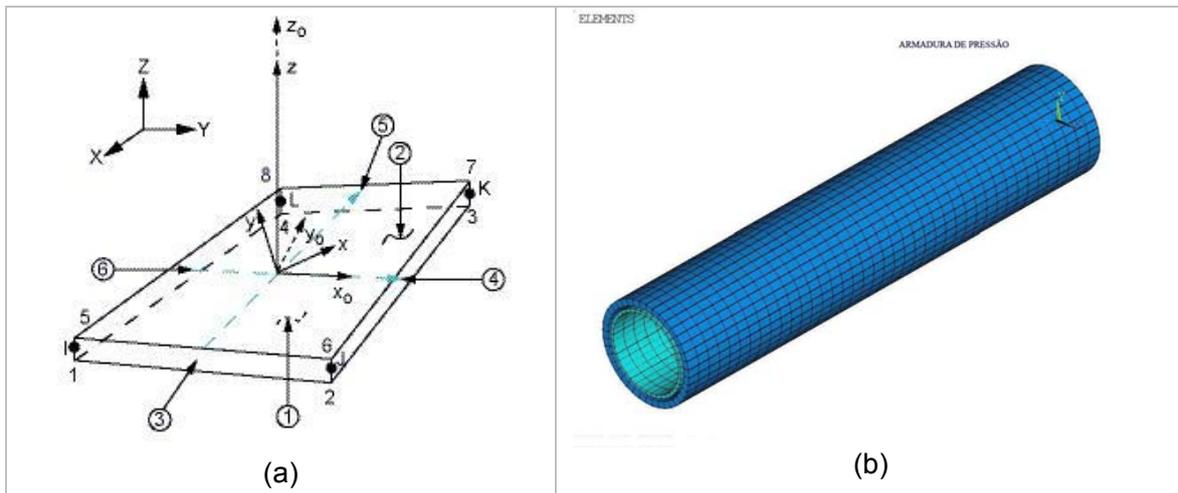


Figura III.3 – (a) Elemento de casca utilizado para representar a carcaça intertravada, (b) vista isométrica da carcaça intertravada (camada mais interna) e da armadura de pressão com propriedades geométricas expandidas.

III.2.2 - Modelagem das camadas poliméricas

As camadas poliméricas são modeladas com os mesmos elementos de casca empregados na modelagem da carcaça intertravada e da armadura de pressão (Figura III.3). Cabe ressaltar as seguintes considerações na representação das camadas poliméricas (SOUSA, 2005):

- As camadas plásticas interna e a camada plástica externa são modeladas empregando elementos com propriedades isotrópicas, tendo em vista que essas são extrusadas segundo o eixo do duto flexível.
- As camadas plásticas anti-desgaste ou de isolamento são representadas com elementos de casca ortotrópicos.
- As fitas de reforço à compressão são consideradas elementos de casca ortotrópicos. Esses elementos, porém somente são solicitados quando tracionados o que introduz um comportamento físico não linear. Na representação desta camada, são empregados elementos do tipo SHELL41 disponíveis no programa ANSYS®.

III.2.3 - Modelagem das armaduras de tração

Cada arame helicoidal das armaduras de tração é modelado com elementos de pórtico tridimensionais. Como a largura e a espessura destes arames são usualmente muito menores que o seu comprimento, eles poderiam ser considerados como estruturas esbeltas e, conseqüentemente, efeitos de cortante não são considerados. Assim, os arames das armaduras de tração foram modelados, utilizando elementos de pórtico espacial com dois nós baseados na teoria de Euler-Bernoulli (elementos BEAM4 do programa ANSYS®) como o apresentado na Figura III.4.

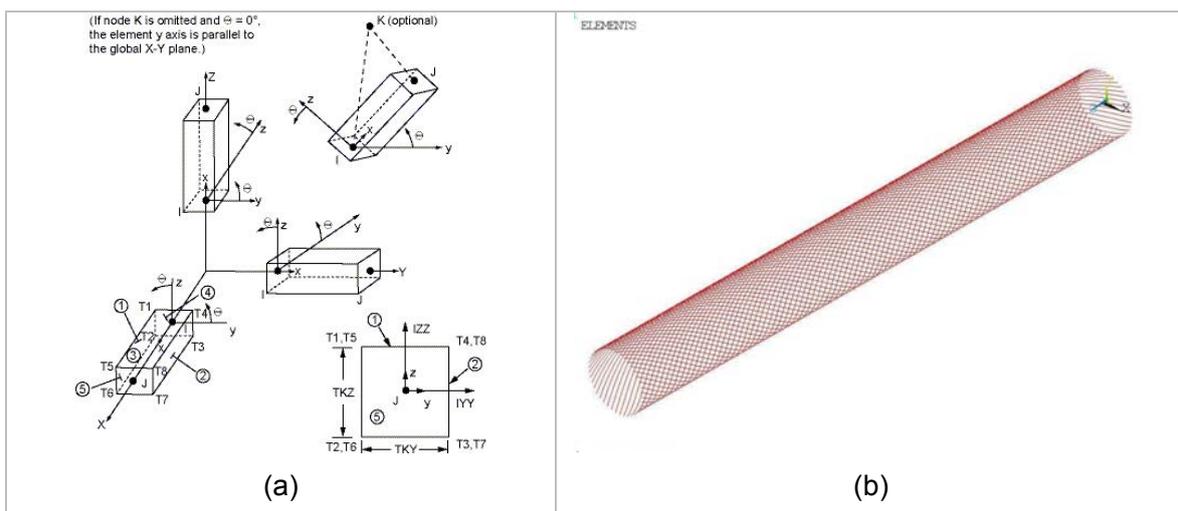


Figura III.4 – (a) Elemento de pórtico tridimensional utilizado para representar as armaduras de tração, (b) vista isométrica da armadura de tração.

Os elementos escolhidos possuem seis graus de liberdade por nó: deslocamentos nas direções X, Y e Z e rotações em torno desses mesmos eixos.

Cabe ressaltar que exclusivamente nas análises considerando não-linearidades físicas, foi realizada a opção de substituir o elemento BEAM4 pelo elemento BEAM188 que possui essa facilidade implementada em sua formulação.

Outro ponto importante diz respeito à posição inicial dos eixos de inércia dos arames no modelo de elementos finitos. Normalmente, os arames que constituem as armaduras de tração possuem seção retangular e, desta maneira, faz-se necessário definir a posição inicial desses eixos. Assim, o eixo de inércia principal da seção transversal do arame é alinhado como um vetor que une o centro da seção transversal do duto com o centro da seção transversal do arame.

III.2.4 - Geração das camadas

As camadas metálicas e poliméricas que constituem um duto flexível são assentadas concentricamente. Como o modelo utiliza elementos de casca e de pórtico para representar as camadas do duto flexível, as espessuras dessas camadas não são diretamente consideradas. Sendo assim, as camadas são geradas como cilindros com raio igual ao raio médio das camadas reais. Além disso, dada a ovalização observada em alguns dutos flexíveis, o programa também permite a geração de camadas com seção transversal elíptica. A equação que define as coordenadas nodais em cada seção transversal do modelo é mostrada em SOUSA (2005).

III.2.5 - Contato entre as camadas

No modelo proposto, a iteração entre as camadas do duto flexível é estabelecida com elementos de contato. Esses elementos permitem grande deslocamento relativo entre as camadas usando um algoritmo de detecção de contato baseado na técnica de “*pinball*” (ver BELYTSCHKO & NEAL, 1991) e forças de contato avaliadas com o método lagrangeano aumentado (ver BELYTSCHKO & NEAL, 2000).

O método lagrangeano aumentado consiste em calcular uma série de forças durante as iterações de equilíbrio fazendo com que o deslocamento final entre os dois corpos de contato seja menor que o valor estabelecido previamente. No desenvolvimento do modelo, uma penetração de 0.1% da menor espessura entre as duas camadas em contato é permitida.

As forças são calculadas colocando molas fictícias permitindo as condições de contato entre os dois corpos. Quando o contato é estabelecido, essas forças são aplicadas aos pontos nodais dos elementos de contatos colocados ao longo do corpo de contato. As forças são proporcionais aos deslocamentos das superfícies de contato e aos parâmetros escolhidos, as quais podem ser interpretadas fisicamente como as rigidezas das molas. A escolha destas rigidezas, denominadas rigidezas de contato normal, pode ser realizada com relativa simplicidade, mas respeitando algumas regras. Por um lado, valores muito elevados podem levar a instabilidade numérica e, por outro, valores muito pequenos provocam violações das condições de contato.

Diferentes estimativas da rigidez normal de contato propostas em BELYTSCKO & NEAL (1991) e BENSON & HALLQUIST (1990), por exemplo, apontam para um valor da rigidez dos elementos de contato equivalente às rigidezas dos corpos em contato. Como uma estimativa da rigidez normal de contato, supõem-se duas camadas cilíndricas de um duto flexível em contato sob a ação de uma carga uniformemente distribuída como mostrado na Figura III.5

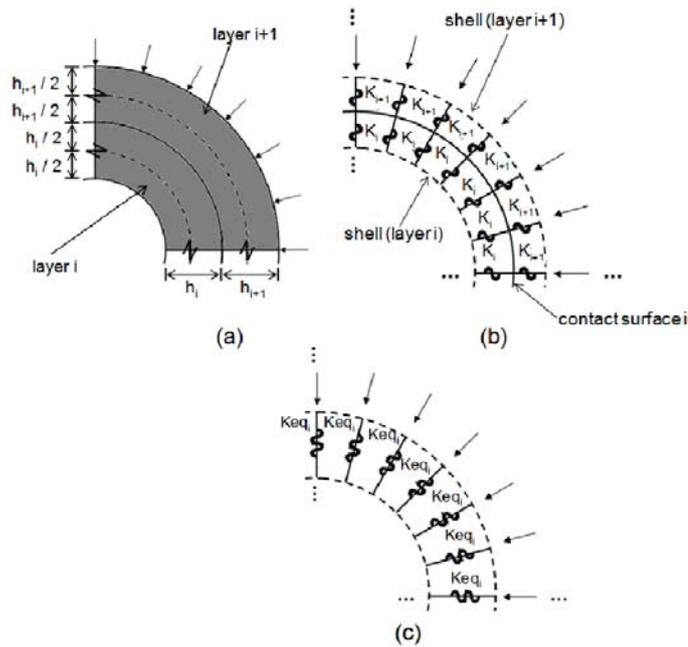


Figura III.5 – Representação esquemática da rigidez normal de contato.

Um modelo equivalente é idealizado pela substituição de camadas sólidas por cascas conectadas por duas molas em série, tal como apresentado na Figura III.5b. A rigidez de cada mola, K , para uma determinada camada i , é:

$$K_i = 2 \cdot \frac{E_i \cdot A_{c_i}}{h_i} \quad (\text{III.13})$$

onde A_c é a área de contato, a qual é expressa por:

$$A_{c_i} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (R_{c_i} - \frac{h_{c_i}}{2})}{n_{cd_i}} \cdot \frac{L}{n_{ld_i}}, i = 1 \dots n_l - 1 \quad (\text{III.14})$$

sendo R_c , h_c , n_{cd} e n_{ld} , respectivamente, o raio médio, a espessura, o número de divisões circunferenciais e o número de divisões longitudinais da camada interna sobre a qual os elementos de contato são colocados; e n_l é o numero de camadas no duto flexível.

A rigidez de contato normal, K_{eq} , para os elementos de contato da interface “i” é (Figura III.5c):

$$K_{eq_i} = \frac{K_i \cdot K_{i+1}}{K_i + K_{i+1}}, i = 1 \dots n_i - 1 \quad (III.15)$$

Os elementos de contato empregados permitem grandes deslizamentos relativos e são definidos por oito nós (ver Figura III.6a) com cada nó possuindo três graus de liberdade: deslocamentos nas direções X, Y e Z (ver Figura III.6). Sua interface de contato é perpendicular ao eixo do elemento que, por sua vez, estabelece a direção da normal de contato. No sistema ANSYS®, esses elementos são designados CONTA174 e TARGE170. Os elementos do tipo CONTA174 são posicionados na superfície de contato (escolhida como a de menor rigidez entre as duas superfícies) e os elementos do tipo TARGE170, por sua vez, são posicionados sobre a superfície “alvo” (tomada como a de maior rigidez entre as duas superfícies em contato).

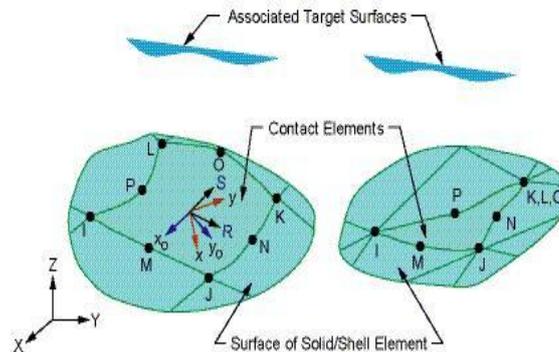


Figura III.6 – (a) Elemento utilizado para representar o contato entre as camadas do duto.

O atrito entre as camadas é tratado considerando o modelo de atrito de Coulomb. A presença das folgas entre as camadas é diretamente modelada na malha de elementos finitos assumindo que o raio médio de uma camada é igual ao seu raio médio inicial incrementado da dimensão da folga. Maiores detalhes sobre o cálculo da rigidez normal e da rigidez à adesão dos elementos podem ser obtidos em SOUSA (2005).

III.2.6 - Modelagem das não linearidades de material

A consideração de não linearidades físicas é feita empregando-se o modelo de BESSELING (1958), enquanto a relação entre o estado de tensão uniaxial dos ensaios de tração e o estado de tensão multiaxial é estabelecida com o critério limite de Von Misses considerando a regra de fluxo associado. A relação tensão – deformação de cada material que constitui o duto flexível é dada pela equação de Ramberg – Osgood:

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{\sigma}{E} \cdot \left[1 + c_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{c_2} \right] \quad (\text{III.16})$$

onde σ_y é a tensão de escoamento do material; e c_1 e c_2 são as constantes de Ramberg – Osgood.

A curva pode ser diretamente aplicada para representar a relação tensão – deformação dos arames da armadura de tração e das camada poliméricas. Para a carcaça intertravada e a armadura de pressão, as tensões do modelo numérico têm que ser corrigidas pelos fatores apresentados na Eq. (III.10). Como foi explicado anteriormente, o modelo foi implementado utilizando um pacote comercial de elementos finitos (ANSYS®), o qual permite a criação de sub-rotinas utilizadas em Fortran 90 que são utilizadas durante o procedimento de solução. Portanto, uma sob-rotina para corrigir automaticamente as tensões na carcaça intertravada e na armadura de pressão foi criada e essas tensões são consideradas em conjunto com o critério de Von Misses.

III.2.7 - Aplicações das cargas e condições de contorno

O modelo assume, ainda, que suas extremidades inicial e final possuem os deslocamentos acoplados de forma a transferir corretamente às camadas as condições de contorno impostas, como destacado na Figura III.7.

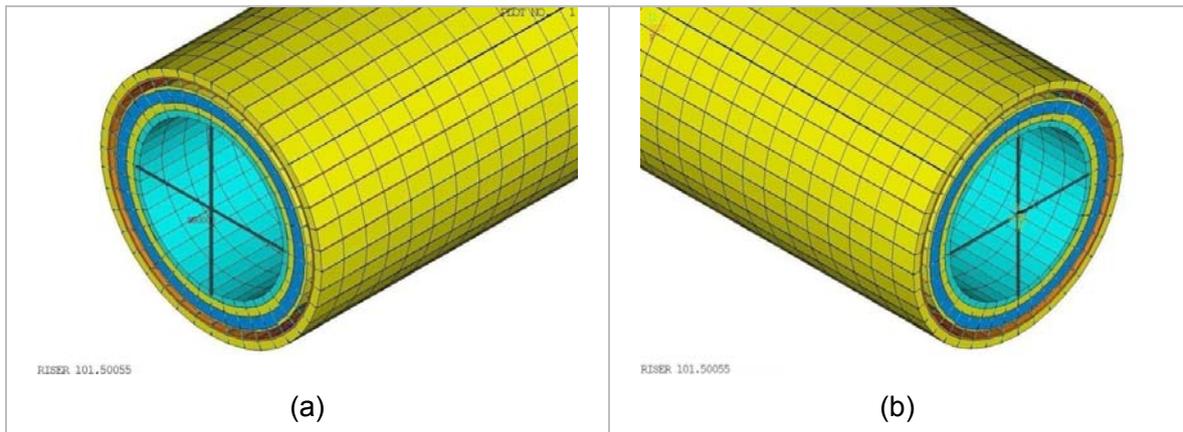


Figura III.7 – Aplicação das cargas e condições de contorno no modelo proposto: (a) tração atuando em uma extremidade; e (b) deslocamentos e rotações engastados na extremidade oposta.

Deve-se destacar que a obrigatoriedade das seções extremas do duto estarem rigidamente conectadas não implica que as outras seções também estarão. Essa conexão gera uma zona de perturbação nas seções próximas às extremidades, mas, à medida que se observam seções mais afastadas, as condições impostas nas extremidades não afetam a resposta, ou seja, cada camada poderá girar ou transladar de forma independente.

III.3 - Descrição do duto flexível do trabalho

O duto flexível utilizado neste trabalho de pesquisa é caracterizado como: não-aderente e de parede rugosa, possuindo 4” de diâmetro interno. As demais características deste duto estão listadas na Tabela III.1.

Tabela III.1 – Características do duto flexível de 4”.

<i>Camada (Material)</i>	<i>Propriedades geométricas</i>
Carcaça intertravada (aço inoxidável)	Espessura = 4.0mm Número de arames = 1 Ângulo de assentamento = +87.6° Área = 32.0mm ² , Inércia [†] = 52mm ⁴
Plástico interno (Polietileno)	Espessura = 5.0mm
Armadura de pressão (aço carbono)	Espessura = 6.2mm Número de arames = 2 Ângulo de assentamento = +87.0° Área = 54.1mm ² , Inércia [†] = 173.4mm ⁴ , perfil Z
Plástico antidesgaste (Poliamida 11)	Espessura = 2.0mm
Armadura interna de tração (aço carbono)	Espessura = 2.0mm Largura=7.0mm Número de arames = 47 Ângulo de assentamento = +35.0° Perfil retangular
Armadura externa de tração (aço carbono)	Espessura = 2.0mm Largura=7.0mm Número de arames = 49 Ângulo de assentamento = -35.0° Perfil retangular
Fita de reforço	Espessura = 1.15mm
Plástico externo (Poliamida 11)	Espessura = 5.0mm
† Menor inércia (inércia normal) do(s) arame(s) que constitui(em) a camada.	

A carcaça intertravada é constituída de aço AISI 304 com módulo de Young de 193GPa e coeficiente de Poisson de 0.3. O material da armadura de pressão e das armaduras de tração têm módulo de Young de 205GPa e coeficiente de Poisson de 0.3. A camada plástica interna é feita de PA11 com módulo de Young de 345MPa, a camada plástica externa também é de PA11, porém com módulo de Young igual a 215MPa. Finalmente, a fita de reforço foi assumida com módulo de elasticidade de 14000MPa, enquanto o plástico anti-desgaste possui módulo de Young de 350MPa. Todos os materiais poliméricos possuem coeficiente de Poisson igual a 0.3.

III.4 - Análises numéricas

A malha de elementos finitos construída (Figura III.8) tem um comprimento de 1274mm, equivalente a dois passos dos arames da armadura externa de tração.

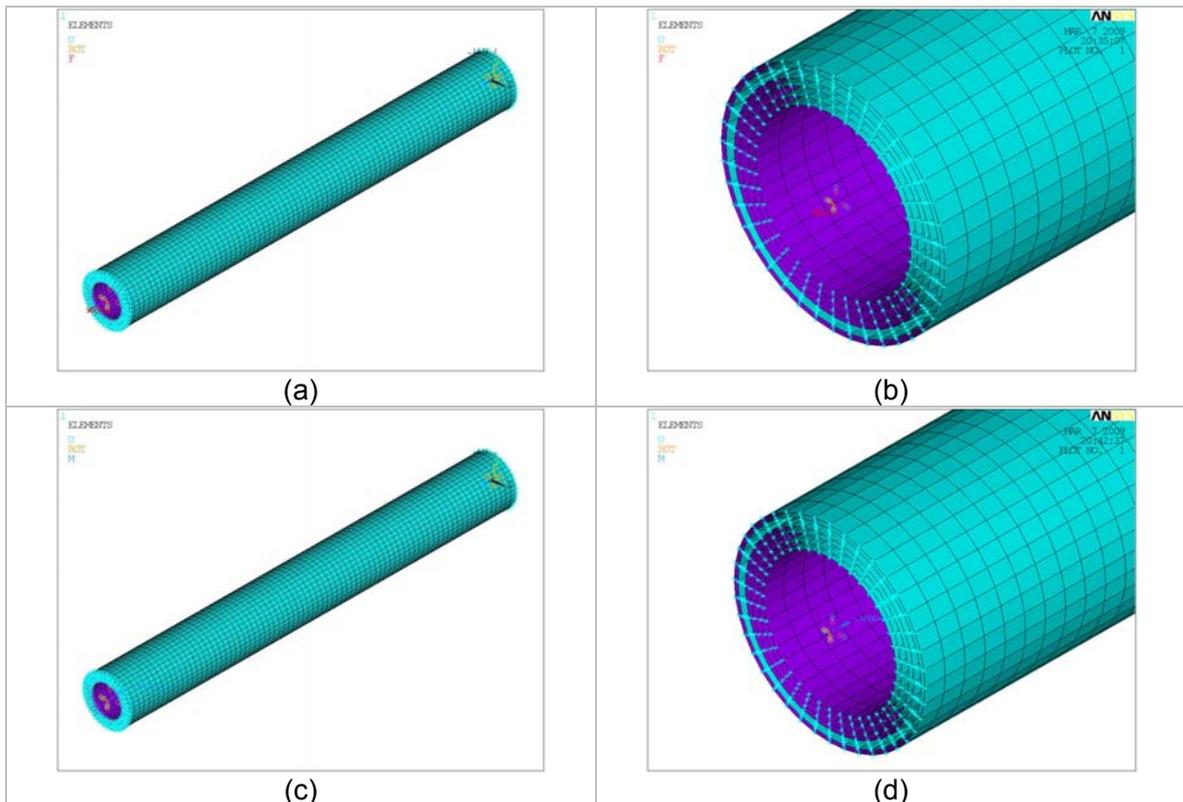


Figura III.8 – Malha elaborada para análise de duto de 4": (a) e (b) vista isométrica e detalhe de tração aplicada no extremo final em modelo sem restrição à rotação axial; (c) e (d) vista isométrica e detalhe de torção horária aplicada no extremo final em modelo sem restrição ao deslocamento axial.

A malha possui 40 divisões circunferenciais e 80 divisões longitudinais gerando um total de 25922 nós e 48280 elementos com 155532 graus de liberdade.

Com o intuito de correlacionar os deslocamentos, as tensões e a rigidez do duto proposto com os resultados experimentais, foram realizadas as seguintes simulações:

- Ensaio de tração pura: Nestas análises, uma tração de 500kN foi aplicada ao duto flexível. A extremidade na qual se aplica a carga pode ter rotação axial livre ou restringida, enquanto a outra extremidade se encontra totalmente engastada. Foi realizado, ainda, um estudo para avaliar o efeito de diferentes coeficientes de atrito entre as camadas. Para efeito de comparação, o mesmo coeficiente de atrito foi assumido em todas as interfaces em todas as análises. Foram considerados coeficientes de atrito de 0.00 (livre deslizamento), 0.05, 0.10, 0.20, 0.40, 0.60 e 1.00. Além disso, uma análise considerando todas as camadas do duto completamente aderidas também foi realizada, adotando-se neste caso um coeficiente de atrito infinito entre as camadas.
- Ensaio de torção pura: Nestas análises, momentos de torção de 5.0kNm foram aplicados ao duto. Estes momentos foram aplicados tanto no sentido horário quanto no anti-horário. A extremidade do duto na qual se aplicaram os momentos pode ter ou não sua translação axial restringida, enquanto a extremidade oposta encontra-se sempre engastada.
- Ensaio de torção com pré-tração aplicada: Nestas simulações momentos de torção horária ou anti-horária de 5.0kNm foram aplicados ao duto considerando diferentes níveis de tração atuando simultaneamente. Trações de 150kN, 300kN e 450kN foram consideradas. Quando se aplicou as cargas de torção, a translação axial nas extremidades do duto é totalmente restringida.

III.4.1 - Simulação do ensaio de tração

As Figuras III.9a e III.9b apresentam, respectivamente, as distribuições de deslocamentos axiais obtidas nas análises de tração de 500kN sem e com restrição à rotação axial e sem atrito entre as camadas. Observa-se que os deslocamentos axiais na tração não são afetados pela restrição à rotação axial na extremidade do modelo.

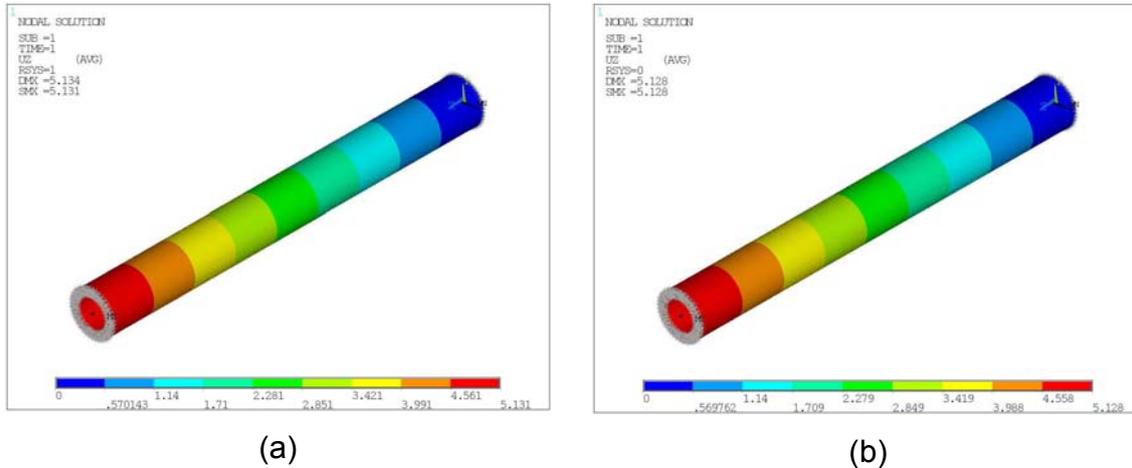


Figura III.9 – Deslocamentos axiais, em mm, devidos à tração de 500kN no duto de 4.0”:
 (a) rotação axial livre; e (b) rotação axial restringida nas extremidades.

As Tabelas III.2 e III.3 apresentam: a relação entre a tração aplicada, F , e o alongamento unitário do duto flexível, ϵ , isto é, a rigidez à tração do duto; a relação entre a rotação axial por unidade de comprimento, ϕ , e o alongamento unitário; e a relação entre a variação radial, ΔR , e o alongamento unitário; para diferentes coeficientes de atrito nos casos de tração com rotação axial livre e restrita nos extremos, respectivamente.

Tabela III.2 – Rigidez à tração do duto, relação entre a rotação axial e o alongamento unitário, e a relação entre a variação radial e o alongamento unitário, na análise de tração com a rotação axial livre nos extremos.

