

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

INSTABILIDADE RADIAL EM DUTOS FLEXÍVEIS COM DEFEITOS NA
BANDAGEM DE ALTA RESISTÊNCIA SUJEITOS A CARGAS AXIAIS
COMPRESSIVAS

Otaviano Luis Talgatti

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre 2013

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

INSTABILIDADE RADIAL EM DUTOS FLEXÍVEIS COM DEFEITOS NA
BANDAGEM DE ALTA RESISTÊNCIA SUJEITOS A CARGAS AXIAIS
COMPRESSIVAS

OTAVIANO LUIS TALGATTI
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Porto Alegre 2013

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Orientador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Giovani Dalpiaz
CENPES/PETROBRAS

Prof. Dr. Antonio Fernando Burkert Bueno
IFRS

Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima
PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação aos meus pais Eolo Luiz Talgatti e Melânia Prichua Talgatti, aos meus irmãos Táliston Davi Talgatti e Dávia Marciana Talgatti e a minha namorada Solange Bandiera, que sempre me apoiaram para a realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha família que sempre apoiou para a realização dos meus sonhos.

Ao professor Telmo Roberto Strohaecker pela orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas do PROENG EC pela amizade e apoio na realização dos ensaios experimentais.

Em especial ao amigo e colega Eng Amauri Mosquen pela dedicação e apoio que foram imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado.

A todos os colegas do LAMEF que sempre buscam ajudar na realização dos trabalhos.

Ao LAMEF pela oportunidade e apoio quanto à realização do trabalho.

A FAPERGS pelo apoio quanto à realização do trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| LISTA DE FIGURAS | VII |
| LISTA DE TABELAS | XII |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS | XIII |
| RESUMO | XIV |
| ABSTRACT | XV |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 7 |
| 2.1 Linhas Flexíveis | 8 |
| 2.2 Detalhamento das Camadas Flexíveis | 10 |
| 2.3 Modelos Numéricos | 20 |
| 2.4 Danos na Bandagem de Alta Resistência | 25 |
| 2.5 Critérios de Falha para <i>Risers</i> Sujeitos a Instabilidade Radial | 28 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 29 |
| 3.1 Metodologia | 29 |
| 3.2 Critério de Falha Proposto | 31 |
| 3.3 Teste Experimental | 31 |
| 3.4 Modelo Numérico | 37 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSÕES | 46 |
| 4.1 Testes Experimentais | 46 |
| 4.2 Validação do Modelo..... | 55 |
| 4.3 Testes Numéricos..... | 60 |
| 5 CONCLUSÕES | 75 |
| 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 76 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 77 |
| ANEXOS | |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1: | Explorações de petróleo em alto mar (imagem maior) e relação entre poços exploratórios e as lâminas d' água (imagem menor) ao longo dos anos (PETROBRAS, 2009). | 1 |
| Figura 1.2: | Camadas Geológicas (PETROBRAS, 2007)..... | 2 |
| Figura 1.3: | Comparação entre dutos rígidos e flexíveis quanto aos tipos de falhas detectadas (PARLOC, 2001). | 3 |
| Figura 1.4: | Configurações típicas de linhas flexíveis: (a) catenária livre; (b) <i>lazy S</i> ; (c) <i>lazy wave</i> ; (d) <i>steep S</i> ; (e) <i>steep wave</i> ; e (f) lanterna chinesa (CLAUSEN & D'SOUZA, 2001). | 4 |
| Figura 1.5: | Unidade flutuante e as linhas estáticas (<i>flowlines</i>) e dinâmicas (<i>riser</i>). | 5 |
| Figura 2.1: | Aspecto dos arames da armadura de tração de uma linha flexível na falha por formação de "gaiola de passarinho" (BECTARTE & COUTAREL, 2004).... | 8 |
| Figura 2.2: | Aspecto dos arames da armadura de tração de uma linha flexível na falha por flambagem lateral (BRAGA, 2003). | 8 |
| Figura 2.3: | Detalhamento das camadas de um duto com paredes rugosas. (RIZZO 2010) | 9 |
| Figura 2.4: | Detalhamento das camadas de um duto com parede lisa..... | 10 |
| Figura 2.5: | Geometria básica da carcaça intertravada com detalhe do perfil intertravado. | 11 |
| Figura 2.6: | Perfis para a armadura de pressão: (a) perfil Z, (b) perfil C, (c) perfil T (grampo ligando os perfis) e (d) perfil T (API RP 17B, 1998). | 13 |

| | | |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.7: | Geometria básica da armadura de pressão com detalhe do perfil Z..... | 13 |
| Figura 2.8: | Disposição do arame helicoidal ao longo do duto e detalhe do perfil utilizado. | 15 |
| Figura 2.9: | Disposição das armaduras de tração contra helicoidalmente posicionadas... | 15 |
| Figura 2.10: | Assentamento da armadura de tração na linha flexível (WELLSTREAM LTD COMPANY). | 16 |
| Figura 2.11: | Gráfico tensão vs deformação de fibras de carbono, fibras de vidro e fibra de aramida (<i>kevlar</i> ®) (HERAKOVICH, 1998). | 19 |
| Figura 2.12: | Analogia entre grelhas e cascas (TIMOSHENKO & WOINOWSKY-KRIEGER,1959) | 23 |
| Figura 2.13: | Estrutura básica de um programa CAE | 25 |
| Figura 2.14: | Defeito na bandagem de alta resistência gerado na instalação da linha flexível (PICKSLEY 2002). | 27 |
| Figura 2.15: | Defeito na bandagem de alta resistência devido ao contato com a plataforma durante operação ou instalação do riser (CARNEVAL,MARINHO, 2006). | 27 |
| Figura 2.16: | Comparativo entre os sistemas de Danos e Mecanismos de falha para os dutos flexíveis (UKOOA 2001)..... | 28 |
| Figura 3.1: | Diagrama de blocos da sequência de materiais e métodos..... | 30 |
| Figura 3.2: | Condição das amostras de 6 polegadas..... | 31 |
| Figura 3.3: | Cortes da capa externa (esquerda) e bandagem de alta resistência (direita). | 32 |
| Figura 3.4: | Cortes dos arames e capa externa antes(esquerda) e depois(direita)..... | 33 |
| Figura 3.5: | Inserção da cunha metálica (esquerda) e montagem do conjunto(direita). ... | 33 |
| Figura 3.6: | Configuração completa utilizada nos testes de compressão. | 33 |
| Figura 3.7: | Configuração utilizada no teste de compressão..... | 35 |
| Figura 3.8: | Remoção da bandagem de alta resistência com dimensões de 200 mm x 56,3 mm..... | 36 |

| | | |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.9: | Bandagens de alta resistência removidas (fita anti-birdcaging)..... | 36 |
| Figura 3.10: | Tamanho de defeito e suas dimensões | 37 |
| Figura 3.11: | Dissecação da amostra de seis polegadas de diâmetro do tipo não aderente de parede lisa..... | 39 |
| Figura 3.12: | Determinação do perfil armadura de pressão (zeta) do duto em análise. .. | 40 |
| Figura 3.13: | Modelo tridimensional com vista isométrica(A), frontal(B) e detalhe do defeito aplicado(C)..... | 43 |
| Figura 4.1: | Gráfico de força x deslocamento para os testes 1 e 2..... | 46 |
| Figura 4.2: | Gráfico de força e deslocamento x tempo, para os testes 1 e 2. | 47 |
| Figura 4.3 | Amostra posicionada na bancada nos testes 1 e 2. | 48 |
| Figura 4.4: | Detalhe da região com capa cortada nos testes 1 e 2..... | 49 |
| Figura 4.5: | Enrugamento da capa e expansão da armadura de arames na região central, antes dos testes 3 e 4..... | 50 |
| Figura 4.6: | Posicionamento da amostra na bancada durante os testes 3 e 4. | 50 |
| Figura 4.7: | Gráfico de força x deslocamento para os testes 3 e 4..... | 51 |
| Figura 4.8: | Gráfico de força e deslocamento x tempo para os testes 3 e 4. | 51 |
| Figura 4.9: | Medição da altura radial da gaiola de passarinho, teste 3. | 53 |
| Figura 4.10: | Formação da gaiola de passarinho - Teste 3. | 53 |
| Figura 4.11: | Condição da amostra no final do teste 3. | 54 |
| Figura 4.12: | Gráfico comparativo de força x deslocamento – testes c/ giro livre..... | 54 |
| Figura 4.13: | Gráfico comparativo de força x deslocamento – testes c/ giro restrito..... | 55 |
| Figura 4.14: | Relação entre carga e deslocamento do teste experimental e carga e deslocamento do modelo desenvolvido. | 56 |
| Figura 4.15: | Relação entre carga e deslocamento do teste experimental e carga e deslocamento do modelo desenvolvido | 57 |

| | | |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.16: | Estado final da amostra após aplicação do deslocamento prescrito segundo teste experimental | 58 |
| Figura 4.17: | Detalhe da gaiola de passarinho observada | 58 |
| Figura 4.18: | Armaduras de tração externa(A) e interna(B) e seus respectivos cortes longitudinais C e D. | 59 |
| Figura 4.19: | Relação visual entre os resultados experimentais e teóricos quanto à formação da gaiola de passarinho desenvolvida. | 60 |
| Figura 4.20: | Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 25 mm. | 61 |
| Figura 4.21: | Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 50 mm. | 61 |
| Figura 4.22: | Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 100 mm. | 62 |
| Figura 4.23: | Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 200 mm. | 62 |
| Figura 4.24: | Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 300 mm. | 63 |
| Figura 4.25: | Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 400 mm. | 63 |
| Figura 4.26: | Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 500 mm. | 64 |
| Figura 4.27: | Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 600 mm. | 64 |
| Figura 4.28: | Relação entre as cargas e deslocamentos para todos os testes experimentais e computacionais..... | 65 |
| Figura 4.29: | Altura da gaiola de passarinho do teste experimental..... | 66 |

Figura 4.30: Flambagem lateral ocorrida segundo condição de defeito 25 mm x 112,6 mm 70

Figura 4.31: Detalhamento para o tamanho de defeito 50 mm x 28,15 mm: defeito aplicado (A). Geração da gaiola – vista isométrica (B). Deformação radial das armaduras de tração – vista isométrica(C). Deformação radial das armaduras de tração – vista lateral (D). Gaiola em corte - vista isométrica – (E) Deformação radial – vista superior (F) 71

Figura 4.32: Detalhamento para o tamanho de defeito 100 mm x 56,3 mm: defeito aplicado (A). Geração da gaiola – vista isométrica (B). Deformação radial das armaduras de tração – vista isométrica(C). Deformação radial das armaduras de tração – vista lateral (D). Gaiola em corte - vista isométrica – (E) Deformação radial – vista superior (F) 72

Figura 4.33: Detalhamento para o tamanho de defeito 400 mm x 56,3 mm: defeito aplicado (A). Geração da gaiola – vista isométrica (B). Deformação radial das armaduras de tração – vista isométrica(C). Deformação radial das armaduras de tração – vista lateral (D). Gaiola em corte - vista isométrica – (E) Deformação radial – vista superior (F) 73

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1: | Propriedades dos aços para a carcaça intertravada (BASTIAN, 2000). | 12 |
| Tabela 2.2: | Propriedades dos aços carbono para armadura de pressão (BERGE <i>et al.</i> , 1992). | 14 |
| Tabela 3.1: | Planejamento dos testes de compressão axial..... | 34 |
| Tabela 3.2: | Variações de defeitos na bandagem de alta resistência a serem testados no qual estão agrupadas pelo comprimento do defeito..... | 38 |
| Tabela 3.3: | Características do duto flexível de seis polegadas de diâmetro do tipo não aderente de parede lisa..... | 41 |
| Tabela 4.1: | Medições realizadas para os testes 1 e 2. | 47 |
| Tabela 4.2: | Medições realizadas para os testes 3 e 4. | 52 |
| Tabela 4.3: | Relação entre o teste experimental e o modelo desenvolvido. | 56 |
| Tabela 4.4: | Relação entre as alturas das gaiolas de passarinho do teste experimental e do modelo. | 59 |
| Tabela 4.5: | Resultados obtidos nos testes segundo o critério de falha estabelecido. | 67 |
| Tabela 4.6: | Relação entre as rigidezas obtidas nos testes com defeito e no teste experimental sem defeito..... | 68 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

SDPs: Sistema Definitivo de Produção;

A: área da seção transversal;

E: módulo de Young do material;

(EA): rigidez axial;

ν : Coeficiente de Poisson;

(ED): rigidez à flexão das armaduras metálicas;

G: módulo de cisalhamento do material;

h: espessura da camada ou altura da gaiola de passarinho;

I: momento de inércia do perfil;

K: fator de compactidade do perfil;

L_p : passo linear do arame;

n_a : número de arames na camada;

w: largura do arame;

C: comprimento do defeito;

L: largura do defeito;

API: American Petroleum Institute;

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

tonf: tonelada força

RESUMO

O *riser* flexível é composto por várias camadas com funções estruturais específicas. Quanto à resistência mecânica, sua estrutura deve suportar os mais variados tipos de solicitações atuantes de forma combinada ou isolada. Uma das formas isoladas de solicitação é a compressão axial, responsável pela instabilidade radial (gaiola de passarinho) do duto flexível.

A instabilidade radial ocorre principalmente quando o duto flexível apresenta danos na bandagem de alta resistência que juntamente com a carga axial compressiva pode levar o *riser* a falhas catastróficas. Esse dano na bandagem é gerado devido á logística de lançamento, defeitos de projeto ou materiais, carregamentos excessivos ou quedas.

Portanto, a presente dissertação objetiva avaliar a relação entre o tamanho do defeito na bandagem de alta resistência e a capacidade de geração da instabilidade radial (birdcaging) para solicitações compressivas atuantes e por consequência propor um critério de falha para o duto flexível. Para concretização do objetivo foi desenvolvido um modelo tridimensional em elementos finitos no software Abaqus, e realização de testes em escala real na bancada de testes do LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física) de forma a validar o modelo.

Para uma análise da relação entre tamanhos de defeitos, instabilidade radial e cargas compressivas que levam a variações no comportamento mecânico do riser segundo suas rigidezas, foram executados 32 testes através do modelo desenvolvido com variações no tamanho de defeito de acordo com os limitantes geométricos do *riser* nas direções de largura e comprimento.

Palavras-chave: Gaiola de passarinho, defeitos na capa externa de *risers*, elementos finitos, cargas compressivas.

ABSTRACT

The flexible riser consists of several layers with specific structural features. In terms of mechanical strength, its structure must resist to all kinds of loads, acting combined or isolated. One of the isolated loads is the axial compression, responsible for radial instability (birdcage) in the duct.

The radial instability occurs mainly when flexible pipe has damage in the high strength bandage. When it occurs, combined with the axial compressive load, the duct can be led to catastrophic failure. This damage in the bandage is generated due to the logistics of launching, design or material defects, excessive loadings or falls.

Therefore, this thesis aims to evaluate the relationship between the size of the defect in high strength bandages and the capacity of generating radial instability (birdcaging) for compressive acting loads and consequently propose a criteria of failure for the flexible duct. To achieve the objective, it was developed a three-dimensional finite element model in Abaqus software and performed tests in a real scale bench on LAMEF (Laboratory of Physical Metallurgy) to validate the model.

For an analysis of the relationship between defects sizes, instability and radial compressive loads that lead to changes in mechanical behavior according to riser stiffness, 32 tests were performed through the model developed with variations in the size of defect according to the geometric limitations of the riser in the directions of width and length.

Keywords: birdcaging, damage in the external layer of risers, finite elements, compressive loads.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil iniciou a busca pelo conhecimento *offshore* em 1968, quando a Petrobras comprovou a existência de petróleo no campo de Guaricema (Sergipe), a 80 metros de profundidade gerando assim o desenvolvimento da primeira plataforma de extração. A partir desse desenvolvimento, o petróleo vem sendo explorado em lâminas de água cada vez mais profundas, demandando investimentos de forma contínua na área de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias capazes de atender os novos desafios impostos ao longo dos anos. A Figura 1.1 demonstra a evolução cronológica das explorações em diferentes níveis de lâminas de água.

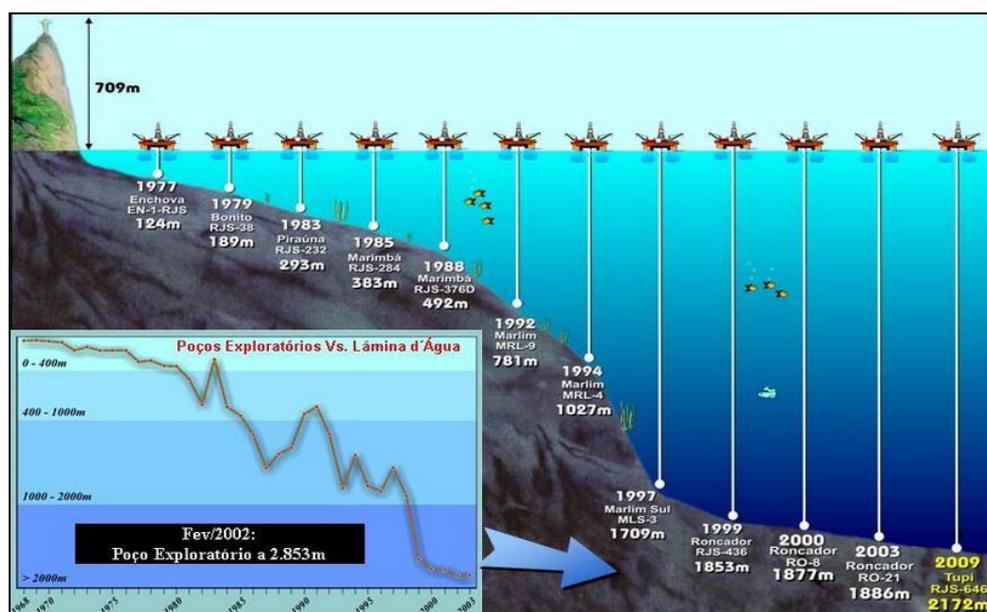


Figura 1.1: Explorações de petróleo em alto mar (imagem maior) e relação entre poços exploratórios e as lâminas d' água (imagem menor) ao longo dos anos (PETROBRAS, 2009).

Em 2007, a descoberta da área de Tupi na Bacia de Santos, com grande concentração de petróleo e gás em seções de pré-sal, elevam a Petrobras e o Brasil em um novo cenário da indústria mundial do setor. Em 2010, no pré-sal, foi estimado que a produção de petróleo em Tupi chegasse a 100 mil barris/dia. Para a exploração do campo é necessário vencer uma lâmina de água de 2000 metros de profundidade e mais 4000 metros

de rocha e crosta salina no qual é incluso a espessa e porosa camada de sal onde abaixo desta encontra-se o pré-sal e seu reservatório. A Figura 1.2 demonstra os níveis de profundidade de exploração.

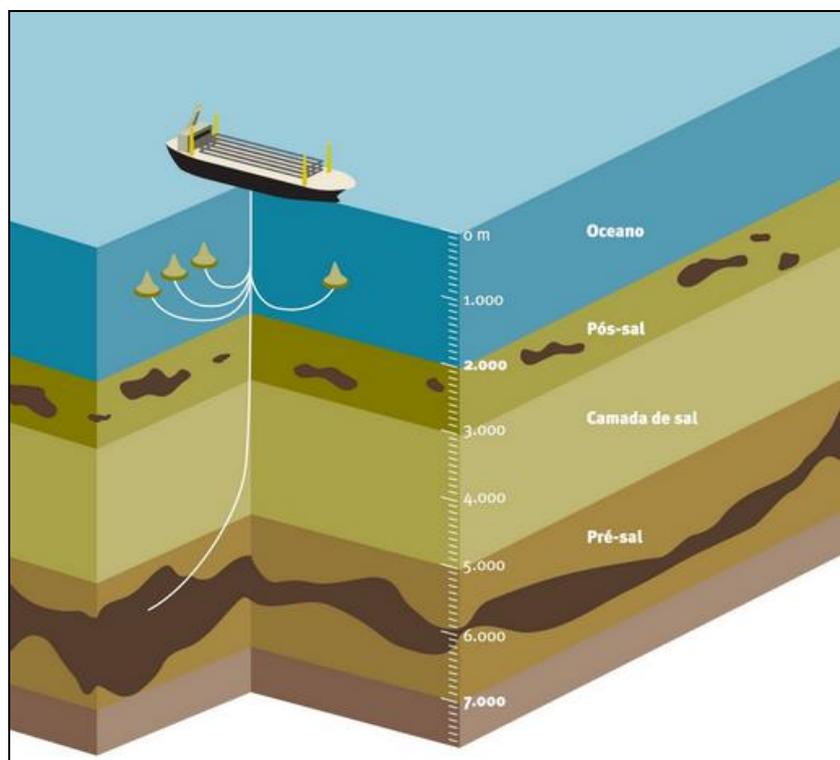


Figura 1.2: Camadas Geológicas (PETROBRAS, 2007).

Dessa maneira percebe-se que o presente e futuro da indústria petrolífera estão concentrados em alto mar, onde o processo de extração envolve inúmeras etapas, cada qual com sua particularidade contribuindo para a obtenção das metas estabelecidas e assim suprindo as necessidades demandadas. Para isso se devem vencer as grandes profundidades tanto de lâminas de água quanto crosta terrestre.

Dentro desse contexto, as linhas de transmissão de petróleo e gás que são extraídos da reserva explorada, são de extrema importância para o desenvolvimento social, político e econômico do país. As linhas de extração podem ser rígidas ou flexíveis. As linhas flexíveis apresentam algumas vantagens como: são pré-fabricadas, de fácil transporte e instalação, grandes comprimentos, podem ser armazenados em carretéis, podem ser facilmente desinstaladas e reinstaladas em outros campos de produção, são estruturas complacentes, isto é, capazes de absorver os grandes deslocamentos impostos pelas unidades flutuantes de produção, entre outras. A Figura 1.3 demonstra um comparativo entre as linhas rígidas e flexíveis quanto aos tipos de falhas detectadas. Por isso as linhas

flexíveis estão presentes na maioria dos sistemas de produção em atividades e, possivelmente, os futuros a serem desenvolvidos ou em desenvolvimento.