Coefficiente de atrito	F/ϵ ($\times 10^2$ kNm/m)	ϕ/ϵ ($\times 10^2$ grau m/m)	$\Delta R/\epsilon$ ($\times 10^2$ mm m/m)
0.00	1241.607	0.2522	-0.2274
0.05	1242.260	0.2372	-0.2275
0.10	1242.333	0.2317	-0.2274
0.20	1242.430	0.2240	-0.2275
0.40	1242.478	0.2155	-0.2275
0.60	1242.503	0.2094	-0.2275
1.00	1242.527	0.2034	-0.2274
<i>Infinito</i>	1243.181	0.0000	-0.2274

Tabela III.3 – Rigidez à tração do duto, relação entre o torque axial e o alongamento unitário, e a relação entre a variação radial e o alongamento unitário, no análise de tração com a rotação axial restrita nos extremos.

Coefficiente de atrito	F/ϵ ($\times 10^2$ kNm/m)	T/ϵ ($\times 10^2$ kNm ² /m)	$\Delta R/\epsilon$ ($\times 10^2$ mm m/m)
0.00	1242.430	-1.8883	-0.2274
0.05	1243.012	-1.8772	-0.2274
0.10	1243.084	-1.8666	-0.2274
0.20	1243.157	-1.8604	-0.2275
0.40	1243.181	-1.8528	-0.2275
0.60	1243.181	-1.8527	-0.2275
1.00	1243.181	-1.8526	-0.2274
<i>Infinito</i>	1243.254	-1.8532	-0.2274

As Tabelas III.2 e III.3 apontam que a rigidez axial do duto não depende do coeficiente de atrito entre as camadas. Quando um dos extremos tem liberada a sua rotação axial, a rigidez sem considerar atrito entre as camadas é só 0.1% menor que a rigidez obtida considerando atrito infinito e, quando um dos extremos tem a rotação axial restrita, esta diferença é reduzida para 0.1%. Também se pode observar que a rigidez axial não é afetada pela restrição da rotação axial.

Outro aspecto que se pode observar nestes resultados é que a rotação axial induzida é muito pequena e pode ser ligeiramente afetada pelo coeficiente de atrito utilizado, quando esses valores são considerados na faixa entre 0.0 e 1.0. A rotação axial estimada para o caso quando não é considerado o atrito interno entre as camadas do duto é 19% maior que o caso quando é considerado um coeficiente de atrito de 1.0. No entanto, quando é considerado atrito infinito entre as camadas do duto, a rotação axial é zero. Quando os extremos do duto são restritos à rotação axial, o torque induzido praticamente não é alterado pelo coeficiente de atrito entre as camadas.

A variação radial do duto também é muito pequena e praticamente insensível ao atrito entre as camadas do duto. Valores constantes foram encontrados em ambos os casos analisados. Os valores estimados considerando as camadas do duto coladas (*bonded*) são os mesmos aos deslocamentos radiais sem considerar o atrito entre as suas camadas.

Um aspecto importante a ser analisado são os deslocamentos axiais previstos para cada seção do duto flexível. A Figura III.10 apresenta os deslocamentos axiais em cada camada e seção transversal do duto quando um de seus extremos tem a rotação axial liberada e coeficiente de atrito nulo entre suas camadas. A Figura III.11 apresenta as rotações axiais para o mesmo caso. Nestas figuras, a posição 0mm (primeira seção transversal) é o extremo restrito do duto.

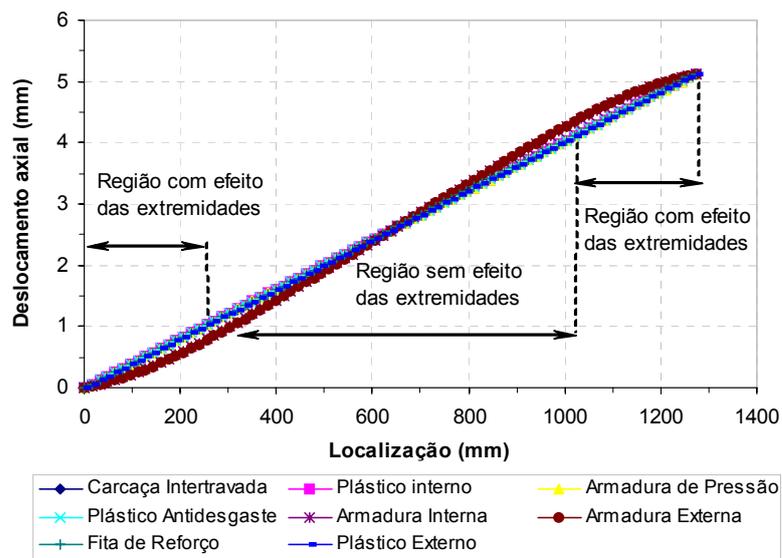


Figura III.10 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto: análise de tração com o extremo final livre à rotação axial.

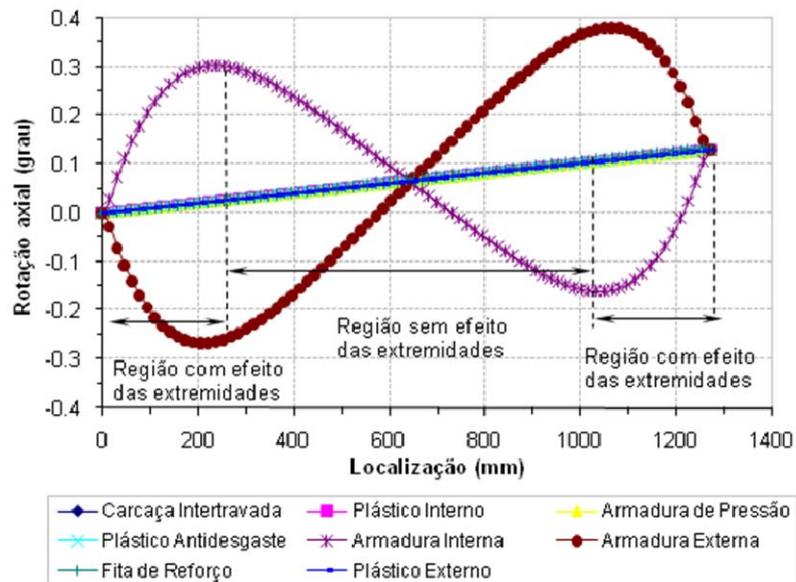


Figura III.11 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto: análise de tração com o extremo final livre à rotação axial.

A Figura III.10 mostra que o deslocamento axial é praticamente o mesmo em cada camada e seção transversal do duto e varia linearmente ao longo do duto com uma pequena não-linearidade nas armaduras de tração. Por outro lado a Figura III.11 apresenta pequenas regiões próximas as extremidades do modelo nas quais a rotação axial é localmente afetada pelas condições de contorno impostas. Adicionalmente, observa-se que fora dessas regiões, a rotação axial calculada não é a mesma em todas as camadas do duto. Assim, as seções transversais do duto permanecem planas, mas as rotações axiais em cada uma das suas camadas são diferentes.

A Figura III.12 apresenta os deslocamentos axiais em cada camada ao longo do duto quando um de seus extremos tem a rotação axial restringida e coeficiente de atrito nulo entre suas camadas. A Figura III.13 apresenta as rotações axiais para o mesmo caso.

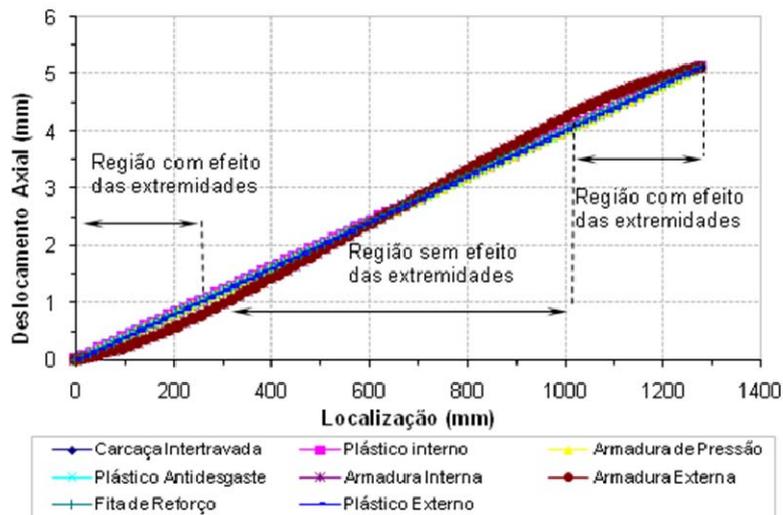


Figura III.12 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto: análise de tração com o extremo final restrito à rotação axial.

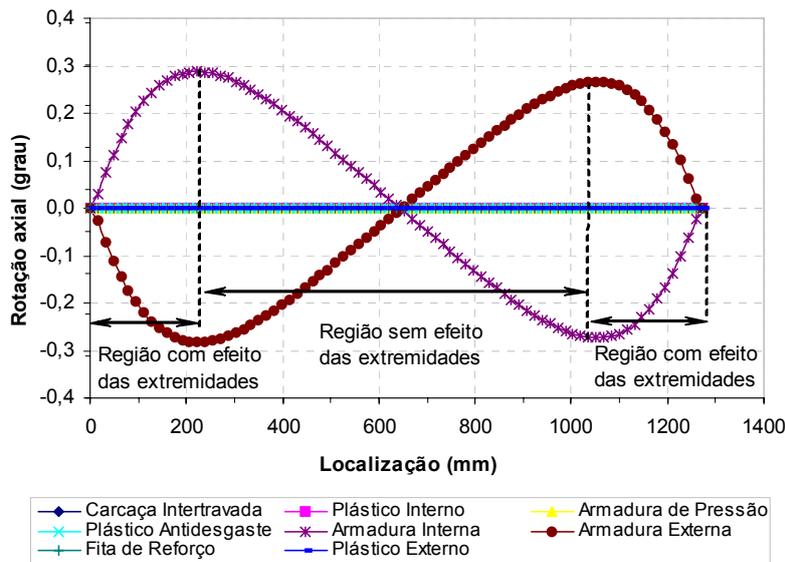


Figura III.13 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto: análise de tração com o extremo final restrito à rotação axial.

Na Figura III.12, tal como na Figura III.10, as seções transversais do duto tem o mesmo deslocamento axial e varia linearmente com respeito à posição da seção transversal com uma pequena não linearidade nas armaduras de tração.

A Figura III.13 também apresenta pequenas regiões próximas às extremidades do modelo nas quais a rotação axial é localmente afetada pelas condições de contorno impostas. Apesar de ter os extremos do duto restringidos à rotação axial, as camadas do duto não giram, embora as armaduras de tração sofram rotação axial. Assim, a rotação axial calculada não é a mesma em todas as camadas do duto.

Para efeitos de comparação foi feita a análise de tração, considerando os extremos livres à rotação axial, e as camadas livres ao deslizamento, utilizando o modelo analítico de FERET & BOURNAZEL (1987) considerando algumas modificações feitas por BATISTA (1989). O valor obtido para a rigidez axial foi de 1454.249×10^2 kNm/m; e os valores da rotação axial e a variação radial em relação ao alongamento foram de 0.6636×10^2 grau m/m e 0.1051×10^2 mm m/m respectivamente.

Uma das hipóteses usualmente adotadas pelos modelos analíticos na análise local de dutos flexíveis é que os deslocamentos e rotações axiais são os mesmos para todas as camadas do duto e em cada uma de suas seções transversais. Como mostrado essa hipótese não é confirmada pelos resultados apresentados pelo modelo numérico quando o carregamento de tração é aplicado no duto. Este fato conduz à discrepâncias na previsão da rotação axial (2.6 vezes maior) e da variação radial (2.1 vezes menor) no duto flexível quando os resultados analíticos aqui apresentados são comparados aos resultados obtidos através do modelo numérico.

III.4.2 - Simulação dos ensaios de torção

As Figuras III.14a e III.14b apresentam as distribuições de deslocamentos tangenciais obtidas nas análises de torção horária de 5kNm considerando livre deslizamento entre as camadas do duto, sem e com restrição ao deslocamento axial, respectivamente. As Figuras III.14c e III.14d apresentam os mesmos resultados obtidos para a simulação de torção anti-horária de 5kNm.

A Tabela III.4, por sua vez, apresenta a relação entre o momento de torção aplicado, M , e a rotação axial por unidade de comprimento do duto flexível, θ , isto é, a rigidez à torção do duto; a relação entre o alongamento axial, ϵ , ou a força axial, F , e a rotação axial; e a relação entre a variação radial, ΔR , e a rotação axial; considerando livre

deslizamento entre as camadas do duto para os casos de torção horária e anti-horária; sem ou com restrição ao deslocamento axial nos extremos.

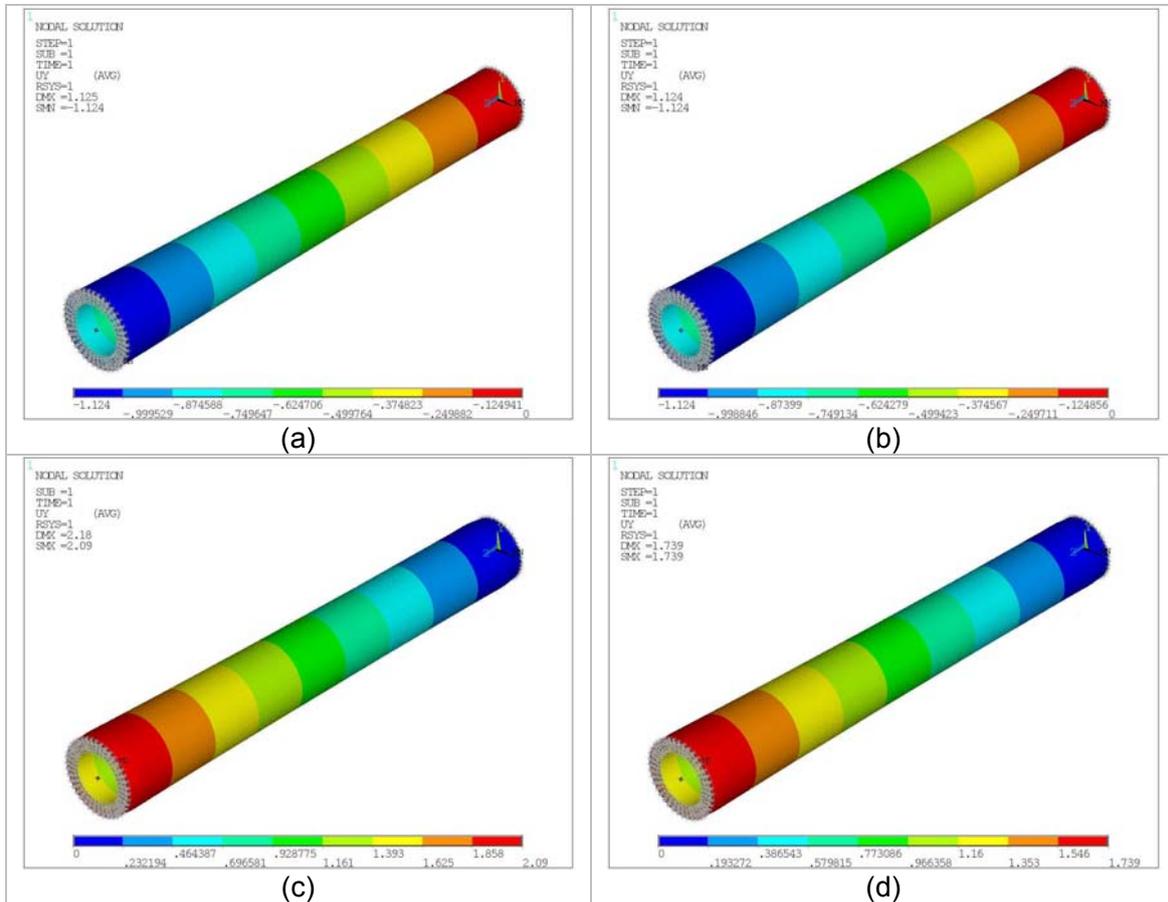


Figura III.14 –(a) e (b) Deslocamentos tangenciais, em mm, para torção horária de 5kNm em análises, respectivamente, sem e com restrição ao deslocamento axial nas extremidades; (c) e (d) Deslocamentos tangenciais, em mm, para torção anti-horária de 5kNm em análises, respectivamente, sem e com restrição ao deslocamento axial nas extremidades.

Tabela III.4 – Rigidez à torção, relação entre o alongamento axial ou força axial e a rotação axial, e a relação entre a variação radial e rotação axial, nas simulações de torção horária e anti-horária com ou sem restrição ao deslocamento axial

Simulação da Torção	Deslocamento axial	M/ϕ (kNm²/grau)	$\epsilon/\phi * 10^{-2}$ (m/grau)	F/ϕ (kNm/grau)	$\Delta R/\phi$ (mm m/grau)
Horária	Livre	7.481	0.0027	0.0000	0.0004
Horária	Restrito	7.486	0.0000	-3.3465	0.0012
Anti-horária	Livre	4.025	-0.0392	0.0000	0.1323
Anti-horária	Restrito	4.836	0.0000	36.0501	0.0908

Na simulação, a rigidez à torção não é afetada pela restrição ao deslocamento axial nos extremos do duto (variação de 0.1% no sentido horário e 16% no sentido anti-horário). O alongamento axial estimado para o caso de torção horária com o deslocamento axial livre é em módulo 93% menor que o alongamento axial obtido no caso de torção anti-horária. A variação radial (diminuição) do duto é muito pequena quando os extremos têm deslocamento axial livre, e triplica quando os extremos têm deslocamento axial restrito. Estes valores se justificam pelo fato de os arames da armadura externa de tração serem tracionados e tenderem a pressionar as camadas mais internas. Por outro lado, os arames da armadura interna são comprimidos e tendem a se expandir radialmente. Este mecanismo acaba por criar uma “restrição natural” o que reflete um elevado valor da rigidez à rotação axial (7.48kNm²/grau), e pequenos valores de alongamento ou força axial, e variação radial.

Na simulação da torção anti-horária, a rigidez à torção é afetada pela restrição ao deslocamento axial nos extremos do duto. A rigidez à torção com o deslocamento axial restringido é aproximadamente 17% maior que a rigidez com o deslocamento axial livre. A variação radial (aumento) também é bastante considerável. Quando os extremos têm o deslocamento axial livre, a variação radial é 31.4% maior do que quando os deslocamentos axiais são restringidos nas extremidades. Na torção anti-horária, os arames da armadura externa tendem a se expandir radialmente e são contidos apenas pela fita de reforço e a camada plástica externa. Já os arames da armadura interna pressionam as camadas inferiores, ou seja, o núcleo rígido do duto. Esse mecanismo produz um grande desequilíbrio de forças nos arames e, deste modo, um significativo acoplamento entre translação e rotação justificando, assim, os resultados encontrados.

As Figuras III.15 e III.16 apresentam, respectivamente, os deslocamentos e rotações axiais em cada camada e seção transversal do duto, na análise de torção horária de 5kNm, quando um de seus extremos tem o alongamento axial livre e coeficiente de atrito nulo entre suas camadas. As Figuras III.17 e III.18 apresentam os mesmos resultados para o caso quando o extremo final tem o alongamento axial restringido. As Figuras III.19 e III.20 mostram, respectivamente, os deslocamentos e rotações axiais em cada camada e seção transversal do duto, na análise de torção anti-horária de 5kNm, quando um de seus extremos tem o alongamento axial livre e coeficiente de atrito nulo entre suas camadas. As Figuras III.21 e III.22 indicam os mesmos resultados para o caso em que o extremo final tem o alongamento axial restringido. Como nas análises de tração, em todas essas figuras, a posição 0mm (primeira seção transversal) é o extremo totalmente restringido do duto.

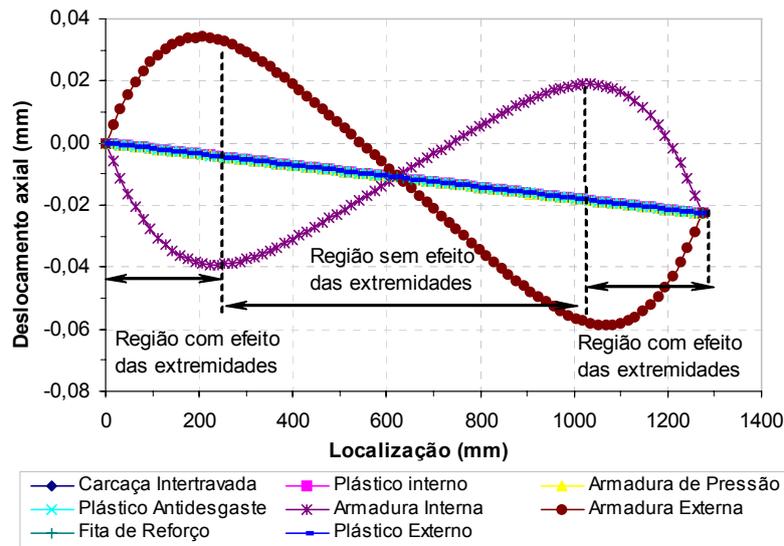


Figura III.15 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção horária de 5kNm, com o extremo final livre ao alongamento axial.

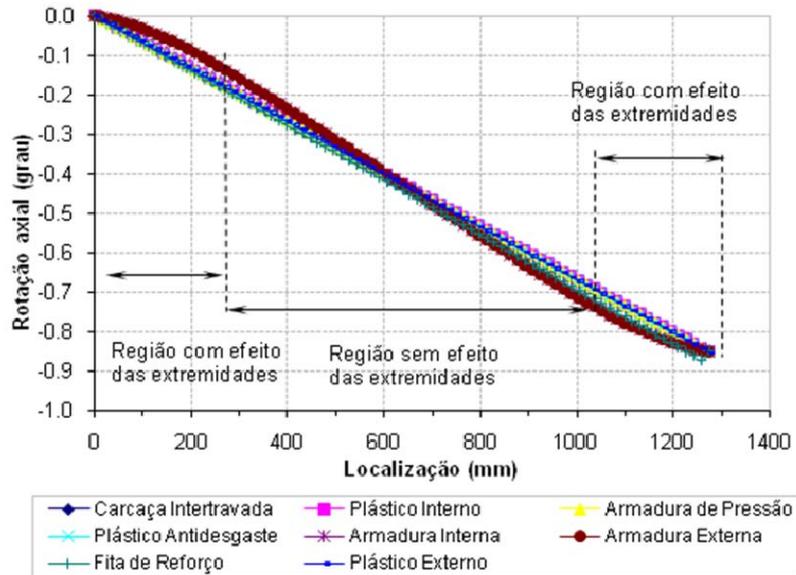


Figura III.16 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção horária de 5kNm, com o extremo final livre ao alongamento axial.

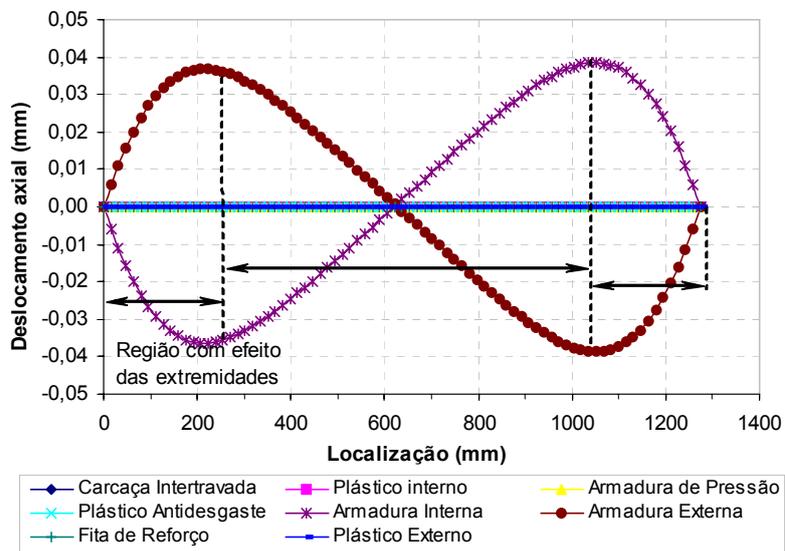


Figura III.17 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção horária de 5kNm, com o extremo final restrito ao alongamento axial.

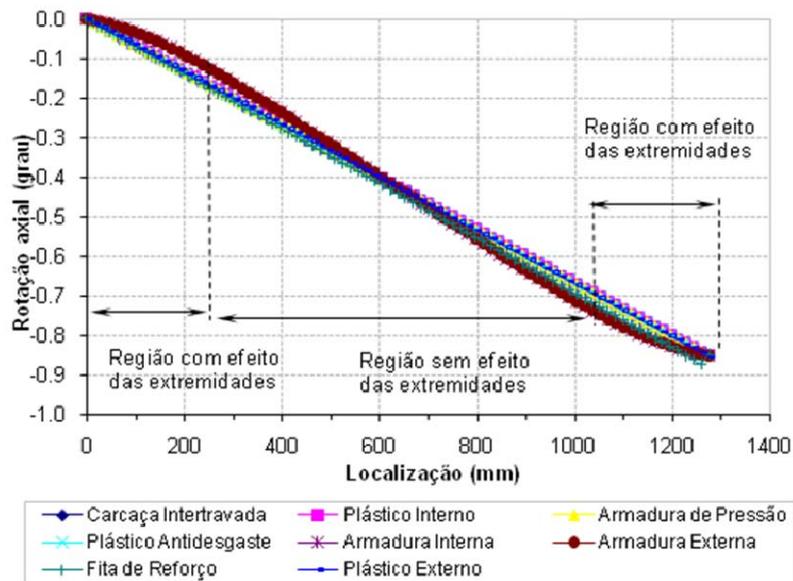


Figura III.18 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção horária de 5kNm, com o extremo final restrito ao alongamento axial.

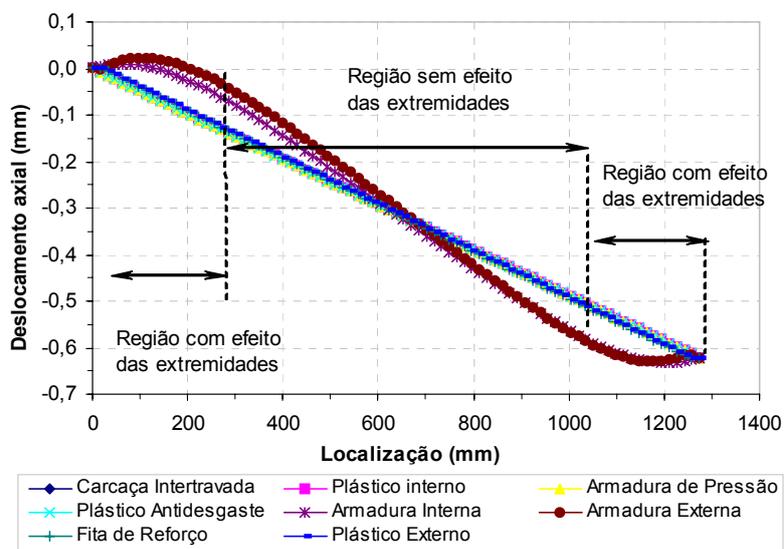


Figura III.19 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção anti-horária de 5kNm, com o extremo final livre ao alongamento axial.

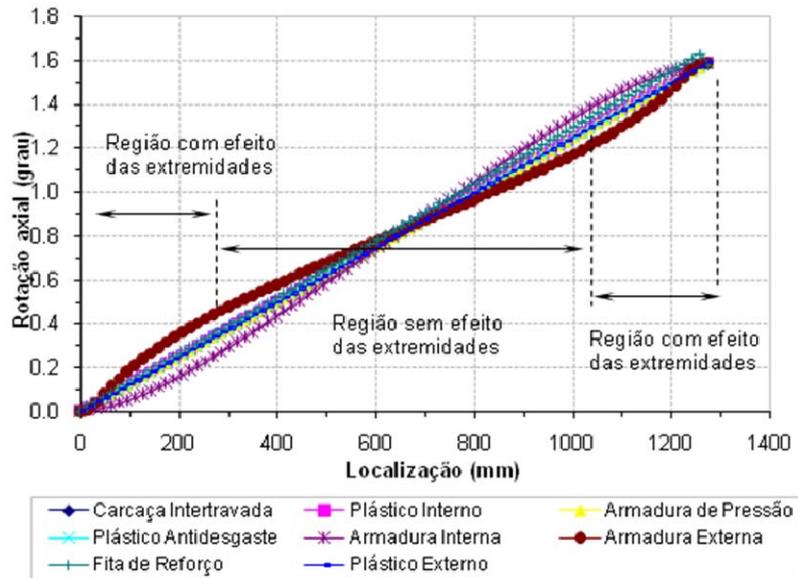


Figura III.20 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção anti-horária de 5kNm, com o extremo final livre ao alongamento axial.

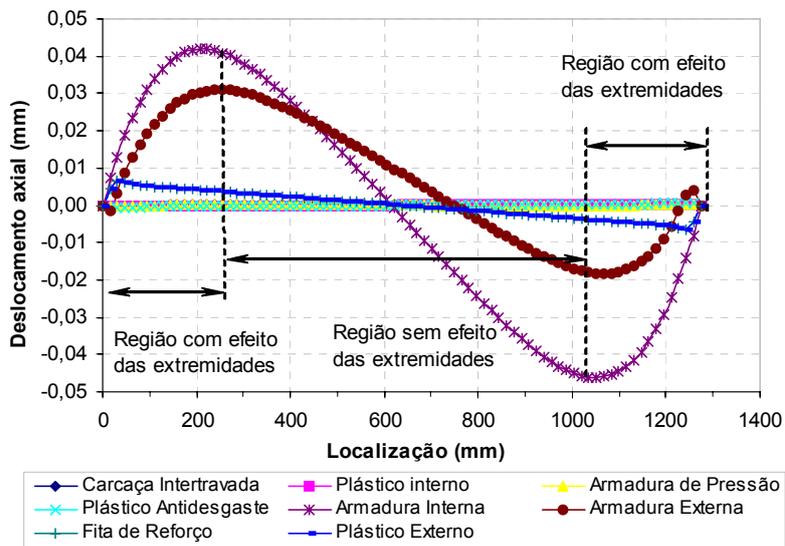


Figura III.21 – Deslocamento axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção anti-horária de 5kNm, com o extremo final restrito ao alongamento axial.

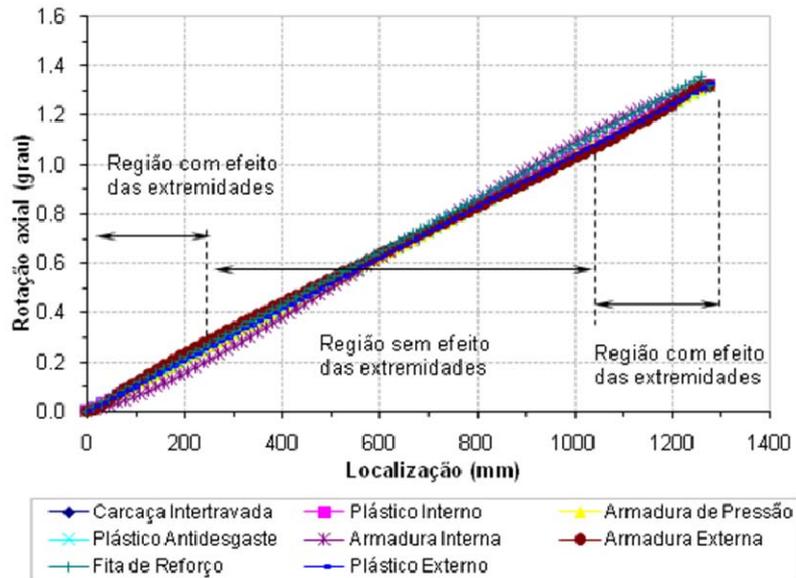


Figura III.22 – Rotação axial em cada camada e seção transversal do duto na análise de torção anti-horária de 5kNm, com o extremo final restrito ao alongamento axial.

Na Figura III.15, observam-se pequenos valores de deslocamento axial e, fora das regiões afetadas pelas condições de contorno impostas, o deslocamento axial calculado em cada camada do duto é o mesmo para todas as camadas do duto, exceto para as armaduras de tração que se deslocam em sentidos opostos. A Figura III.16 mostra que a rotação axial é praticamente a mesma em cada camada e seção transversal do duto. A rotação axial varia praticamente de forma linear com respeito à posição da seção transversal com uma pequena não-linearidade nas armaduras de tração. Assim na simulação do ensaio de torção horária, considerando livre deslizamento entre as camadas do duto, com o extremo final livre ao alongamento axial, as rotações axiais em cada uma das camadas do duto e cada seção transversal são praticamente as mesmas, mas as seções transversais do duto não permanecem planas.

Na Figura III.17, observa-se que não há deslocamento axial nas camadas do duto, à exceção de pequenos deslocamentos axiais calculados nas armaduras de tração fora das regiões afetadas pelas condições de contorno impostas. A Figura III.18 mostra que a rotação axial é praticamente a mesma em cada camada e seção transversal do duto. A rotação axial varia linearmente com respeito à posição da seção transversal com uma

pequena não-linearidade nas armaduras de tração. Assim, na simulação do ensaio de torção horária, considerando livre deslizamento entre as camadas do duto, com o extremo final restrito ao alongamento axial, as rotações axiais em cada uma das camadas do duto e cada seção transversal são praticamente as mesmas, mas as seções transversais do duto, mais uma vez, não permanecem planas.

As Figuras III.15 a III.18, apontam valores muito próximos de deslocamento e rotação axial na simulação de torção horária indicando, assim, que a resposta do duto a este carregamento não é afetada pela restrição ao deslocamento axial nos extremos do duto.

A Figura III.19 ilustra que, fora das regiões afetadas pelas condições de contorno impostas, o deslocamento axial calculado em cada camada do duto varia linearmente com respeito à posição da seção transversal e é praticamente o mesmo em quase todas as camadas do duto.. A Figura III.20 mostra que a rotação axial também é praticamente a mesma em cada camada e seção transversal do duto. A rotação axial varia linearmente com respeito à posição da seção transversal com uma pequena não-linearidade nas armaduras de tração. Assim na simulação do ensaio de torção anti-horária, considerando livre deslizamento entre as camadas do duto, com o extremo final livre ao alongamento axial, as rotações e deslocamentos axiais em cada uma das camadas do duto e cada seção transversal são praticamente as mesmas, e pode-se dizer que as seções transversais do duto quase permanecem praticamente planas.

Nas análises com torção anti-horária e deslocamento axial restringido nas extremidades, a Figura III.21 indica que há deslocamentos axiais apenas nas armaduras de tração do duto e fora das regiões afetadas pelas condições de contorno impostas. A Figura III.22 mostra que a rotação axial é praticamente a mesma em cada camada e seção transversal do duto. A rotação axial em todas as camadas do duto varia linearmente com respeito à posição da seção transversal. Assim, nesta condição de análise, as rotações axiais em cada uma das camadas do duto e cada seção transversal são praticamente as mesmas, mas, como os deslocamentos axiais não são os mesmos em todas as camadas, as seções transversais do duto não permanecem planas.

As Figuras III.19 a III.22 apontam valores muito próximos de rotação axial, embora os deslocamentos axiais sejam consideravelmente alterados na simulação de torção anti-horária, ou seja, a resposta do duto é afetada pela restrição ao deslocamento axial nos extremos do duto.

Também foi feita as análises de torção horária e anti-horária utilizando o modelo analítico, considerando os extremos livres ao deslocamento axial, e as camadas livres ao deslizamento. O valor obtido na simulação de torção horária para a rigidez torsional foi de $6.438\text{kNm}^2/\text{grau}$; e os valores do alongamento e a variação radial em relação á rotação axial foram de $0.0304 \times 10^{-2} \text{ m/grau}$ e 0.0387mm m/grau respectivamente. O valor obtido na simulação de torção anti-horária para a rigidez torsional foi de $3.217\text{kNm}^2/\text{grau}$; e os valores do alongamento e a variação radial em relação á rotação axial foram de $-0.0425 \times 10^{-2} \text{ m/grau}$ e 0.1311mm m/grau respectivamente

Como mostrado a hipótese dos modelos analíticos não é confirmada segundo os resultados apresentados pelo modelo numérico; quando o carregamento de torção horária é aplicado no duto, conduz a discrepâncias na previsão do deslocamento axial (10.2 vezes maior) e da variação radial (95.8 vezes maior); embora, quando o carregamento de torção anti-horária é aplicado, conduz a valores muito próximos na previsão do deslocamento axial e variação radial no duto flexível quando os resultados analíticos aqui apresentados são comparados aos resultados obtidos através do modelo numérico.

Os aspectos apontados anteriormente se refletem nas tensões calculadas para as camadas do duto flexível em cada tipo de carregamento (tração e torção). Essas tensões são apresentadas na Tabela III.5.

A Tabela III.5 indica que a restrição à rotação axial na tração trouxe uma pequena redução na tensão observada nos arames da armadura interna de tração e um pequeno aumento nas tensões nos arames da armadura externa. Nesse caso, o acoplamento entre translação e rotação no duto pouco afeta a distribuição de tensões. Para a torção horária, a Tabela III.5 mostra que os resultados pouco variam com a restrição à rotação axial, mas, por outro lado, na torção anti-horária, as tensões são bem distintas. Os arames da armadura interna são mais solicitados, assim como os arames da armadura de pressão; as tensões nos arames da armadura externa sofrem uma queda bastante significativa.

Surgem ainda tensões na carcaça intertravada. Conclui-se, portanto, que a restrição ao deslocamento axial altera substancialmente a resposta do duto flexível à torção anti-horária e, nesse caso, o acoplamento translação-rotação é um importante aspecto na resposta do duto flexível.

Tabela III.5 –Tensões nas armaduras metálicas do duto flexível de 4” para os diferentes carregamentos de tração e torção considerando livre deslizamento entre as camadas do duto.

Carregamento	Tensões sem restrição / com restrição (MPa)			
	Carcaça intertravada	Armadura de pressão	Armadura de tração interna	Armadura de tração externa
Tração	-31.1 / -31.1	-57.7 / -57.7	+470.9 / +459.2	+436.1 / +447.4
Torção horária	- / -	- / -	-81.6 / -79.6	+79.2 / +81.1
Torção anti-horária	-2.1 / -3.5	-4.1 / -6.6	+70.6 / +108.9	-63.7 / -38.0

III.4.3 - Simulação dos ensaios de torção com pré-tração aplicada

As Figuras III.23a e III.23b apresentam as distribuições de deslocamentos tangenciais na análise de torção horária de 5kNm obtidas, respectivamente, com pré-cargas iniciais de 150kN e 450kN considerando livre deslizamento entre as camadas do duto, com restrição ao deslocamento axial. As Figuras III.23c e III.23d apresentam os mesmos resultados obtidos para a simulação de torção anti-horária de 5kNm.

Nas Figuras III.23a e III.23b, pode-se observar que, na simulação de torção horária de 5kNm, os deslocamentos tangenciais não são afetadas pelo valores de pré-cargas axiais aplicadas no duto. As Figuras III.23c e III.23d apontam para a mesma conclusão. Cabe ressaltar ainda que os deslocamentos axiais no duto não são alterados pelo sentido de torção aplicado (horário ou anti-horário)

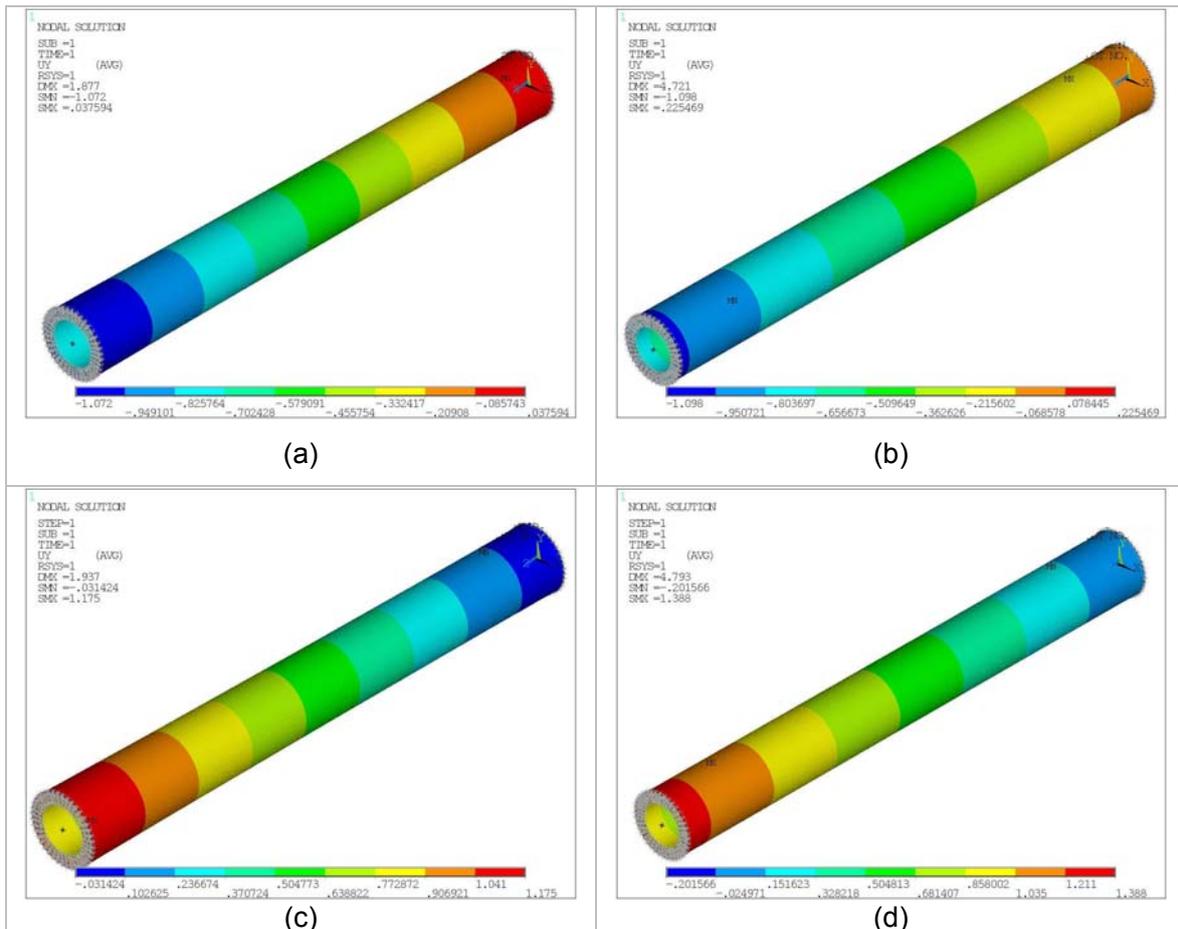


Figura III.23 – (a) e (b) Deslocamentos tangenciais, em mm, para torção horária de 5kNm, obtidos respectivamente, com pré-cargas axiais de 150kN e 450kN, em análises com restrição ao deslocamento axial nas extremidades; (c) e (d) Deslocamentos tangenciais, em mm, para torção anti-horária de 5kNm, obtidos respectivamente, com pré-cargas axiais de 150kN e 450kN, em análises com restrição ao deslocamento axial nas extremidades

A Tabela III.6 apresenta a relação entre o momento de torção imposto e a rotação axial produzida, a relação entre a força axial, F , e a rotação axial e a relação entre a variação radial, ΔR , e a rotação axial; considerando livre deslizamento entre as camadas do duto; para a simulação de torção horária com restrição ao deslocamento axial nos extremos; para os casos de pré-carga de 150kN, 300kN e 450kN em análise. A Tabela III.7 apresenta os mesmos resultados para a simulação da torção anti-horária.

Tabela III.6 – Relações entre momento de torção e giro axial, força axial e rotação axial e variação radial e rotação axial do duto sob torção horária com pré-cargas de 150kN, 300kN e 450kN e com deslocamento axial nos extremos restringidos..

Pré-carga	M/θ (kNm ² /grau)	F/θ (kN m/grau)	$\Delta R/\theta$ (mm m/grau)
150kN	7.486	-3.3837	0.0017
300kN	7.486	-3.4736	0.0032
450kN	7.486	-3.5635	0.0049

Tabela III.7 – Relações entre momento de torção e giro axial, força axial e rotação axial e variação radial e rotação axial do duto sob torção anti-horária com pré-cargas de 150kN, 300kN e 450kN e com deslocamento axial nos extremos restringidos.

Pré-carga	M/θ (kNm ² /grau)	F/θ (kN m/grau)	$\Delta R/\theta$ (mm m/grau)
150kN	7.486	-3.2039	-0.0017
300kN	7.486	-3.1140	-0.0032
450kN	7.486	-3.0242	-0.0049

A Tabela III.6 indica que, na simulação da torção horária considerando pré-carga, a relação entre o momento de torção imposto e a rotação axial não é afetada pelo valor de pré-carga imposta no duto flexível. Os valores apontados nesta tabela se assemelham bastante aos mostrados na Tabela III.4 indicando desta forma o desacoplamento entre tração e torção anti-horária.

A Tabela III.7, por sua vez, aponta que, na simulação da torção anti-horária considerando pré-carga, a rigidez à rotação axial também não é afetada pelo valor de pré-carga imposta no duto flexível e os valores também se aproximam dos valores apontados na Tabela III.4, porém para a torção horária. Isto se deve ao fato de, sob tração, as camadas do duto flexível se encontrarem em contato, pressionando umas às outras. Quando é aplicada a torção horária, essa não é suficiente para abrir folgas entre as armaduras de tração e assim mobilizar a fita de reforço à compressão e a camada plástica externa. Desta maneira, sob torção anti-horária, neste caso, a estrutura tem termos de acoplamento iguais aos obtidos quando sob torção horária.

CAPÍTULO IV

APRESENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS

Para a realização dos testes experimentais, cujo principal objetivo é avaliar o comportamento do duto flexível à tração e à torção, foi necessário fabricar um equipamento capaz de aplicar esses carregamentos simultaneamente. Este equipamento, denominado Máquina de Tração-Torção, permite simular essas cargas em dutos flexíveis com comprimento de até 10m. A Figura IV.1 ilustra uma vista geral do equipamento.



Figura IV.1 – Vista geral da Máquina de Tração-Torção.

Para gerar as cargas, este equipamento possui dois cilindros hidráulicos, sendo que um impõe tração e o outro serve para impor torção ao espécime. Algumas das características dos cilindros hidráulicos de tração e torção são apresentadas na Tabela IV.1.

A Figura IV.2 ilustra a vista frontal e a seção longitudinal do cilindro hidráulico de tração, a Figura IV.3 ilustra uma vista geral dos atuadores de tração e torção.

Tabela IV.1 – Características dos cilindros hidráulicos de tração e torção.

Característica	Cilindro hidráulico de tração	Cilindro hidráulico de torção
Diâmetro interior do cilindro	250mm	140mm
Diâmetro da haste	95mm	70mm
Curso	800mm	300mm
Força nominal	1000kN	150kN
Pressão máxima	250bar (3625psi)	210bar (3045psi)

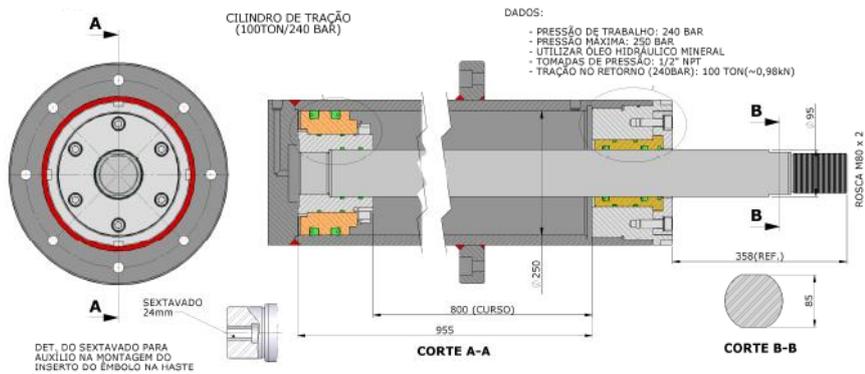


Figura IV.2 – Vista frontal e seção longitudinal do cilindro hidráulico de tração.

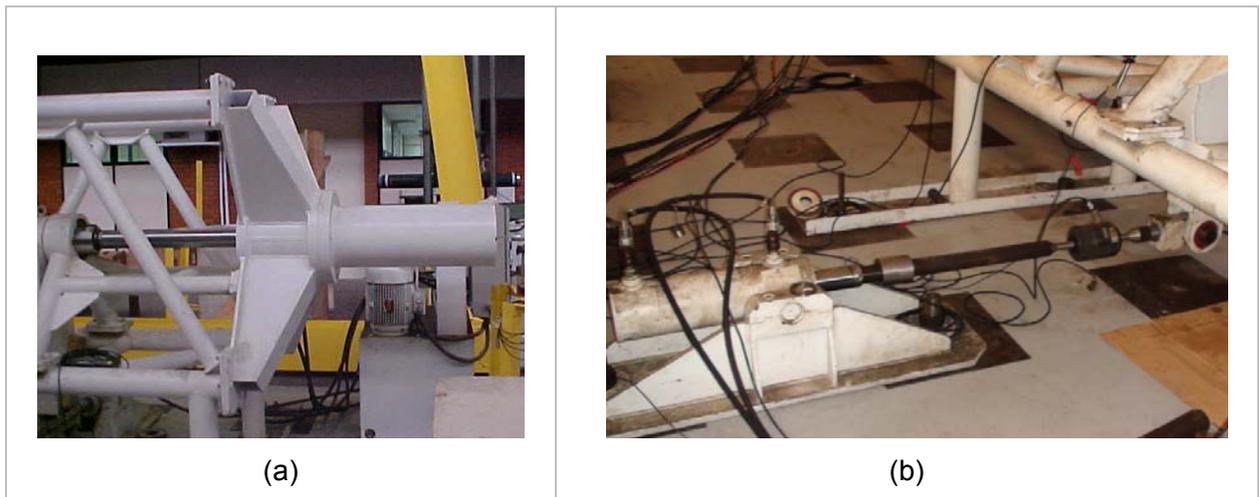


Figura IV.3 – (a) Atuador de tração, (b) Atuador de torção.

O sistema hidráulico utilizado permite que cada um dos cilindros seja movimentado independentemente, possibilitando que sejam realizadas diferentes simulações de carregamento e condições de contorno, como exposto na Tabela IV.2.

Tabela IV.2 – Máquina de Tração-Torção: Tipos de Carregamento e Condições de Contorno.

Ensaio	Tipo de carregamento		Condição de contorno	
	Tração	Torção	Axial	Rotação
1	Ativada	Nula	Sob Carga	Livre
2	Ativada	Ativada (*)	Sob Carga	Restrita
3	Ativada (*)	Ativada (-)	Restrita	Sob Carga
4	Ativada (*)	Ativada (+)	Restrita	Sob Carga

(*) – Sistema impõe força somente para garantir que o grau de liberdade fique restrito

(-) Sentido negativo de torção – horário

(+) Sentido positivo de torção – anti-horário

A Figura IV.4 ilustra os sistemas hidráulicos (a – Tração e b – Torção) utilizados para gerar as cargas de tração e de torção, que combinados com os respectivos atuadores podem gerar carregamentos de tração de até 1000kN e de torção de até 150kNm. Estes sistemas não possuem controles digitais permitindo somente que os carregamentos sejam controlados através da pressão injetada no cilindro hidráulico, isto é, somente é possível realizar ensaios com controle de força.



(a)



(b)

Figura IV.4 – Bombas hidráulicas utilizada no sistema de (a) tração e (b) torção.

A fim de medir as cargas impostas, cada atuador hidráulico possui uma célula de carga. No caso do sistema de tração, a célula de carga utilizada foi projetada para medir o carregamento axial através das deformações devidas ao cisalhamento puro. Esta célula foi fabricada em aço de alta resistência mecânica, sendo instalada no eixo do atuador axial, conforme pode ser visto em detalhe na Figura IV.5. Esta célula é denominada “*Load Cell 01*”. O outro sistema utilizou uma célula de carga convencional instalada no eixo que liga o sistema hidráulico ao braço de alavanca, conforme pode ser visto na Figura IV.6. Esta célula é denominada “*Load Cell 02*”. A Figura IV.7 ilustra a localização das células de carga “*Load Cell 01 e 02*” no equipamento.



Figura IV.5 – “Load Cell 01” no eixo de tração com capacidade de 1000kN na Máquina de Tração-Torção.

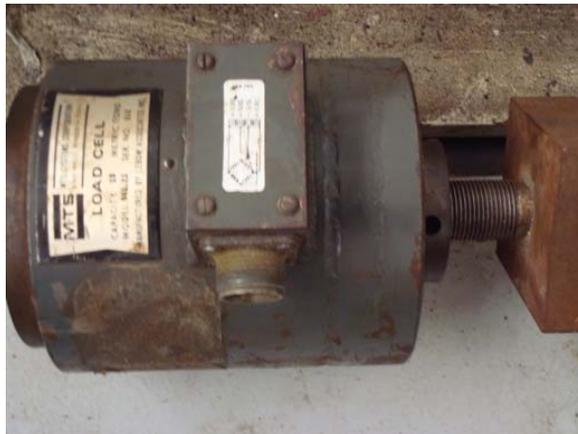


Figura IV.6 – “Load Cell 02” no eixo de torção com capacidade de 350kN na Máquina de Tração-Torção.

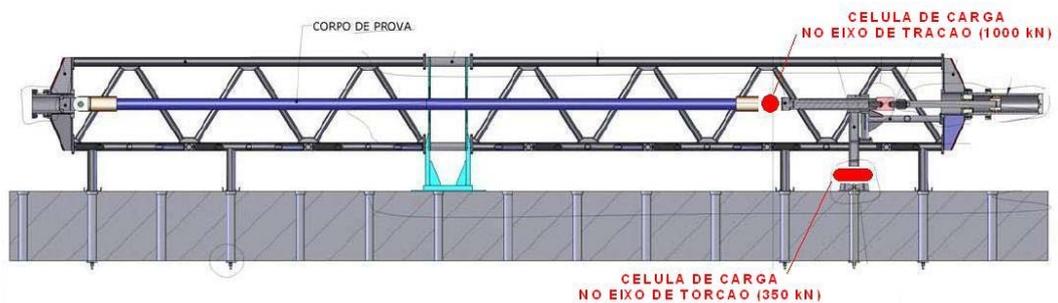


Figura IV.7 – Localização das células de carga de tração e torção no equipamento.

Para que seja possível aplicar a força de torção ao espécime, a Máquina Tração-Torção foi projetada de maneira que o sistema hidráulico atuasse sobre um braço de alavanca, o qual é fixado ao eixo do sistema de tração, permitindo assim transferir a torção desejada ao espécime. A Figura IV.8 apresenta algumas das características do braço de alavanca, sendo o seu peso aproximadamente de 1.75kN. Cabe ressaltar que o eixo do sistema axial foi projetado para não possuir nenhuma restrição a torção. No entanto, foi verificado experimentalmente a existência de forças de atritos que conduzem a uma torção estática de aproximadamente 0.18kNm.