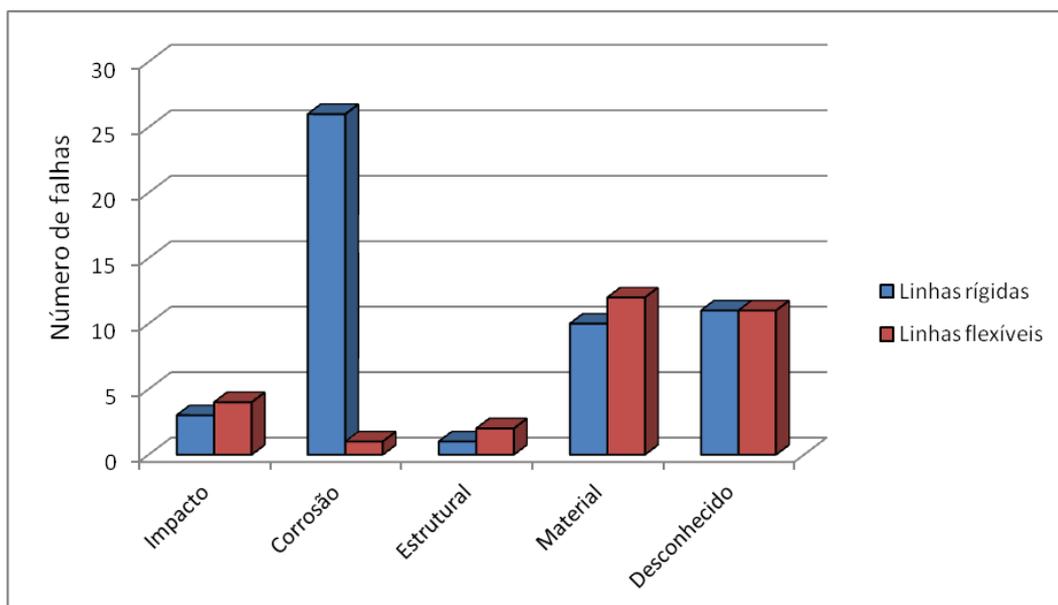


Figura 1.3: Comparação entre dutos rígidos e flexíveis quanto aos tipos de falhas detectadas (PARLOC, 2001).

Os dutos flexíveis passaram a ser utilizados no Brasil após poucos anos de seu projeto de engenharia, no qual foi desenvolvido na década de 1970, pelo Instituto Francês de Petróleo (IFP). Apesar do tempo decorrido o projeto de dutos flexíveis ainda não está totalmente entendido, isso se deve pela alta complexidade que as inúmeras variáveis podem gerar pelo envolvimento das mais variadas áreas da engenharia e a existência de inúmeros mecanismos de falhas que podem ocorrer. Existem dois tipos de linhas flexíveis (SOUSA 2005):

- Linhas de camadas aderentes, que têm como principal característica a vulcanização dos seus componentes metálicos em uma matriz de elastômero. Como camadas impermeabilizantes, são utilizados compostos de elastômeros reforçados com fibras plásticas embebidas nos mesmos. Os espaços entre os arames de uma mesma camada metálica são ocupados pelo elastômero, que é submetido a elevadas tensões cisalhantes provocando, assim, o enrijecimento dessas camadas.
- Linhas de camadas não aderentes, que 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.

As linhas flexíveis possuem configurações típicas e podem ser visualizadas de acordo com a Figura 1.4.

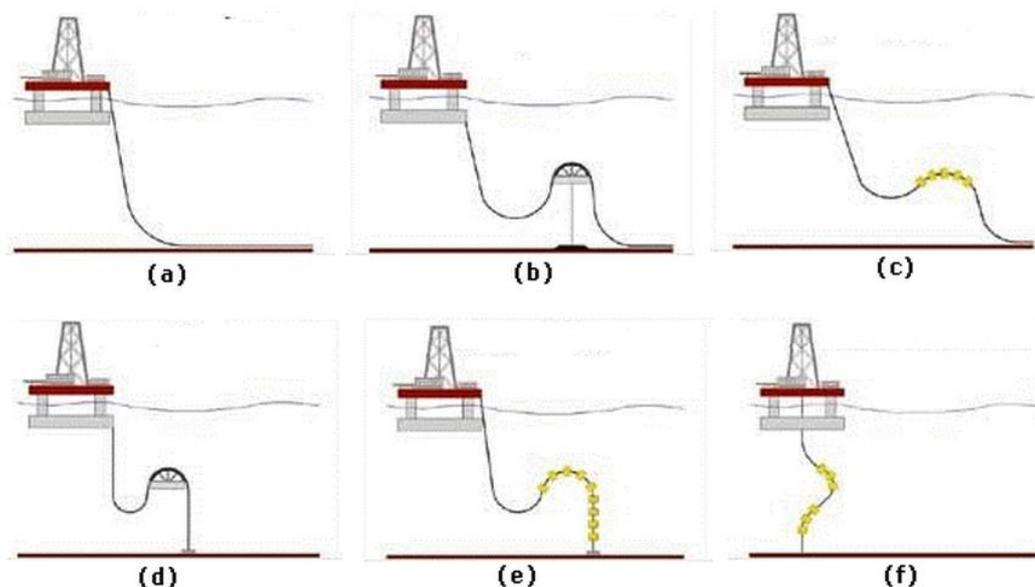


Figura 1.4: Configurações típicas de linhas flexíveis: (a) catenária livre; (b) *lazy S*; (c) *lazy wave*; (d) *steep S*; (e) *steep wave*; e (f) lanterna chinesa (CLAUSEN & D'SOUZA, 2001).

Os tipos de linhas flexíveis interferem diretamente na logística de lançamento dos *risers* contribuindo assim para uma maior ou menor probabilidade de ocorrência de um possível dano na bandagem de alta resistência. Também sua disposição com o fundo do mar interfere quanto ao nível de carregamento compressivo atuante no duto, pois dependendo do ângulo disposto altera a componente da força que leva a instabilidade radial.

As linhas flexíveis de camadas não aderentes podem ser utilizadas tanto estaticamente quanto dinamicamente. As linhas estáticas ou *flowlines* são assentadas no fundo do mar para escoar óleo e/ou gás ou, ainda, injetar água no poço produtor. Essas linhas estáticas se conectam a linhas dinâmicas, conhecidas como *risers*, que ligam o fundo do mar ao sistema flutuante de produção. A Figura 1.5 demonstra as linhas estáticas (*flowlines*) e as linhas dinâmicas (*riser*).

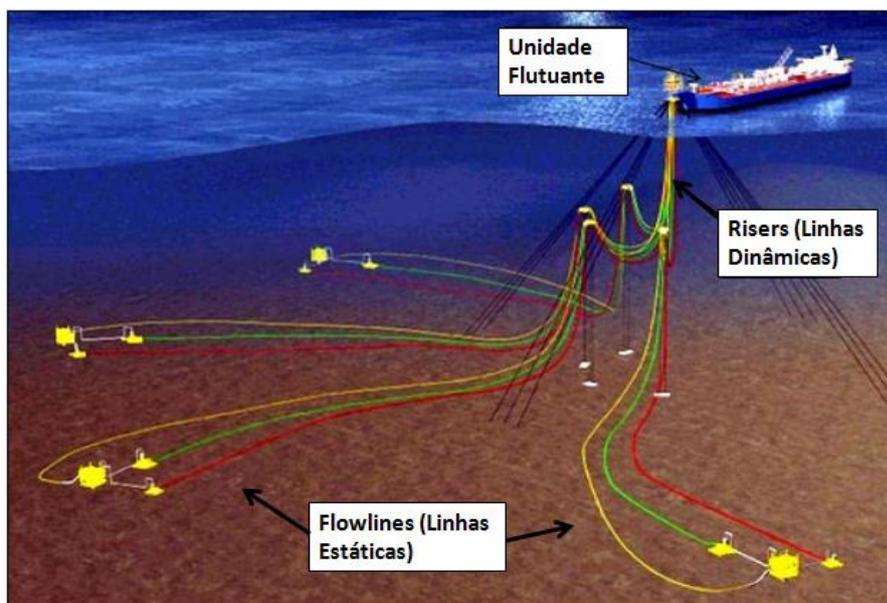


Figura 1.5: Unidade flutuante e as linhas estáticas (*flowlines*) e dinâmicas (*riser*).

De acordo com a Figura 1.4, pode-se perceber que as linhas flexíveis possuem várias configurações ficando assim expostas aos mais variados tipos de solicitação, como: pressão externa principalmente em águas profundas, pressão interna devido aos fluidos da extração, o peso próprio que se intensifica de acordo com a profundidade, solicitações cíclicas devido ao movimento contínuo dos sistemas flutuantes de produção, correntes marinhas entre outras.

As solicitações, agindo de forma isolada ou em conjunto, podem gerar instabilidade nos dutos flexíveis. Um caso particular de instabilidade ocorre devido às cargas compressivas atuarem de forma extrema, gerando assim flambagem radial (gaiola de passarinho) ou lateral no duto. Tais flambagens podem ocorrer devido ao efeito de terminação (*end cap*) no qual grandes pressões hidrostáticas geram elevadas cargas compressivas nas terminações do duto durante seu lançamento ou devido ao efeito dinâmico de topo no qual o duto sofre elevadas cargas compressivas na parte de fundo quando o ângulo de topo é pequeno, mas com deslocamentos extremos.

A exploração de petróleo está sendo realizada em lâminas d'água cada vez mais profundas fazendo com que as cargas compressivas aumentem consideravelmente de forma que o mesmo sofra solicitações particulares que contribuem para o surgimento do efeito de gaiola de passarinho (*birdcaging*). Essa instabilidade no duto pode ser um critério de falha para a substituição do mesmo dependendo de sua intensidade. Esse efeito de gaiola de passarinho se intensifica quando o riser possui algum tipo de defeito em sua camada externa.

As variações existentes entre as configurações dos sistemas de exploração de petróleo são independentes e, por esse motivo, é válida uma abordagem mais específica para cada caso. Um dos objetivos deste trabalho é um melhor entendimento quanto aos estudos de cargas compressivas em linhas flexíveis dinâmicas (*risers*) do tipo não aderentes de paredes lisas com defeitos na bandagem de alta resistência sujeitas às cargas axiais compressivas levando a falha por instabilidade radial também conhecida como gaiola de passarinho ou *birdcaging*. Tal objetivo será mensurado através da realização de um modelo tridimensional em elementos finitos desenvolvido no *software Abaqus* e a realização de testes em escala real na bancada de teste do LAMEF de forma a validar o modelo. Com a análise dos resultados da relação entre tamanho de defeito da bandagem de alta resistência e a carga compressiva para a geração da gaiola de passarinho será possível determinar as cargas limites no qual o duto flexível poderá estar submetido em campo de acordo com a proposta de um critério de falha a ser adotado. A falta de literatura de um modelo tridimensional que englobe o sistema atuando em conjunto e que esteja o mais próximo da realidade é um diferencial que pode contribuir para o melhor entendimento da geração da gaiola de passarinho perante as condições expostas.

Para o desenvolvimento do trabalho é de fundamental entendimento os assuntos chave abordados, os quais giram em torno dos defeitos na bandagem de alta resistência assim como falhas devido à instabilidade radial (gaiola de passarinho) de dutos flexíveis sujeitos a cargas axiais compressivas assistidos via software através de simulações em elementos finitos. A literatura não aborda os assuntos em conjunto, ou seja, a relação entre possíveis tamanhos de defeitos na bandagem de alta resistência de um duto flexível e seus respectivos limites de cargas axiais compressivas permitidas para o não surgimento do efeito de gaiola de passarinho.

Cabe ressaltar que os danos na bandagem de alta resistência são os principais fatores que contribuem para a formação da *birdcaging*, portanto uma análise específica que relaciona o tamanho do dano da bandagem de alta resistência com a formação da gaiola de passarinho devido às cargas compressivas é de extrema importância para o entendimento dos limites de cargas a serem aplicados. Tais danos na bandagem levam a falha do duto através da formação da gaiola de passarinho, portanto o entendimento do comportamento da instabilidade radial faz com que inúmeros transtornos sejam evitados tais como; vazamentos em alto mar, paradas de produção para a troca do duto, ruptura catastrófica indesejada, dificuldade de acesso já que o mesmo provavelmente esteja entre os mais profundos, pois são os que mais sofrem cargas devido a lamina d'água, entre outros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento da revisão bibliográfica foi realizada uma análise das principais normas sobre dutos flexíveis, teses, trabalhos publicados, patentes, fabricantes de dutos flexíveis, artigos científicos, dissertações e livros.

As cargas compressivas aplicadas axialmente aos dutos induz uma torção no sentido contrário ao assentamento dos arames da camada apresentada como armadura de tração, gerando assim, um afastamento radial dos arames em relação às camadas subjacentes. Esse mecanismo de instabilidade é conhecido como flambagem radial ou "gaiola de passarinho" (birdcaging). Quando a resistência ao movimento radial não for suficiente para evitar tais deslocamentos podem ocorrer danos permanentes à linha flexível sendo considerado um critério de falha para o duto conforme a Figura 2.1. Essa resistência ao movimento radial é desenvolvida pela camada externa e a fita subsequente (que dependendo da configuração do duto pode existir ou não), ambas localizadas após a armadura externa de tração conforme detalhado na Figura 2.3. A forma mais observada de flambagem radial ou "gaiola de passarinho" surge quando as camadas, após a armadura de tração externa, são danificadas. Com as camadas externas em relação à armadura de tração danificadas o fluido externo, que antes atuava nessa camada, acaba atuando sobre a próxima camada polimérica íntegra que possui um diâmetro menor fazendo com que os esforços sejam menores, com isso a resistência ao movimento radial dos arames, pela pressão externa, deixa de existir e dessa forma, há possibilidade dos mesmos se instabilizarem. Já a flambagem lateral ocorre quando a resistência ao movimento radial é suficiente para evitar deslocamentos radiais conforme Figura 2.2. A relação entre a carga compressiva, tamanho de defeito na bandagem de alta resistência, gaiola de passarinho é o foco deste trabalho.



Figura 2.1: Aspecto dos arames da armadura de tração de uma linha flexível na falha por formação de "gaiola de passarinho" (BECTARTE & COUTAREL, 2004).

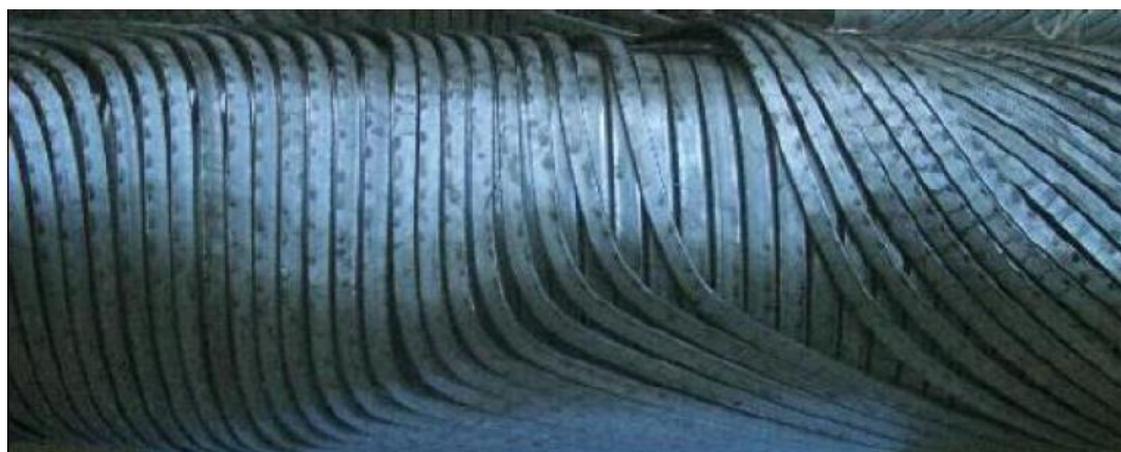


Figura 2.2: Aspecto dos arames da armadura de tração de uma linha flexível na falha por flambagem lateral (BRAGA, 2003).

2.1 Linhas Flexíveis

O duto flexível foi desenvolvido na década de 1970 pelo Instituto Francês de Petróleo (IFP), o qual passou a ser utilizado no Brasil poucos anos após seu projeto de engenharia. Sua estrutura é composta por camadas concêntricas no qual geram em conjunto as características de alta resistência axial, estanqueidade e baixa rigidez a flexão. Quanto à resistência estrutural, deve suportar aos vários tipos de solicitações atuantes tais como; tração, compressão, flexão, cisalhamento ou solicitações combinadas, já a baixa rigidez a flexão permite sua flexibilidade contribuindo assim para o fácil transporte e

instalação, também podem ser facilmente desinstaladas e reinstaladas em outros campos de produção e são estruturas capazes de absorver os grandes deslocamentos impostos pelas unidades flutuantes de produção.

Existem algumas configurações de linhas Flexíveis de camadas não aderentes que variam de acordo com a disposição das camadas que compõe o duto. Uma linha flexível pode ter entre cinco e dezenove camadas e diâmetros internos entre 2,5 polegadas e 19 polegadas (COFLEXIP, 2002). Segundo as recomendações da API RP 17B (American Petroleum Institute, 1998) as linhas flexíveis de camadas não aderentes dividem-se em três famílias, podendo ser: com parede lisa, parede rugosa sem reforço à pressão e parede rugosa com reforço à pressão. A Figura 2.3 demonstra as linhas com dutos de parede rugosa.

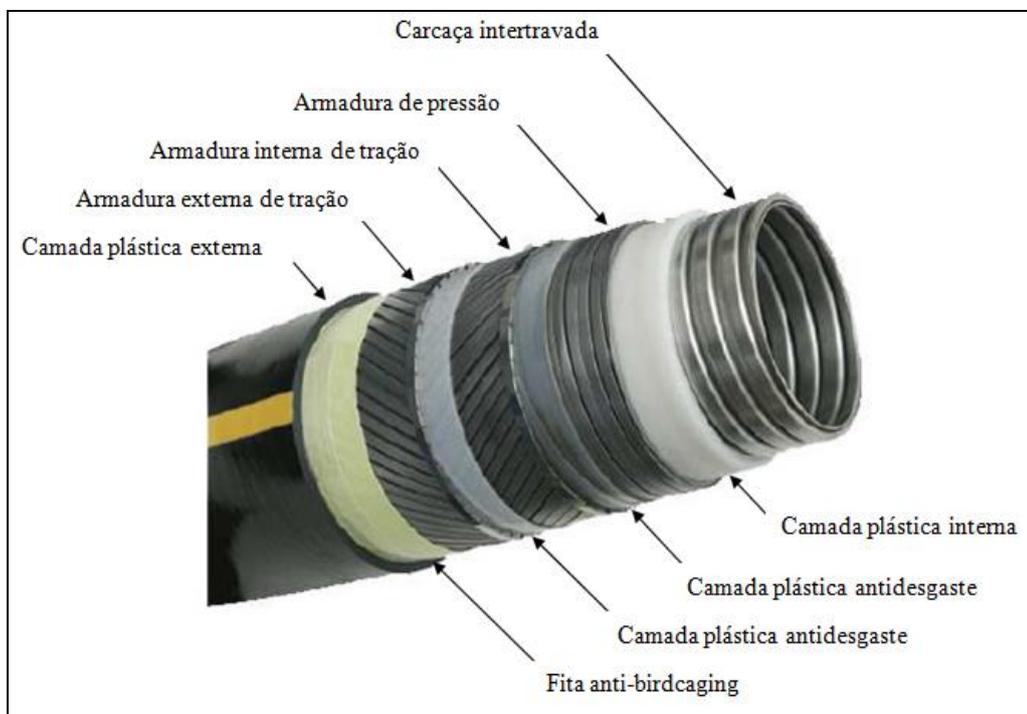


Figura 2.3: Detalhamento das camadas de um duto com paredes rugosas. (RIZZO 2010)

A Figura 2.3 demonstra as camadas em uma linha flexível com parede rugosa no qual possui a configuração (da mais interna para a mais externa): carcaça intertravada, camada plástica interna, armadura de pressão (opcional), camada plástica antidesgaste, um par de armaduras de tração e entre as armaduras uma camada plástica antidesgaste, fita anti-*birdcaging* e camada plástica externa.

As linhas flexíveis de parede rugosa são utilizadas para transporte de substâncias que possuem gases, sendo que a camada mais interna é a carcaça intertravada metálica que contribui tanto para aumentar a resistência mecânica do duto quanto para evitar o colapso

por queda de pressão da linha. Essa linha pode conter ainda uma armadura de pressão interna sendo assim caracterizada como linha rugosa com reforço a pressão. Já as linhas flexíveis de parede lisa são utilizadas para transportes de substâncias que não possuem gases, evitando assim a difusão do mesmo através da camada polimérica mais interna que está em contato direto com a substância em transporte. As linhas possuem diferentes configurações de acordo com a aplicação desejada, podendo variar pela adição de camadas de isolamento térmico, armaduras de tração e camadas poliméricas. A Figura 2.4 demonstra o detalhamento das camadas de um duto flexível de parede lisa (da mais interna para a mais externa): camada plástica interna, armadura de pressão (com uma possível camada de reforço à pressão), camada plástica anti-desgaste, um par de armaduras de tração, fita anti-*birdcaging* e uma camada plástica externa.



Figura 2.4: Detalhamento das camadas de um duto com parede lisa.

2.2 Detalhamento das Camadas Flexíveis

As camadas do duto flexível podem ser divididas em metálicas e poliméricas cada qual com uma função específica que será detalhada nos itens a seguir.

2.2.1 Camadas Metálicas

Carcaça intertravada

É a camada mais interna do riser do tipo parede rugosa, constituída de aço carbono, inoxidável ou aço-liga, possui alta flexibilidade devido ao seu formato intertravado conforme Figura 2.5.



Figura 2.5: Geometria básica da carcaça intertravada com detalhe do perfil intertravado.

A carcaça intertravada possui as seguintes funções (SOUSA 2005):

- Prevenir o colapso da estrutura devido a cargas radiais distribuídas, como pressão externa e *squeeze*, e devido a cargas radiais concentradas como o *crushing*.
- Prevenir o colapso da linha flexível devido a uma queda abrupta da pressão interna na estrutura (linhas que transportam gases).
- Fornecer resistência à abrasão causada por partículas existentes no fluido transportado ou pela passagem de ferramentas por dentro da linha flexível.

A carcaça intertravada confere grande resistência quando submetida a cargas radiais distribuídas ou concentradas, pois o ângulo de assentamento entre os arames constituintes é elevado, próximo aos 90 graus. Por outro lado essa camada não resiste a cargas axiais devido ao seu formato de construção. Essa carcaça possui pequena ovalização ao longo de seu diâmetro pelo fato de ser construída sobre um mandril guia.

Os aços utilizados possuem alta resistência á corrosão por hidrocarbonetos e água. Podem ser utilizados (API RP 17B, 1998):

- Aços carbono.
- Aços inoxidáveis ferríticos (AISI 409 e AISI 430).
- Aços inoxidáveis austeníticos (AISI 304, 304L, 316 e 316L).

- Aços inoxidáveis Duplex (UNS S31803).
- Aços-liga com alto teor de níquel (N08825).

A Tabela 2.1 demonstra, segundo (BASTIAN, 2000), a relação entre as propriedades de alguns materiais constituintes da camada intertravada. Estes valores não consideram o efeito de encruamento da carcaça durante o processo de fabricação.