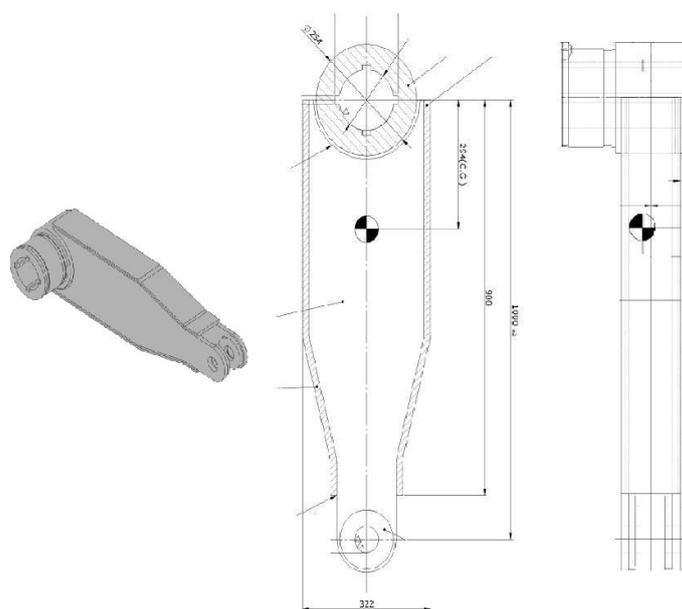


Figura IV.7 – Braço de torção da Máquina Tração-Torção.

IV.1 - Avaliação do equipamento e da instrumentação utilizada

Com o objetivo de avaliar o desempenho do equipamento e da instrumentação utilizada, foi realizada uma série de testes com um corpo de prova metálico, o qual é constituído por um tubo sólido de aço com diâmetro de 75mm e com conectores de cabeça de tração em ambas extremidades, conforme é ilustrado nas Figuras IV.9 e IV.10.

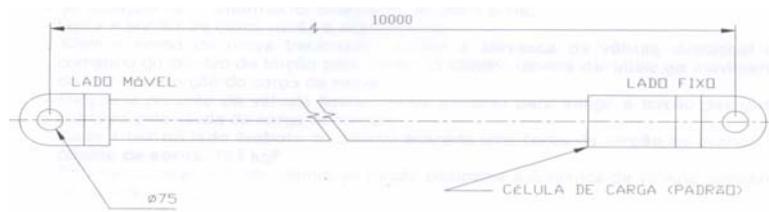


Figura IV.8 – Esquema do corpo de prova utilizado no equipamento.



Figura IV.9 – Corpo de prova montado no equipamento.

Neste teste a carga axial máxima aplicada foi na ordem de 400kN e a máxima torção foi de 60kNm, tendo sido utilizada a instrumentação descrita a seguir:

IV.1.1 - Células de carga

A fim de aferir a célula de carga de tração do equipamento, foi instalada uma célula de carga adicional, denominada “*MTS 01*” com capacidade de carga de 1500kN, como ilustrado na Figura IV.11. A Figura IV.12 apresenta a localização das células de carga “*MTS 01*”, e “*Load Cell 01*” no equipamento. Cabe ressaltar que a célula de carga “*MTS 01*” foi aferida antes utilizando-se uma prensa hidráulica, conforme ilustra a Figura IV.13. Este mesmo processo foi empregado para verificar a célula de carga “*Load Cell 02*” a qual foi utilizada para medir os carregamentos de torção.

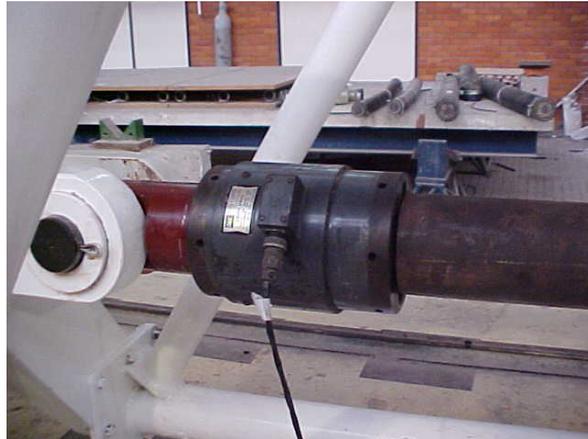


Figura IV.10 – Célula de carga “*MTS 01*” com capacidade de 1500kN, utilizada na calibração do “*Load Cell 01*”.

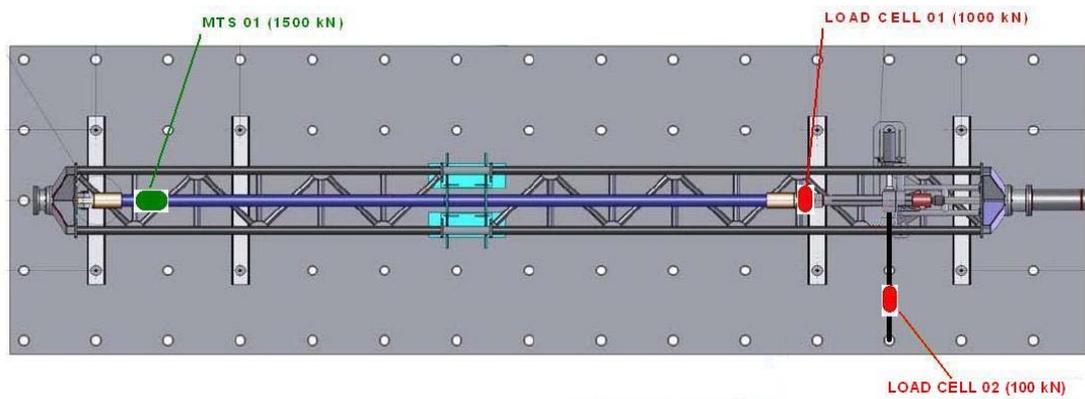


Figura IV.11 – Localização das células de carga utilizadas “*MTS 01*”, “*Load Cell 01* e *02*”.



Figura IV.12 – Calibração das células de carga na prensa hidráulica.

IV.1.2 - Flexímetros elétricos

Para medir o deslocamento axial da estrutura metálica foram instalados os flexímetros elétricos “*Flex 01*” (Figura IV.14) e “*Flex02*” (Figura IV.15), nas extremidades do equipamento. A convenção utilizada para o sinal dos flexímetros foi de maneira que quando estes mediam valores negativos apresentava um encurtamento da estrutura devido à tração aplicada no espécime. A Figura IV.16 ilustra a localização dos flexímetros “*Flex 01*” e “*Flex 02*” no equipamento. Ressalta-se que foi necessário utilizar estes dois flexímetros uma vez que o equipamento é somente algumas vezes mais rígido que os espécimes testados apresentando, assim, um pequeno encurtamento que deve ser descontado a fim de se obter o alongamento correto do espécime.



Figura IV.13 – Flexímetro “Flex 01” para medir o encurtamento na extremidade final do equipamento.

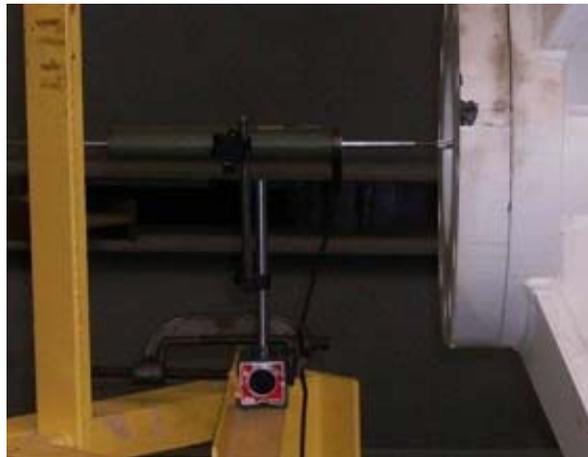


Figura IV.14 – Flexímetro “Flex 02” para medir o encurtamento na extremidade inicial do equipamento.

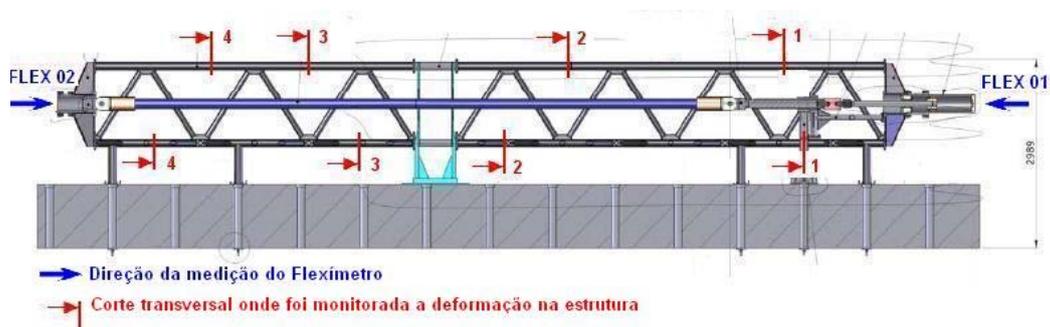


Figura IV.15 – Localização dos flexímetros elétricos na Máquina de Tração-Torção.

O encurtamento total da estrutura pode ser calculado como a soma dos encurtamentos das extremidades (*Flex 01* + *Flex 02*).

Nesta fase de pré-testes, também foram utilizados os flexímetros elétricos “*Flex 03*” (Figura IV.17) e “*Flex 04*” (Figura IV.18) instalados na parte superior da estrutura, conforme indicado, mais adiante, na Figura IV.20. O objetivo desta instrumentação foi avaliar a abertura transversal do quadro metálico e com isso verificar alguma possível instabilidade global.



Figura IV.16 – Flexímetro “*Flex 03*” para medir a abertura transversal do equipamento.



Figura IV.17 – Flexímetro “*Flex 04*” para medir a abertura transversal do equipamento.

IV.1.3 - Extensômetros elétricos

Para medir o alongamento devido à força axial e os possíveis efeitos de flexão associados à instabilidade global da máquina, foram utilizados 27 extensômetros elétricos de resistência uni-axiais, distribuídos em quatro seções transversais do equipamento (ver Figura IV.16). A Figura IV.19 ilustra as dimensões em (mm) do extensômetro utilizado e a Figura IV.20 apresenta a localização dos sensores elétricos em cada uma das seções transversais.

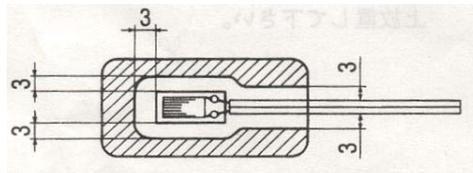


Figura IV.18 – Extensômetro elétrico utilizado na instrumentação do equipamento.

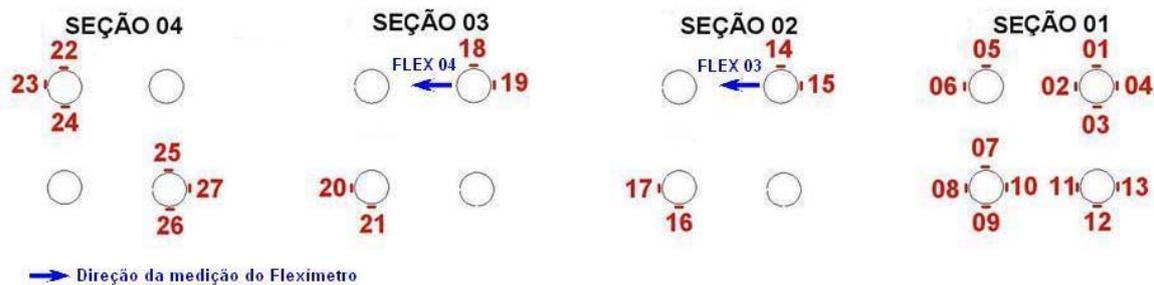


Figura IV.19 – Disposição dos extensômetros nas quatro seções da Máquina de Tração-Torção.

Cabe ressaltar que todos os extensômetros elétricos foram lidos em um quarto de ponte de *Wheatstone*, com os valores positivos representando tração e valores negativos compressão. A Figura IV.21 ilustra um extensômetro já colado na Máquina de Tração-Torção.

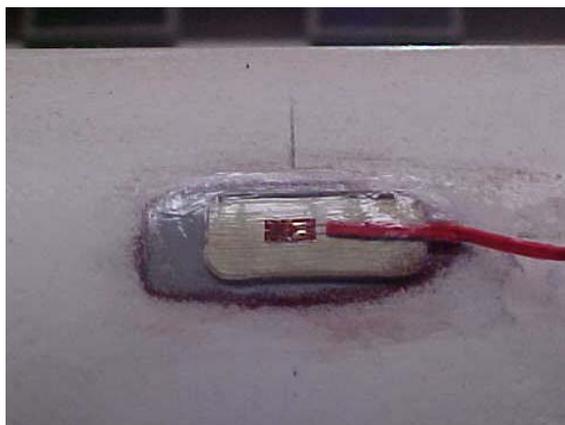


Figura IV.20 – Extensômetro elétrico colado na Máquina de Tração-Torção.

IV.2 - Correlação numérico-experimental do equipamento

Os valores dos deslocamentos e das deformações da Máquina Tração-Torção obtidos experimentalmente nos testes utilizando-se o corpo de prova metálico foram correlacionados aos valores obtidos através de um modelo numérico desenvolvido com o programa comercial SAP (*Structural Analysis Program*). Este procedimento foi realizado a fim de obter um modelo calibrado do equipamento de ensaios possibilitando verificar as tensões existentes e possíveis ocorrências de instabilidade global. Para a modelagem numérica da estrutura, foram considerados os seguintes parâmetros:

- Módulo de elasticidade longitudinal igual a 200GPa.
- Coeficiente de Poisson 0.3
- Peso por unidade de volume 76970N/m³
- Tensão de escoamento de 248MPa.
- Tensão de ruptura de 400MPa.

Os apoios dos extremos da estrutura foram considerados restringidos só na direção vertical, mas os apoios centrais foram restringidos nas três direções X, Y e Z. Estas hipóteses foram adotadas com a finalidade de representar melhor as condições de contorno reais do equipamento instalado no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. A Figura IV.22 apresenta uma vista do modelo numérico desenvolvido.

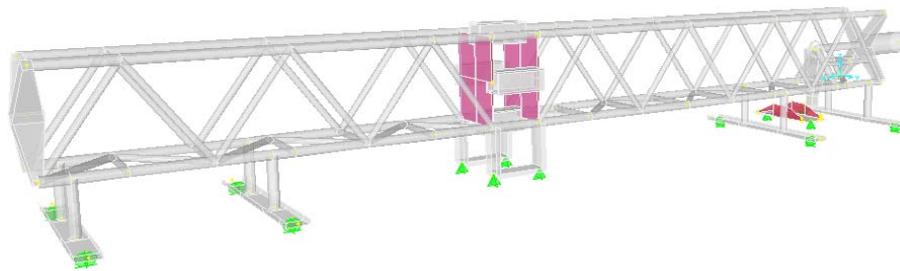


Figura IV.21 – Modelo numérico da Máquina de Tração-Torção.

A Figura IV.23 apresenta o gráfico de carga axial vs deslocamento obtido experimentalmente e numericamente.

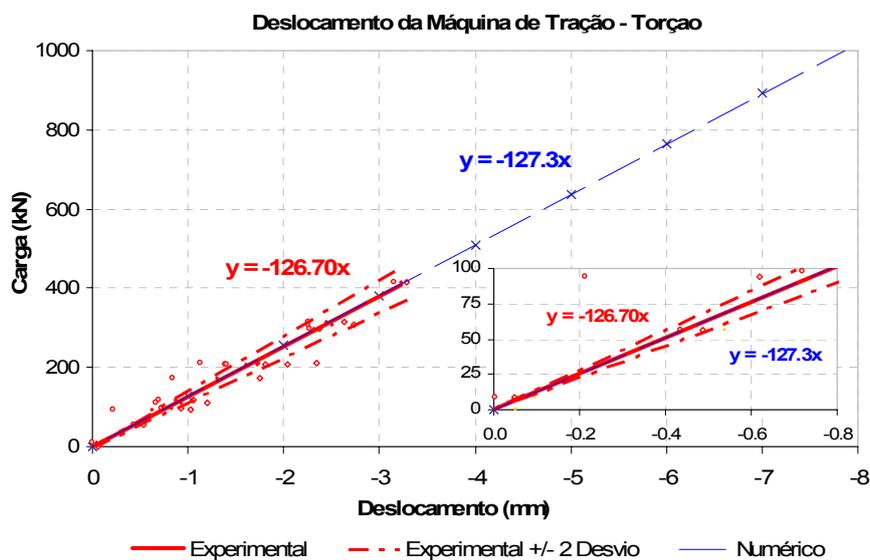


Figura IV.22 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deslocamento axial da Máquina de Tração-Torção.

A partir destes dados pode-se obter a rigidez axial do equipamento de 127.3kN/mm. Nota-se, na Figura IV.23, um comportamento linear com uma excelente correlação, indicando que o modelo numérico está representando fielmente o comportamento da estrutura. Cabe ressaltar que os valores negativos de deslocamento indicam que a estrutura sofre encurtamento ao aplicar carregamento de tração no espécime. Os deslocamentos obtidos mediante os flexímetros "Flex 03" e "Flex 04" foram

quase nulos, ou seja, não houve abertura transversal da estrutura metálica. Deste modo, não foi detectado nenhum tipo de instabilidade global do equipamento de ensaios.

Os valores das deformações experimentais foram obtidos de forma similar aos deslocamentos. Foi considerada, para cada valor médio de deformação, uma variação de dois desvios padrões para poder visualizar a margem de incerteza dos ensaios experimentais. As Figuras IV.24 a IV.33 apresentam os gráficos da carga axial vs deformação obtidos experimentalmente e numericamente para os extensômetros elétricos em cada seção. Pode-se observar nestas figuras um comportamento linear com uma boa correlação, indicando novamente que o modelo numérico está representando de forma adequada o comportamento da estrutura.

Onde $1\mu\text{st} = 10^{-6} \text{ m/m}$

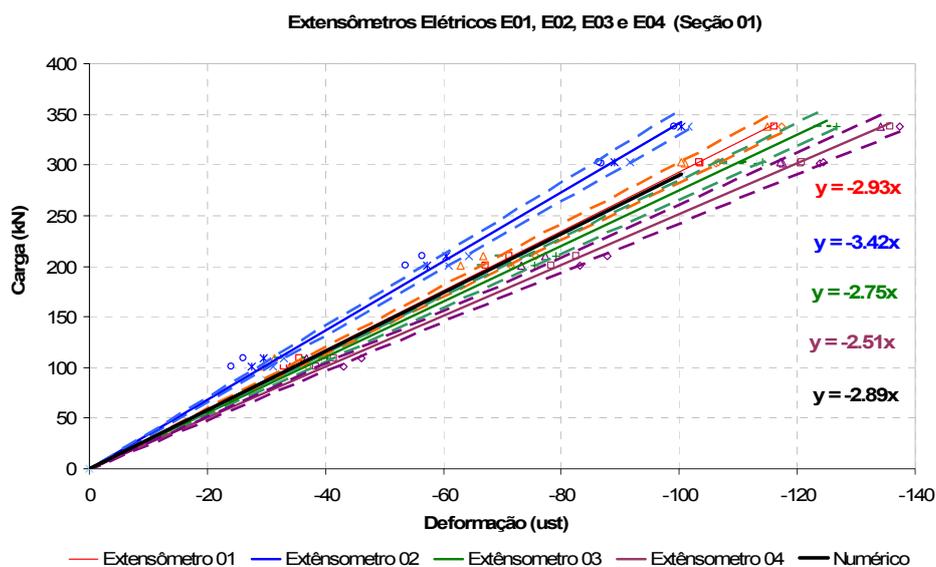


Figura IV.23 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E01, E02, E03 e E04 na seção 01.

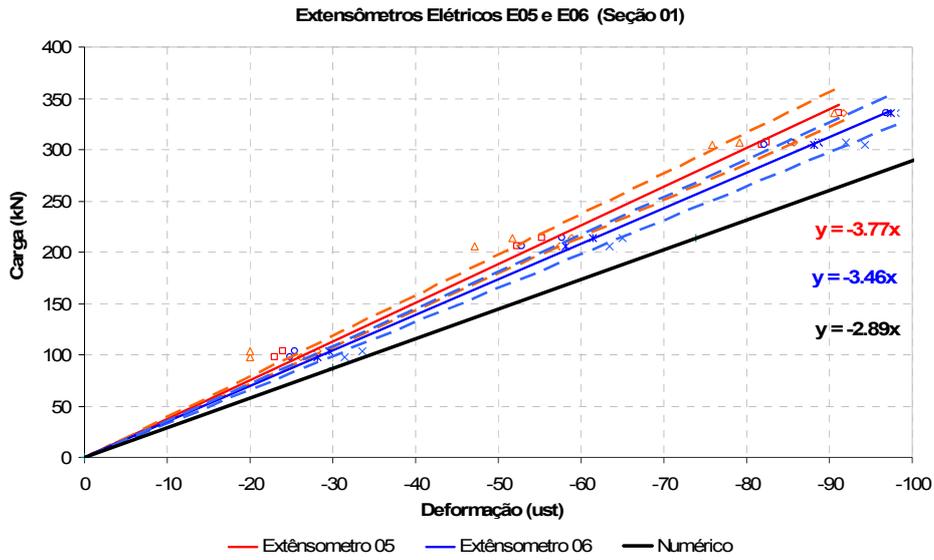


Figura IV.24 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E05 e E06 na seção 01.

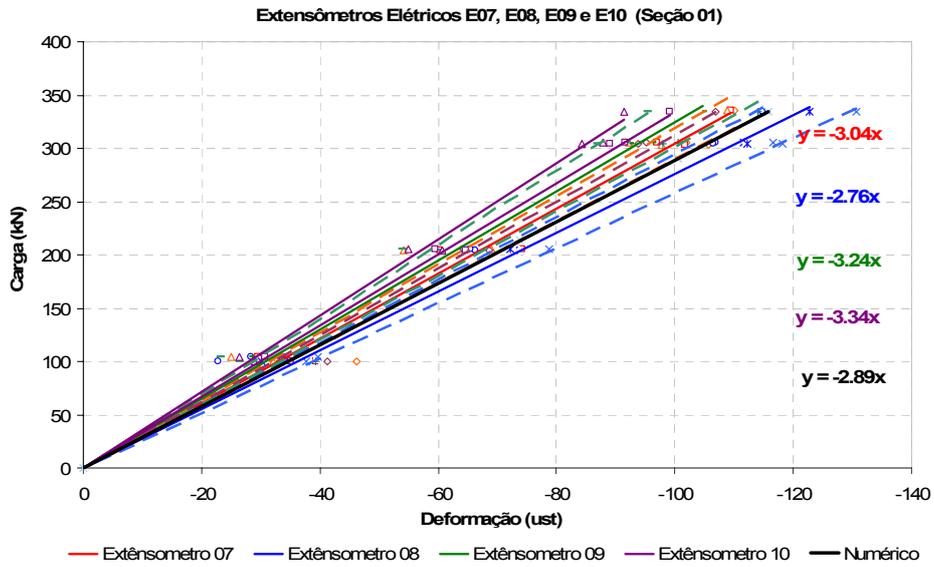


Figura IV.25 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E07, E08, E09 e E10 na seção 01.

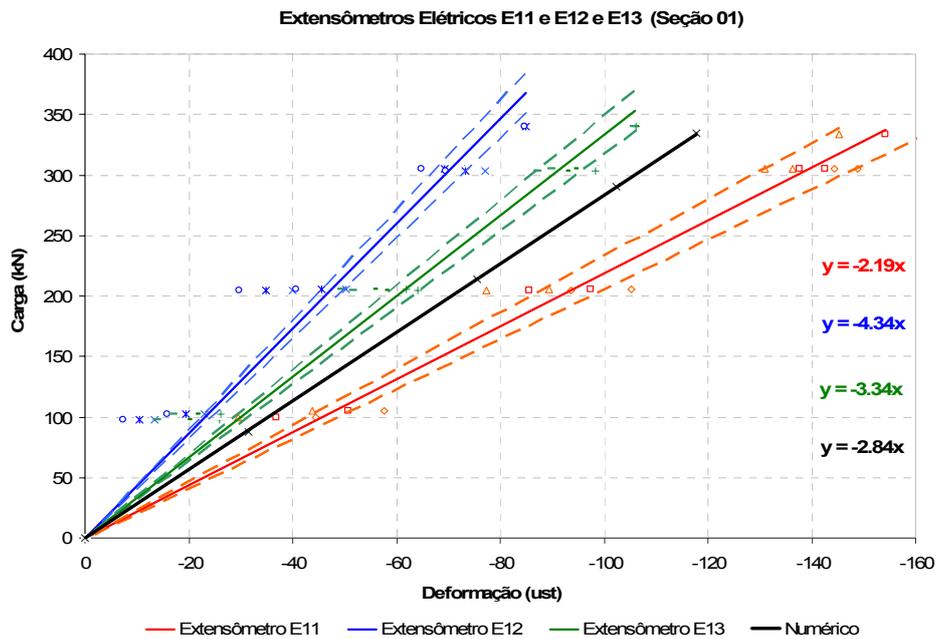


Figura IV.26 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E11, E12 e E13 na seção 01.

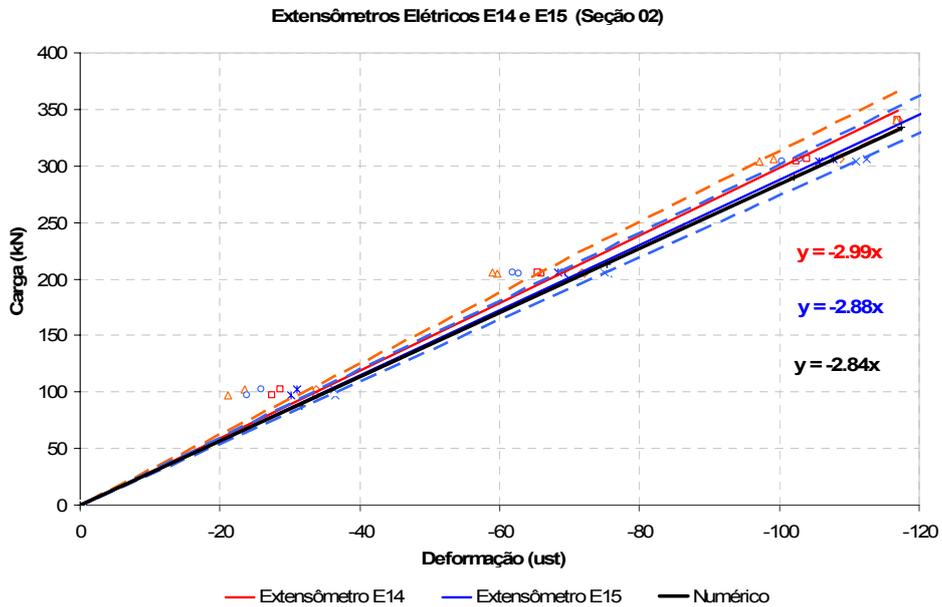


Figura IV.27 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E14 e E15 na seção 02.

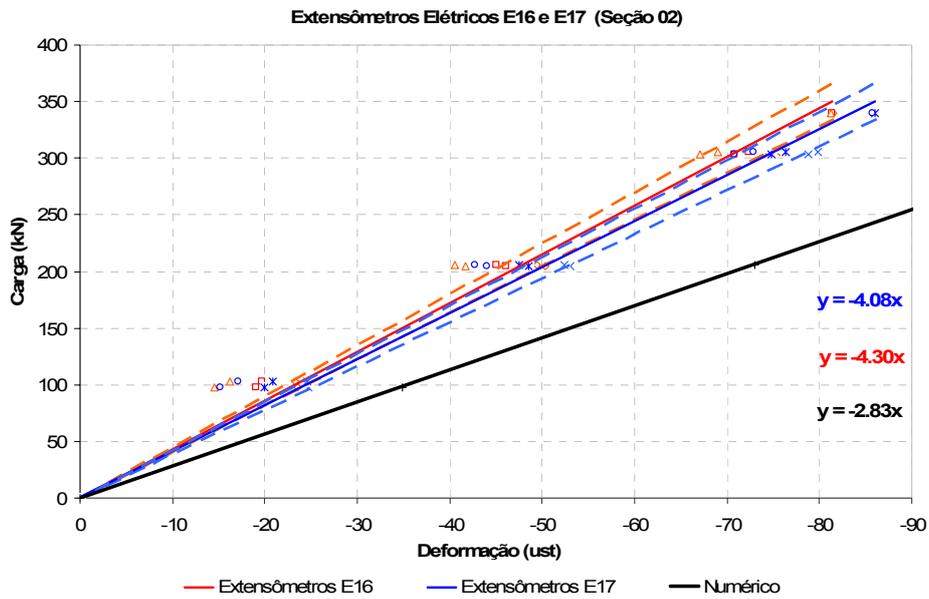


Figura IV.28 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E16 e E17 na seção 02.

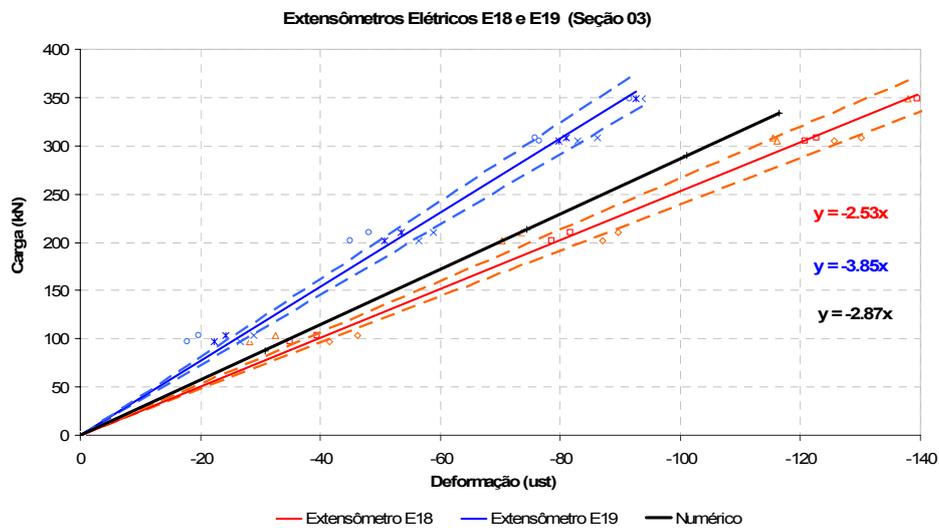


Figura IV.29 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E18 e E19 na seção 03.

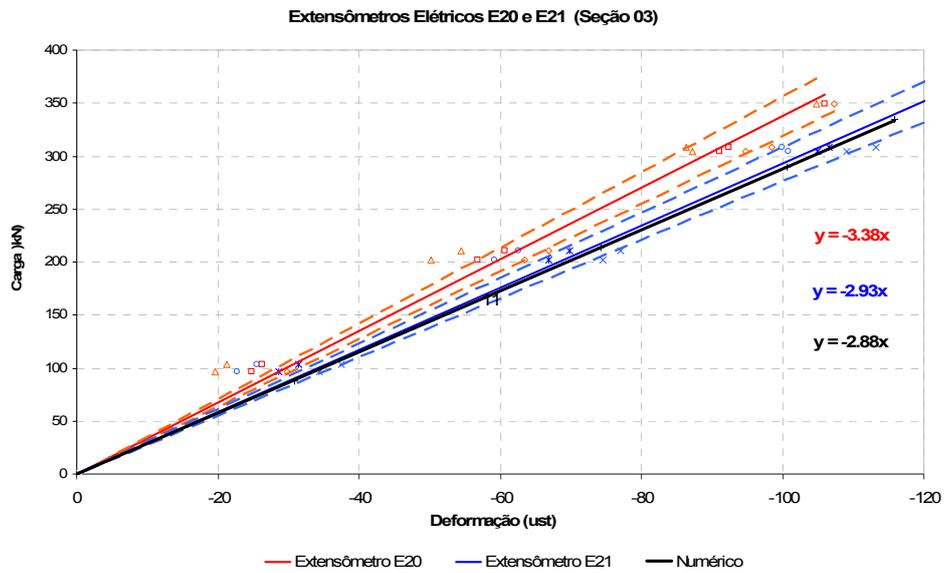


Figura IV.30 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E20 e E21 na seção 03.

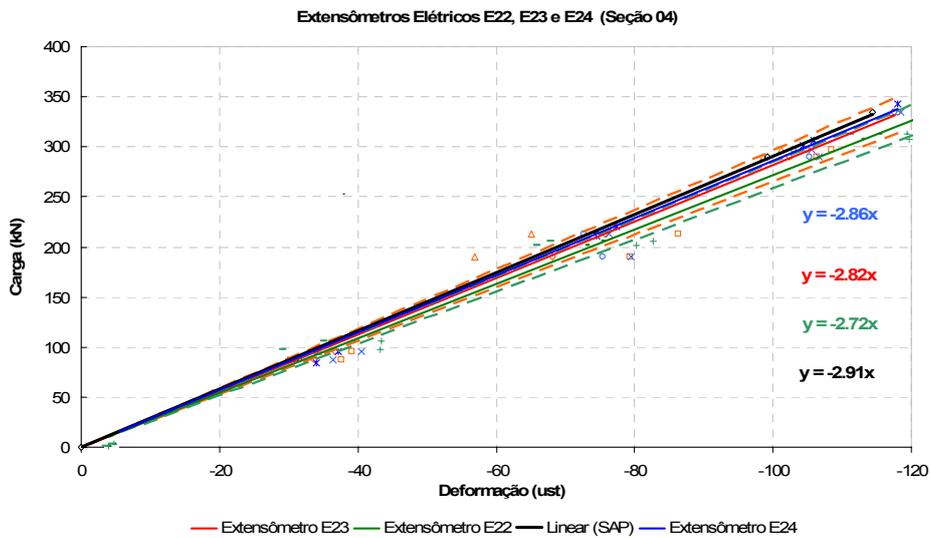


Figura IV.31 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E22, E23 e E24 na seção 04.

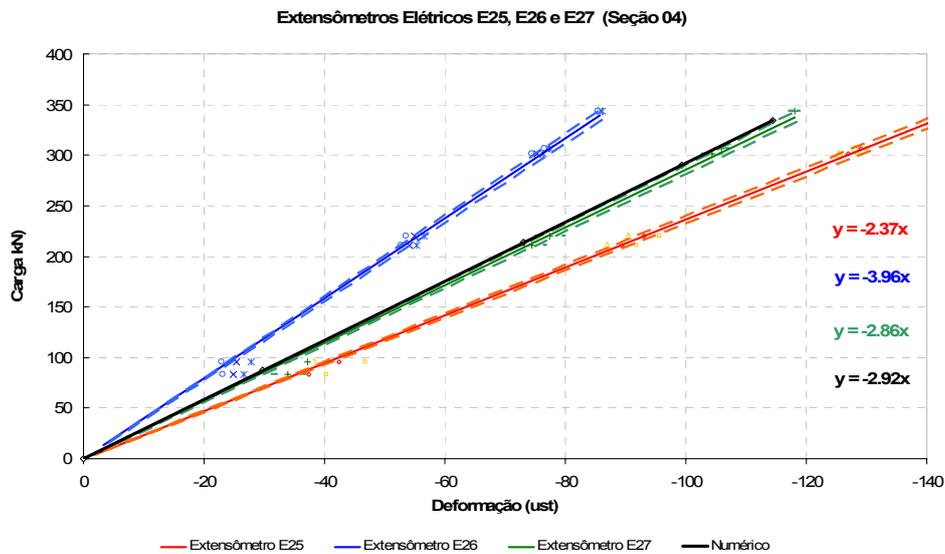


Figura IV.32 – Gráfico numérico e experimental de carga vs deformação axial para os Extensômetros Elétricos E25, E26 e E27 na seção 04.

A Tabela IV.3 apresenta uma comparação entre os valores médios da deformação experimental com as deformações obtidas numericamente por unidade de força, para cada extensômetro elétrico.

Pode se observar na Tabela IV.3 que, de um modo geral, os valores das deformações numéricas e experimentais são bem semelhantes, exceto para os extensômetros elétricos 16 e 17. Isto se deve ao fato de que nessa região se encontram o braço e o cilindro de torção, ambos fixados à placa de reação, que não foram modelados, conduzindo, assim, a uma distribuição de tensões distinta do modelo numérico.

Para o carregamento máximo de tração de 1000kN, segundo o modelo numérico, o elemento mais crítico da estrutura teve uma deformação de 370µst, isto é, uma tensão de 74MPa que está muito abaixo do valor da tensão de ruptura de 400MPa, assegurando o bom funcionamento da Máquina de Tração-Torção. É importante ressaltar que o valor do deslocamento (encurtamento) da estrutura, correspondente ao valor da carga máxima, é de 7,9mm. Assim para cada nível de carga o encurtamento da estrutura foi medido, estes valores foram considerados mais adiante para obter o verdadeiro alongamento do duto flexível.

Tabela IV.3 – Comparação das deformações experimentais e numéricas

Extensômetro	F/ε (kN/10 ⁻⁶ m/m)		
	Experimental	Numérico	
SEÇÃO 1	E 01	2.90	2.89
	E 02	3.40	2.89
	E 03	2.80	2.89
	E 04	2.65	2.89
	E 05	3.80	2.90
	E 06	3.45	2.89
	E 07	3.05	2.98
	E 08	2.80	2.83
	E 09	3.20	2.69
	E 10	3.30	2.83
	E 11	2.20	2.83
	E 12	3.88	2.70
	E 13	3.58	2.83
SEÇÃO 2	E 14	3.00	2.86
	E 15	2.90	2.84
	E 16	4.10	2.88
	E 17	4.10	2.89
SEÇÃO 3	E 18	2.65	2.89
	E 19	3.75	2.87
	E 20	3.35	2.88
	E 21	2.90	2.79
SEÇÃO 4	E 22	2.70	2.87
	E 23	2.80	2.86
	E 24	2.84	2.84
	E 25	2.40	3.04
	E 26	3.90	2.81
	E 27	2.85	2.92

CAPÍTULO V

ENSAIO EXPERIMENTAL DO DUTO FLEXÍVEL

Vários autores apresentaram dados oriundos de ensaios experimentais de dutos flexíveis sob a ação de cargas axissimétricas como, por exemplo, os trabalhos de BECH *et al.* (1992), WITZ (1996) e RAMOS Jr. *et al.* (2008). Estes ensaios foram voltados para a avaliação do efeito de alguns parâmetros, tais como frequência, amplitude da carga e pressão interna, na resposta do duto flexível aos carregamentos axissimétricos de tração e torção.

No presente trabalho foram realizados ensaios experimentais em um duto flexível submetida à cargas axissimétricas de tração e torção voltados para a avaliação do efeito de alguns parâmetros tais como as condições de contorno e o coeficiente de atrito entre as camadas do duto.

V.1 - Descrição da instrumentação

A Figura V.1 mostra um esquema da instrumentação utilizada, a qual constou basicamente dos sensores descritos a seguir.

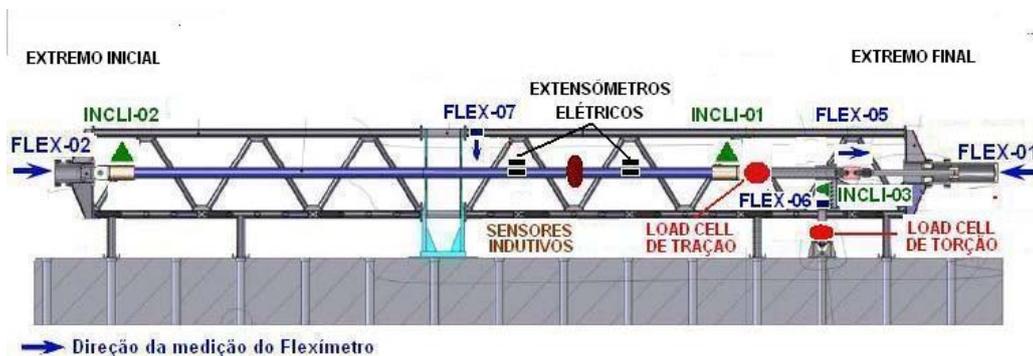


Figura V.1 – Instrumentação utilizada no ensaio do duto flexível de 4”.

V.1.1 - Células de carga

Utilizaram-se as células de carga de tração “*Load Cell 01*” (Figura V.2a), e de torção “*Load Cell 02*” (Figura V.2b), calibradas nos testes com o corpo de prova metálico, para ter controle da força aplicada no duto flexível.

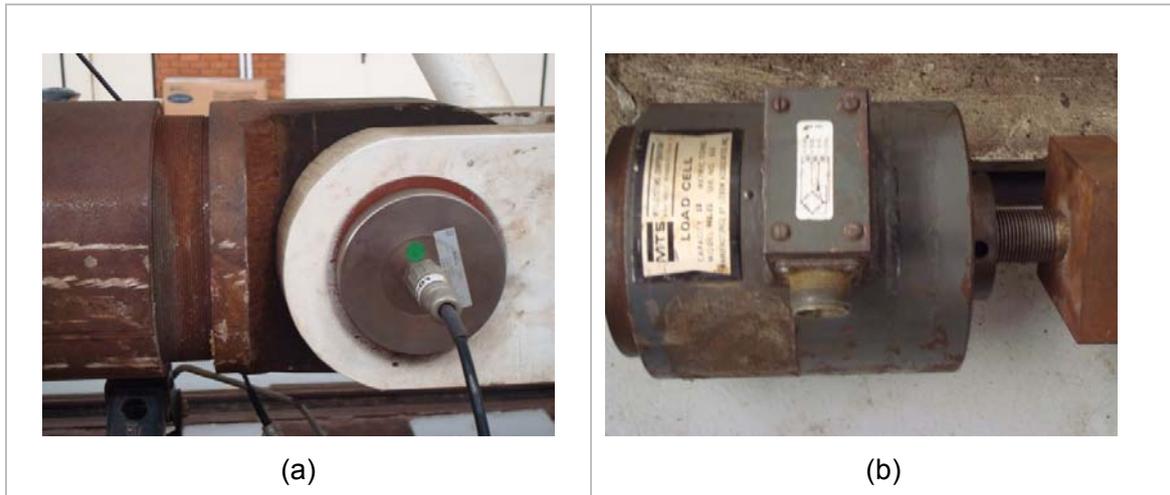


Figura V.2 – (a) “*Load Cell 01*” utilizado para medir a força de tração; (b) “*Load Cell 02*” utilizado para medir a força de torção.

V.1.2 - Flexímetros elétricos

Para medir o deslocamento da estrutura foram utilizados os flexímetros “*Flex 01*” (Figura IV.14) e “*Flex 02*” (Figura IV.15) utilizados nos testes com o corpo de prova metálico. Também foram utilizados adicionalmente, o flexímetro “*Flex 05*” (Figura V.3), para medir o avanço do eixo de tração, e o flexímetro “*Flex 06*” (Figura V.4), para medir o avanço do eixo de torção. A Figura V.1 ilustra a localização de cada um dos flexímetros na Máquina de Tração-Torção.

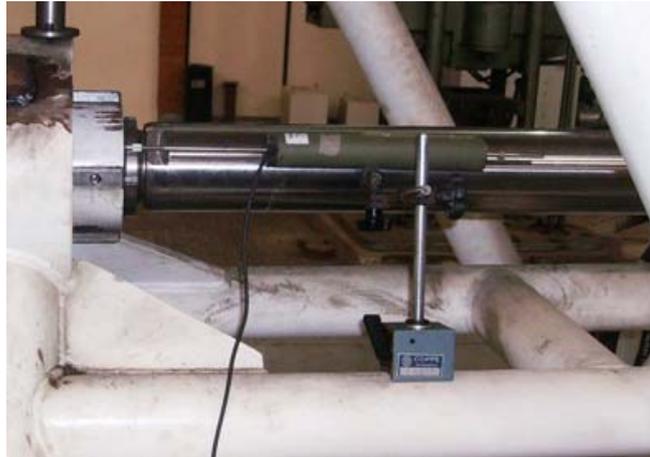


Figura V.3 – Flexímetro “*Flex 05*” utilizado para medir o avanço do eixo de tração da Máquina de Tração-Torção.



Figura V.4 – Flexímetro “*Flex 06*” utilizado para medir o avanço do eixo de torção da Máquina de Tração-Torção.

A convenção utilizada para o sinal dos flexímetros “*Flex 01*” e “*Flex 02*”, foi a mesma utilizada nos testes com o corpo de prova metálico. O flexímetro “*Flex 05*” mediu valores positivos com o recuo do eixo de tração (alongamento do duto flexível) e o flexímetro “*Flex 06*” mediu valores negativos no sentido da rotação anti-horária no duto flexível.

Ao posicionar o duto flexível dentro da Máquina Tração-Torção, o duto não ficava totalmente esticado (ver Figura V.5). Esta posição foi adotada como a origem dos instrumentos de carga e deslocamento. Foi também instalado o flexímetro “Flex 07” (Figura V.6) na parte central da estrutura a fim de monitorar a flecha vertical do duto com o aumento da carga e obter a força mínima necessária F_{min} capaz de manter o duto esticado na posição próxima a horizontal. A Figura V.6 apresenta a montagem do flexímetro “Flex 07” na parte central da estrutura.

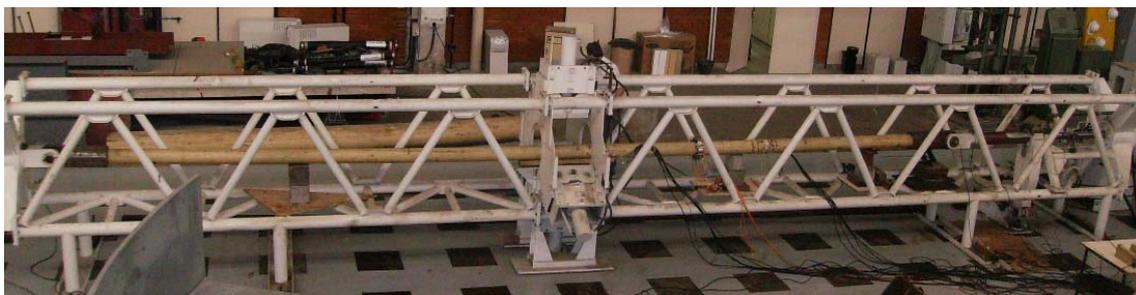


Figura V.5 – Posicionamento do duto na Máquina de Tração-Torção.



Figura V.6 – Flexímetro “Flex 07” utilizado para medir a flecha do duto com o aumento da carga.

O flexímetro “Flex 07” foi fixado na parte superior central da estrutura mediante uma base magnética e com ajuda de um fio metálico tracionado desde a ponta do flexímetro até a capa externa do duto, permitindo medir a variação da flecha no duto.

V.1.3 - Inclinômetros elétricos

Para medir a rotação axial do duto flexível com o aumento da carga, foram utilizados os inclinômetros “*Inc 01*” (Figura V.7) e “*Inc 02*” (Figura V.8), os quais foram posicionados nos extremos do duto flexível. A localização destes inclinômetros na estrutura é ilustrada na Figura V.1. Os inclinômetros foram montados em chapas retangulares de aço e fixados por meio de bases magnéticas aos extremos do duto.



Figura V.7 – Inclinômetro “*Inc 01*” utilizado para medir a rotação do duto no extremo final.



Figura V.8 – Inclinômetro “*Inc 02*” utilizado para medir a rotação do duto no extremo inicial.

Cabe ressaltar que a rotação do duto flexível na Máquina de Tração-Torção só é permitida no extremo final (*Inc 01*). No extremo inicial (*Inc 02*), o duto flexível é impedido de girar, embora a rotação tenha sido monitorada para verificar se esta condição estava sendo respeitada.

Com a finalidade de avaliar se o sistema impunha de forma adequada a restrição à rotação axial do duto durante os ensaios de tração com rotação axial restrita, esta rotação foi monitorada no braço de torção da estrutura utilizando-se o inclinômetro "Inc 03". A Figura V.9 ilustra a montagem do inclinômetro "Inc 03" no braço de torção.



Figura V.9 – Inclinômetro "Inc 03" utilizado para medir a rotação do braço de torção.

V.1.4 - Sensores sem contato

Para medir a variação radial da camada plástica externa, foram utilizados seis sensores sem contato, os quais foram montados em um anel metálico de forma hexagonal mostrado na Figura V.10. Estes sensores foram posicionados na parte central do duto com a finalidade de evitar qualquer perturbação associada aos conectores nas extremidades do duto. A Figura V.11 apresenta a montagem dos sensores radiais na parte central do duto flexível.

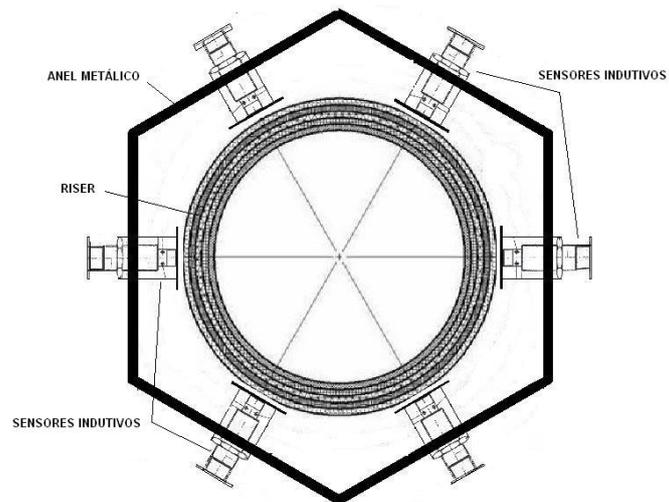


Figura V.10 – Esquema dos sensores indutivos.



Figura V.11 – Montagem dos sensores indutivos no duto flexível.

Cabe ressaltar que a medida experimental da variação radial no duto flexível na camada plástica externa foi calculada como a média aritmética das três diferenças entre as medidas dos sensores diametralmente opostos instalados no anel metálico.

V.1.5 - Extensômetros elétricos

Para medir a deformação na camada plástica externa, foram utilizados 4 extensômetros elétricos de resistência tri axiais, isto é, cada um é capaz de medir a deformação na direção axial, diagonal e transversal simultaneamente. Os extensômetros foram localizados em duas seções centrais do duto flexível, afastadas de 2m uma da outra. Em cada seção, foi colado um extensômetro na parte superior e outro na parte lateral da camada plástica do duto, conforme apresentado na Figura V.12. A Figura V.13 apresenta um extensômetro tri axial colado na camada plástica externa.

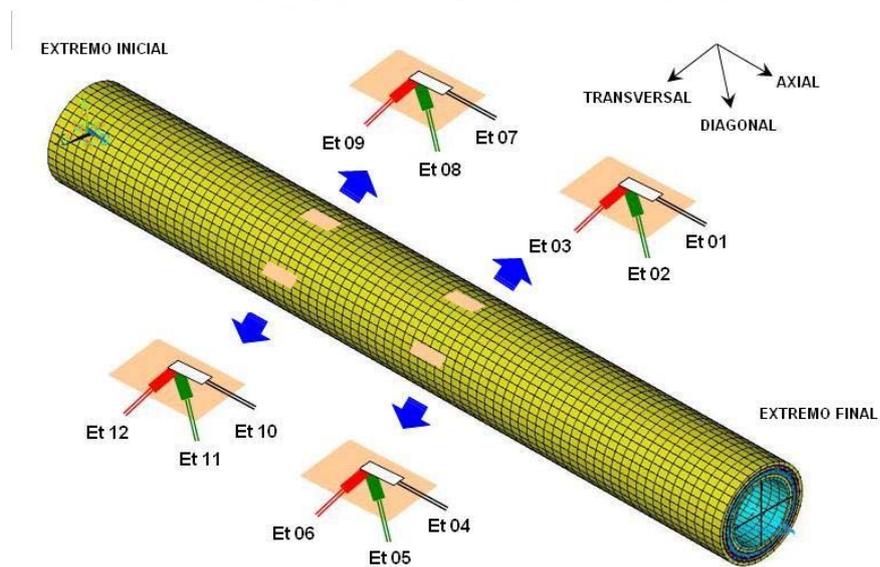


Figura V.12 – Localização dos extensômetros tri axiais na camada plástica externa.

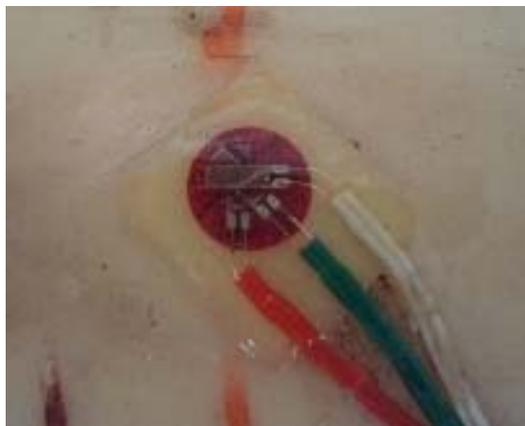


Figura V.13 – Extensômetro triaxial colado na camada plástica externa.

V.1.6 - Convenção de sinais

A Figura V.14 apresenta os sentidos dos sinais positivos de deslocamento, rotação axial e variação radial do duto flexível, isto é, um deslocamento axial positivo corresponde ao alongamento do duto, uma rotação axial positiva corresponde a uma rotação no sentido anti-horário e, por último, uma variação radial positiva corresponde ao aumento radial do duto.

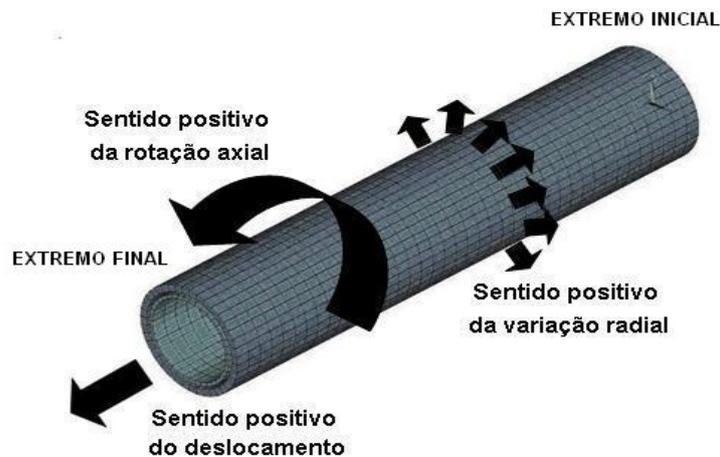


Figura V.14 – Convenção dos sinais adotados nos testes.

V.2 - Descrição dos testes realizados

Em todos os ensaios, os sinais dos sensores foram monitorados com uma frequência de aquisição de 5Hz. O comprimento total do duto flexível (incluindo os conectores) foi de 10.0m e o comprimento efetivo (excluindo os conectores) foi de 8.9m.

Antes do início do ensaio, todos os sinais dos sensores foram ajustados para o valor zero e o ensaio era, então, iniciado. Primeiramente, era aplicado um carregamento crescente, tendo-se o cuidado de mantê-lo dentro dos limites máximos estipulados. Atingindo o limite estipulado, o carregamento era aliviado, retornando a uma posição próxima a inicial, mantido por um pequeno intervalo de tempo nesta configuração. Este processo era repetido algumas vezes permitindo assim avaliar a repetibilidade dos resultados medidos.