Tabela 2.1: Propriedades dos aços para a carcaça intertravada (BASTIAN, 2000).

| <i>Tipo de aço</i> | <i>Tensão de escoamento</i> | <i>Ruptura</i> | |
|--------------------|-----------------------------|----------------|-------------------|
| | | <i>Tensão</i> | <i>Deformação</i> |
| AISI 304 | 310MPa | 620MPa | 30,0% |
| AISI 304L | 310MPa | 620MPa | 30,0% |
| AISI 316 | 310MPa | 620MPa | 40,0% |
| AISI 316L | 310MPa | 620MPa | 30,0% |
| AISI 409 | 205MPa | 380MPa | 20,0% |
| AISI 430 | 205MPa | 450MPa | 22,0% |
| UNS S31803 | 450MPa | 620MPa | 25,0% |

Armadura de pressão

É constituída por um ou dois arames enrolados em hélice de pequeno passo, no qual sua aplicação objetiva resistir aos esforços radiais devido às pressões externas e internas assim como cargas mecânicas radiais ajudando assim a diminuir os esforços na carcaça intertravada. Assim com a carcaça intertravada possui pequena resistência a cargas axiais e de flexão, pois possui ângulo de assentamento próximo de 90°.

Diversos perfis são utilizados em sua constituição. A Figura 2.6 destaca alguns deles (API RP 17B, 1998). O mais utilizado é o perfil Z, no qual leva a denominação espiral ou camada zeta conforme Figura 2.7.

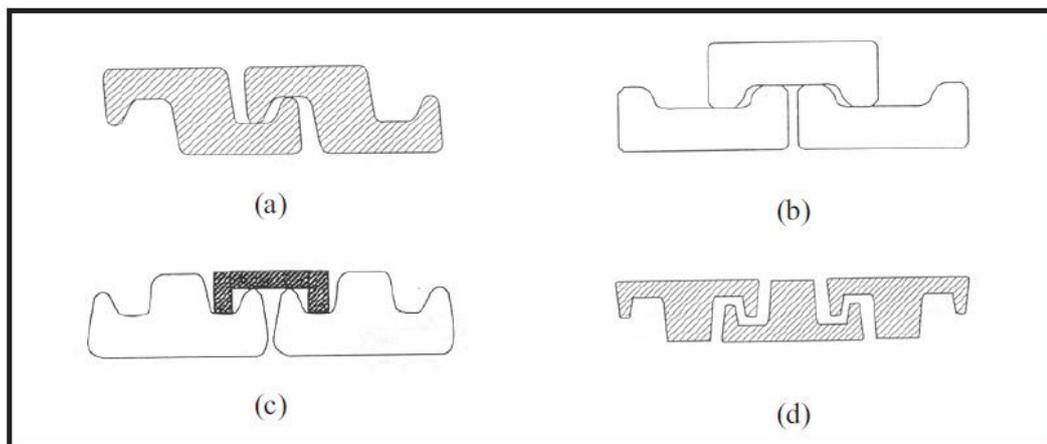


Figura 2.6: Perfis para a armadura de pressão: (a) perfil Z, (b) perfil C, (c) perfil T (grampo ligando os perfis) e (d) perfil T (API RP 17B, 1998).

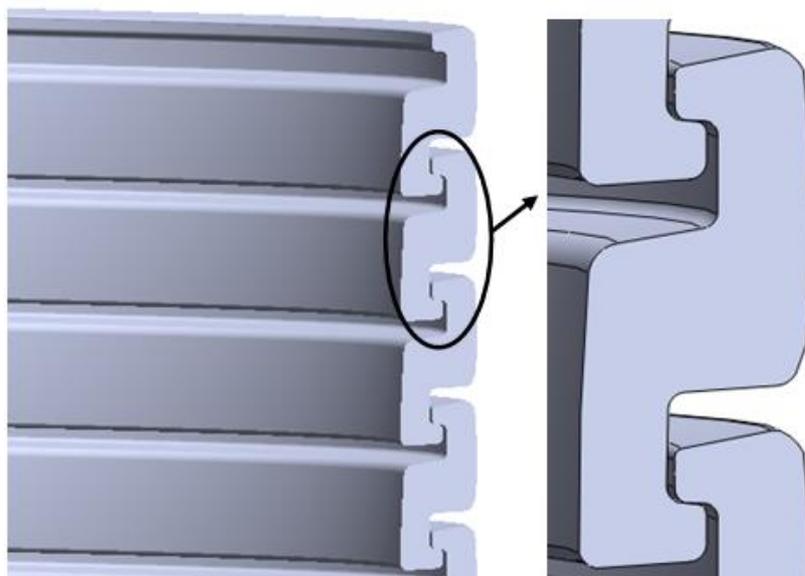


Figura 2.7: Geometria básica da armadura de pressão com detalhe do perfil Z.

Os aços com baixo teor de carbono são os mais empregados e algumas de suas propriedades encontram-se na Tabela 2.2 (BERGE *et al.*, 1992). Da mesma forma que a carcaça intertravada, valores desta tabela podem variar quando se leva em consideração o coeficiente de encruamento. O intertravamento da zeta pode ser desfeito sem que seja necessário cortar o perfil.

Tabela 2.2: Propriedades dos aços carbono para armadura de pressão (BERGE *et al.*, 1992).

| <i>Especificação</i> | <i>Grau</i> | <i>Acabamento</i> | <i>Tensão de ruptura</i> | <i>Deformação de ruptura</i> |
|----------------------|-------------|-------------------|--------------------------|------------------------------|
| AFNOR | FM 15 | trefilado a frio | 784MPa | - |
| AFNOR | FM 35 | trefilado a frio | 850MPa | 6,0% |

O intertravamento dos arames zeta permite um curso livre de cerca de 2 mm por volta na direção longitudinal, de modo a permitir que a linha seja flexionada, apenas aproveitando essa folga sem solicitar a seção longitudinal dos arames zeta (BRAGA 2003).

Camada de reforço à pressão

A principal função da camada de reforço à pressão é oferecer resistência adicional à linha flexível aos carregamentos de pressão interna e externa. A camada é opcional constituída por um ou mais arames enrolados em espiral de pequeno passo. É uma camada empregada em linhas flexíveis utilizadas em águas ultraprofundas e/ou submetidas à grande pressão interna. A utilização dessa camada diminui a carga atuante na armadura de pressão e na carcaça intertravada. O perfil mais utilizado é retangular, com materiais semelhantes aos da armadura de pressão.

Armaduras de tração

A armadura de tração do duto engloba duas camadas concêntricas de arames conhecidas como armadura externa quando disposta na parte mais afastada em relação ao centro e a armadura interna localizada logo abaixo da camada externa. A Figura 2.8 demonstra a disposição do arame helicoidal ao longo do duto e detalhe do perfil retangular utilizado. As armaduras conferem à resistência as cargas axiais, torcionais e a pressão interna, estando ambas contra-helicoidalmente posicionadas, com vários arames dispostos ao longo da circunferência conforme Figura 2.9. Os arames possuem seção aproximadamente retangular e propriedades mecânicas elevadas com alto teor de carbono, dadas às elevadas tensões devido aos carregamentos aplicados na linha flexível. As propriedades dos aços da armadura podem ser visualizadas conforme a Tabela 2.3 (BERGE *et al.*, 1992).

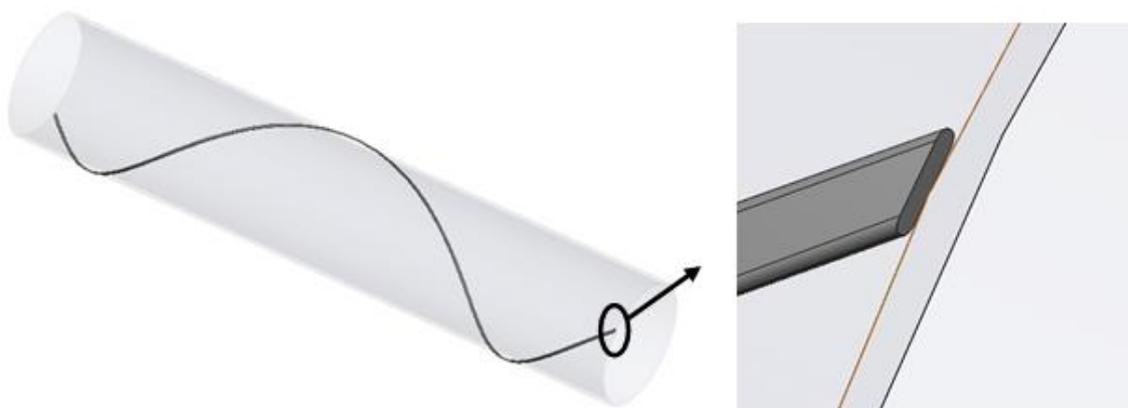


Figura 2.8: Disposição do arame helicoidal ao longo do duto e detalhe do perfil utilizado.

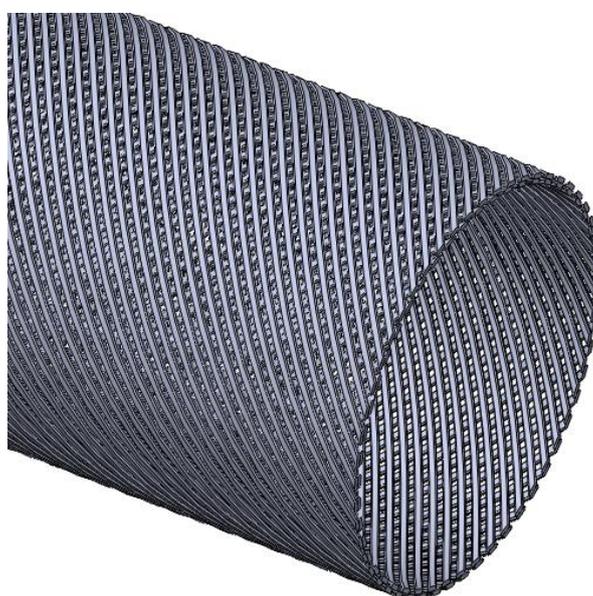


Figura 2.9: Disposição das armaduras de tração contra helicoidalmente posicionadas.

Tabela 2.3: Propriedades dos aços carbono para armadura de tração (BERGE *et al.*, 1992).

| <i>Especificação</i> | <i>Grau</i> | <i>Acabamento</i> | <i>Tensão de ruptura</i> | <i>Deformação de ruptura</i> |
|----------------------|-------------|-------------------|--------------------------|------------------------------|
| AFNOR | FM 60 | trefilado a frio | 1373MPa | - |
| AFNOR | FM 72 | trefilado a frio | 1500MPa | 1,0% |

O ângulo de assentamento varia aproximadamente entre 20° e 55° , por serem valores baixos, não comprometem a alta flexibilidade que caracteriza a linha, de forma que os arames podem se deslocar quando o duto é flexionado.

A relação entre resistência axial e radial é determinada pelo ângulo de assentamento aplicado, no qual pode ser visualizado conforme Figura 2.10. O ângulo de assentamento destas camadas determina a condição da solicitação do duto em operação, valores entre 20° e 35° são utilizados para linhas de alta pressão. A resultante das forças axiais e radiais determina o ângulo de assentamento, para linhas não muito severas, é de aproximadamente 55° (SOUSA, 2005). Outros fatores podem alterar o ângulo de assentamento tais como o tipo de solicitação de forma estática ou dinâmica, a presença de reforços á pressão, etc.

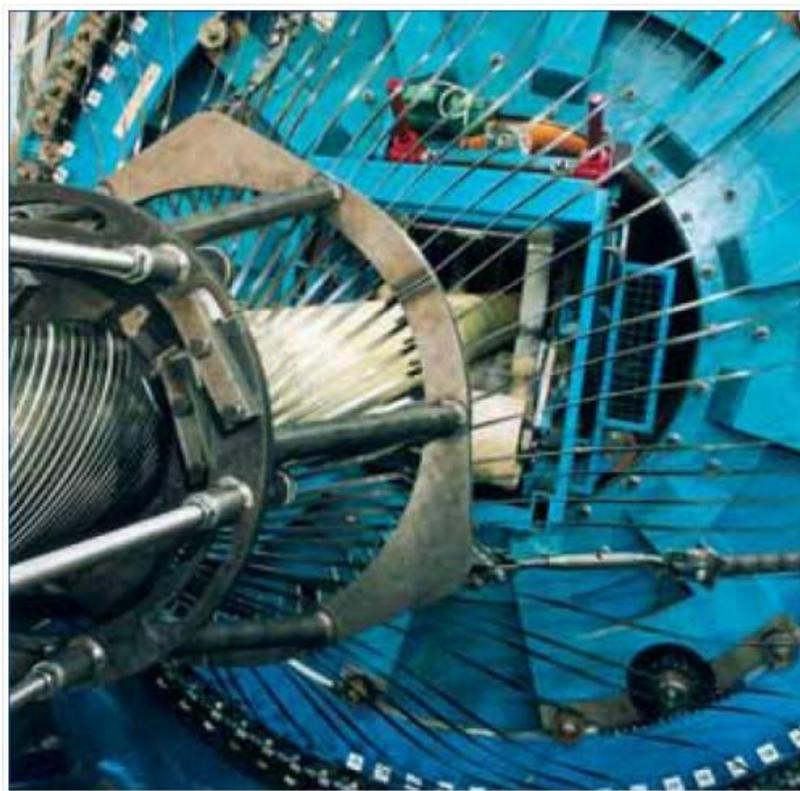


Figura 2.10: Assentamento da armadura de tração na linha flexível (WELLSTREAM LTD COMPANY).

2.2.2 Camadas Poliméricas

Os polímeros utilizados na engenharia podem ser classificados de acordo com seu comportamento mecânico, solubilidade ou fusibilidade. Polímeros são macromoléculas caracterizadas pelo seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares.

Possuem unidades químicas ligadas por covalências, repetidas regularmente ao longo da cadeia, denominados meros (MANO & MENDES, 1999).

Os polímeros, quanto ao comportamento mecânico, podem ser classificados como (MANO & MENDES, 1999):

- Borrachas ou elastômeros: materiais macromoleculares que exibem elasticidade em longa faixa à temperatura ambiente.
- Plásticos: materiais macromoleculares que, embora sejam sólidos no estado final, em algum estágio do processamento podem se tornar fluidos e moldáveis por ação isolada ou conjunta de calor e pressão.
- Fibras: macromoléculas lineares, orientadas longitudinalmente, com estreita faixa de extensibilidade parcialmente reversível (como os plásticos). Resistem a variações de temperatura entre -50°C e 150°C sem alteração substancial das propriedades mecânicas e, em alguns casos, são infusíveis. Possuem, ainda, pequena seção transversal, elevada relação entre o comprimento e o diâmetro e alta flexibilidade.

Quanto à solubilidade ou fusibilidade, os polímeros se dividem em (MANO, 1996):

- Termoplásticos: polímeros que podem ser reversivelmente aquecidos e resfriados, passando respectivamente de massas fundidas a sólidos. Podem, ainda, ser processados por métodos tradicionais tais como laminação, injeção ou extrusão.
- Termorrígidos: plásticos que fundem quando aquecidos, porém, nesse estado, sofrem reações químicas que causam a formação de ligações cruzadas intermoleculares restando uma estrutura reticulada infusível e insolúvel.

Os dutos flexíveis são normalmente constituídos de plásticos e fibras. As camadas plásticas estão indiretamente ou diretamente expostas a elevadas pressões, cargas de tração e flexão, temperaturas variando entre 4°C e 120°C , além da ação abrasiva dos fluidos. Os plásticos utilizados devem atender aos seguintes requisitos (BERGE *et al.*, 1992):

- Boa resistência à fadiga.
- Boa resistência ao desgaste e à abrasão.
- Baixa permeabilidade, absorção e resistência química em relação aos fluidos interno e externo.
- Boa resistência à deformação lenta (fluência) e à relaxação.
- Boa resistência à formação de vesículas.

As propriedades mecânicas dos plásticos variam com a temperatura e pressão e, por consequência variações na permeabilidade e a absorção. São materiais não lineares de forma a dificultar sua caracterização. Os polímeros sofrem o envelhecimento do material que é a perda de alguns plastificantes, tal processo é acelerado devido às altas temperaturas e pressões externas e internas no qual o duto está submetido em operação, assim como através das interações dos fluidos internos e externos em que as camadas estão em contato direto. Tais interações contribuem para a queda da resistência e ductilidade (API RP 17B, 1998), contribuindo para a formação, por exemplo, de defeitos na bandagem de alta resistência, que por consequência, dependendo da carga aplicada, pode levar ao surgimento da gaiola de passarinho, pois a bandagem de alta resistência também é utilizada como proteção para evitar as deformações radiais devido às cargas compressivas.

A primeira camada plástica interna do duto flexível é extrusada sobre a carcaça intertravada e possui funções específicas tais como: estanqueidade isolando o fluido que é extraído das outras camadas constituintes, função mecânica fazendo com que os esforços sejam distribuídos ao longo das camadas metálicas adjacentes, resistências à abrasão, corrosão e ataque químico, pois o fluido que ultrapassa a camada intertravada permanece em contato com a camada polimérica.

Os dutos flexíveis caracterizam-se pela sua baixa rigidez à flexão. Essa flexão gera movimentos entre as camadas constituintes e como alguns trechos de riser encontram-se em movimento contínuo, o desgaste por atrito seria extremamente elevado podendo levar a linha a falha catastrófica, mas isso não acontece justamente devido as camadas antidesgaste localizadas entre as armaduras de tração e entre a armadura de tração e a armadura de pressão. Também conferem estanqueidade à linha tanto pela ação externa da água do mar pelo anular, caso exista defeito na bandagem de alta resistência, ou pelo fluido interno (petróleo) que está sendo extraído para as armaduras ou alto mar.

Para evitar a flambagem radial (gaiola de passarinho ou *birdcaging*) é usualmente utilizada uma fita polimérica constituída por fibras de aramida (*kevlar29®* ou *kevlar49®*) sobre a armadura externa de tração, aumentando assim a resistência e rigidez da linha em compressão.

A camada externa polimérica é extrusada sobre a armadura de tração sendo utilizados para manter a mesma na posição correta, assim como proteger o duto contra abrasão, danos devido ao impacto de ferramentas durante a instalação, impactos com o solo marinho, corrosão, ajudar no isolamento térmico da linha, etc. Portanto sua espessura

dever ser suficiente para evitar as funções já comentadas e evitar a possibilidade de falha por extrusão da camada nos interstícios da armadura externa de tração.

As fibras são constituídas de macromoléculas lineares, possuem pequenos diâmetros, com elevada razão entre comprimento e diâmetro e devido a isso costumam ser flexíveis. As fibras possuem elevadas propriedades mecânicas e são estáveis quanto às variações bruscas de temperatura. A fibra de aramida (*kevlar*®) entre outras são infusíveis. As fibras de carbono e aramida estão presentes nas indústrias; espacial, automotiva, esportiva e de segurança e, recentemente, na construção de linhas flexíveis de camadas não aderentes. A Figura 2.11 ilustra a relação entre tensão e deformação de algumas fibras.

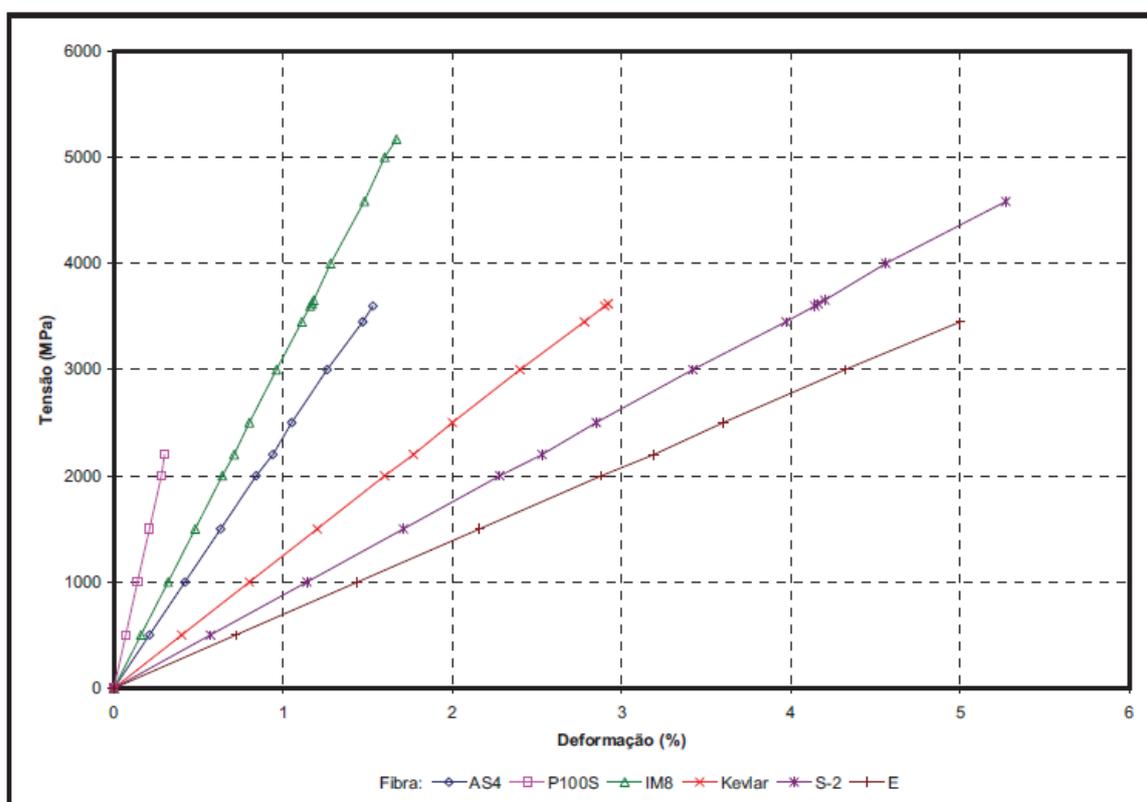


Figura 2.11: Gráfico tensão vs deformação de fibras de carbono, fibras de vidro e fibra de aramida (*kevlar*®) (HERAKOVICH, 1998).

As fibras são utilizadas em dutos submetidos a águas ultraprofundas, objetivando um melhor assentamento das camadas plásticas sobre as armaduras metálicas e também para solucionar o problema de falha por instabilidade radial (*gaiola de passarinho* ou *birdcaging*). A fibra de aramida é um dos focos principais deste trabalho já que a mesma é a utilizada no riser a ser estudado onde testes foram realizados no LAMEF e utilizados para calibração do modelo em elementos finitos. A fibra de aramida é muito flexível, foi desenvolvida por químicos da empresa norte-americana DuPont na década de 1970 com o nome comercial de *kevlar*®. A Tabela 2.4 apresenta algumas de suas propriedades físicas.