Conforme apresentado anteriormente, foram realizados quatro tipos de ensaios:

- i) Tração com rotação axial livre;
- ii) Tração com rotação axial restrita;
- iii) Torção horária com força axial inicial de 150kN, 300kN e 500kN e com deslocamento axial restrito;
- iv) Torção anti-horária com força axial inicial de 150kN, 300kN e 500kN e deslocamento axial restrito.

Em cada um dos casos foram realizados dois ensaios com pelo menos três ciclos de carga e descarga com a finalidade de avaliar adequadamente a repetição dos resultados experimentais.

V.2.1 - Ensaio de tração

O carregamento de tração no duto flexível foi aplicado ciclicamente desde zero até o máximo valor de 450kN. Três ciclos de carga foram aplicados para as duas diferentes condições de contorno. No ensaio de tração com rotação axial livre, a rotação do duto foi monitorada. Por outro lado, no ensaio de tração com rotação axial restrita, a reação do momento de torção no duto foi monitorada.

A Figura V.15 apresenta o sinal típico de carga utilizado nos ensaios de tração no duto. Cabe ressaltar que o carregamento de tração foi imposto a uma taxa média de 9kN/s com um período aproximado de 75s para cada ciclo de carga e descarga. As Figuras V.16, V.17, V.18 e V.19 ilustram respectivamente como variam o alongamento axial típico nos ensaios de tração, a rotação axial no ensaio de tração com a rotação livre, o torque no ensaio de tração com a rotação restrita e a variação radial típica do duto nos ensaios de tração.

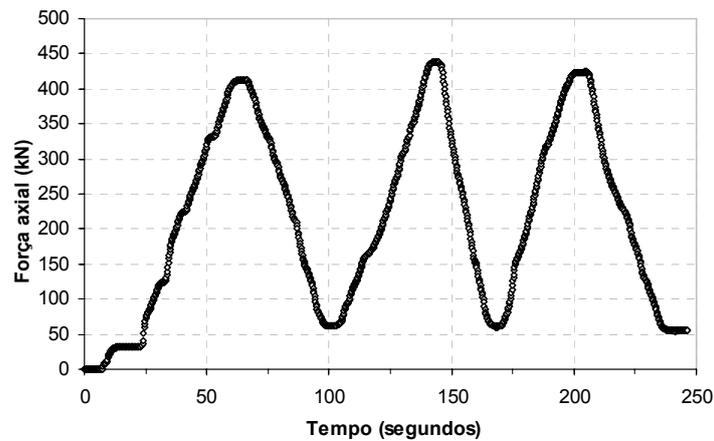


Figura V.15 – Ciclos de carga típicos nos ensaios de tração.

Nota-se, de um modo geral nestes resultados, que o comportamento do espécime nas duas situações de ensaio de tração, sem e com restrição à rotação axial, apresenta uma boa repetibilidade, retornando sempre a valores bem próximos aos iniciais. Cabe ressaltar que nestes ensaios, na fase de descarregamento, foi mantido sempre um pequeno resíduo de carga axial conforme pode ser observado na Figura V.15. Conforme se pode observar na Figuras V.16 a V.19, este resíduo de carga axial acarretou em um resíduo nas medições dos demais sensores.

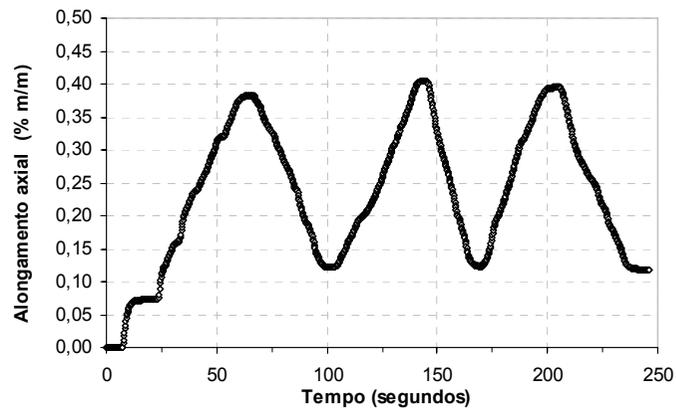


Figura V.16 – Alongamento axial típico obtido nos ensaios de tração com o extremo final livre e restrito à rotação axial.

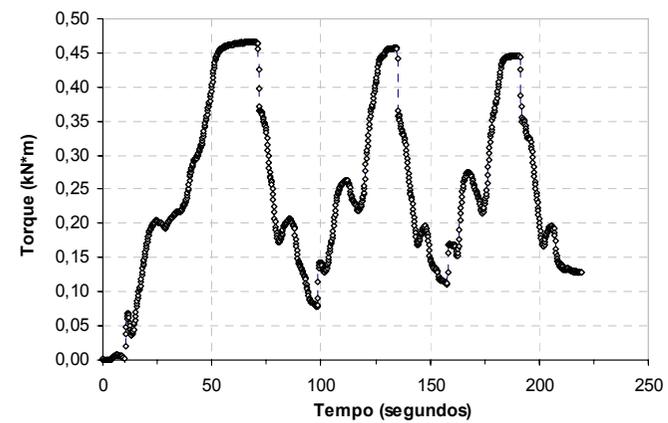


Figura V.18 – Torque obtido no ensaio de tração com o extremo final restrito à rotação axial.

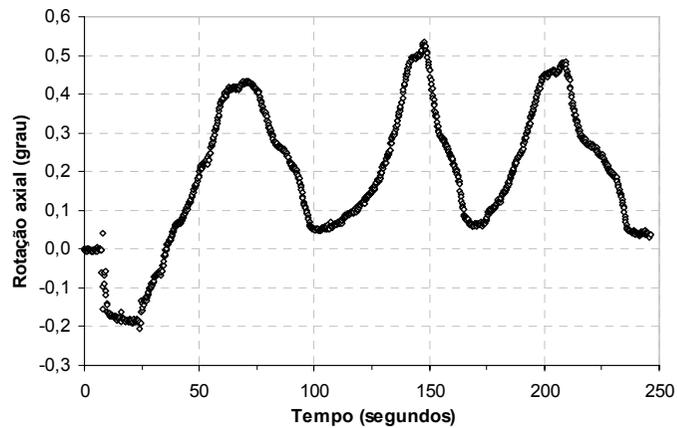


Figura V.17 – Rotação axial obtida no ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial.

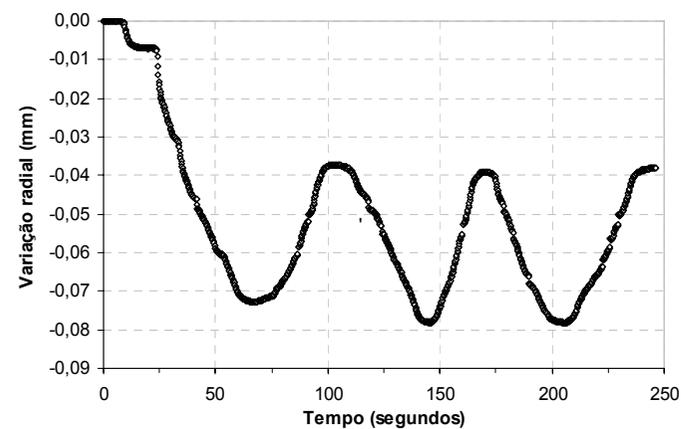


Figura V.19 – Variação radial típica dos ensaios de tração com o extremo final livre e restrito à rotação axial.

A Figura V.20 apresenta a flecha central medida devido ao peso próprio do duto flexível com o aumento da carga, no ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial. Como esperado, a flecha reduz à medida que a força axial aumenta. Nota-se, também, que a flecha apresenta uma variação não linear com a carga aplicada. A taxa de variação decresce com o aumento da carga atingindo um valor praticamente estável a partir de 300kN. Deste modo, a partir dessa carga, pode-se afirmar que o duto está próximo de sua posição horizontal. Deve-se destacar que um comportamento similar a este também foi observado no ensaio de tração com o extremo restrito à rotação axial.

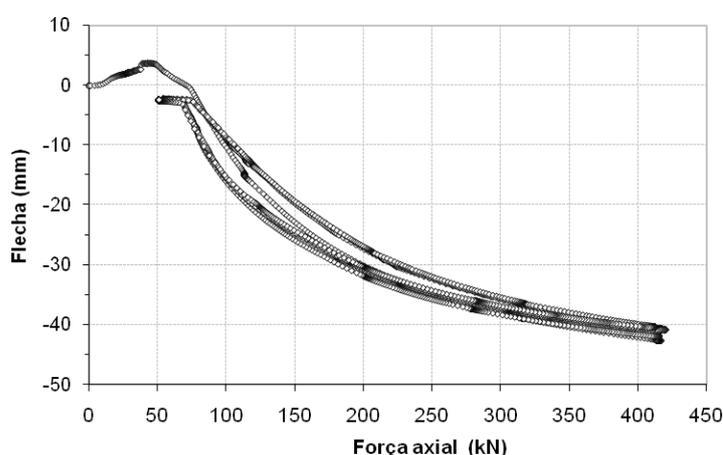


Figura V.20 – Flecha do duto vs força axial aplicada.

As Figuras V.21 e V.22 apresentam, respectivamente, a variação da flecha com a força axial e o alongamento axial para o ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial. As Figuras V.23 e V.24 apresentam os mesmos resultados para o ensaio de tração com o extremo final restrito à rotação axial.

Pode-se observar nas Figuras V.21 e V.22 que, no ensaio de tração com o extremo livre à rotação axial, existe uma considerável variação da flecha central no duto, até atingir uma força axial aproximada de 300kN, equivalente a um alongamento axial de 0.27% m/m . Depois deste valor, a flecha central do duto permanece quase constante com o aumento da carga aplicada.

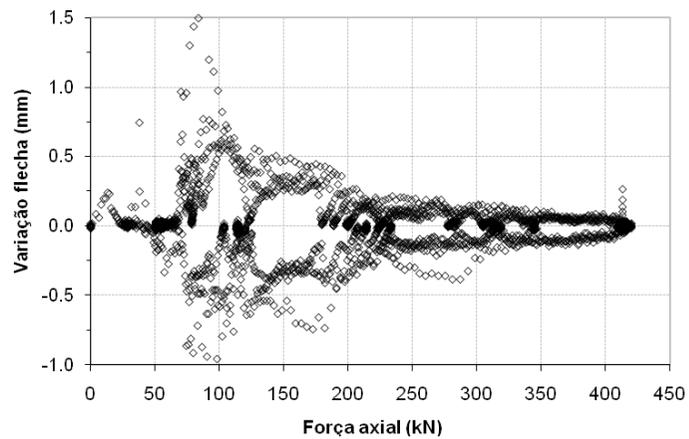


Figura V.21 – Variação da flecha vs força axial: ensaio de tração com o extremo livre à rotação axial.

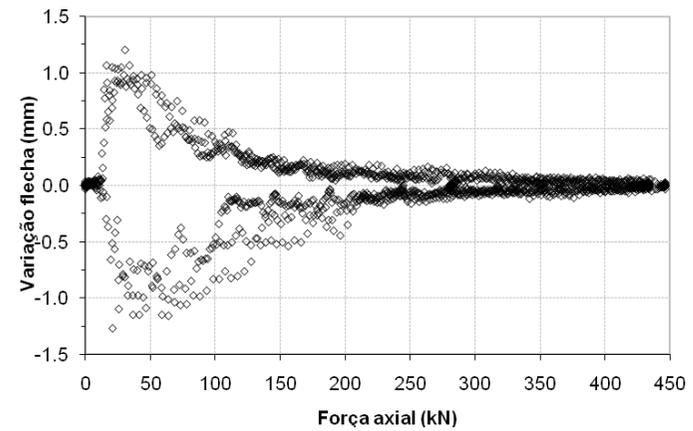


Figura V.23 – Variação da flecha vs força axial: ensaio de tração com o extremo restrito à rotação axial.

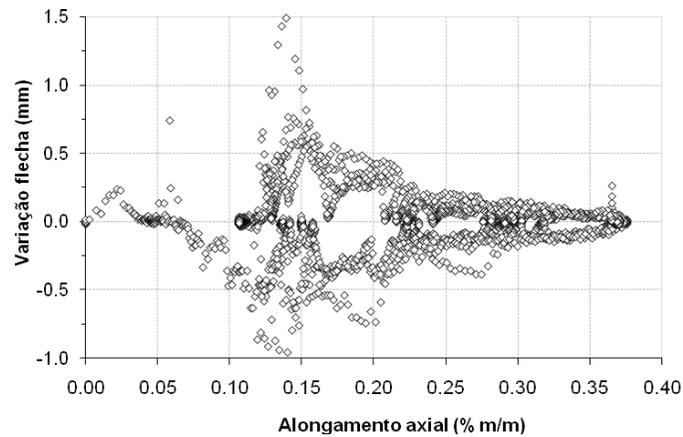


Figura V.22 – Variação da flecha vs alongamento axial: ensaio de tração com o extremo livre à rotação axial.

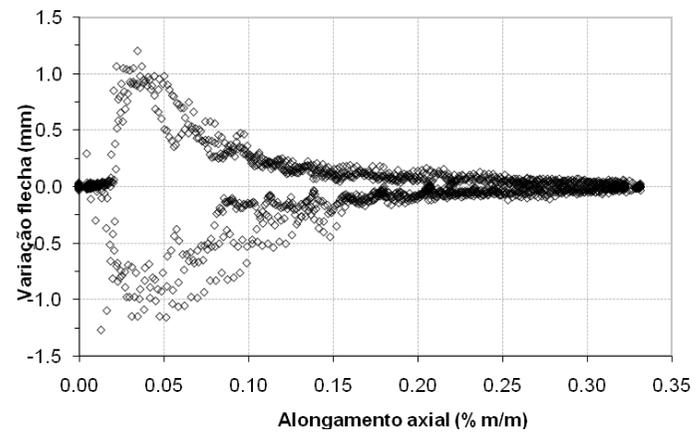


Figura V.24 – Variação da flecha vs alongamento axial: ensaio de tração com o extremo restrito à rotação axial.

Pode-se observar nas Figuras V.23 e V.24 que, no ensaio de tração com o extremo restrito à rotação axial, também existe uma considerável variação da flecha central no duto até se atingir uma força axial de 250kN, equivalente a um alongamento axial de 0.20%/m. Depois deste valor, a flecha do duto permanece quase constante com o aumento da carga aplicada.

Desta maneira, de acordo com os resultados dos gráficos apresentados, obtém-se um valor de força axial mínima de 300kN para manter o duto próximo à posição horizontal que corresponde a modelagem numérica realizada. Para valores de força axiais inferiores a 300kN, o duto se encontra submetido a efeitos de flexão devidos a seu peso próprio. Nessa configuração, a rotação axial do duto é afetada, mas o deslocamento axial não sofre alteração significativa. Para ter certeza do valor obtido de força mínima 300kN nos resultados experimentais, foi feita uma análise numérica que representa o comportamento da flecha central no duto flexível ao aplicar o carregamento axial. Essa análise é apresentada no anexo A.

Assim, na correlação entre os valores experimentais e numéricos para a rotação axial e o torque obtidos nos ensaios de tração, serão tomados os valores correspondentes a uma força axial maior ou igual a 300kN. Para valores de força axial menores que 300kN, a rotação axial e o torque são consideravelmente afetados pela flexão imposta ao duto flexível por seu peso próprio.

No ensaio de tração com os extremos restritos à rotação axial, foi medida através das rotações do braço de torção e também através de um inclinômetro fixado diretamente ao duto flexível. Esta monitoração através de dois sensores distintos foi realizada com a finalidade de verificar se existia algum tipo de folga do equipamento que pudesse permitir a rotação do duto, apesar do braço de torção ter sido fixado.

A Figura V.25 apresenta a variação da rotação do braço de torção e do duto com a força axial aplicada, enquanto a Figura V.26 apresenta as mesmas variações em função do alongamento axial imposto.

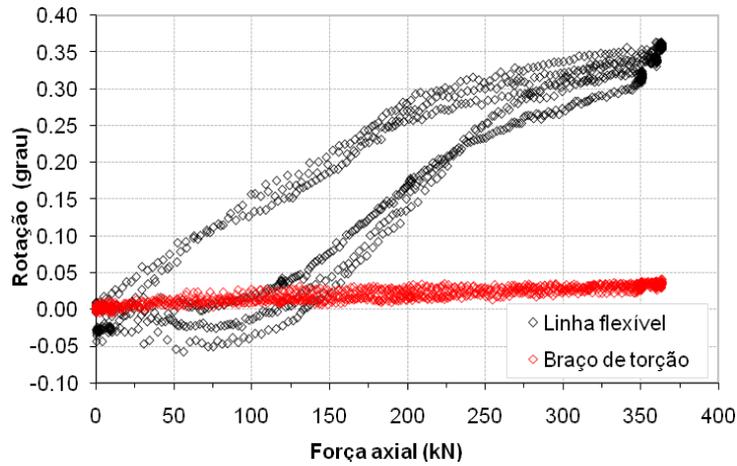


Figura V.25 – Rotação do braço de torção e rotação axial do duto vs força axial aplicada.

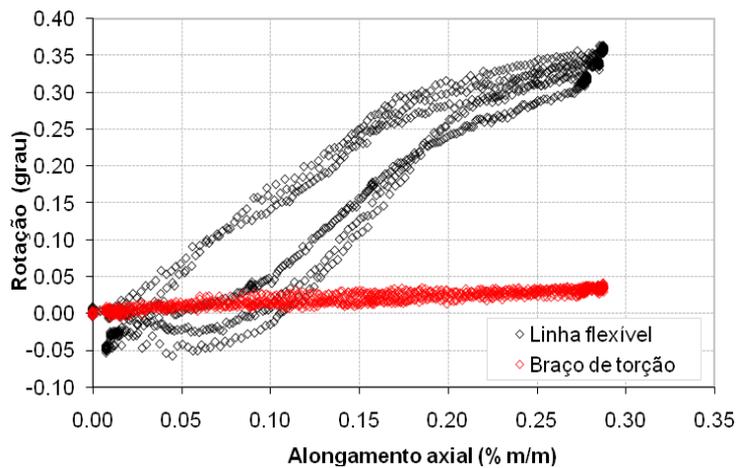


Figura V.26 – Rotação do braço de torção e rotação axial do duto vs alongamento axial aplicado.

As Figuras V.25 e V.26 mostram que, apesar do braço de torção ter sido fixado ao duto, ainda há uma rotação axial considerável até a força axial alcançar um valor de 250kN, equivalente a um alongamento axial de 0.20%/m. Depois desse valor, a rotação axial do duto é praticamente nula. Este fato se deve à existência de pequenas folgas no próprio equipamento. No entanto, as variações observadas não afetam as análises, pois os valores a serem comparados serão tomados para cargas acima deste valor com o intuito de minorar os efeitos da flexão devidos ao peso próprio.

V.2.2 - Ensaio de torção

O carregamento de torção no duto flexível foi aplicado para três diferentes níveis de pré-tração inicial: aproximadamente 150kN, 350kN e 450kN. Para cada um destes níveis, foram aplicados três carregamentos cíclicos de torção variando desde a posição zero até uma rotação máxima de $\approx 8^\circ$ tanto no sentido horário como no sentido anti-horário. A Figura V.27 apresenta o sinal típico de pré-carga de tração utilizada nos ensaios de torção no duto.

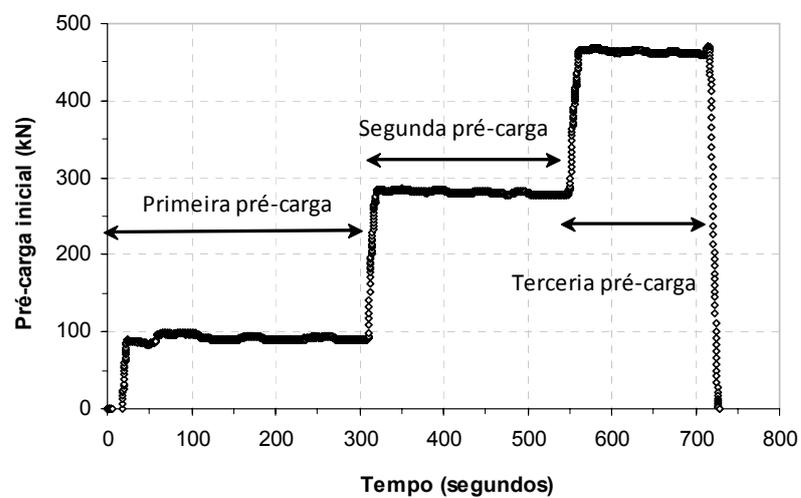


Figura V.27 – Pré-carregamento típico nos ensaio de torção.

A Figura V.28 apresenta o sinal típico de torção imposto ao duto considerando cada nível de pré-carga apresentado na Figura V.27. Note-se que, para cada nível de pré-carga, foram aplicados três ciclos de carga de torção. Isto foi realizado tanto no ensaio de torção horária quanto no ensaio de torção anti-horária.

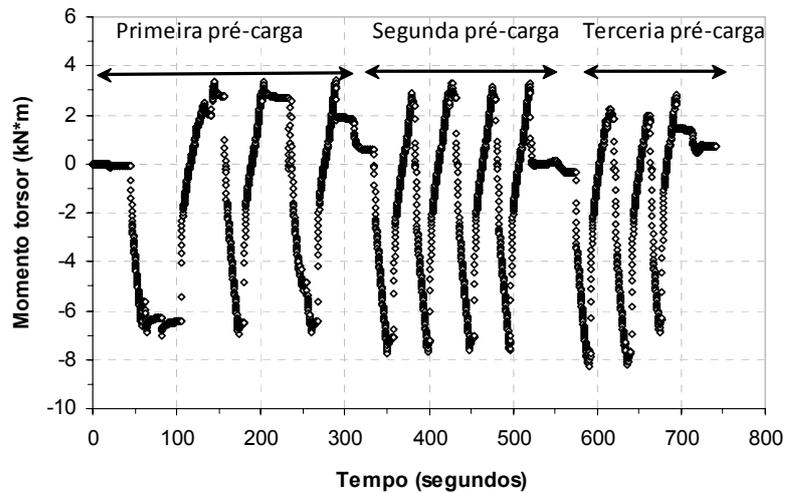


Figura V.28 – Ciclos de carregamento típicos nos ensaios de torção.

Analogamente aos ensaios de tração, nos ensaios de torção foram monitoradas a rotação do braço de torção (rotação imposta) e a rotação axial no duto flexível (rotação medida) com a finalidade de verificar se as possíveis folgas do equipamento alteram a resposta da rotação do duto flexível. A Figura V.29 apresenta a variação da rotação do braço de torção e da rotação axial do duto com o tempo para o ensaio de torção horária. A Figura V.30 apresenta as mesmas rotações para o ensaio de torção anti-horária.

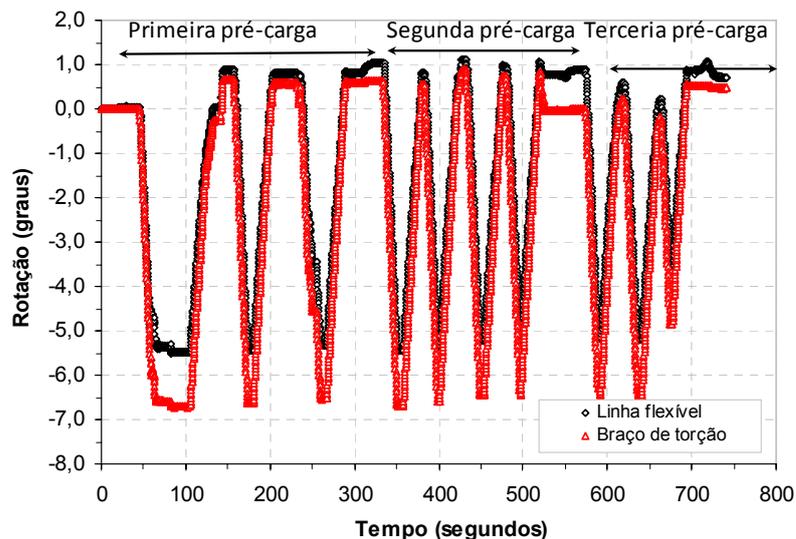


Figura V.29 – Variação da rotação do braço de torção e da rotação axial do duto com o tempo para o ensaio de torção horária.

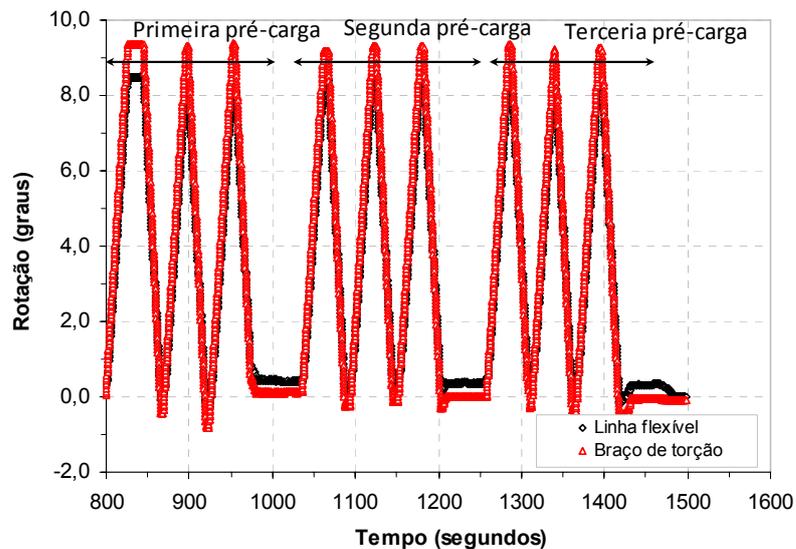


Figura V.30 – Variação da rotação do braço de torção e da rotação axial do duto com o tempo para o ensaio de torção anti-horária.

Pode-se observar, na Figura V.29, que a rotação do braço de torção (rotação imposta) e a rotação do duto (resposta da rotação) são praticamente as mesmas para tais níveis de rotação. Comportamento semelhante é observado na Figura V.30. Desta forma, é possível garantir que as pequenas folgas do equipamento não alteram de forma significativa a resposta da rotação no duto flexível

Correlacionando-se os resultados das Figuras V.28, V.29 e V.30, pode-se verificar que a pré-carga axial praticamente não tem influência na resposta à torção do duto, uma vez que os momentos necessários para atingir as rotações de aproximadamente 8° são praticamente iguais pra as três fases de pré-carga.

CAPÍTULO VI

ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma análise do comportamento de dutos flexíveis com base nos resultados dos ensaios experimentais descritos no Capítulo V desta dissertação. Além disso, é realizada uma correlação destes resultados experimentais com os obtidos pelo modelo numérico tridimensional em elementos finitos discutido na seção III.2 com o objetivo de verificar a sua validade e seus limites de utilização.

VI.1 - Correlação numérico-experimental

VI.1.1 - Ensaio de tração

A Figura VI.1 apresenta os resultados experimentais e numérico do alongamento axial do duto flexível com respeito à força axial aplicada. Nesta figura, o extremo final do duto tem a rotação axial livre.