Tabela 2.4: Propriedades físicas de materiais compósitos (HERAKOVICH, 1998).

| | <i>AS4 / poli-imida</i> | <i>kevlar® / epóxi</i> | <i>S-2 / epóxi</i> |
|----------------------------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| Densidade | 1,52g/cm ³ | 1,38g/cm ³ | 2,00g/cm ³ |
| Módulo axial (E_1) | 148GPa | 77GPa | 44GPa |
| Módulo transversal (E_2) | 10,5GPa | 5,5GPa | 11,5GPa |
| Coefficientes de Poisson ($\nu_{12} - \nu_{23}$) | 0,30 – 0,59 | 0,34 – 0,37 | 0,27 – 0,40 |
| Módulos de cisalhamento | 5,6GPa – 3,2GPa | 2,1GPa – 1,4GPa | 3,5GPa – 4,1GPa |
| Tensão de ruptura axial (σ_a) | 2137MPa | 1380MPa | 1724MPa |
| Tensão de ruptura transversal (σ_t) | 53MPa | 28MPa | 41MPa |
| Percentual de fibra | 62% | 55% | 60% |

2.3 Modelos Numéricos

Os modelos em elementos finitos seguem algumas teorias tais quais; as vigas curvas de Clebsch-Kirchhoff, tubos de parede espessa da teoria de Lamé, comportamentos linear viscoelástico, equações de continuidade e equilíbrio ou ambas as teorias aplicadas para o mesmo duto flexível de paredes não aderentes.

OLIVEIRA *et al.* (1985) desenvolveram o primeiro modelo analítico para a análise mecânica de linhas flexíveis de camadas não aderentes. Este modelo supõe que as armaduras experimentam apenas deformações axiais e se baseia em um conjunto de equações lineares para avaliar a rigidez axial à tração e à torção de uma linha flexível.

FERET & BOURNAZEL (1987) consideraram cada camada da linha flexível como independente que através de algumas considerações pode trabalhar com equações de continuidade e equilíbrio. As deformações radiais e axiais são consideradas variáveis independentes, permite o cálculo de tensões e deformações devidas a cargas axissimétricas. Este modelo abrange tanto linhas de camadas não aderentes quanto linhas de camadas

aderentes e serve de base para o sistema de análise de linhas flexíveis da Petrobras conhecido como FRAES.

SOUSA (1999), em sua dissertação, revisou e implementou os modelos bidimensionais propostos por FERET & BOURNAZEL (1987) e por BATISTA (1988 e 1989) para carregamentos axissimétricos e de flexão e comparou os resultados obtidos através do método de elementos finitos proposto por CRUZ(1996). Também analisou numericamente, através do mesmo modelo em elementos finitos, o lançamento de uma linha flexível obtendo as tensões que se desenvolvem nas diversas camadas da estrutura. Concluiu que a principal fonte de divergência entre os modelos é o modo como se estabelece o contato entre as camadas. Cabe ressaltar que por se tratar de um modelo tridimensional, este pode detectar variações nas deformações nas tensões no sentido longitudinal da linha sendo que os modelos bidimensionais não levam isso em consideração.

RIZZO (2010) desenvolveu um modelo em elementos finitos para prever a resposta mecânica do duto (*riser*) sob tração, compressão e torção. Também a carga crítica de flambagem, para qualquer tipo de forma (lateral e radial), pode ser estimada. Para o desenvolvimento do modelo de elementos finitos foi utilizada uma combinação complexa de elementos de vigas e molas no qual simula uma análise axissimétrica. Apenas um arame de cada armadura de tração foi simulado, levando a um menor custo computacional, sem influenciar na resposta final.

BRAGA (2003) realizou quinze ensaios destrutivos em modernas linhas flexíveis para águas ultra profundas com o objetivo de avaliar se a flexão cíclica é capaz de degradar à resistência a compressão longitudinal de linhas flexíveis. Foi comprovado que as linhas testadas apresentam o tipo de falha, conhecido como gaiola de passarinho, numa profundidade maior que sua profundidade limite de operação. Determinou-se o número de ciclos de flexão necessários para levar às amostras a falha, conhecida como flambagem lateral, quando sujeitas as ações compressivas características de sua profundidade limite de operação. Além disso, foram efetuados ensaios para avaliar o efeito de danos pré-existentes na formação de gaiola de passarinho.

CUSTÓDIO (1999) propõe um modelo derivado da teoria de Clebsch-Kirchhoff para hastes esbeltas e formulações de Lamé para cilindros que respectivamente descrevem a armaduras helicoidais e capas cilíndricas homogêneas.

CUSTÓDIO (2005) sugere um modelo analítico de estimativa da instabilidade de reforçadores helicoidais de dutos flexíveis sob carregamento axissimétrico, cuja

manifestação mais comum é a formação de gaiola de passarinho. A aplicação do modelo é feita para dutos sobre os quais se possui resultados experimentais.

CRUZ (1996) propôs um modelo inteiramente baseado no MEF no qual o modelo é gerado através de um pré-processador específico (GERFLEX) e as camadas da linha flexível levam em consideração alguns tópicos abaixo:

- Carcaça intertravada e armaduras de pressão: utilizando uma correlação entre grelhas e cascas ortotrópicas e assumindo algumas simplificações nos perfis das camadas pode-se discretizar essas camadas com elementos de casca ortotrópica.
- Armaduras de tração: são modeladas com elementos de pórtico espacial, fornecendo-se propriedades geométricas equivalentes ao modelo.
- Camadas poliméricas: são modeladas com elementos sólidos isotrópicos.

Quanto aos contatos entre as armaduras metálicas, são considerados elementos de pórtico espacial, onde a rigidez pode ser calibrada com o objetivo de considerar o atrito no modelo, já os contatos entre uma armadura e uma camada polimérica são realizados através de nós comuns, baseando-se no argumento de que a grande diferença de rigidez entre essas camadas implicaria a ausência de deslocamento relativo.

MEDINA (2008) em sua dissertação sugere um método de estimativa da resposta viscoelástica de dutos flexíveis sob carregamento axissimétrico, cuja manifestação mais comum é o amortecimento interno para carregamentos cíclicos. As camadas poliméricas são modeladas considerando-se comportamento linear viscoelástico, termo-reologicamente simples e considerando o módulo de dilatação volumétrica constante.

NOVITSKY (2000) e LONTRA FILHO (2000) indicam a instabilidade radial (*birdcaging*) na instalação das linhas flexíveis como um dos principais responsáveis pela falha dos dutos em águas profundas.

A armadura de pressão (camada zeta) devido ao seu formato diferenciado é tratada segundo analogia entre grelhas e cascas ortotrópicas proposta por TIMOSHENKO & WOINOWSKY-KRIEGER (1959) para modelar a armadura de pressão como cascas com propriedades ortotrópicas. Um material é ortotrópico se suas propriedades são únicas e independentes nas três direções mutuamente perpendiculares. Desta maneira, diminui-se sensivelmente o número de graus de liberdade do problema e se viabiliza a representação através de elementos finitos. A Figura 2.12 demonstra a analogia entre grelhas e cascas.

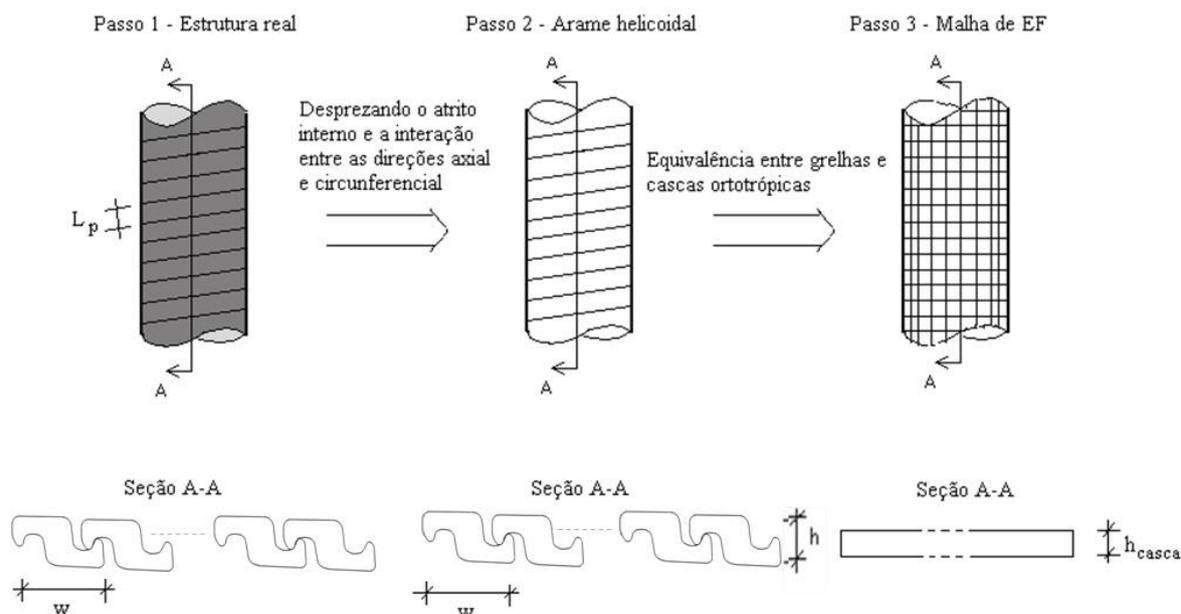


Figura 2.12: Analogia entre grelhas e cascas (TIMOSHENKO & WOINOWSKY-KRIEGER, 1959)

A analogia entre grelhas e cascas ortotrópicas consiste em estabelecer uma equivalência entre as rigidezas e as tensões da estrutura reticulada considerada como grelha. Deve-se destacar, contudo, que a equivalência entre as rigidezas das duas estruturas não implica equivalência entre as tensões no qual é calculada com equações específicas de acordo com a analogia apresentada. Como este trabalho não aborda a análise das tensões a mesma não será apresentada no desenvolvimento. Para a realização do cálculo no qual se encontra a espessura da casca e seu módulo de elasticidade, que represente a armadura de pressão e que contenha as mesmas propriedades do material de origem, devem-se coletar alguns dados específicos. Os mesmos devem ser empregados nas Equações 2.1 até 2.8 segundo a literatura corrente, que foram utilizados no modelo em elementos finitos.

As rigidezas da casca podem ser escritas como (TIMOSHENKO & WOINOWSKY-KRIEGER, 1959):

A rigidez de membrana é dada pela Equação 2.1:

$$(EA)_{casca} = h_{casca} \cdot E_{casca_z} \quad (2.1)$$

A rigidez à flexão é dada pela Equação 2.2:

$$(EI)_{casca} = \left(\frac{h^3_{casca}}{12} \right) \cdot E_{casca_z} \quad (2.2)$$

Sendo h_{casca} a espessura da casca ortotrópica equivalente à grelha, que representa a armadura de pressão.

As rigidezas de uma grelha podem ser escritas como (TIMOSHENKO & WOINOWSKY-KRIEGER, 1959):

A rigidez axial é dada pela Equação 2.3:

$$(EA)_{grelha} = \left(\frac{A \cdot n_{ar}}{L_p} \right) \cdot E \quad (2.3)$$

Sendo n_{ar} representa o número de arames helicoidais da camada

A rigidez à flexão é dada pela Equação 2.4:

$$(EI)_{grelha} = \left(\frac{I_{eq} \cdot n_{ar}}{L_p} \right) \cdot E \quad (2.4)$$

Sendo L_p o passo do arame e I_{eq} é o menor momento de inércia do arame que constitui a armadura de pressão. I_{eq} é expresso segundo a Equação 2.5 (BERGE *et al.*, 1992):

$$I_{eq} = K \cdot I_x \quad (2.5)$$

Sendo K o fator de compacidade e pode ser expresso segundo a Equação 2.6 (SOUZA, 2002):

$$K = 12 \cdot n_{ar} \cdot \frac{I_x}{L_p} \cdot \frac{1 - \nu^2}{h^3} \quad (2.6)$$

Igualando as equações, determinam-se as propriedades físicas e geométricas da casca ortotrópica equivalente à grelha. Essas propriedades da casca ortotrópicas são dadas por:

A espessura é dada pela Equação 2.7:

$$h_{casca} = \sqrt{12 \cdot \frac{K \cdot I_x}{A}} \quad (2.7)$$

O módulo de elasticidade é dado pela Equação 2.8:

$$E_{casca_z} = \left(\frac{n_{ar} \cdot A}{L_p \cdot h_{casca}} \right) \cdot E \quad (2.8)$$

Para o desenvolvimento de modelos numéricos faz-se uma análise de programas CAE (*Computer Aided Engineering*) no qual possui estrutura básica de acordo com a Figura 2.13.

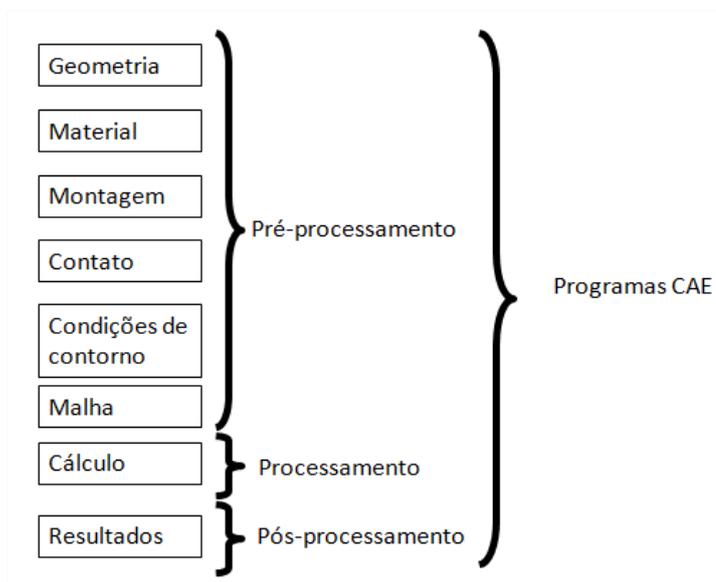


Figura 2.13: Estrutura básica de um programa CAE

2.4 Danos na Bandagem de Alta Resistência

Como este trabalho aborda a relação entre o tamanho de defeito na bandagem de alta resistência e a carga compressiva para geração da gaiola de passarinho, a Tabela 2.5 demonstra os mecanismos de falha da camada externa da linha flexível (API RP 17B 1998).

Tabela 2.5: Mecanismos de falha da camada externa da linha flexível (API RP 17B 1998).

| Camada | Defeito | Consequência | Possíveis causas |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Camada plástica externa | Furo, ruptura, rasgo ou fissuração | Entrada de água do mar na linha flexível. | <ul style="list-style-type: none"> a. Defeito de fabricação. b. Rasgo durante a instalação. c. Contato pontual, impacto ou cisalhamento. d. Projeto inadequado de conexões (endfitting, clamp, etc). e. Aumento da pressão interna na linha flexível. f. Vazamento na camada plástica interna. g. Flexão excessiva + defeito existente. h. Envelhecimento e ação de raios ultravioleta. |

A Figura 2.14 e Figura 2.15 demonstram defeitos registrados na bandagem de alta resistência do duto flexível no momento de sua instalação ou operação em alto mar. As inspeções das linhas objetivando detectar defeitos na bandagem de alta resistência são de extrema importância, mas a falta de informações para as medidas a serem tomadas após sua detecção é uma das motivações para o desenvolvimento deste trabalho já que apresenta uma relação entre os tamanhos dos defeitos e suas consequências para a linha de acordo com as cargas compressivas expostas, contribuindo para uma tomada de decisão por parte dos responsáveis.



Figura 2.14: Defeito na bandagem de alta resistência gerado na instalação da linha flexível (PICKSLEY 2002).



Figura 2.15: Defeito na bandagem de alta resistência devido ao contato com a plataforma durante operação ou instalação do riser (CARNEVAL, MARINHO, 2006).

Segundo levantamento (UKOOA 2001) os danos e mecanismos de falha para dutos flexíveis podem ser vistos na Figura 2.716. De um total de 106 dutos reportados pelos operadores UKCS (não incluindo anular alagado), 20% apresentaram danos ou falhas, sendo que destes 20%, dois terços ocorreram durante a instalação e um terço durante sua operação normal.

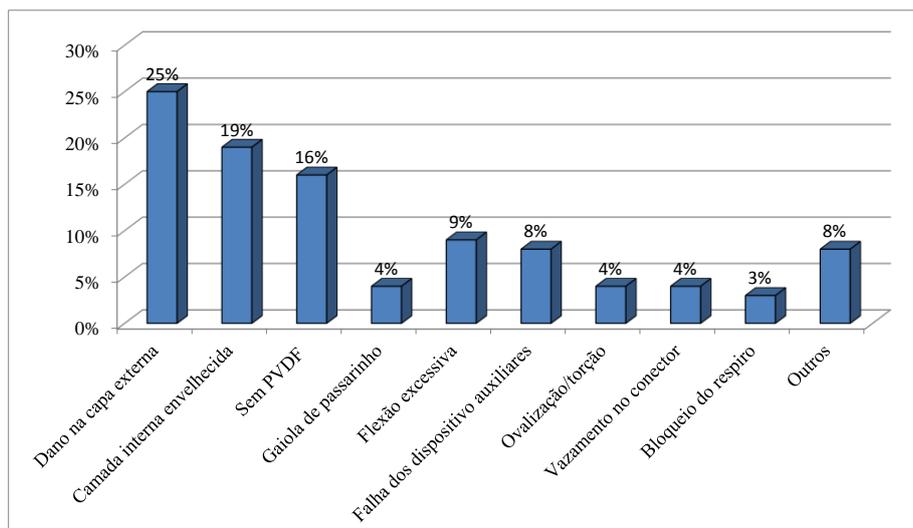


Figura 2.16: Comparativo entre os sistemas de Danos e Mecanismos de falha para os dutos flexíveis (UKOOA 2001).

Os tópicos específicos abordados neste trabalho envolvem a relação direta entre danos na bandagem de alta resistência e por consequência a formação de *birdcaging*, portanto segundo a Figura 2.16, pode-se perceber que a maior parte, 25% dos casos estão relacionados com danos na bandagem de alta resistência dos dutos flexíveis já falhas por *birdcaging* representam 4%.

2.5 Critérios de Falha para Risers Sujeitos a Instabilidade Radial

As camadas que compõem as linhas flexíveis estão sujeitas a defeitos específicos que podem levar a falha do duto. Apesar da grande quantidade de mecanismos de falha e do grande interesse que o assunto proporciona, existem poucos casos relatados na literatura sobre os critérios de falhas desenvolvidos em linhas flexíveis de camadas não aderentes.

COSTELLO (1997) aborda a formação da gaiola de passarinho em cabos trançados, no qual é gerada devido às cargas compressivas ou combinação entre torque e tração e sugere como critério de falha a perda de contato entre as tranças.

Fabricantes ressaltam que a instabilidade do *riser* ocorre quando a camada de alta resistência é rompida. Dessa forma o critério quanto à formação da gaiola de passarinho seria o rompimento da bandagem de alta resistência.

Segundo API RP 17B (1998), os espaçamentos radiais (*gaps*) entre as armaduras de tração não devem ser superior a 50 % da espessura dos arames da própria camada. Essa recomendação sugere redimensionamento da bandagem de alta resistência caso ultrapasse tal porcentagem e define o critério de instabilidade através deste limite.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia

Para o desenvolvimento desta etapa é utilizado o diagrama de blocos conforme a Figura 3.1 que representa as principais atividades a serem detalhadas. A validação do modelo desenvolvimento em elementos finitos ocorre segundo relação entre os dados experimentais e os dados numéricos. Para a validação do modelo foram utilizados alguns critérios específicos de comparação entre os resultados, de forma que, caso não exista uma convergência entre os valores deve-se realizar uma nova análise quanto ao modelamento numérico até a equivalência desejada.

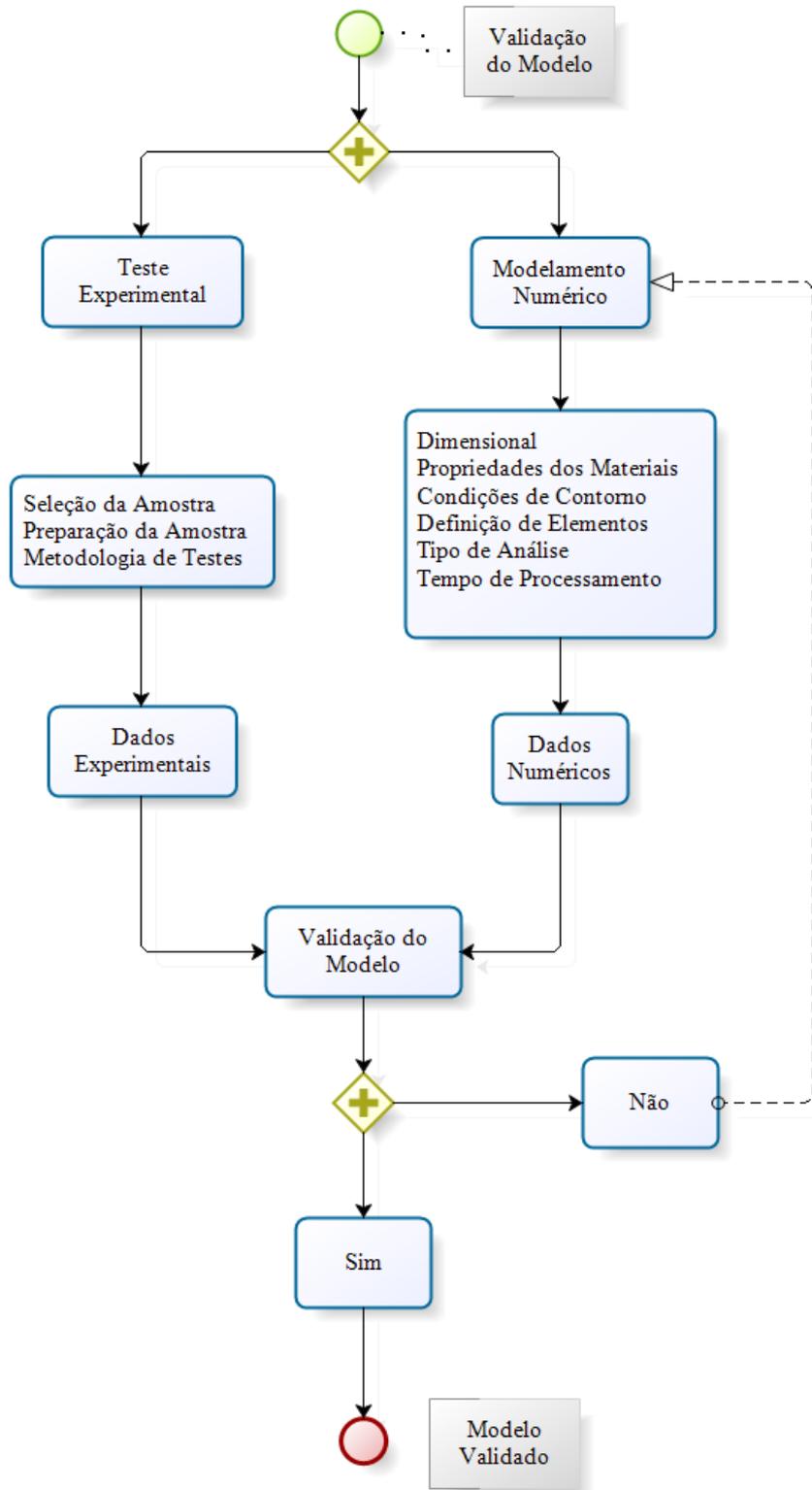


Figura 3.1: Diagrama de blocos da sequência de materiais e métodos

3.2 Critério de Falha Proposto

Na análise do comportamento mecânico do duto flexível com defeitos na bandagem de alta resistência submetido às cargas compressivas, espera-se mudanças nas inclinações das retas que relacionam a carga compressiva e o deslocamento. Tais variações nas possíveis inclinações podem determinar a perda de rigidez do *riser*, ou seja, pode ser considerado como um critério de falha, já que o comportamento do *riser* deverá ser estável até o ponto crítico da mudança de comportamento.