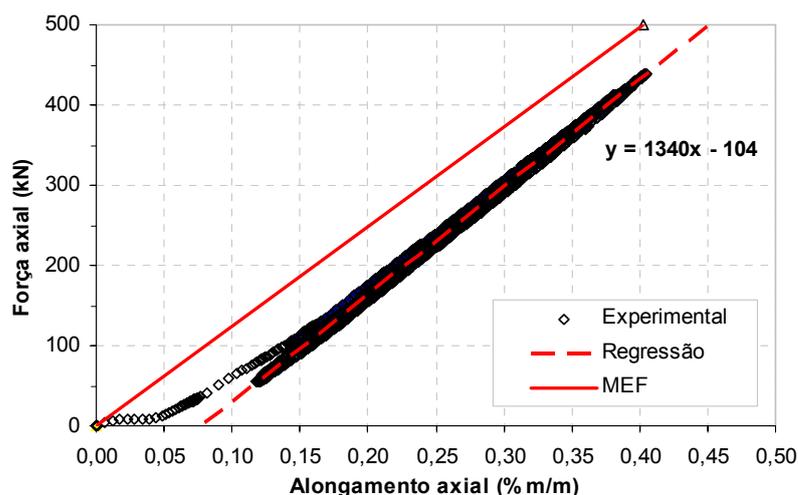


Figura VI.1 – Alongamento axial vs força axial aplicada no ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial.

A Figura VI.2 apresenta a mesma variação, mas, neste caso, o extremo final do duto é restrito à rotação axial.

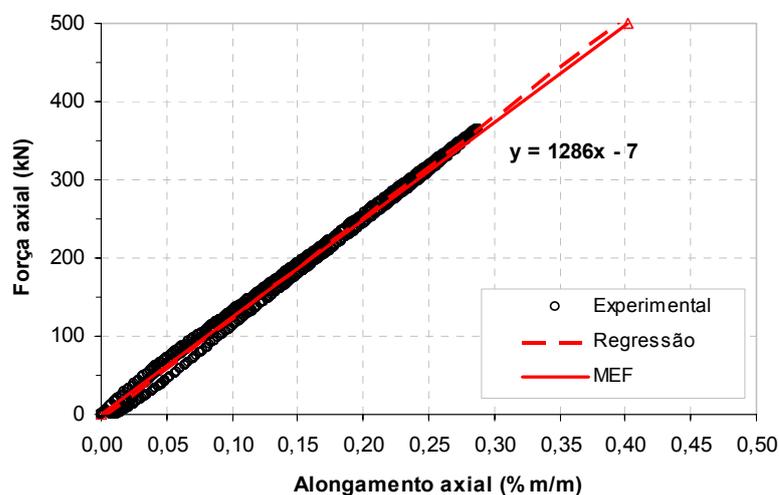


Figura VI.2 – Alongamento axial vs força axial aplicada: tração com o extremo final restrito à rotação axial.

A Figura VI.1 mostra que, depois da fase inicial de acomodação, o alongamento axial do duto varia linearmente com o carregamento de tração imposto. Também é possível observar que, durante as fases de carregamento ou descarregamento, não há modificação significativa na rigidez axial do duto. Uma função linear foi ajustada aos resultados experimentais, obtendo-se uma rigidez axial de 134000kNm/m, a qual é 7% maior que os valores estimados pelo modelo numérico quando não é considerado coeficiente de atrito (124161kNm/m, Tabela III.2).

A Figura VI.2 apresenta um comportamento similar, mas a acomodação inicial não foi observada. Nestes ensaios, o ajuste linear indica uma rigidez axial de 128600kNm/m, a qual é 4.0% menor que a rigidez estimada nos ensaios com o extremo final livre à rotação axial, e 3.5% maior que a rigidez axial do modelo numérico sem atrito (124243kNm/m, Tabela III.3).

Desta forma, pode-se concluir que a restrição à rotação axial não afeta de forma significativa a rigidez axial do duto flexível e que o modelo numérico está bem ajustado em relação a este parâmetro.

As Figuras VI.3 e VI.4 apresentam, respectivamente, a rotação axial induzida (extremidade livre) e o torque necessário para manter o duto sem rotação. Na Figura VI.3, além dos resultados experimentais, mais três funções são apresentadas. Duas funções lineares que foram ajustadas aos dados experimentais após atingir um alongamento axial de 0.27%*m/m*; uma para a fase de carregamento e a outra para a fase do descarregamento. Além disso, a função obtida pelo modelo numérico sem considerar o atrito entre as camadas internas do duto também é apresentada. Na Figura VI.4, três funções são apresentadas com os resultados experimentais: duas lineares que foram obtidas através do ajuste de funções lineares aos dados experimentais após atingir um alongamento axial de 0.20%*m/m* (uma para a carga e outra para a descarga); e a terceira função obtida a partir do modelo numérico sem considerar atrito entre as camadas internas do duto.

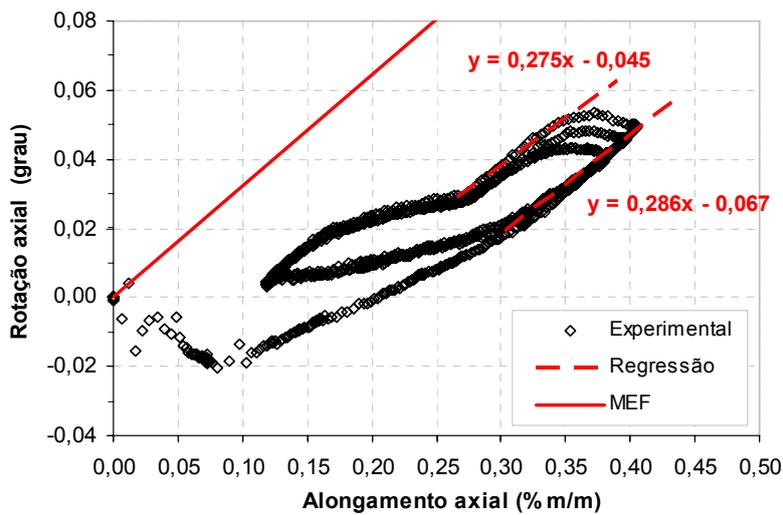


Figura VI.3 – Alongamento axial vs rotação axial: tração com o extremo final livre à rotação axial.

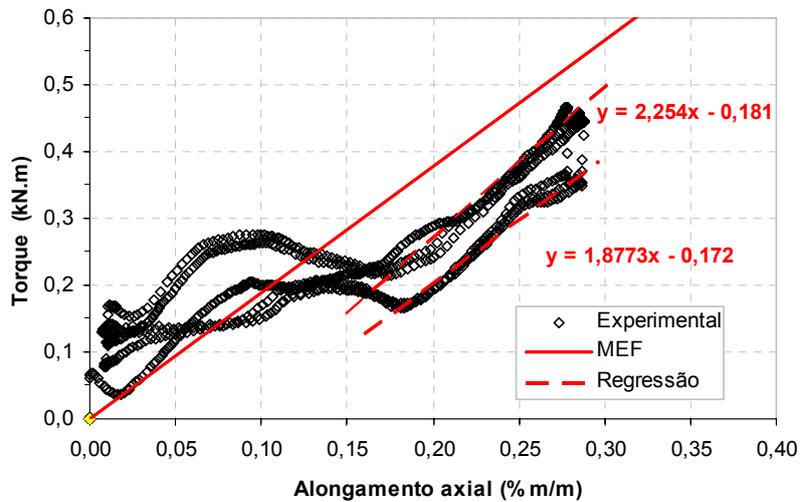


Figura VI.4 – Alongamento axial vs torque: tração com o extremo final restrito à rotação axial

Os resultados experimentais apresentam uma fase inicial de acomodação com um comportamento altamente não linear. Na Figura VI.3, a rotação axial do duto depois da fase de acomodação, cresce quase linearmente (28.6 grau m/m) até que seja iniciado o descarregamento. Quando é iniciado o descarregamento, a rotação axial, inicialmente, aumenta com uma pequena redução do alongamento axial e, em seguida, começa uma diminuição com uma taxa constante (27.5 grau m/m). No entanto, quando o alongamento axial de 0.27%/m/m é atingido, a razão entre a rotação e o alongamento axial decresce para um valor aproximadamente igual a um terço do valor anterior. Quando o duto é recarregado, a razão inicial é quase igual à última razão de descarregamento, mas, quando o alongamento axial de 0.27%/m/m é novamente atingido, a relação entre a rotação e o alongamento axial aumenta novamente de forma linear. Este tipo de resposta foi observado nos três ciclos de carga-descarga aplicados.

As medidas experimentais das rotações axiais sugerem que algum tipo de não linearidade ocorre na fase inicial de carregamento do duto. Isso pode ser explicado pela flexão inicial do duto devida a seu peso próprio, comentada anteriormente, ou devido a uma pequena adesão que pode existir entre as camadas. O valor obtido para a relação entre a rotação axial e o alongamento (carregamento) depois da fase de acomodação é, 12% maior que o modelo numérico (25.22 grau m/m, Tabela III.2) quando não é considerado o atrito entre as camadas do duto. Este alto valor é atingido quando uma

força axial significativa é imposta e, conseqüentemente, um possível atrito interno do duto é superado. O menor valor corresponde a aproximadamente 62% do modelo numérico, é observado quando um baixo carregamento axial é aplicado. Isto pode indicar que há algum atrito interno ou uma adesão entre as camadas internas do duto.

A Figura VI.4 indica que a resposta do duto é inicialmente bastante intrincada. A razão entre o torque induzido e o alongamento axial aumenta e diminui de forma altamente não linear até o alongamento axial atingir um valor aproximado de 0.20%/m, isto é, em torno do valor na qual o efeito de flexão é minimizado (vide Capítulo V). Depois desse ponto, a taxa de crescimento é praticamente constante, e a variação do torque com respeito ao alongamento axial é aproximadamente linear. O valor experimental para esta razão (carregamento) é 19% maior que a razão obtida pelo modelo numérico (1.888kNm²/m, Tabela III.3).

A Figura VI.5 e VI.6 ilustram a variação do deslocamento radial do duto com o alongamento axial para os casos no qual o extremo final está livre e restrito à rotação axial, respectivamente.

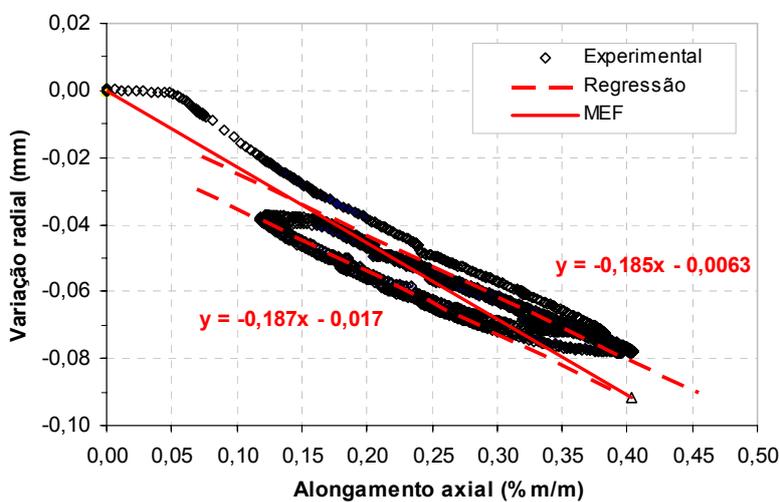


Figura VI.5 – Alongamento axial vs variação radial: tração com o extremo final livre à rotação axial.

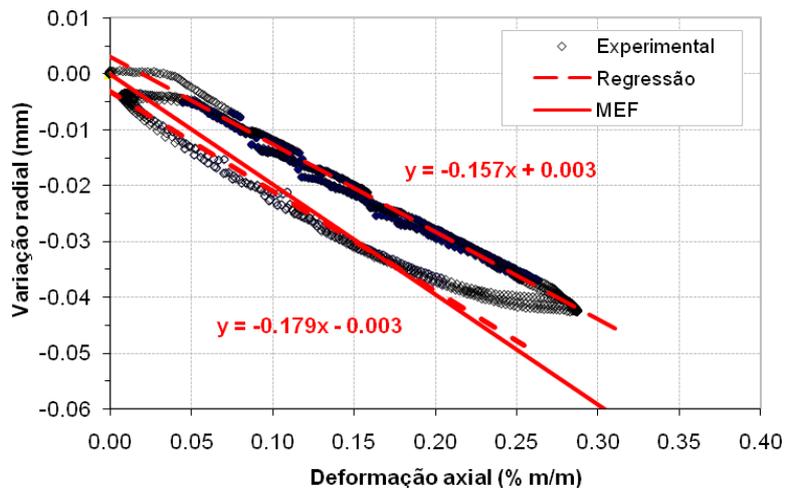


Figura VI.6 – Alongamento axial vs variação radial: tração com o extremo final restrito à rotação axial.

Os resultados apresentados nestas figuras mostram um mesmo tipo de comportamento. Existe uma fase de acomodação inicial do duto seguida por uma variação linear entre a contração radial e o alongamento axial. Quando a carga é invertida, é apresentada novamente uma fase inicial de acomodação e, após isso, o deslocamento radial tende a apresentar um comportamento linear em relação ao alongamento axial. As funções lineares ajustadas aos resultados experimentais apresentadas nas Figuras VI.5 e VI.6 conduzem a valores médios em torno de -18.6mm, e -16.8mm. Estes resultados indicam que a restrição à rotação axial apresenta pouca influência nos deslocamentos radiais no duto. Estes valores são aproximadamente: 18.2% (extremidade livre à rotação axial), e 26.1% (extremidades restrita à rotação axial), menores que aqueles obtidos no modelo numérico (-22.74mm em ambos os casos).

É importante observar que o comportamento não linear observado para a rotação axial e torque nos ensaios experimentais não é visto no alongamento axial do duto e, também, na contração radial obtida. Isto também é indicado pelo modelo numérico uma vez que a variação do coeficiente de atrito, como apontado nas Tabelas III.1 e III.2, não implica qualquer alteração significativa na rigidez axial ou na contração radial do duto.

A Figura VI.7 apresenta os resultados experimentais da deformação axial na camada plástica externa do duto flexível com respeito à força axial aplicada. Estes resultados correspondem ao ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial. Nesta figura, são apresentados os resultados experimentais dos quatro extensômetros que mediram as deformações axiais: *Et 01*, *Et 04*, *Et 07* e *Et 10* tal e como foi apresentado na Figura V.12. É importante mencionar que a deformação axial na camada plástica externa do duto varia linearmente com a força axial imposta. Percebe-se que, durante as fases de carregamento ou descarregamento, não há modificação significativa na relação da força axial aplicada com a deformação axial do duto. Uma função linear foi ajustada aos resultados experimentais de cada um dos extensômetros. A função do modelo numérico também é mostrada na Figura VI.7.

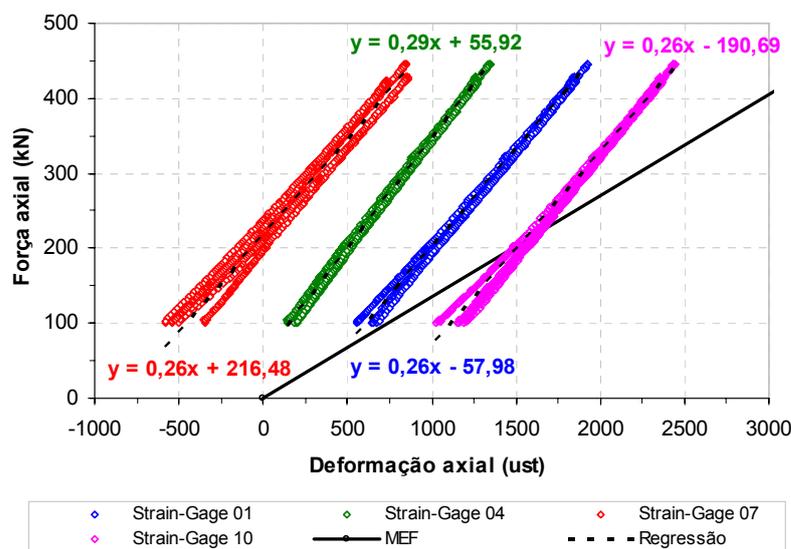


Figura VI.7 – Deformação axial na camada plástica externa vs força axial aplicada no ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial.

De um modo geral, observa-se que os resultados são bastante consistentes entre si, porém distantes do previsto pelo modelo numérico. Deve-se destacar que resultados bem similares a estes foram obtidos para as deformações diagonais e transversais também medidos nestes ensaios de tração. As Tabelas VI.1 e VI.2 mostram de forma resumida os resultados obtidos experimentalmente e pelo modelo numérico para as deformações axiais, diagonais e transversais da camada plástica externa para os casos de tração sem e com restrição à rotação axial no extremo final do duto, respectivamente.

Tabela VI.1 – Comparação das deformações axiais, diagonais e transversais na camada plástica externa, experimentais e numéricas, no ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial.

Deformação	$\varepsilon / F (10^{-6}m/m / kN)$		
	Experimental		MEF
	Média	Desvio	
Axial	3.75	0.15	7.14
Diagonal	1.35	0.25	3.57
Transversal	-1.41	0.14	-2.38

Tabela VI.2 – Comparação das deformações axiais, diagonais e transversais na camada plástica externa, experimentais e numéricas, no ensaio de tração com o extremo final restrito à rotação axial.

Deformação	$\varepsilon / F (10^{-6}m/m / kN)$		
	Experimental		MEF
	Média	Desvio	
Axial	3.66	0.22	7.69
Diagonal	1.27	0.23	3.57
Transversal	-1.32	0.09	-2.38

As Tabelas VI.1 e VI.2 indicam que as deformações obtidas pelo modelo numérico não variam com a restrição à rotação axial nos extremos do duto. As deformações axiais, diagonais e transversais obtidas experimentalmente se mostram, em média, respectivamente 47.5%, 62.2% e 40.8% menores que os valores de deformação obtidos pelo modelo numérico.

A diferença observada nestas tabelas entre as deformações obtidas experimentalmente e numericamente pode ser explicada pelo fato da camada plástica externa não estar adequadamente fixada aos conectores e tender a ceder à medida que a força axial é aplicada. A Figura VI.8a apresenta o desenho do conector no extremo do duto. Note-se que a camada plástica externa não é travada pelo conector. A Figura VI.8b apresenta uma vista do conector no extremo inicial do duto, onde se pode observar o deslizamento da camada plástica no extremo do conector, reforçando esta hipótese.

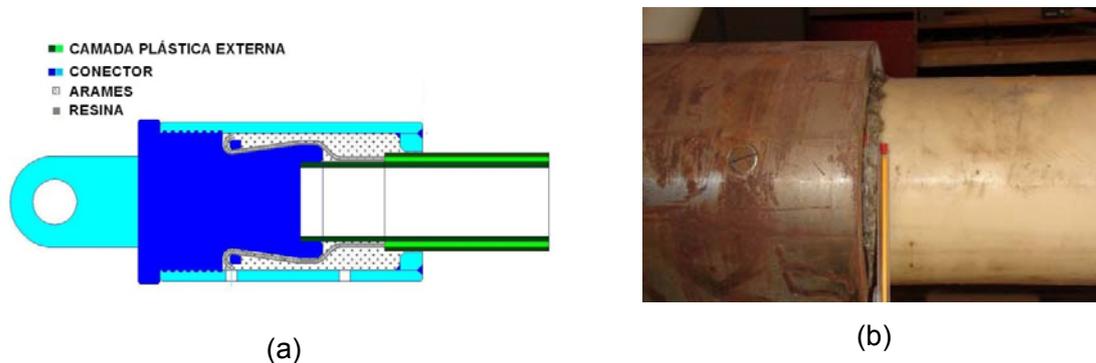


Figura VI.8 – (a) Esquema do conector no extremo do duto, (b) Conector no extremo inicial do duto depois do ensaio de tração.

VI.1.2 - Ensaio de torção

As Figuras VI.9 e VI.10 apresentam os resultados experimentais da rotação axial do duto com respeito ao momento de torção aplicado nos ensaios de torção horária e anti-horária, respectivamente, e com o extremo final restrito ao deslocamento axial. Nessas figuras, são apresentadas as respostas considerando os três níveis de pré-tração inicial (150kN, 350kN e 450kN) como foi explicado no item V.2.2.

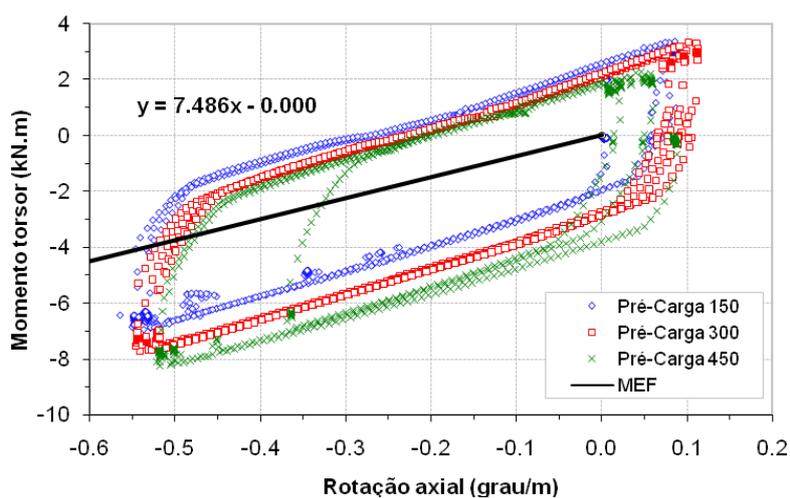


Figura VI.9 – Rotação axial vs momento de torção aplicado no ensaio de torção horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.

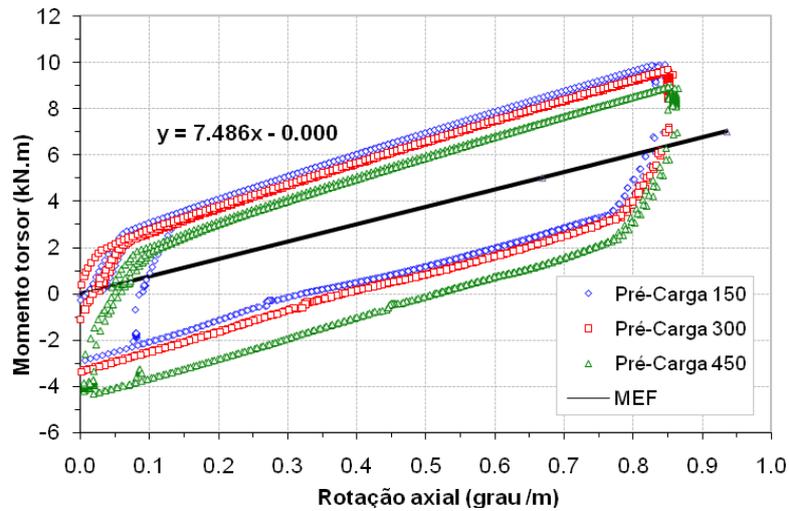


Figura VI.10 – Rotação axial vs momento de torção aplicado: torção anti-horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.

Os resultados apresentados na Figura VI.9 mostram que para cada nível de pré-carga no duto, a relação entre o momento de torção aplicado e a rotação axial do duto não sofre alteração significativa. Assim, é observado que, durante as fases de carregamento ou descarregamento, não há modificação significativa na rigidez à torção do duto. Uma função linear foi ajustada aos resultados experimentais, para cada nível de pré-carga, tanto no carregamento como no descarregamento e são mostrados na Tabela VI.3. A Figura VI.10 apresenta um comportamento similar ao da Figura VI.9. Os resultados referentes aos ajustes realizados nessa condição são apresentados na Tabela VI.4

Tabela VI.3 – Rigidez à torção experimental para o caso de torção horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.

Pré-carga	Rigidez à torção	
	Carga (kNm ² /grau)	Descarga (kNm ² /grau)
150kN	8.45	8.50
300kN	9.10	9.20
450kN	8.03	9.30

Tabela VI.4 – Rigidez à torção experimental para o caso de torção anti-horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.

Pré-carga	Rigidez à torção	
	Carga (kNm ² /grau)	Descarga (kNm ² /grau)
150kN	9.25	7.89
300kN	9.37	8.30
450kN	9.11	8.48

A Tabela VI.3 mostra que os valores das rigidezas à torção horária obtidas experimentalmente na fase de carregamento são em média 5.6% menores aos obtidos na fase de descarregamento. Assim também se pode observar que a rigidez à torção horária não é alterada pelos níveis de pré-carga impostos no duto flexível. Em média, a rigidez à torção obtida experimentalmente na fase de carregamento é 8% maior que a obtida pelo modelo numérico (7.846kNm²/grau, Tabela III.6).

A Tabela VI.4, por sua vez, mostra que os valores das rigidezas à torção anti-horária obtidas experimentalmente na fase de carregamento são, em média, 11% maiores aos obtidos na fase de descarregamento. Assim também se pode observar que a rigidez à torção anti-horária obtida experimentalmente também não é alterada pelas pré-cargas impostas ao duto flexível, o que corrobora a hipótese de que essas pré-cargas formam uma restrição natural à torção no duto, conforme discutido no item III.4.3. Em média, a rigidez à torção anti-horária obtida experimentalmente é 15% maior que a obtida pelo modelo numérico (7.846kNm²/grau, Tabela III.7).

A Figura VI.11 apresenta a variação radial do duto flexível com a rotação axial para cada nível de pré-carga aplicada nos ensaios de torção horária. A Figura VI.12 apresenta a força de reação axial do duto flexível com a rotação axial para cada nível de pré carga aplicada nos ensaios de torção horária

As Figura VI.11 e VI.12 indicam que, no ensaio de torção horária, tanto a variação radial quanto a força axial medidas experimentalmente são praticamente nulas, o que valida os resultados obtidos pelo modelo numérico na Tabela III.5.

Cabe ressaltar que comportamentos similares foram obtidos no ensaio de torção anti-horária e, por isso, optou-se por suprimir os gráficos correspondentes.

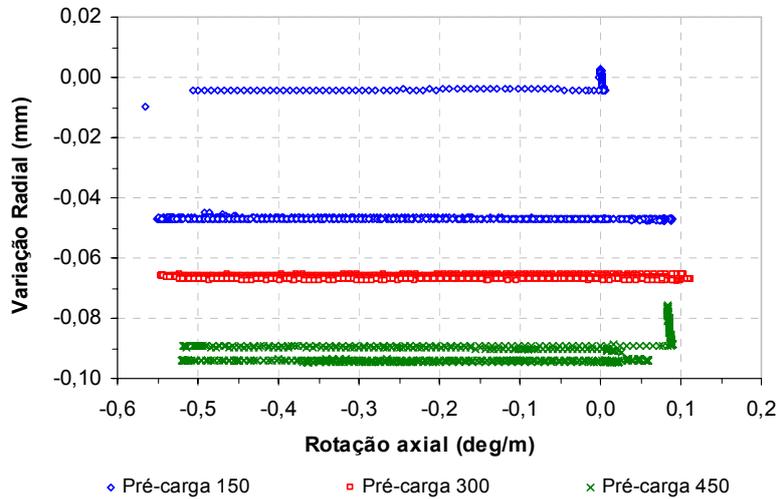


Figura VI.11 – Variação radial vs rotação axial aplicado no caso de torção horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial

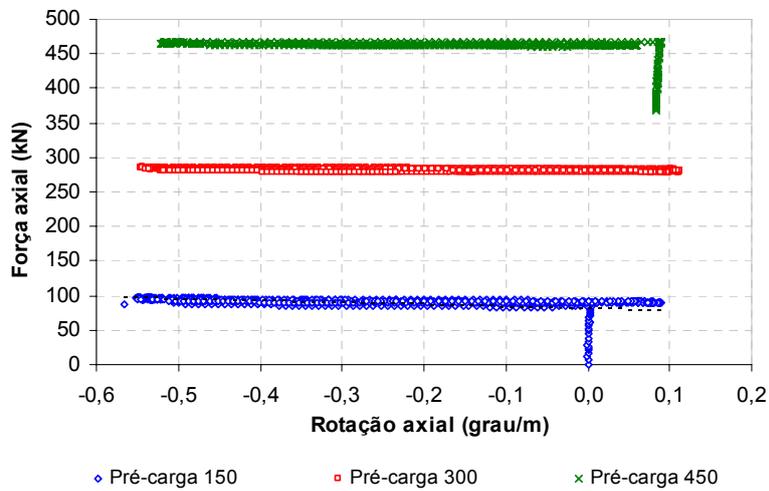


Figura VI.12 – Força axial vs rotação axial aplicado no caso de torção horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho tratou do comportamento acoplado tração-torção de um duto flexível de 4" de camadas não-aderentes. O duto foi submetido à tração pura e à torção com pré-carga axial. Duas diferentes condições de contorno foram consideradas na análise de tração e dois diferentes tipos de carregamento no ensaio de torção. No ensaio de tração, foram consideradas as extremidades livres e restritas à rotação axial. No ensaio de torção, a carga foi aplicada tanto no sentido horário quanto no anti-horário podendo-se ter as extremidades livres ou restritas ao deslocamento axial. A resposta do duto foi prevista com um modelo numérico tridimensional não linear baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Alguns aspectos dos resultados obtidos foram discutidos, tais como:

- O efeito da restrição à rotação axial nos extremos do modelo numérico.
- O efeito do atrito ou adesão entre as camadas do duto na rotação (ou torque), alongamento axial e variação radial do duto induzidos por tração.
- A simplificação do comportamento em seções planas do duto, usualmente assumidas pelos modelos analíticos.