A perda de rigidez pode ser considerada um critério de falha, pois a geração da gaiola de passarinho devido ao tamanho de defeito imposto é responsável diretamente pela instabilidade radial e por consequência, da mudança de rigidez. Após este ponto crítico o *riser* diminui a resistência ao deslocamento devido à formação local da gaiola de passarinho, portanto a instabilidade radial (*birdcaging*) é um limitador de carga axial ou deslocamento para o *riser*, no qual determina a mudança de rigidez e consequentemente uma proposta de critério de falha.

3.3 Teste Experimental

3.3.1 Seleção da Amostra

Foi utilizada a amostra de dutos flexíveis de 6 polegadas de diâmetro, com comprimento de 6 metros e sem qualquer conector em sua extremidade. O duto foi selecionado para o teste experimental justamente pela disponibilidade nas dependências do laboratório (LAMEF). A Figura 3.2 apresenta as condições das amostras.



Figura 3.2: Condição das amostras de 6 polegadas.

3.3.2 Preparação da Amostra

A amostra selecionada foi cortada para um comprimento livre desejado de 2400 mm (descontando os conectores) com utilização da máquina serra fita e apresenta passo de armadura de tração de 1066 mm de comprimento, conforme calculado com as informações técnicas fornecidas pela Petrobras, na OS-015 RESUB.

Adaptações ao CP e bancada de teste

De modo a possibilitar a montagem da amostra na bancada de ensaios foram desenvolvidos conectores específicos para o projeto. A transferência de carga se deu através da estrutura do duto, ou seja, batente mecânico contra as camadas estruturais (transferência em compressão). Para a realização dos testes foi adquiridos um cilindro hidráulico com capacidade de até 1600 kN (160 ton.f) e dispositivos de interface amostra/bancada.

Montagem dos conectores

A montagem dos conectores na amostra de 6 polegadas foi realizada no LAMEF. Para a realização da mesma foi necessária a preparação do duto (*riser*), onde as seguintes camadas foram removidas: capa externa e fita de alta resistência (Figura 3.3), primeira e segunda camadas das armaduras de tração (Figura 3.4). A inserção da cunha metálica e do conector podem ser visualizados conforme Figura 3.5.



Figura 3.3: Cortes da capa externa (esquerda) e bandagem de alta resistência (direita).



Figura 3.4: Cortes dos arames e capa externa antes(esquerda) e depois(direita).



Figura 3.5: Inserção da cunha metálica (esquerda) e montagem do conjunto(direita).

Os ensaios foram realizados na bancada de testes, Figura 3.6, do LAMEF no qual possui capacidade de carga de 5000 kN (500 tonf) em testes estáticos.

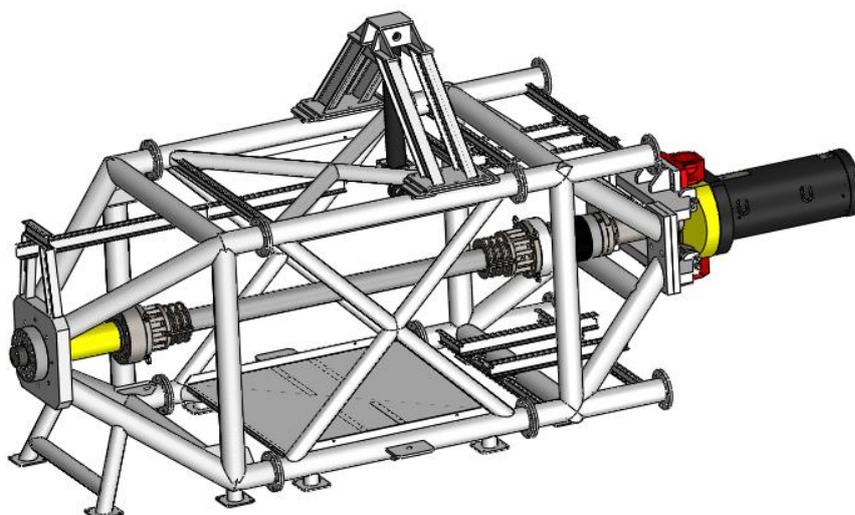


Figura 3.6: Configuração completa utilizada nos testes de compressão.

3.3.3 Metodologia dos Testes

Para a validação do modelo numérico tridimensional em elementos finitos foram realizados testes compressivos em escala real de uma amostra de duto flexível de 6 polegadas de acordo com as seguintes configurações de ensaio: duto íntegro e duto com dano nas bandagens de alta resistência.

Descrição dos Testes

Foram realizados quatro testes de compressão variando alguns fatores pré-estabelecidos como; a porcentagem de contração da amostra em carregamento, restrição ao movimento torcional através de barras atuantes no conector e trole manual que acompanha o deslocamento axial e defeito na bandagem de alta resistência. A Tabela 3.1 demonstra a sequência de testes e suas respectivas condições.

O objetivo dos testes de compressão foi obter as relações entre as cargas compressivas e os deslocamentos axiais da amostra, ou seja, mensurar o comportamento de tais variáveis quando o duto é solicitado com cargas compressivas que podem levar a instabilidade através da geração da gaiola de passarinho. Tais dados foram utilizados para a realização e calibração do modelo em elementos finitos.

Tabela 3.1: Planejamento dos testes de compressão axial

| Teste | Descrição: | |
|-------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 | Compressão até 0,7% - amostra com bandagem - giro livre | Testes para levantamento da rigidez axial |
| 2 | Compressão até 0,7% - amostra com bandagem - giro restrito | |
| 3 | Compressão até 2,0% - amostra sem bandagem - giro livre | Testes para indução de gaiola |
| 4 | Compressão até 2,0% - amostra sem bandagem - giro restrito | |

Os testes 1 e 2 apresentam dados para o levantamento da rigidez axial do duto flexível sem defeito na bandagem de alta resistência, já os testes 3 e 4 induzem a geração da gaiola de passarinho devido aos defeitos na bandagem de alta resistência.

Testes de compressão de 1 a 4

A seguir é apresentado a sequência e o detalhamento dos parâmetros e métodos utilizados nos testes.

- 1º passo - Montar a amostra na bancada de testes de compressão, com tubo guia interno, conforme indicado na Figura 3.7.



Figura 3.7: Configuração utilizada no teste de compressão.

- 2º passo - Inspeção visual e dimensional da amostra, considerando os seguintes parâmetros: comprimento total, comprimento livre, perímetro e diâmetro no centro, a 100 mm do conector (lado do atuador), a 100 mm do conector (lado oposto ao atuador) e em locais com eventual expansão radial da capa. Tais pontos foram coletados para cada tipo de teste, pois serão utilizados para o modelo em elementos finitos.
- 3º passo - Aplicação de uma carga de compressão na amostra para determinar sua rigidez axial. Contração de 0,7% do comprimento livre no qual representa o valor limite para a não formação da gaiola de passarinho. Um teste com amostra livre para girar e, em seguida, com a amostra impedida de girar. Taxa de carregamento igual a 0,1% do comprimento livre por minuto. Manutenção do patamar de deslocamento por 15 minutos, seguido de descarga com taxa de 1% do comprimento livre por minuto.
- 4º passo - Remoção da bandagem de alta resistência no centro da amostra o setor correspondente às dimensões especificadas de 200 mm x 56,3 mm, conforme Figura 3.8. Posterior repetição do terceiro passo. Esse tamanho de defeito também foi utilizado para a calibração do modelo em elementos finitos.

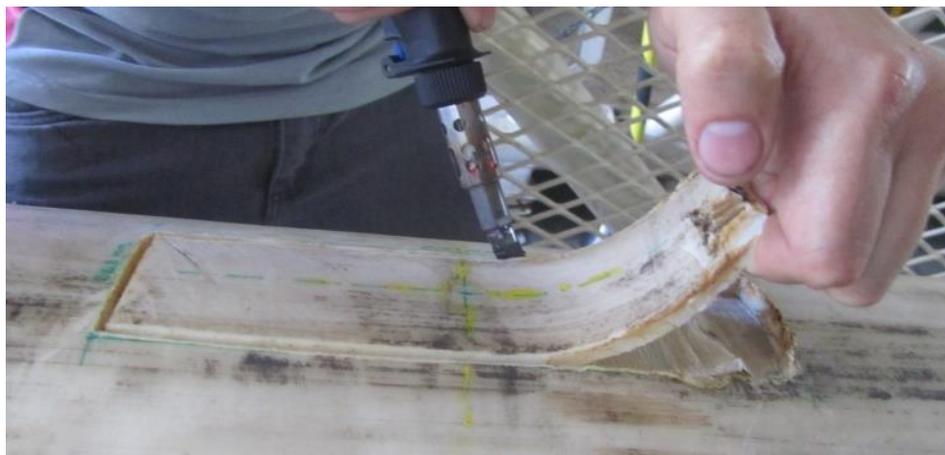


Figura 3.8: Remoção da bandagem de alta resistência com dimensões de 200 mm x 56,3 mm

- 5º passo - Remoção completa da bandagem (fita anti-birdcaging) exposta no quarto passo, conforme Figura 3.9, e posterior repetição do terceiro passo;



Figura 3.9: Bandagens de alta resistência removidas (fita anti-birdcaging).

- 6º passo - Aplicação de uma carga de compressão prolongando a contração até 1,7% do comprimento livre, com ela livre para girar e, posteriormente, com ela impedida de girar. Taxa de carregamento igual a 0,1% do comprimento livre por minuto. O deslocamento ou carga deve ser mantido por 15 minutos, seguido de descarga na taxa de 1% do comprimento livre por minuto.

A inspeção visual e dimensional da amostra foi realizada antes, no patamar de deslocamento e ao final de cada teste. Foram considerados os seguintes parâmetros; comprimento total, comprimento livre, perímetro e diâmetro no centro, a 100 mm do conector (lado do atuador), a 100 mm do conector (lado oposto ao atuador) e em locais com eventual expansão radial da capa. Ao fim de todos os testes onde houve algum tipo de

expansão radial residual procedeu-se com três ciclos de tração com carga de duas toneladas a fim de alinhar novamente a amostra para o teste seguinte.

Para evitar a flambagem global do duto flexível, foi utilizada uma barra metálica interna com folga e comprimento pré-estabelecidos. Essa barra possui dimensões que permitem a compressão do riser sem que a mesma seja solicitada e é inserida após a montagem dos conectores e antes do flange que conecta a amostra na bancada de testes.

Os referidos testes objetivam mensurar o comportamento do duto, de acordo com as configurações estabelecidas, devido ao carregamento compressivo aplicado para então realizar a calibração do modelo em elementos finitos desenvolvido. Todos os projetos de dispositivos, montagens de equipamentos e máquinas utilizadas neste trabalho são realizados e pertencem ao LAMEF.

3.4 Modelo Numérico

O modelo em elementos finitos, desenvolvido e validado de acordo com os testes experimentais apresentados, também foi utilizado para mensurar a instabilidade radial em dutos flexíveis com defeitos na bandagem de alta resistência sujeitos a cargas axiais compressivas. O defeito na bandagem de alta resistência é interpretado como variações em duas dimensões chamadas de largura do defeito e comprimento do defeito. A Figura 3.10 demonstra as variações em duas dimensões do defeito.

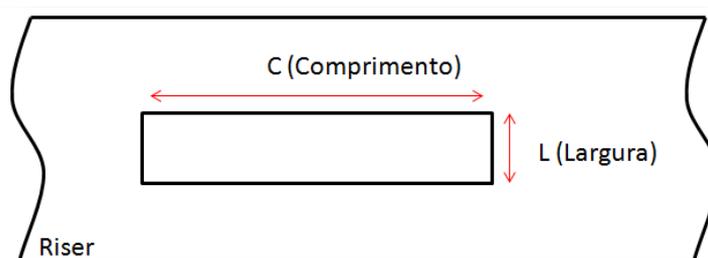


Figura 3.10: Tamanho de defeito e suas dimensões

As dimensões de referência com as quais foi realizado o teste experimental são de 200 mm de comprimento e 56,3 mm de largura, portanto os valores adotados quanto às variações no comprimento são entre 25 mm e 600 mm que são valores pré-estabelecidos segundo alguns testes iniciais, assim como a limitação do comprimento da amostra testada de forma que não venha a afetar os resultados, já para a largura foram adotadas variações entre 14,075 mm e 112,6 mm que são valores baseados na largura de referência, assim como nos valores limites geométricos do riser de 6 polegadas de diâmetro em questão. As

variações de defeitos na bandagem de alta resistência são aplicadas no modelo de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Variações de defeitos na bandagem de alta resistência a serem testados no qual estão agrupadas pelo comprimento do defeito.

| Comprimento (mm) | Largura (mm) |
|------------------|--------------|
| 25 | 14,075 |
| | 28,150 |
| | 56,300 |
| | 112,600 |
| 50 | 14,075 |
| | 28,150 |
| | 56,300 |
| | 112,600 |
| 100 | 14,075 |
| | 28,150 |
| | 56,300 |
| | 112,600 |
| 200 | 14,075 |
| | 28,150 |
| | 56,300 |
| | 112,600 |
| 300 | 14,075 |
| | 28,150 |
| | 56,300 |
| | 112,600 |
| 400 | 14,075 |
| | 28,150 |
| | 56,300 |
| | 112,600 |
| 500 | 14,075 |
| | 28,150 |
| | 56,300 |
| | 112,600 |
| 600 | 14,075 |
| | 28,150 |
| | 56,300 |
| | 112,600 |

Segundo a tabela acima, percebe-se um total de 32 testes que serão aplicados ao riser em análise. Tais testes estão divididos em grupos tendo por referência o comprimento do defeito. O parâmetro de controle para os testes, através do modelo desenvolvido, será por deslocamento, assim como no teste experimental.

3.4.1 Dimensional

Algumas informações de fundamental importância foram mensuradas de acordo com uma dissecação da amostra conforme Figura 3.11. Esta mesma amostra, conforme Figura 3.2, foi utilizada nos testes para comprovação do modelo desenvolvido em elementos finitos.



Figura 3.11: Dissecação da amostra de seis polegadas de diâmetro do tipo não aderente de parede lisa.

Para o desenho tridimensional do duto, foi necessária uma análise mais específica para a armadura de pressão (zeta), pois a mesma possui perfil não mensurável através de métodos convencionais, portanto foi realizado um corte no perfil de espessura fina através da máquina de eletroerosão. Com a imagem em escala e o software de desenho foi obtido seu perfil conforme Figura 3.12.

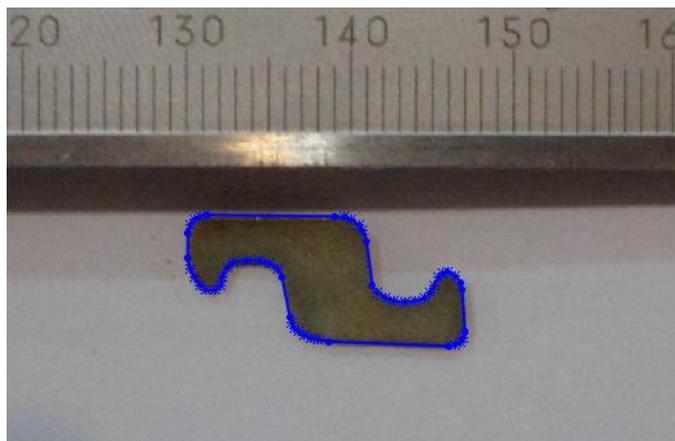


Figura 3.12: Determinação do perfil armadura de pressão (zeta) do duto em análise.

Com o perfil da armadura de pressão (zeta) foram coletados dados como área do perfil, momento de inércia e realização do desenho tridimensional.

3.4.2 Validação do Modelo

A validação do modelo consiste na relação entre os resultados do ensaio experimental e do modelo desenvolvido. Para validar o modelo serão analisadas diversas relações:

- ✓ Rigidez do *riser* sem defeito na bandagem de alta resistência;
- ✓ Diâmetro do *riser* sem defeito na bandagem de alta resistência;
- ✓ Rigidez do *riser* com defeito na bandagem de alta resistência;
- ✓ Altura radial da gaiola de passarinho do *riser* com defeito;
- ✓ Inspeção visual comparativa;

Cada tópico será analisado de forma comparativa entre os testes experimentais e o modelo desenvolvido no qual possuem as mesmas condições tanto geométricas como estruturais.

3.4.3 Propriedades dos Materiais

As propriedades do duto flexível dinâmico de seis polegadas de diâmetro do tipo não aderente de parede lisa podem ser vistos na tabela Tabela 3.3. Os dados da tabela referentes aos materiais utilizados nas camadas do duto (*datasheet* da amostra) e suas propriedades mecânicas foram coletados segundo publicações de domínio público.

Tabela 3.3: Características do duto flexível de seis polegadas de diâmetro do tipo não aderente de parede lisa

| | | |
|-------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Camada plástica interna | Material | PA11 |
| | Limite de resistência | 28 MPa |
| | Modulo de elasticidade | 380 MPa |
| | Massa específica | 1,06 g/cm ³ |
| | Massa | 3,05 kg/m |
| | Diâmetro interno | 152,4 mm |
| | Espessura | 6,5 mm |
| Armadura de pressão | Material | AFNOR -FN 35 |
| | Número de arames | 1 |
| | Coefficiente de Poisson | 0,3 |
| | Tensão de ruptura | 850 MPa |
| | Modulo de elasticidade | 205000 MPa |
| | Massa | 28,9 kg/m |
| | Diâmetro interno | 165,4mm |
| | Espessura | 8 mm |
| | Deformação de ruptura | 6% |
| | Menor momento de Inércia de área | 203,81 mm ⁴ |
| | Área do perfil | 74,99 mm ² |
| | Ângulo de assentamento positivo | 88,4° |
| Passo helicoidal | 14,57 mm | |
| Camada plástica anti-desgaste | Material | PA11 |
| | Limite de resistência | 28 MPa |
| | Modulo de elasticidade | 380 MPa |
| | Massa específica | 1,06 g/cm ³ |
| | Diâmetro interno | 181,4 mm |
| Espessura | 6 mm | |
| Armadura interna de tração | Material | FI 41 |
| | Número de arames | 71 |
| | Limite de resistência | 1400 MPa |
| | Modulo de elasticidade | 207000 MPa |
| | Massa | 10,92 kg/m |
| | Diâmetro interno | 193,4mm |
| | Espessura | 2,5 mm |
| | Menor momento de Inércia de área | 8.47 mm ⁴ |
| | Ângulo de assentamento positivo | 30° |
| | Passo helicoidal | 1066 mm |
| Área do perfil | 16.95 mm ² | |

| | | |
|----------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Armadura externa de tração | Material | FI 41 |
| | Número de arames | 73 |
| | Limite de resistência | 1400 MPa |
| | Modulo de elasticidade | 207000 MPa |
| | Massa | 11,07 kg/m |
| | Diâmetro interno | 198,4 mm |
| | Espessura | 2,5 mm |
| | Menor momento de Inércia de área | 8.47 mm ⁴ |
| | Passo helicoidal | 1093 mm |
| | Ângulo de assentamento negativo | 30° |
| | Área do perfil | 16.95 mm ² |
| Fita anti-birdcaging | Material | kevlar® |
| | Tensão de ruptura | 3620 MPa |
| | Modulo de elasticidade | 124GPa |
| | Coefficiente de Poisson | 0,34 |
| | Massa específica | 1,44 g/cm ³ |
| | Massa | 0,44 kg/m |
| | Diâmetro interno | 203,4 mm |
| | Espessura | 1,15 mm |
| Camada plástica externa | Material | PA11 |
| | Limite de resistência | 28 MPa |
| | Modulo de elasticidade | 380 MPa |
| | Massa específica | 1,06 g/cm ³ |
| | Massa | 4,15 kg/m |
| | Diâmetro interno | 205,7 mm |
| | Espessura | 6 mm |

3.4.4 Descrição do Modelo

O modelo em elementos finitos é uma ferramenta que possibilita replicar o comportamento experimental em escala real do riser, de forma que inúmeros ensaios computacionais sejam realizados sem a necessidade do emprego de inúmeras amostras. Tem-se, ainda, a praticidade de obtenção dos resultados de forma rápida e precisa, além do baixo custo em relação aos testes experimentais. A maior dificuldade no desenvolvimento de um modelo em elementos finitos é representar de maneira satisfatória o teste experimental, portanto uma das motivações para o desenvolvimento deste trabalho gira em torno da realização deste modelo e sua validação.

O desenvolvimento do modelo não linear em elementos finitos será relatado de acordo com as camadas existentes no riser em análise. A Figura 3.13 demonstra de forma geral o modelo tridimensional com vista isométrica, frontal e detalhe do defeito aplicado.

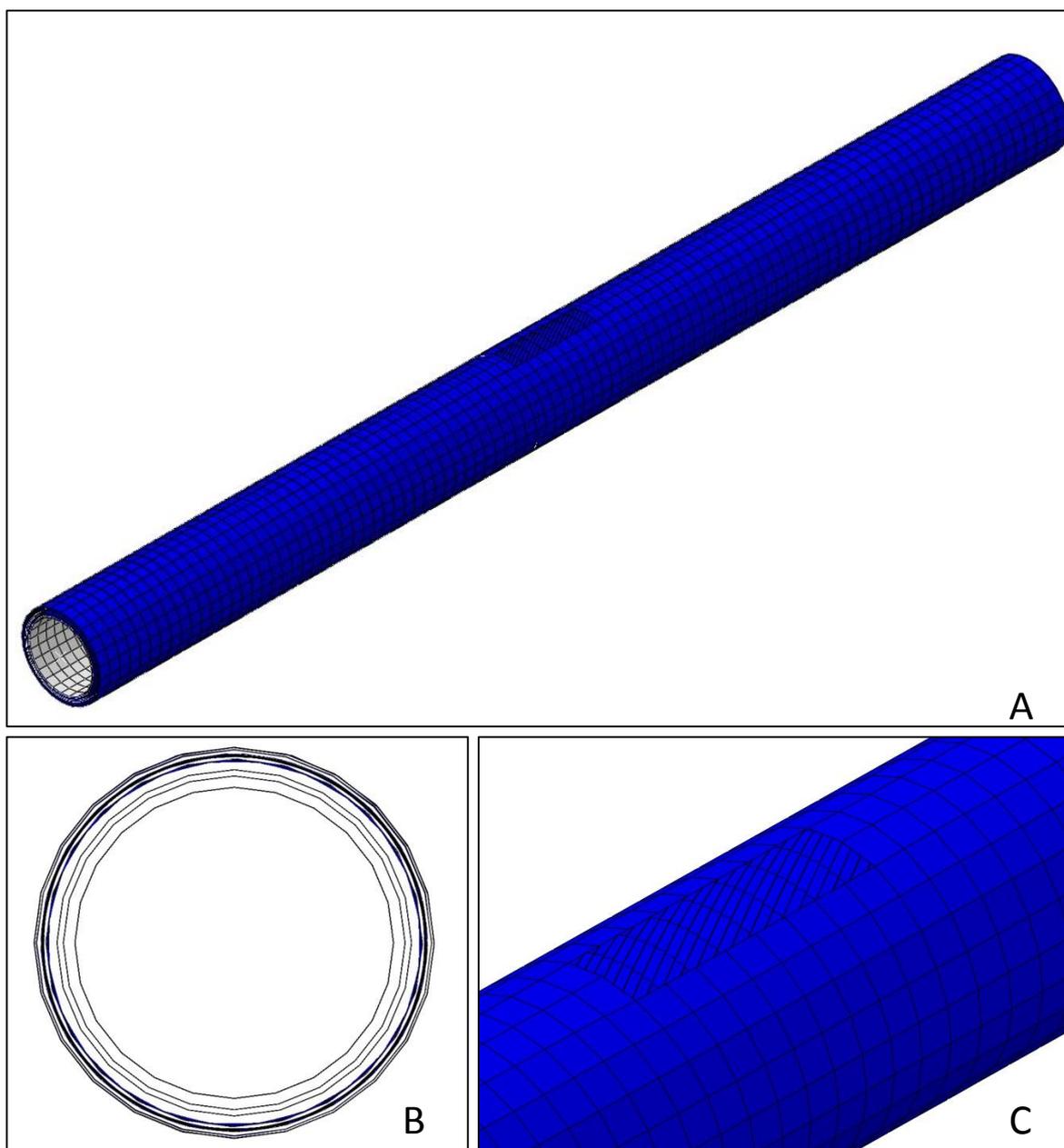


Figura 3.13: Modelo tridimensional com vista isométrica(A), frontal(B) e detalhe do defeito aplicado(C).

O modelo é capaz de englobar todas as camadas da linha flexível e suas interações, além do carregamento desejado, folgas existentes, possíveis condições de contorno e, no caso específico, mudanças no tamanho de defeito que é o foco específico deste trabalho.

Inicialmente foi desenvolvido um modelo fidedigno do duto flexível, mas essa abordagem foi extremamente onerosa (4 dias de processamento) sob o ponto de vista computacional inviabilizando a continuidade já que para o desenvolvimento deste trabalho é de extrema importância que o modelo seja concluído em um tempo aceitável, pois vários testes foram aplicados de acordo com o tamanho de defeito de interesse. Sabe-se que o

tempo de processamento está relacionado ao grau de complexidade da camada em análise e, no caso de *risers*, as camadas que contribuiriam de forma significativa para o tempo de processamento foram; a camada intertravada e a armadura de pressão. Como o trabalho envolve linhas flexíveis de parede lisa, não existe a camada intertravada, sendo assim uma análise específica na armadura de pressão (camada zeta) foi de fundamental importância. Além de ser de complexa análise, a camada zeta, possui uma influência não muito significativa em relação às armaduras de tração no qual absorvem grande parte do carregamento compressivo imposto e tendem à formação da gaiola de passarinho. O conceito da armadura de pressão em forma de helicóide com ângulo de assentamento próximo a 90° faz com que ela tenha baixa resistência às cargas compressivas axiais. Portanto, para reduzir o tempo de processamento e ao mesmo tempo manter as características reais foram utilizadas algumas abordagens já desenvolvidas e comprovadas na literatura, no qual serão apresentadas na sequência.

Para o desenvolvimento do modelo baseado na literatura analisada faz-se em uma primeira abordagem as seguintes hipóteses:

- ✓ O atrito interno para o duto flexível é desprezível. Para comprovar tal hipótese foram realizados testes no modelo, pois o mesmo se diferencia dos atuais existentes por considerar o duto flexível o mais próximo possível da realidade em termos de simulação do conjunto como um todo.
- ✓ A pressão externa é desconsiderada, pois mesmo submerso em águas ultra profundas, devido ao defeito na bandagem de alta resistência e bandagem anti-birdcaging, o efeito da pressão acaba atuando na próxima camada tubular e não na armadura de tração.

Para o desenvolvimento do modelo composto por camadas com características construtivas específicas foram utilizados elementos de cascas. Os elementos de cascas são utilizados para simular estruturas, nas quais uma dimensão (espessura) é muito menor que as outras, e onde as tensões variam linearmente ao longo da espessura. Para utilização de elementos de cascas é necessário informar a espessura da casca e o material utilizado.

As armaduras de tração foram construídas com elementos de cascas isotrópicos e formato helicoidal conforme o *riser* real. Essas camadas de tração são de extrema importância para os resultados deste trabalho já que são os arames destas que sofrem com a formação da gaiola de passarinho. Desta forma as camadas de tração são tratadas de forma fiel para manter os resultados mais próximos possíveis à realidade do teste experimental.

As camadas poliméricas foram constituídas com elementos de cascas isotrópicos e presentes no modelo no formato tubular, inclusive a bandagem anti-birdcaging no qual possui equivalência com as propriedades reais do material.

A armadura de pressão (camada zeta) é tratada segundo analogia entre grelhas e cascas ortotrópicas.

Devido à complexidade do modelo, ao grande número de partes em contato e ao grande número de elemento, optou-se por uma simulação dinâmica, que possui tempo computacional linearmente proporcional ao número de elementos, algoritmos de contato mais robustos e maior estabilidade na convergência. O modelo rodou em 45 minutos após tais ajustes e considerações.

A malha aplicada no modelo pode ser visualizada conforme Figura 3.13. A malha não foi detalhada, pois os dados de saída do modelo giram em torno da obtenção da carga resistiva, altura da gaiola de passarinho e inspeção visual quanto à instabilidade radial. Portanto a malha possui dimensões relativamente grosseiras, já que um refinamento iria aumentar ainda mais o tempo computacional.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguem descritos a seguir os resultados obtidos nos testes e posteriormente às discussões pertinentes.

4.1 Testes Experimentais

4.1.1 Testes de compressão 1 e 2 (0,7 % de compressão)

Abaixo são plotados os gráficos de “Força x Deslocamento” (Figura 4.1) e “Força e Deslocamento x Tempo” (Figura 4.2) para os testes 1 e 2. A Tabela 4.1 compila as medições realizadas antes, durante e após o teste.

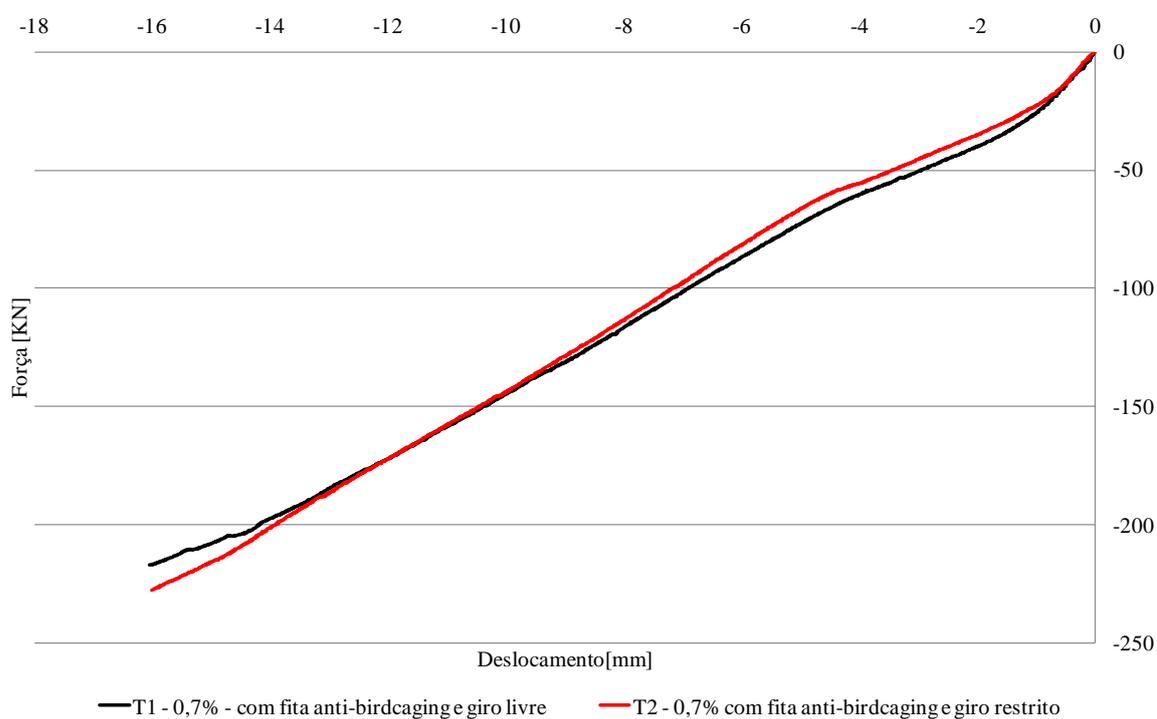


Figura 4.1: Gráfico de força x deslocamento para os testes 1 e 2.

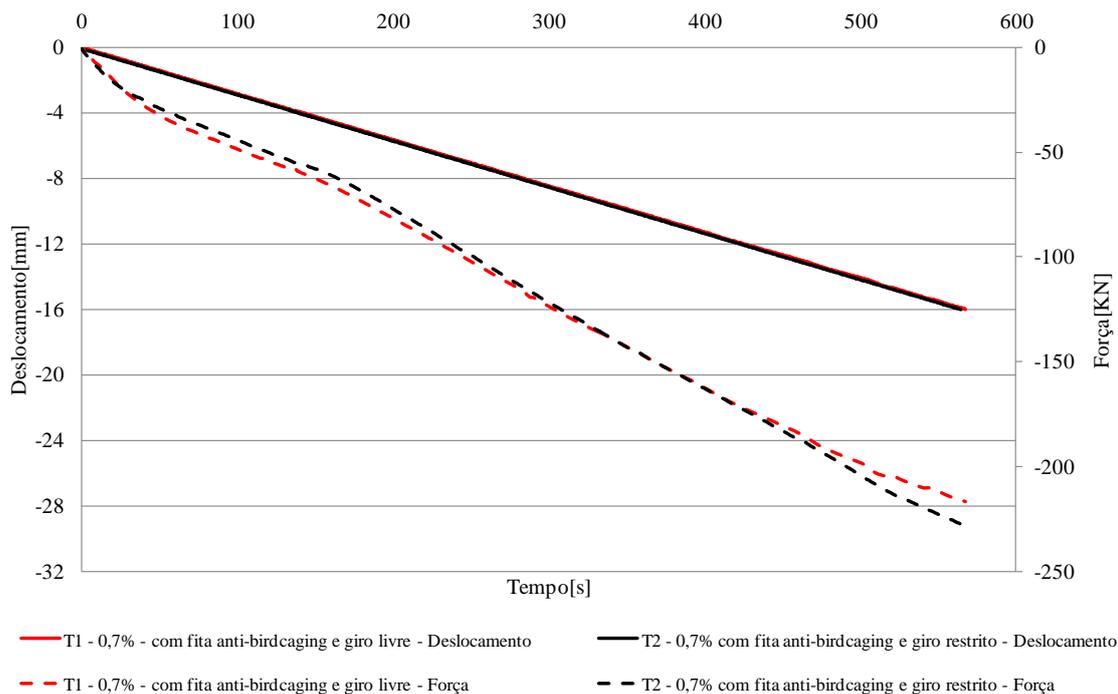


Figura 4.2: Gráfico de força e deslocamento x tempo, para os testes 1 e 2.

Tabela 4.1: Medições realizadas para os testes 1 e 2.

| | | Tabela de medições (valores em mm) | Teste 1 | Teste 2 |
|------------------------|--|--------------------------------------------------|----------------|----------------|
| Antes do teste | | Comprimento total da amostra | 3150 | 3148 |
| | | Comprimento livre da amostra | 2402 | 2400 |
| | | Diâmetro da amostra - Centro (0° e 90°) | 218,2/217,6 | 217,8/217,8 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Atuador (0° e 90°) | 219,1/217 | 218/216,5 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Fechamento (0° e 90°) | 219,0/216,6 | 218/216,2 |
| | | Circunferência da amostra - Centro | 685 | 683 |
| | | Circunferência da amostra - Lado Atuador | 685 | 683 |
| | | Circunferência da amostra - Lado Fechamento | 684 | 683 |
| Durante o teste | | Comprimento total da amostra | 3134 | 3132 |
| | | Comprimento livre da amostra | 2386 | 2384 |
| | | Diâmetro da amostra - Centro (0° e 90°) | 218,7/218,7 | 218,9/218,9 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Atuador (0° e 90°) | 221,2/216,2 | 221,5/216,5 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Fechamento (0° e 90°) | 221,4/216,5 | 221,5/216,3 |
| | | Circunferência da amostra - Centro | 687 | 687 |
| | | Circunferência da amostra - Lado Atuador | 688 | 687 |
| | | Circunferência da amostra - Lado Fechamento | 688 | 688 |
| Após o teste | | Comprimento total da amostra | 3148 | 3148 |
| | | Comprimento livre da amostra | 2400 | 2400 |
| | | Diâmetro da amostra - Centro (0° e 90°) | 217,8,217,8 | 218,2/218,2 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Atuador (0° e 90°) | 218/216,2 | 218/216,4 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Fechamento (0° e 90°) | 218/216,2 | 218/216,5 |
| | | Circunferência da amostra - Centro | 683 | 683 |
| | | Circunferência da amostra - Lado Atuador | 683 | 683 |
| | | Circunferência da amostra - Lado Fechamento | 683 | 683 |

A Figura 4.3 apresenta a amostra posicionada na bancada para a realização do teste. A Figura 4.4 apresenta o detalhe do corte na capa com as dimensões de 200 mm x 56,3 mm aplicado na parte central da amostra.



Figura 4.3 Amostra posicionada na bancada nos testes 1 e 2.

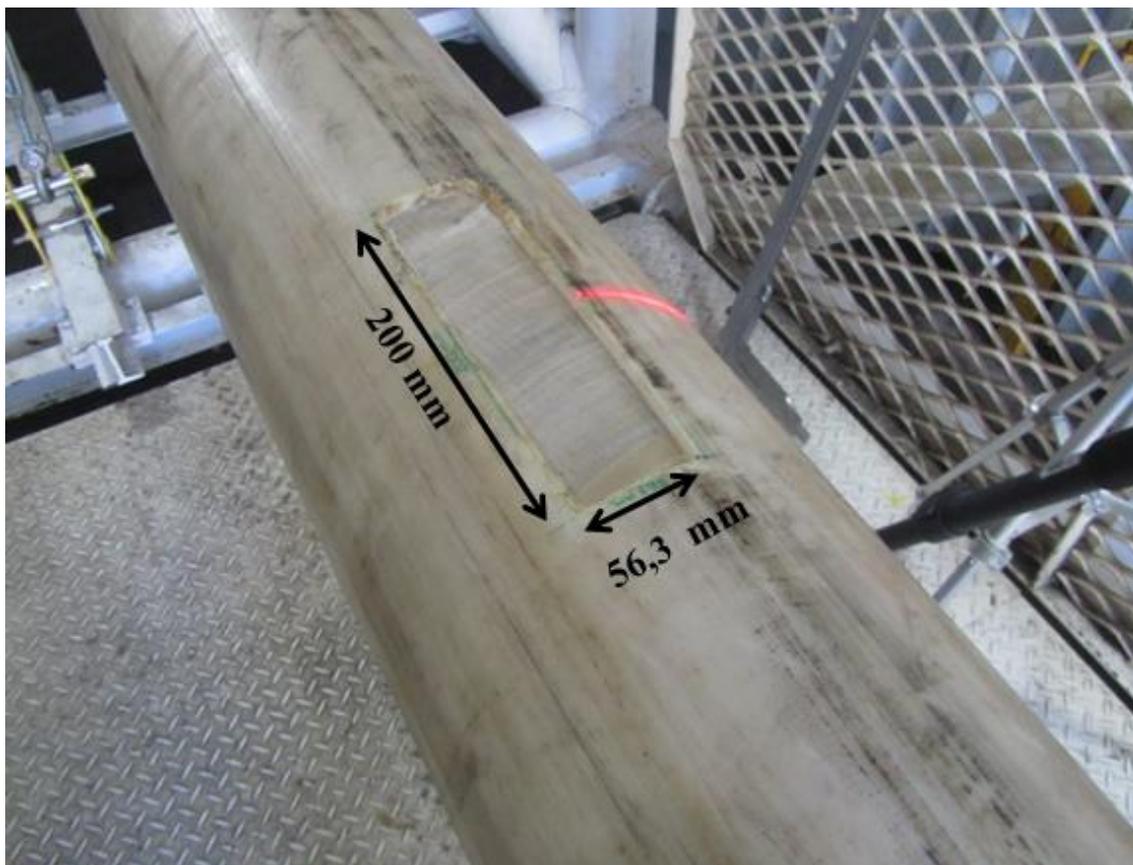


Figura 4.4: Detalhe da região com capa cortada nos testes 1 e 2.

4.1.2 Testes de compressão 3 e 4 (1,7 % de compressão)

Abaixo são plotados os gráficos de “Força x Deslocamento” (Figura 4.7) e “Força e Deslocamento x Tempo” (Figura 4.8) para os testes 3 e 4. A Tabela 4.2 compila as medições realizadas antes, durante e após o teste.

Antes dos testes 3 e 4 foi possível observar a flexão da bandagem de alta resistência na região do corte, com uma leve expansão radial da armadura de tração dos arames. A Figura 4.5 mostra a região central em detalhe enquanto que a Figura 4.6 traz a imagem da amostra na bancada.



Figura 4.5: Enrugamento da capa e expansão da armadura de arames na região central, antes dos testes 3 e 4.



Figura 4.6: Posicionamento da amostra na bancada durante os testes 3 e 4.

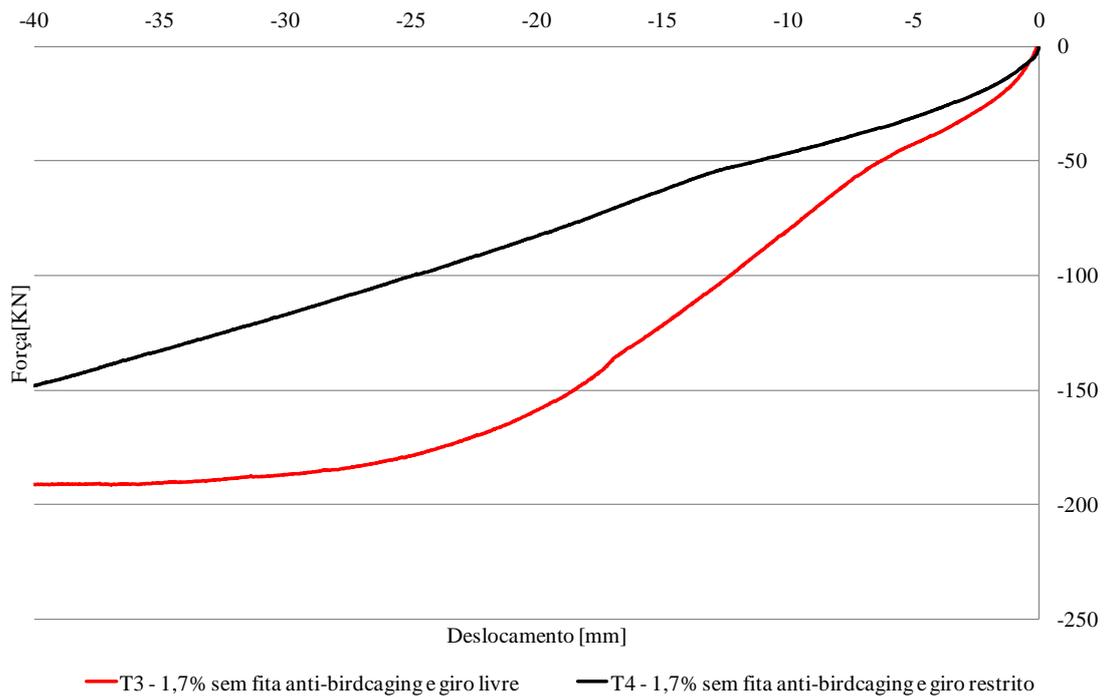


Figura 4.7: Gráfico de força x deslocamento para os testes 3 e 4.