Os resultados numéricos mostraram que a rigidez axial e os deslocamentos radiais do duto não variam com a restrição à rotação axial em suas extremidades. Além disso, o modelo numérico indicou que o coeficiente de atrito entre as camadas do duto também não afetam a sua rigidez axial ou deslocamentos radiais. O modelo numérico em elementos finitos apontou também valores muito baixos para rotação axial ou torque induzido na suas extremidades. Além disso, a rotação axial foi ligeiramente alterada quando coeficientes de atrito entre 0.0 e 1.0 foram considerados, mas diminuiu consideravelmente se as camadas do duto são supostas como aderidas. O torque induzido pela restrição à rotação axial também não varia com os diferentes valores de coeficientes de atrito assim como a contração radial do duto.

O duto flexível analisado se mostrou torque–balanceado, uma vez que as rotações axiais induzidas pela força axial imposta foram bastante pequenas e sua rigidez axial não foi alterada pela restrição à rotação axial.

O modelo numérico apontou também que um coeficiente de atrito significativo entre as camadas do duto altera a rotação axial induzida no duto, mas parece não alterar a sua rigidez axial ou variação radial.

Um aspecto importante verificado nas simulações numéricas do ensaio de tração foi que a suposição dos modelos analíticos de que todas as camadas são submetidas à mesma rotação axial não é válida. Este fato conduz à discrepâncias na previsão da rotação axial (2.6 vezes maior) e da variação radial (2.1 vezes menor) no duto flexível quando os resultados analíticos são comparados aos resultados obtidos através do modelo numérico.

Os resultados obtidos dos ensaios experimentais de tração apontam uma pequena fase inicial de acomodação com variação não linear do alongamento axial com a força imposta. Isso se deve à presença de folgas iniciais que provocam uma acomodação do duto quando baixas forças axiais estão sendo aplicadas (grandes deformações axiais com baixa força axial).

Os resultados obtidos para a rotação axial e/ou torque axial induzido nos ensaios experimentais de tração também apontaram uma segunda fase inicial de acomodação do duto, com resposta não linear. Este comportamento não-linear é atribuído à flexão do duto pelo seu peso próprio. Quando a força axial imposta é suficientemente alta para manter o duto próximo da sua posição horizontal (valores maiores que 300kN no caso analisado), a resposta do duto é linear.

Quando as medidas experimentais são comparadas aos resultados obtidos pelo modelo numérico, boa concordância foi observada. A medida da rigidez à tração foi 7% (extremidades livres à rotação axial) e 3.5% (extremidades impedidas à rotação axial) maiores que os calculados no modelo numérico. Além disso, as medidas da razão entre a variação radial do duto o seu alongamento axial obtido numericamente foi 18.2%

(extremidades livres à rotação) e 26.1% (extremidades impedidas da rotação).maiores que as obtidas nos ensaios experimentais

A razão, desprezando o atrito, entre a rotação e alongamento axial obtida experimentalmente foi 12% maior que as medidas obtidas numericamente para uma elevada carga axial (>300kN). Isso indica que o modelo numérico não consegue representar tais níveis de rotação obtidas experimental no ducto.

Analogamente à variação da rotação axial, o torque induzido também exibe inicialmente comportamento altamente não linear, mas, para elevada força axial (>300kN), tende a variar linearmente com o alongamento axial. Novamente, para este nível de carga, os resultados numéricos concordaram muito bem com as medidas experimentais.

Nas simulações numéricas de torção pura, verificou-se que a rigidez à rotação axial do duto no sentido horário não varia com a restrição ao deslocamento axial em suas extremidades (variação de 0.1%), embora a rigidez à rotação no sentido anti-horário é significativamente alterada (variação de 16%). Além disso, o modelo numérico indicou também que a rigidez à torção do duto é afetada pelo sentido de aplicação da torção imposta horário ou anti-horário (68.9% de variação).

Na simulação da torção horária, o modelo numérico em elementos finitos apontou valores muito baixos para o alongamento axial ou força de reação induzida na suas extremidades; na simulação de torção anti-horária, o deslocamento axial foi consideravelmente alterado (variação de 93%). A força de reação induzida pela restrição ao deslocamento axial também é consideravelmente alterada (variação de 93%), assim como a variação radial do duto.

Observou-se que o comportamento do duto flexível sob torção horária, que, no caso analisado, traciona a armadura externa de tração, não é significativamente afetado por uma possível restrição ao deslocamento axial. Neste caso, a estrutura interna do duto acaba criando uma “restrição natural” ao deslocamento axial. Por outro lado, há uma significativa alteração no comportamento do duto submetido à torção anti-horária que, neste caso, comprime a armadura externa de tração, posto que as armaduras de tração tendem a se separar.

O duto flexível analisado se mostrou com resposta balanceada no ensaio de torção horária, uma vez que os deslocamentos axiais induzidos pela torção horária imposta foram bastante pequenos e sua rigidez à rotação axial não foi alterada pela restrição ao deslocamento axial. O mesmo não se pode afirmar quando uma torção anti-horária é aplicada ao duto.

Outro aspecto verificado nas simulações numéricas, é que apenas no ensaio de torção anti-horária, considerando livre o deslizamento entre as camadas do duto, com o extremo final livre ao alongamento axial, as rotações e deslocamentos axiais em cada uma das camadas do duto e cada seção transversal são praticamente as mesmas, e as seções transversais do duto quase permanecem planas. Assim, a suposição dos modelos analíticos de que todas as camadas são submetidas ao mesmo deslocamento e rotação axial poderia ser válida para este tipo de carregamento em tais condições de carga. Isto é corroborado segundo os valores muito próximos obtidos numérica e analiticamente.

Nos ensaios experimentais de torção com pré-tração axial, não se observa a fase inicial de acomodação vista nos ensaios experimentais de tração, nem a segunda fase de acomodação do duto atribuído à flexão pelo seu peso próprio. Isso se deve ao fato de que a pré-carga axial elimina as folgas iniciais e minimizam os efeitos de flexão causados pelo seu peso próprio, que provocam uma acomodação do duto.

Os valores das rigidezas obtidas experimentalmente nos ensaios de torção na fase de carregamento foram relativamente próximas às rigidezas obtidas na fase de descarregamento. (5.6% na torção horária e 11% na torção anti-horária).

Os resultados obtidos experimentalmente e pelo modelo numérico, no ensaio de torção com pré-carga axial, apontaram valores muito baixos para o alongamento axial ou força de reação induzida na suas extremidades, os quais não apresentaram mudança significativa para os diferentes níveis de pré-carga aplicada.

Os ensaios experimentais e as simulações numéricas de torção com pré-carga inicial indicam que a relação entre o momento de torção imposto, independentemente do sentido, e a rotação axial do duto flexível não é significativamente alterada pelas pré-

cargas aplicadas. Isto se deve ao fato de que as pré-cargas aplicadas formam uma restrição natural no duto, que impede a separação entre suas armaduras de tração. Deste modo, essa relação será sempre igual aquela obtida para a torção que induz tração na armadura externa de tração do duto flexível.

Os resultados obtidos em geral indicam que o modelo numérico está bem ajustado aos resultados experimentais. Além disso, de acordo com os valores experimentais obtidos, conclui-se que é necessário considerar no modelo numérico o atrito entre as camadas do duto flexível na simulação de torção.

Tomando por base essas conclusões, como propostas de estudos futuros, apontam-se a:

- Realização de novos ensaios de tração e torção em outras configurações de dutos flexíveis, a fim de se confirmarem ou não as hipóteses levantadas neste trabalho.
- Execução de outros ensaios experimentais como compressão radial, pressão interna e externa com outros dutos, e o ajuste destes dados com o modelo numérico revisto neste trabalho.
- Realização de ensaios experimentais a fim de verificar a influência no comportamento dos dutos devidos a danos, principalmente o rompimento e monitoramento das tensões nos arames da armadura de tração.

Como uma crítica e, ao mesmo tempo, uma proposição de um novo trabalho, é importante mencionar que devido ao grande comprimento do duto, a análise foi afetada pela flexão imposta pelo peso próprio da estrutura gerando não linearidades na resposta. Seria interessante fazer ensaios em dutos com comprimentos menores ou ensaios de dutos em outras configurações de forma que esta flexão seja diminuída.

Para concluir, é convicção do autor que este trabalho contribui para compreender o comportamento de um duto flexível submetido a carregamentos de tração e torção e os efeitos do atrito sobre a sua resposta. Além disso, corrobora os resultados apontados por um modelo numérico tridimensional baseado no MEF, previamente apresentado, para lidar com a análise local de dutos flexíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- API RP 17B, 1998, *Recommended Practice for Flexible Pipe*, 2nd ed., Washington, American Petroleum Institute.
- BAHTUI, A., BAHAI, H., and ALFANO, G., 2008, "A Finite Element Analysis of Unbonded Flexible Risers under Axial Tension," *Proceedings of the ASME 27th OMAE*, 57627, Estoril.
- BASTIAN, F. L., 2000, "Materiais". In: *Curso de Extensão em Tubos Flexíveis e Cabos Umbilicais*, Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- BATISTA, R. C., BOGARIN, J. A. G., EBECKEN, N. F. F., 1989, "Local Mechanical Behaviour of Multilayered Flexible Risers", In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Offshore Engineering*, pp. 494-510, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Agosto.
- BECH, A., SKALLERUD, B., SOHDAL, N., 1992, "Structural Damping in Design Analysis of Flexible Risers", In: *Proceedings of the First European Conference on Flexible Pipes, Umbilicals and Marine Cables (MARINFLEX)*, London, Nov.
- BELYTSCHKO, T., and NEAL, M. O., 1991, "Contact-Impact by the Pinball Algorithm with Penalty and Lagrangian Methods," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 31, pp. 547-72.
- BELYTSCHKO, T., LIU, and W. K., MORAN, B., 2000, *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, John Wiley & Sons Ltd, England.
- BENSON, D. J., and HALLQUIST, J. O., 1990, "A Single Contact Algorithm for the Postbuckling Analysis of Shell Structures," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 78, pp. 141-63.

- BERGE, S., ENGSETH, A., FYLLING, I. *et al.*, 1992, *FPS2000 / Flexible Risers and Pipes: Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes*. Report STF70 A92006, SINTEF Structural Engineering, Trondheim, Norway.
- BESSELING, J. F., 1958, "A Theory of Elastic, Plastic and Creep Deformations of an Initially Isotropic Material Showing Anisotropic Strain-Hardening Creep Recovery and Secondary Creep," *Journal of Applied Mechanics*, pp. 529-36.
- CLAUSS, G. F., 2006, "The Conquest of the Inner Space – Challenges and Innovations in Offshore Technology", *21st National Congress on Maritime Transportation, Ship Construction and Offshore Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 27th November to 1st December.
- CRUZ, F. T. L., 1996, *Análise Estrutural de Linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos*. Dissertação M.Sc., EPUSP, São Paulo, Brasil.
- CUSTODIO, A. B., and VAZ, M. A., 2002, "A Nonlinear Formulation for the Axisymmetric Response of Umbilical Cables and Flexible Pipes," *Applied Ocean Research*, 24, pp. 21-9.
- DUPONT, 1992, *Kevlar® Aramid Fiber: Technical Guide*, USA, DUPONT Advanced Fibers Systems.
- FERET, J. J., and BOURNAZEL, C. L., 1987, "Calculation of Stresses and Slip in Structural Layers of Unbonded Flexible Pipes," *Journal of Offshore and Arctic Engineering*, 109, pp. 263-9.
- FIGUEIREDO, M. W., 2001. *Estudo de Cargas em Cabeça de Poço Submarino em Operações de Completação*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FMC Technologies. Subsea Systems Informações sobre os projetos disponibilizados por esta empresa. Disponível em: <http://www.fmctechnologies.com>. Consultado em 5 de setembro 2008, 17:10:20.

- FROUFE, L. M., 2006. *Análise comparativa de critérios de dimensionamento de risers rígidos*. Dissertação de M.Sc., PEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GADÉA, A. S. M., *et al.* 2007, “Análise Numérica do Acoplamento Translação-Rotação em Linhas Flexíveis de Camadas Não-Aderentes”. *Proceedings of the CMNE / CILAMCE 2007*, Porto, Portugal, 13-15 Junho.
- HERAKOVICH, C. T., 1998, *Mechanics of Fibrous Composites*, 1st ed., United States of America, John Wiley & Sons.
- KIRBY, R., 2006, *The Oil that Greases the Squeaky Wheel of Peak Oil*, “Financial Sense University”.
- HOBBS, R. E., and RAOOF, M., 1982, “Interwire Slippage and Fatigue Prediction in Stranded Cables for TLP Tether,” *Proceedings of Behaviour of Offshore Structures (BOSS)*, 2, pp. 77-99.
- KRAINCANIC, I., 1995, “Analysis of the Coupled Axial / Torsional Behaviour of Spiral Strands, Wire Ropes, and Locked Coil Cables,” B.Sc. dissertation, School of Architecture and Civil Engineering, South Bank University, London.
- LIMA, A. L., 2006. *Avaliação de Metodologias de Análises de Unidades Estacionárias de Produção de Petróleo Offshore*. Dissertação de MSc, PEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MAGLUTA, C., ROITMAN, NEY., 2007, *Métodos Experimentais para Análise Estática e Dinâmica de Estruturas*, Notas de aula, PEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MERINO, M. H. E., SOUSA, J. R. M., MAGLUTA, C., ROITMAN., 2007, “Correlação Numérica Experimental de Risers Flexíveis Submetidos a Cargas de Tração e Torção”. *XXIX CILAMCE - Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia*, PAP0865, Alagoas, Brasil, 04-07 Novembro.

NKT. Flexible Pipe Designs. Informações sobre os produtos disponibilizados por este fabricante de dutos flexíveis. Disponível em: <http://www.nktflexibles.com>. Consultado em 13 de janeiro 2009, 16:20:30.

RAMOS Jr., R., MARTINS, C. A., PESCE, C. P., and ROVERI, F. E., 2008, "A Case Study on the Axial - Torsional Behavior of Flexible *Risers*," Proceedings of the ASME 27th OMAE, 57514, Estoril.

RAOOF, M., and HOBBS, R. E., 1984, "Analysis of Multilayered Structural Strands," Journal of Engineering Mechanics Division – ASCE, 114, pp. 1166-82.

RIBEIRO, E. J. B., SOUSA, J. R. M., ELLWANGER, G. B., and LIMA, E. C. P., 2003, "On the Tension-Compression Behaviour of Flexible *Risers*," Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 105-112, Honolulu.

SAEVIK, S., and BRUASETH, S., 2005, "Theoretical and experimental studies of the axisymmetric behaviour of complex umbilical cross-sections," Applied Ocean Research, 27, pp. 97-106.

SOUSA, J. R. M., 1999, *Análises Numérica de Risers Flexíveis*. Dissertação de M.Sc., PEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SOUSA, J. R. M., 2005. *Análise Local de Linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos*. Tese de DSc, PEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SOUSA, J. R. M., 2007, *Tópicos em Análise Mecânica de Dutos Flexíveis Offshore*, Notas de aula, PEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SOUSA, J. R. M., *et al.* 2008a, "Estudo do Acoplamento Rotação-Translação em uma Linha Flexível de 2,5" de Camadas Não-Aderentes". *Proceedings of the XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural*, Santiago, Chile.

SOUZA, A. P. F., 2002, *Colapso de Dutos Flexíveis sob Pressão Extrema*. Tese de DSc, PENO-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

TIMOSHENKO, S. P., WOINOWSKY-KRIEGER, S., 1959, *Theory of Plates and Shells*. 2nd ed., Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd.

WITZ, J. A., and TAN, Z., 1992, "On the Axial-Torsional Behaviour of Flexible Pipes, Umbilicals and Marine Cables," *Marine Structures*, 5, pp. 205-27.

WITZ, J. A., 1996, "A Case Study in the Cross-Section Analysis of Flexible Riser". *Marine Structures*, v.9, pp. 885-904.

ANEXO A

VERIFICAÇÃO DA FORÇA AXIAL MÍNIMA NECESSÁRIA PARA DIMINUIR OS EFEITOS DE FLEXÃO CAUSADOS PELO PESO PRÓPRIO DO DUTO

Como apontado no item V.2.1 do capítulo V, a resposta estrutural do duto flexível ensaiado no equipamento é afetada pela flexão devida ao seu peso próprio. Isto provoca um comportamento não linear na fase inicial da resposta do duto. Deste modo, duas questões foram levantadas, a saber:

- Quais parâmetros de resposta do duto são afetados pela flexão?
- Qual é a força axial mínima aplicada no duto capaz de diminuir esta flexão?

Para responder às perguntas, foi desenvolvido um modelo do duto para representar o seu comportamento no equipamento. A Figura A.1 apresenta uma vista geral do modelo elaborado.

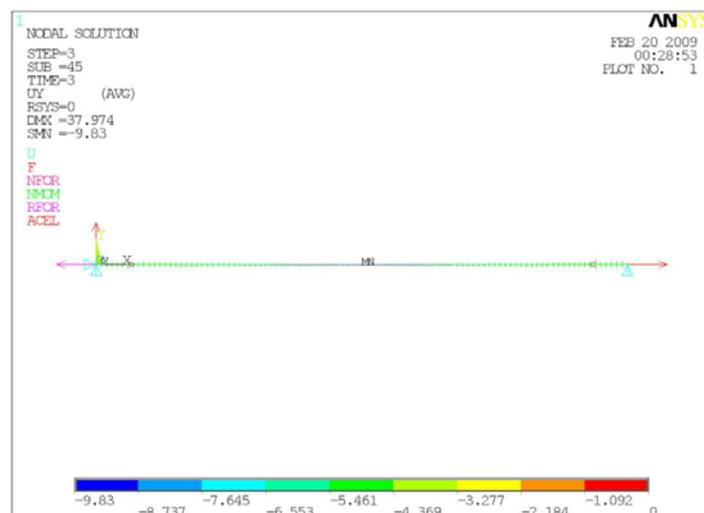


Figura A.1 – Modelo simplificado em elementos finitos do duto.

Posteriormente, foi aplicada uma força axial no duto a fim de tentar diminuir a flecha devido ao seu peso próprio. A figura A.2 apresenta a flecha do duto flexível com o aumento da carga, enquanto, a Figura A.3 apresenta a variação da flecha do duto com a força axial imposta.

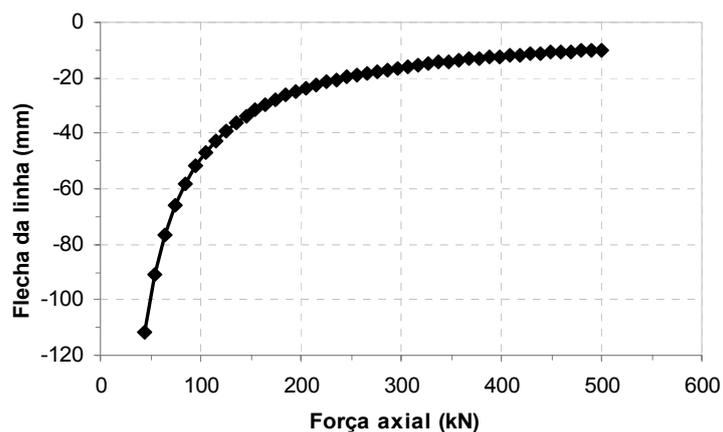


Figura A.2 – Flecha no duto flexível vs força axial imposta.

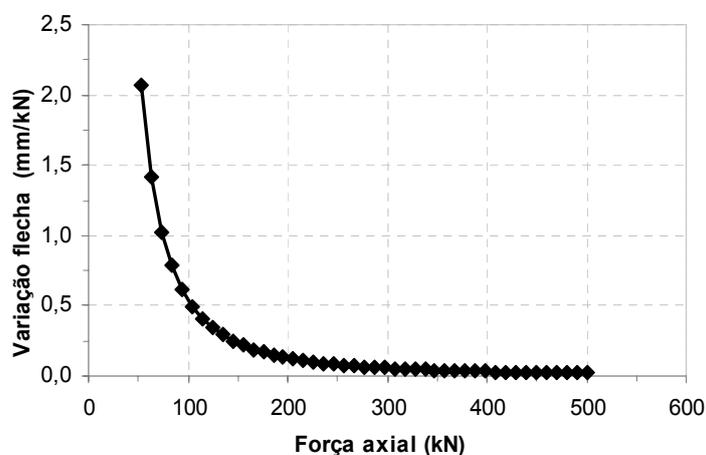


Figura A.3 – variação da flecha no duto flexível vs força axial imposta.

Note-se que existe uma primeira fase inicial com uma considerável variação da flecha, ate atingir um valor de força axial de 300kN, a partir do qual a variação é praticamente nula. Desta forma, pode-se considerar que a partir do valor de força axial de 300kN, o duto passa a não mais apresentar os efeitos de flexão devido ao seu peso próprio.

As Figuras A.4 e A.5 apresentam o alongamento axial do duto flexível com o aumento da carga. As Figuras A.6 e A.7 apresentam a variação do alongamento do duto com a força axial imposta.

As Figuras A.4 e A.5 indicam que o alongamento axial do duto apresenta uma pequena alteração em seu comportamento devido à flexão inicial até a força axial atingir 100kN. Depois desse valor, a variação do alongamento permanece constante.

As Figuras A.6 e A.7 mostram que a rotação no apoio do duto é bastante afetada pela flexão inicial até um valor de força axial próximo de 300kN depois desse valor a variação dessa rotação permanece constante.

Esta análise permite verificar que o alongamento axial do duto praticamente não é influenciado pela flexão inicial desta. Por outro lado, há significativas rotações nos apoios da estrutura para força axiais inferiores a 300kN. Estas rotações nos apoios podem, por sua vez, afetar substancialmente as rotações axiais medidas nos ensaios. Assim, a partir de uma carga axial de 300kN, o duto tende a apresentar uma configuração praticamente horizontal, eliminando como visto, os efeitos da flexão devida ao peso próprio.

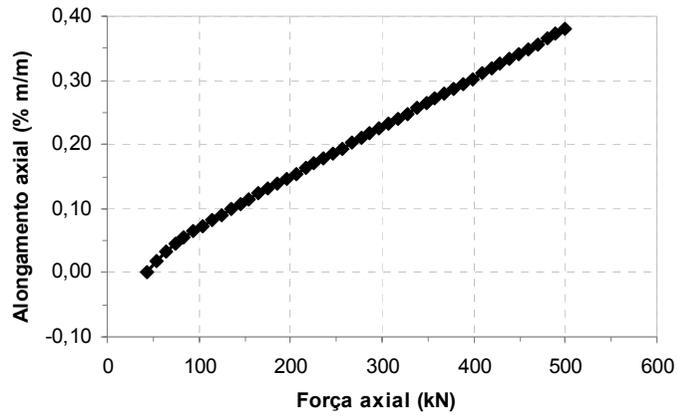


Figura A.4 – Alongamento no duto flexível vs força axial imposta.

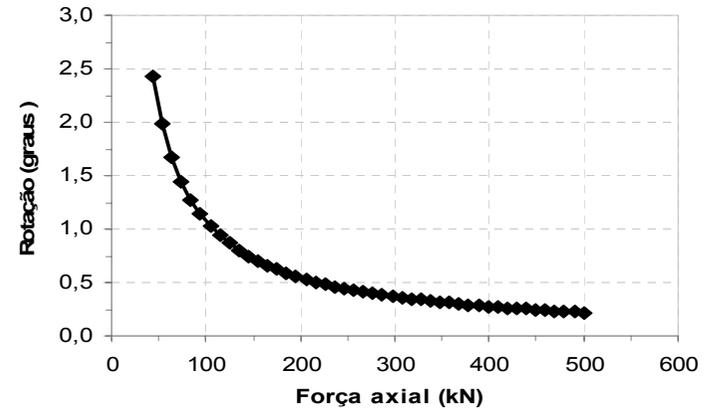


Figura A.6 – Rotação no apoio vs força axial imposta.

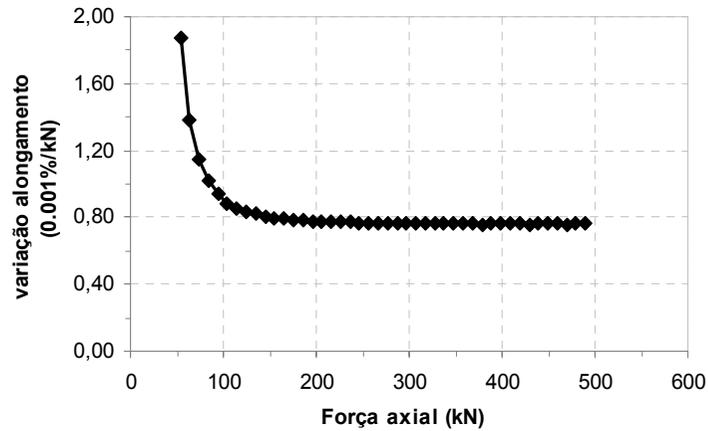


Figura A.5 – Variação do alongamento no duto flexível vs força axial imposta.

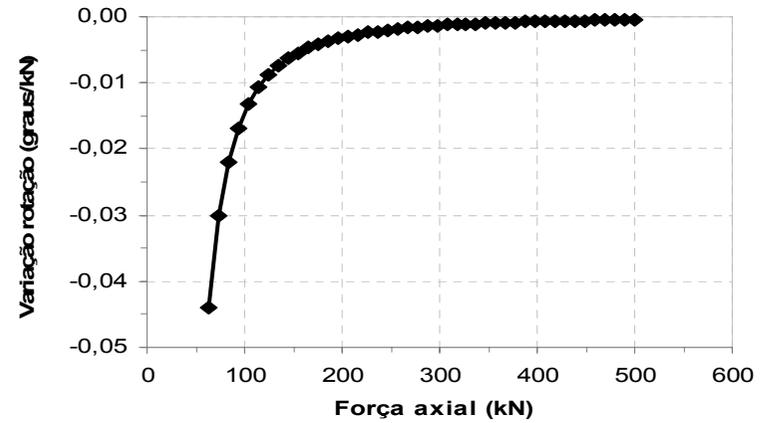


Figura A.7 – Variação da rotação no apoio vs força axial imposta.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)