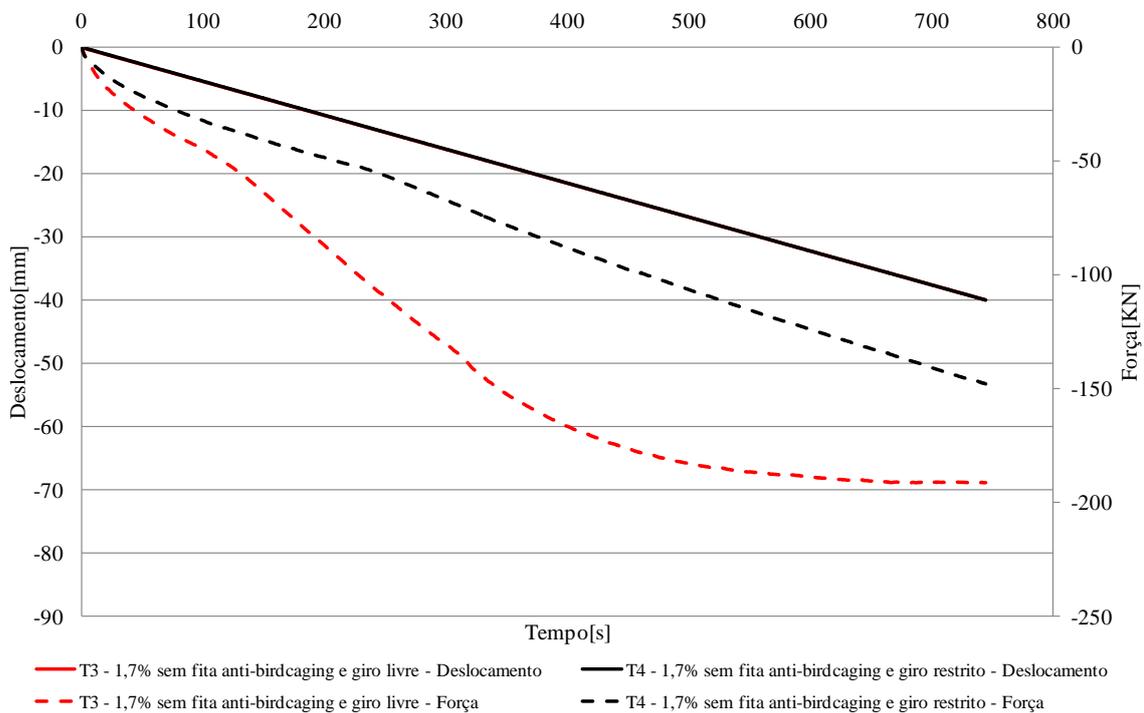


Figura 4.8: Gráfico de força e deslocamento x tempo para os testes 3 e 4.

Tabela 4.2: Medições realizadas para os testes 3 e 4.

| | | Tabela de medições (valores em mm) | Teste 3 | Teste 4 |
|------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------|----------------|
| Antes do teste | | Comprimento total da amostra | 3148 | 3148 |
| | | Comprimento livre da amostra | 2400 | 2400 |
| | | Diâmetro da amostra - Centro (0° e 90°) | 221/221 | 236,2/236,2 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Atuador (0° e 90°) | 217,9/216,4 | 217,9/216,6 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Fechamento (0° e 90°) | 218,2/216,4 | 217,9/216,6 |
| | | Circunferência da amostra - Centro | 703 | 818 |
| | | Circunferência da amostra - Lado Atuador | 683 | 683 |
| Durante o teste | | Circunferência da amostra - Lado Fechamento | 684 | 683 |
| | | Comprimento total da amostra | 3108 | 3108 |
| | | Comprimento livre da amostra | 2360 | 2360 |
| | | Diâmetro da amostra - Centro (0° e 90°) | 330/330 | 358/358 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Atuador (0° e 90°) | 220,1/216,6 | 219,4/216,8 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Fechamento (0° e 90°) | 220/216,7 | 219,5/216,8 |
| | | Circunferência da amostra - Centro | 1000 | 1033 |
| Após o teste | | Circunferência da amostra - Lado Atuador | 685 | 685 |
| | | Circunferência da amostra - Lado Fechamento | 686 | 686 |
| | | Comprimento total da amostra | 3148 | 3146 |
| | | Comprimento livre da amostra | 2400 | 2399 |
| | | Diâmetro da amostra - Centro (0° e 90°) | 236,2/236,2 | 241,5/241,5 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Atuador (0° e 90°) | 217,9/216,6 | 217,7/216,7 |
| | | Diâmetro da amostra - Lado Fechamento (0° e 90°) | 217,9/216,6 | 217,7/216,5 |
| | Circunferência da amostra - Centro | 818 | 845 | |
| | Circunferência da amostra - Lado Atuador | 683 | 683 | |
| | Circunferência da amostra - Lado Fechamento | 683 | 683 | |

O grande espaçamento entre arames permitiu a medição da altura da gaiola com relação à superfície base da armadura, conforme indicado na Figura 4.9. Medições tomadas nestas regiões são apresentadas na Tabela 4.2. A Figura 4.10 mostra a condição da amostra durante o teste 3 e a Figura 4.11 ilustra a situação da amostra ao fim do mesmo teste.



Figura 4.9: Medição da altura radial da gaiola de passarinho, teste 3.

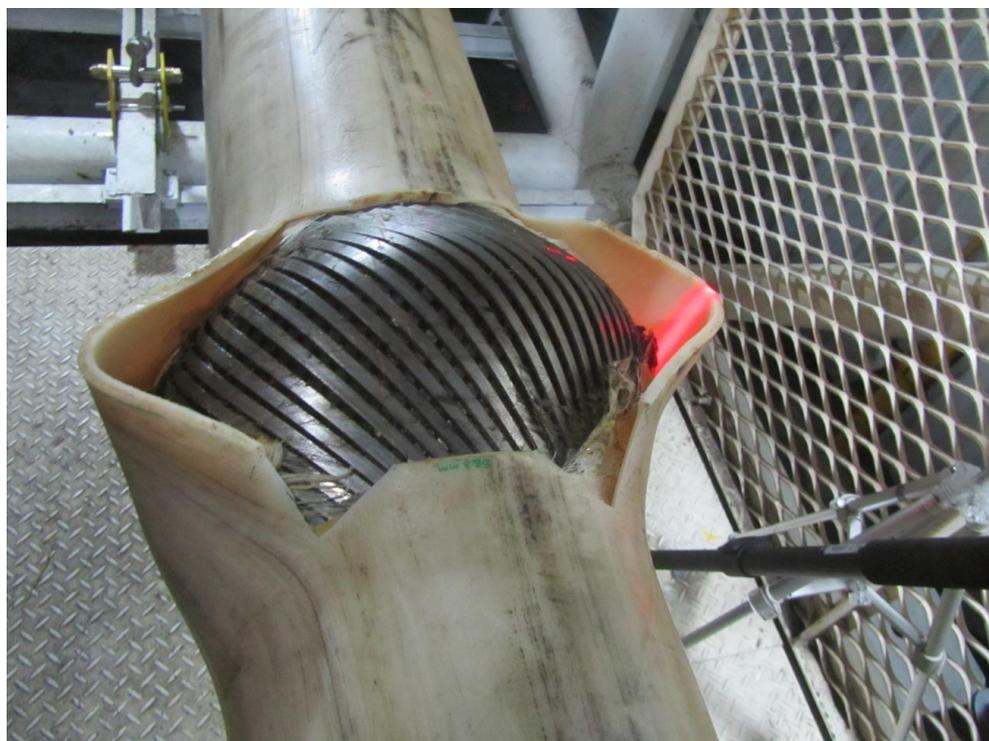


Figura 4.10: Formação da gaiola de passarinho - Teste 3.



Figura 4.11: Condição da amostra no final do teste 3.

4.1.3 Testes de Compressão: Compilação dos Resultados

Abaixo são plotados os gráficos de “Força x Deslocamento” (Figura 4.12) para os testes 1 e 3 com giro livre e de “Força x Deslocamento” (Figura 4.13) para os testes 2 e 4 com giro restrito.

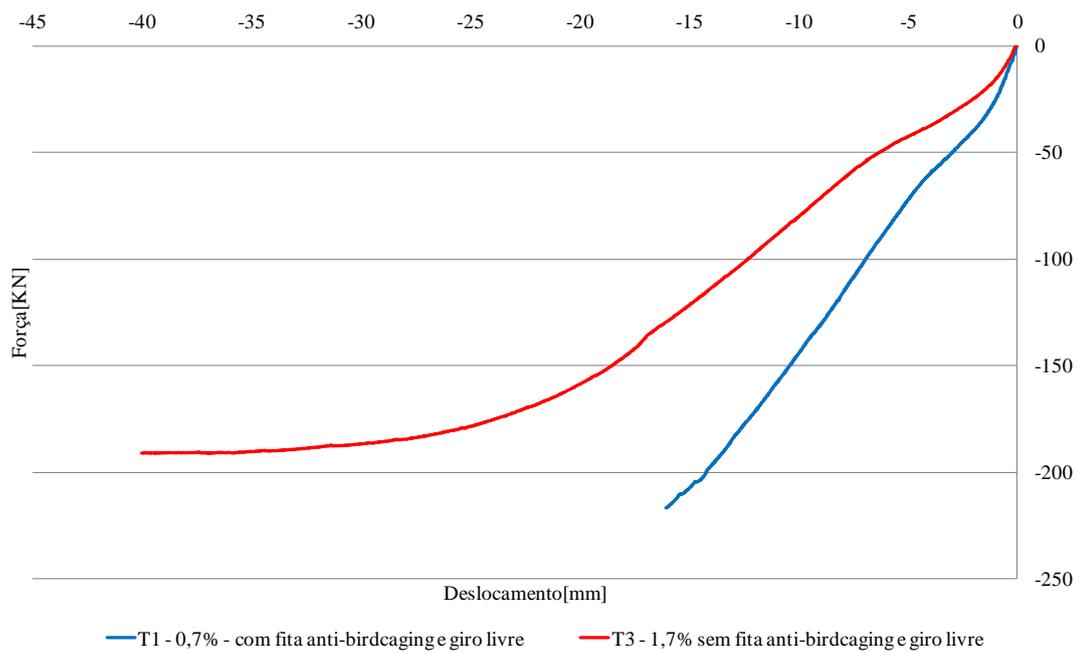


Figura 4.12: Gráfico comparativo de força x deslocamento – testes c/ giro livre.

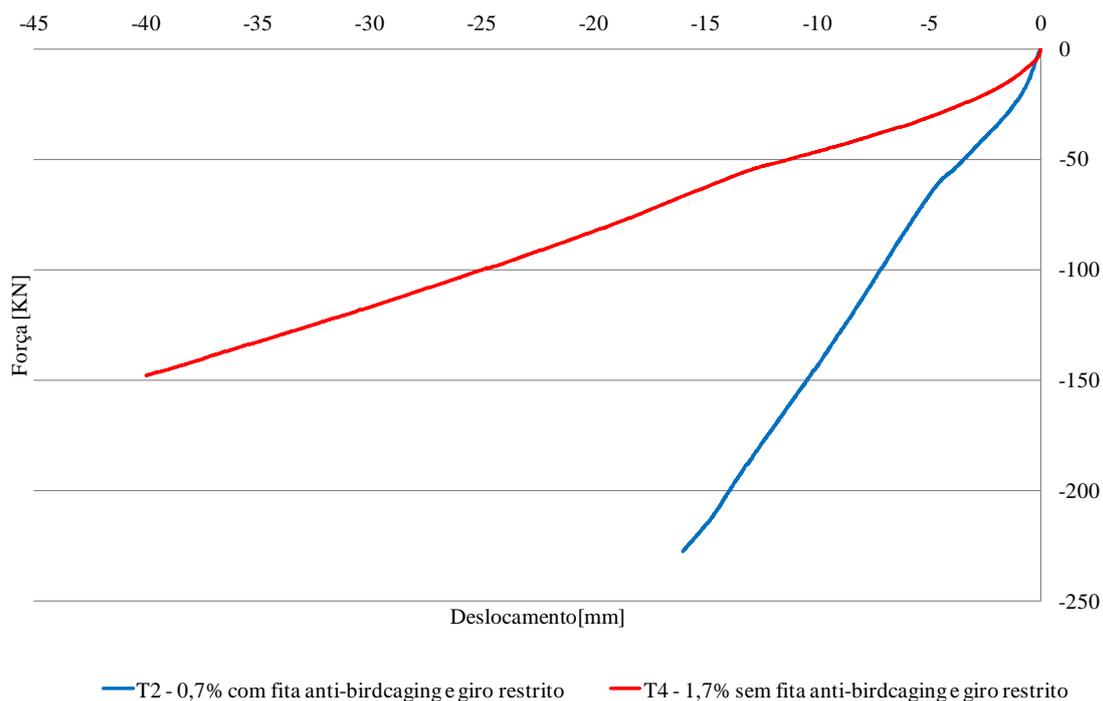


Figura 4.13: Gráfico comparativo de força x deslocamento – testes c/ giro restrito.

4.2 Validação do Modelo

A validação segue os critérios apresentados na metodologia e são apresentados nos tópicos a seguir.

4.2.1 Rigidez do riser sem defeito na bandagem de alta resistência

A Figura 4.14 apresenta a relação entre carga e deslocamento do teste experimental e carga e deslocamento do modelo desenvolvido em elementos finitos para o duto flexível sem defeito na fita anti-birdcaging.

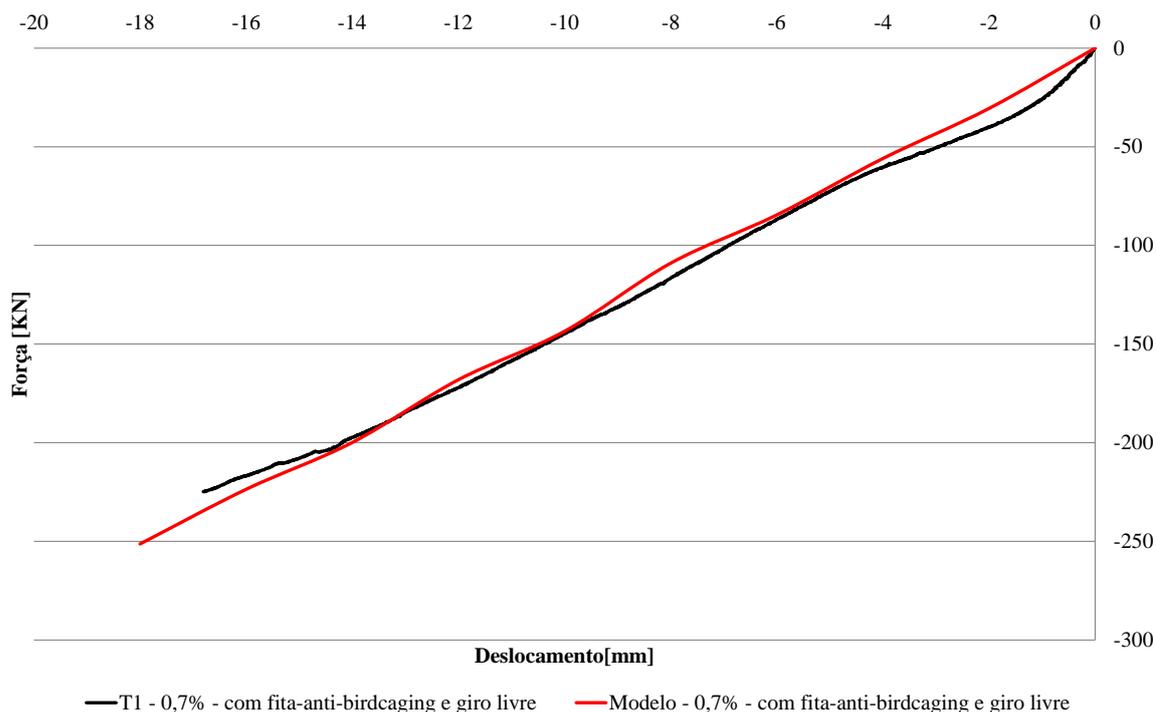


Figura 4.14: Relação entre carga e deslocamento do teste experimental e carga e deslocamento do modelo desenvolvido.

4.2.2 Diâmetro do *riser* sem defeito na bandagem de alta resistência

Para a validação do modelo desenvolvido é de fundamental importância vários pontos de análise. Um ponto importante é o comportamento radial antes da realização do defeito no *kevlar* (*anti-birdcaging*). Desta forma a Tabela 4.3 demonstra a relação entre o diâmetro do teste experimental em relação ao diâmetro do modelo desenvolvido em elementos finitos no ponto máximo de deformação como previsto (0,7%).

Tabela 4.3: Relação entre o teste experimental e o modelo desenvolvido.

| Medições - Posições | Teste Experimental | Simulação Elementos Finitos | Diferença (%) |
|-----------------------|--------------------|-----------------------------|---------------|
| Diâmetro (mm) - 0° | 218,00 | 216,00 | 0,92% |
| Diâmetro (mm) - 90° | 218,50 | 216,20 | 1,05% |
| Perímetro (mm) | 686,00 | 679,21 | 0,99% |
| Comprimento livre(mm) | 2384,00 | 2384,00 | 0,00% |

4.2.3 Rigidez do *riser* com defeito na bandagem de alta resistência

A Figura 4.15 apresenta a relação entre carga e deslocamento do teste experimental e carga e deslocamento do modelo desenvolvido em elementos finitos para o duto flexível

com defeito proposital na bandagem de alta resistência. O tamanho de defeito na parte do comprimento é de 200 mm e na largura de 56,3 mm.

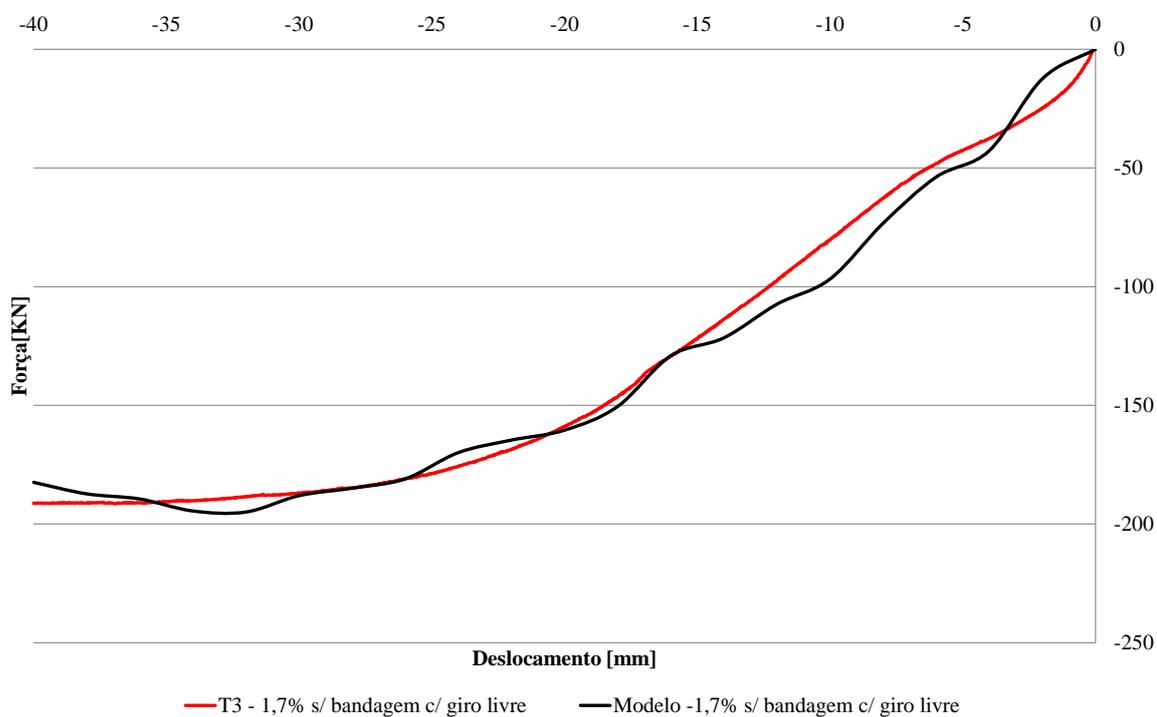


Figura 4.15: Relação entre carga e deslocamento do teste experimental e carga e deslocamento do modelo desenvolvido

A Figura 4.16 demonstra de forma isométrica o estado final da amostra após aplicação do deslocamento prescrito segundo teste experimental. Já a Figura 4.17 detalha a gaiola de passarinho observada, objetivando uma melhor visualização da deformação radial ocorrida.

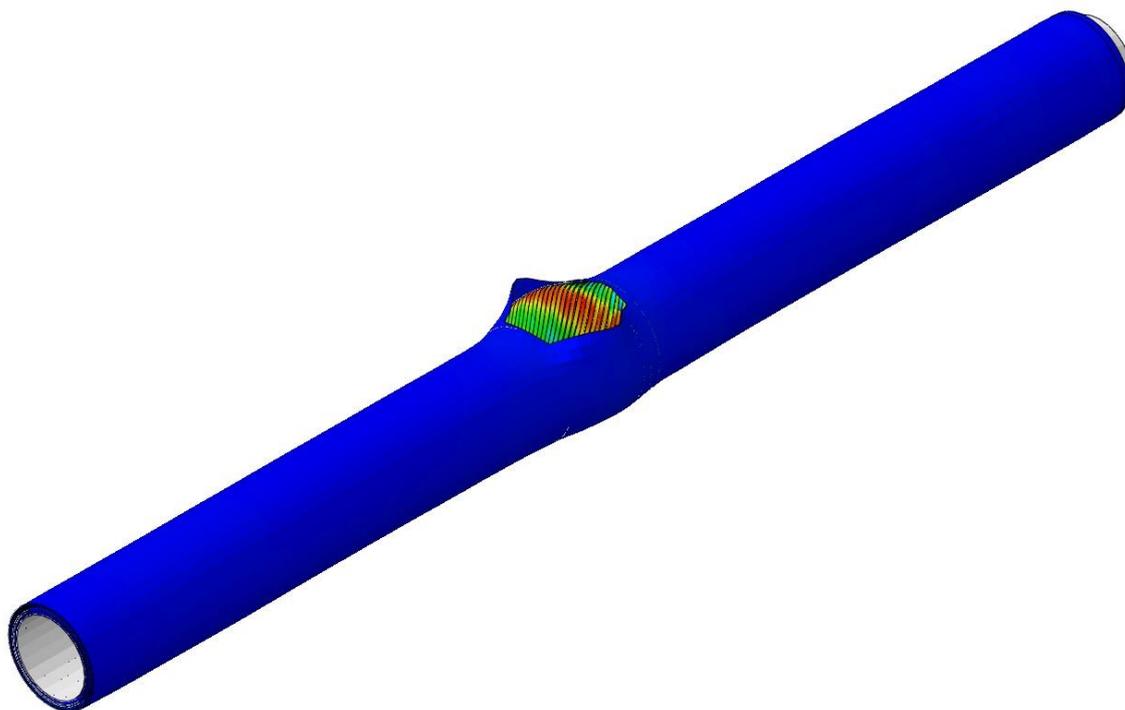


Figura 4.16: Estado final da amostra após aplicação do deslocamento prescrito segundo teste experimental

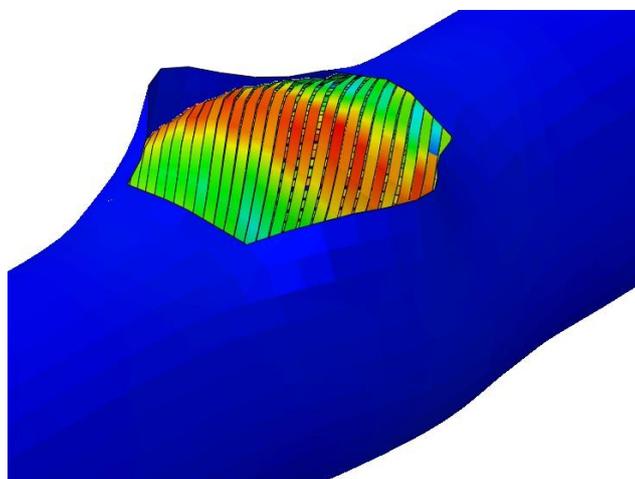


Figura 4.17: Detalhe da gaiola de passarinho observada

A Figura 4.18 apresenta as armaduras de tração externa e interna e suas respectivas deformações no formato de gaiola de passarinho. As letras A e B demonstram de forma isométrica o comportamento em elementos finitos da armadura externa, representado pela letra A, e a armadura interna, representado pela letra B, já as letras C e D detalham seus respectivos comportamentos através da vista lateral em corte longitudinal.

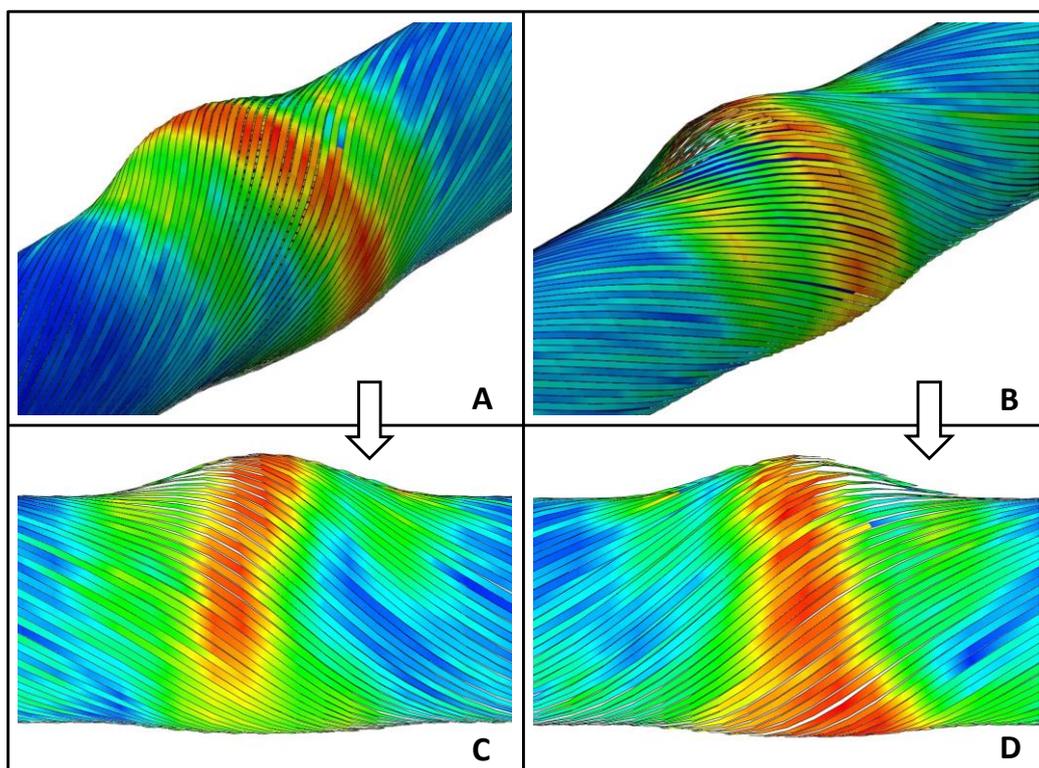


Figura 4.18: Armaduras de tração externa(A) e interna(B) e seus respectivos cortes longitudinais C e D.

4.2.4 Altura radial da gaiola de passarinho do riser com defeito

A Tabela 4.4 demonstra a relação entre a altura da gaiola de passarinho do teste experimental em relação à altura da gaiola do modelo, desenvolvido em elementos finitos, no ponto máximo de deformação como previsto (1,7 %).

Tabela 4.4: Relação entre as alturas das gaiolas de passarinho do teste experimental e do modelo.

| Medições - Posições | Teste Experimental | Simulação Elementos Finitos | Diferença (%) |
|----------------------|--------------------|-----------------------------|---------------|
| Altura da gaiola(mm) | 51,80 | 50,80 | 1,93% |

4.2.5 Inspeção visual comparativa

A Figura 4.19 demonstra a relação visual entre a gaiola do teste experimental em relação à gaiola do modelo desenvolvido em elementos finitos.

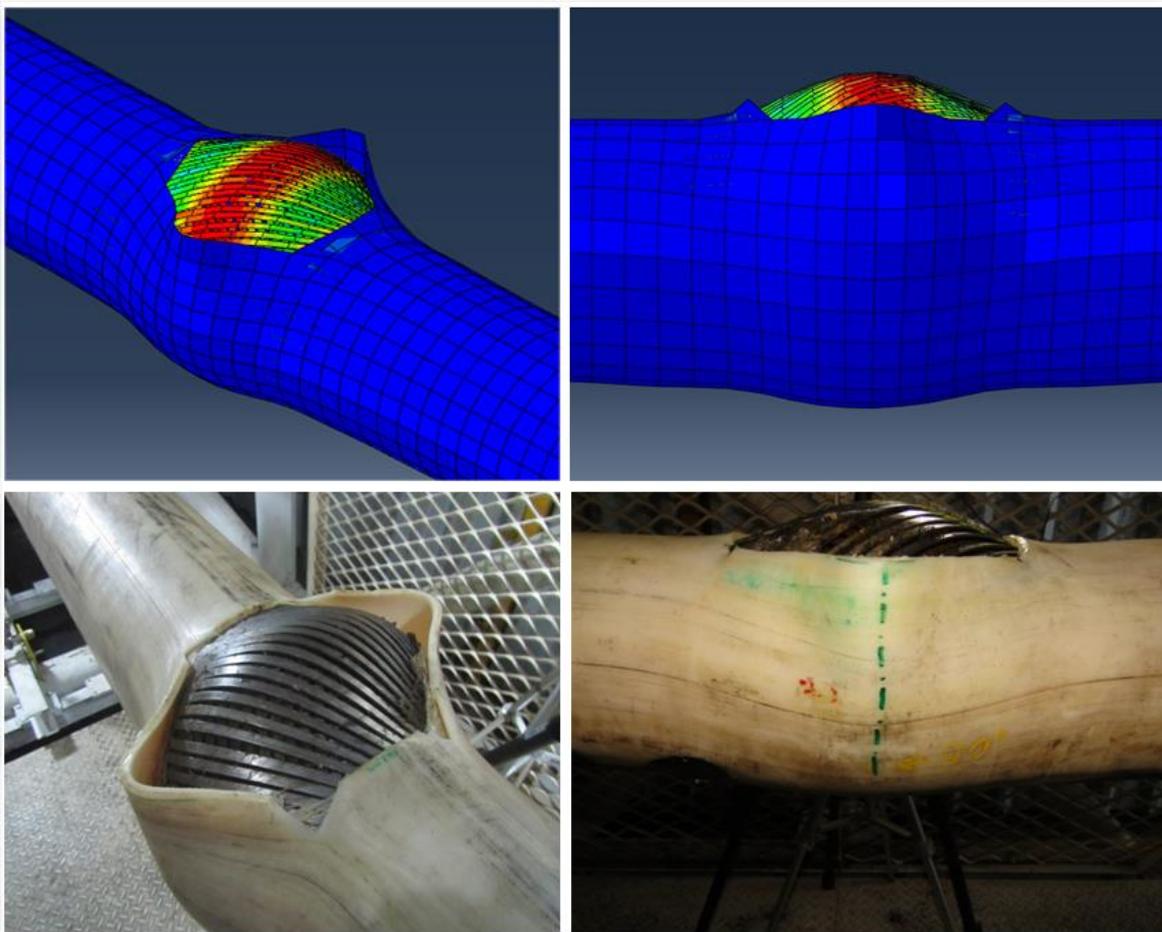


Figura 4.19: Relação visual entre os resultados experimentais e teóricos quanto à formação da gaiola de passarinho desenvolvida.

4.3 Testes Numéricos

4.3.1 Grupo do defeito com comprimento de 25 mm

A Figura 4.20 demonstra a relação entre carga e deslocamento para o grupo.

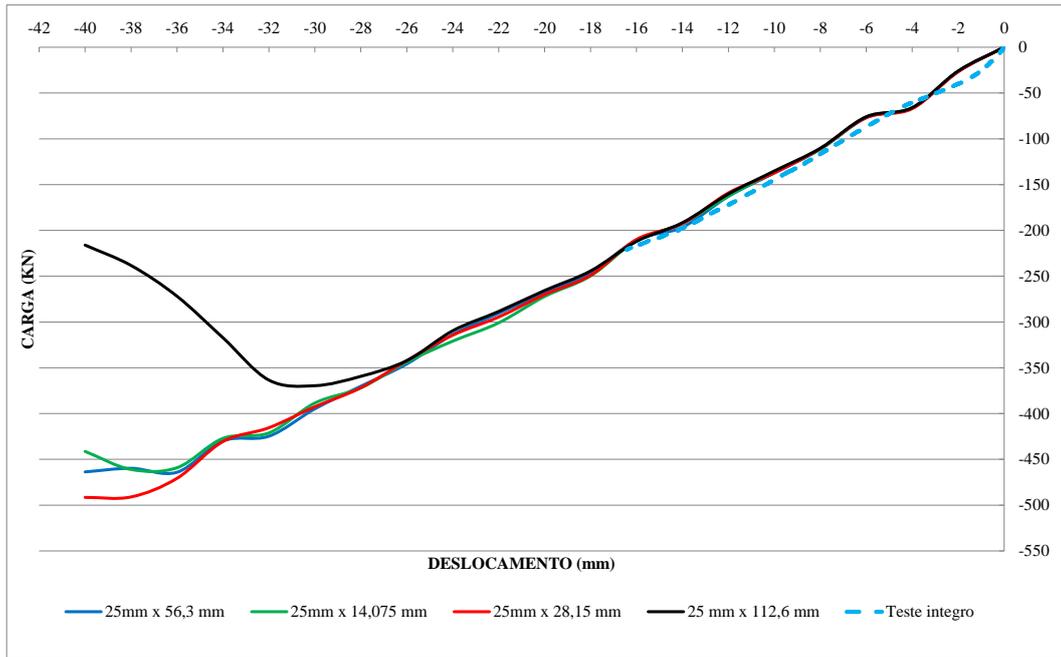


Figura 4.20: Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 25 mm.

4.3.2 Grupo do defeito com comprimento de 50 mm

A Figura 4.21 demonstra a relação entre carga e deslocamento para o grupo.

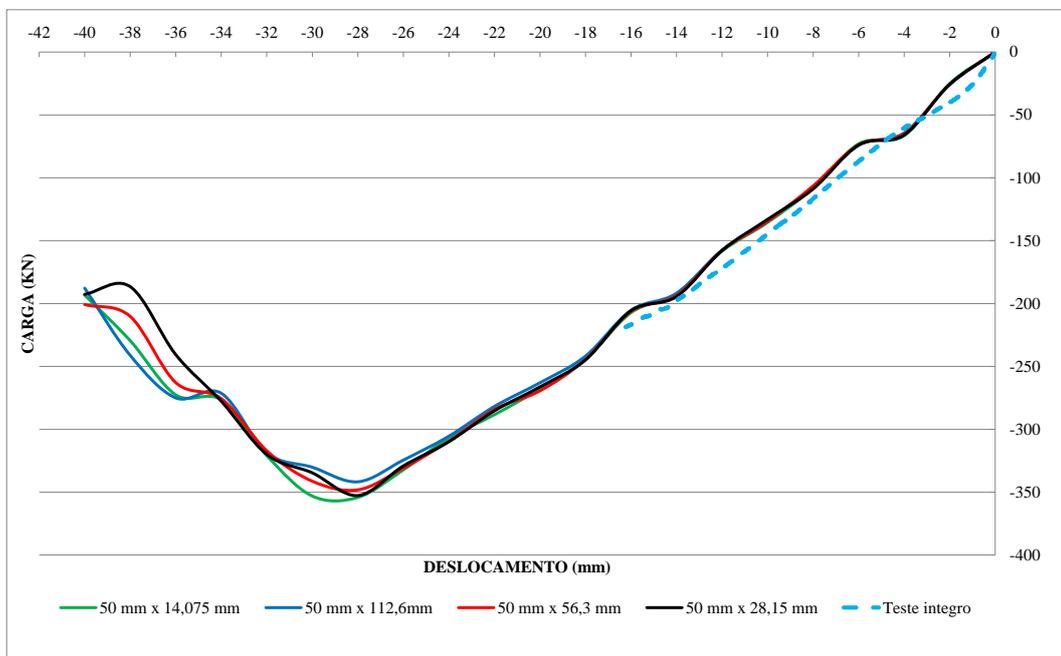


Figura 4.21: Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 50 mm.

4.3.3 Grupo do defeito com comprimento de 100 mm

A Figura 4.22 demonstra a relação entre carga e deslocamento para o grupo.

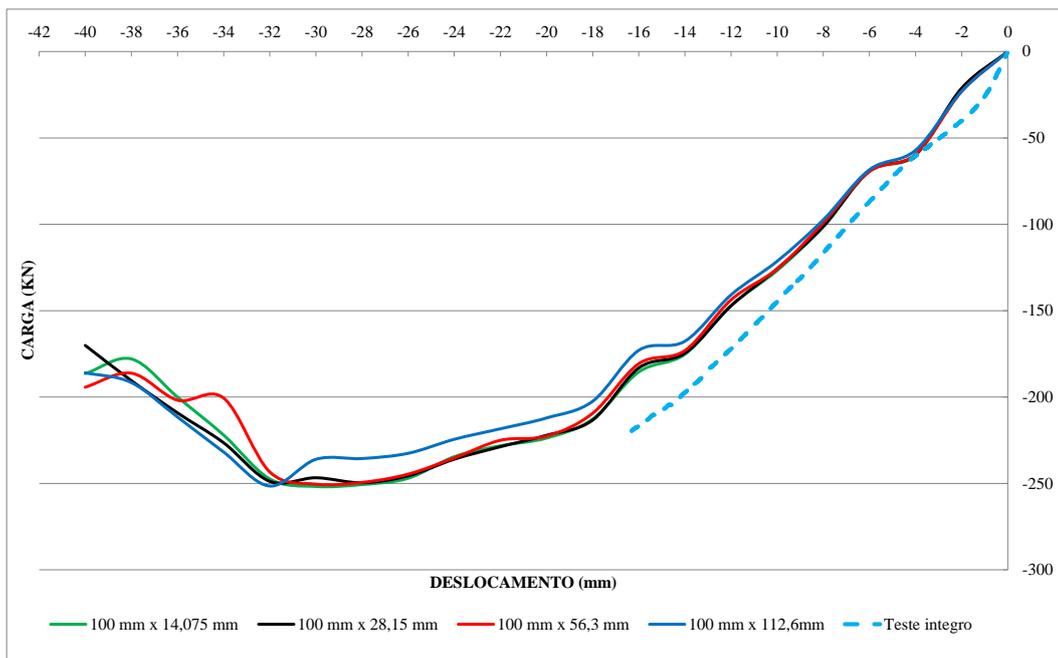


Figura 4.22: Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 100 mm.

4.3.4 Grupo do defeito com comprimento de 200 mm

A Figura 4.23 demonstra a relação entre carga e deslocamento para o grupo.

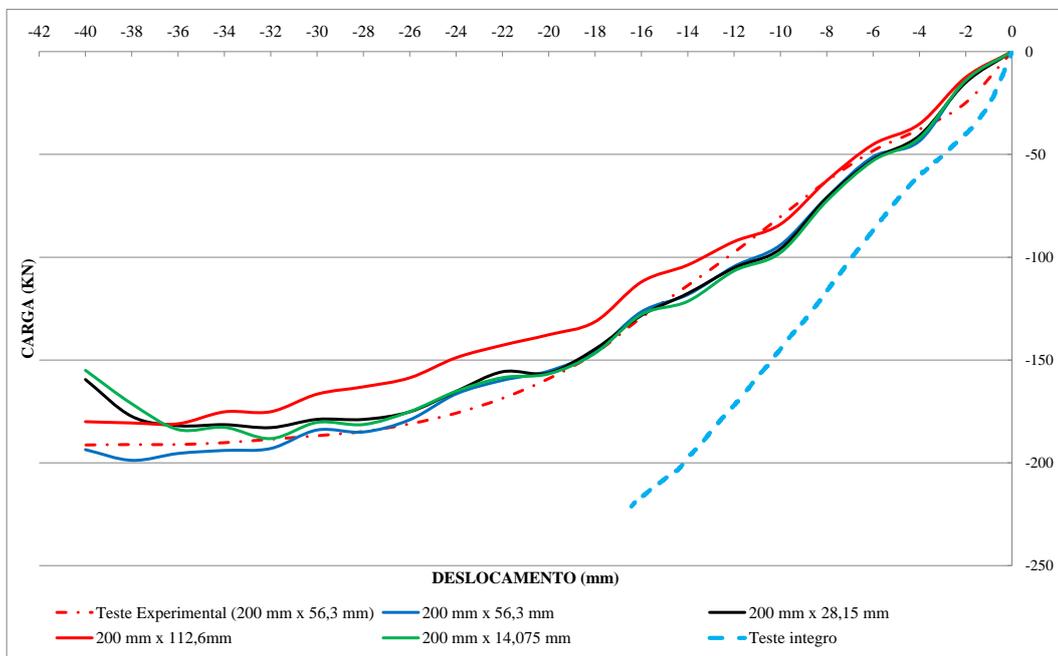


Figura 4.23: Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 200 mm.

4.3.5 Grupo do defeito com comprimento de 300 mm

A Figura 4.24 demonstra a relação entre carga e deslocamento para o grupo.

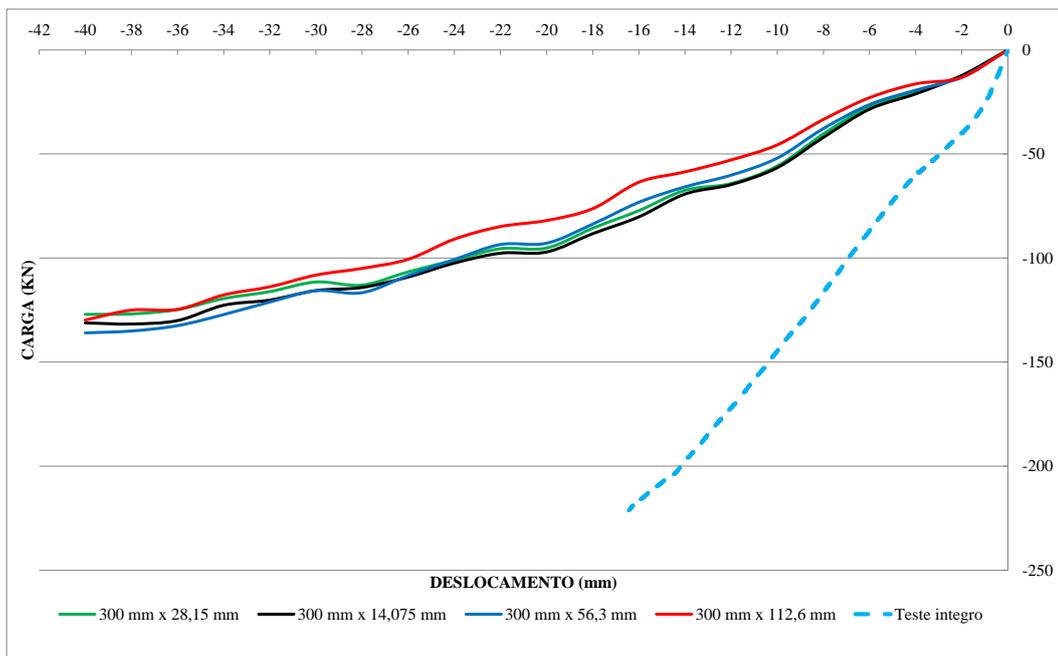


Figura 4.24: Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 300 mm.

4.3.6 Grupo do defeito com comprimento de 400 mm

A Figura 4.25 demonstra a relação entre carga e deslocamento para o grupo.

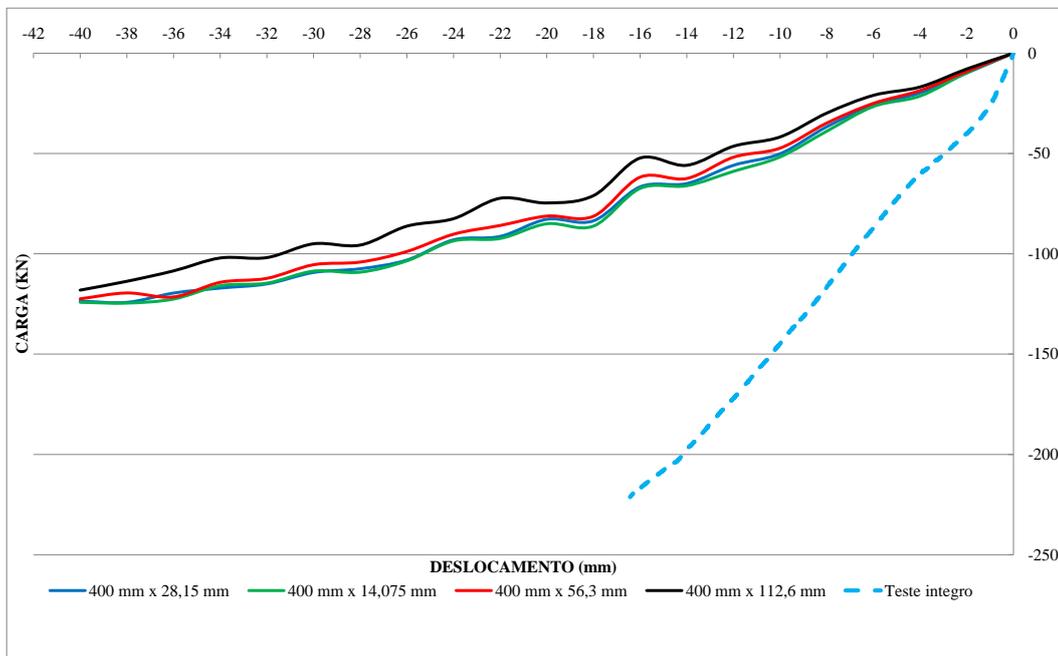


Figura 4.25: Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 400 mm.

4.3.7 Grupo do defeito com comprimento de 500 mm

A Figura 4.26 demonstra a relação entre carga e deslocamento para o grupo.

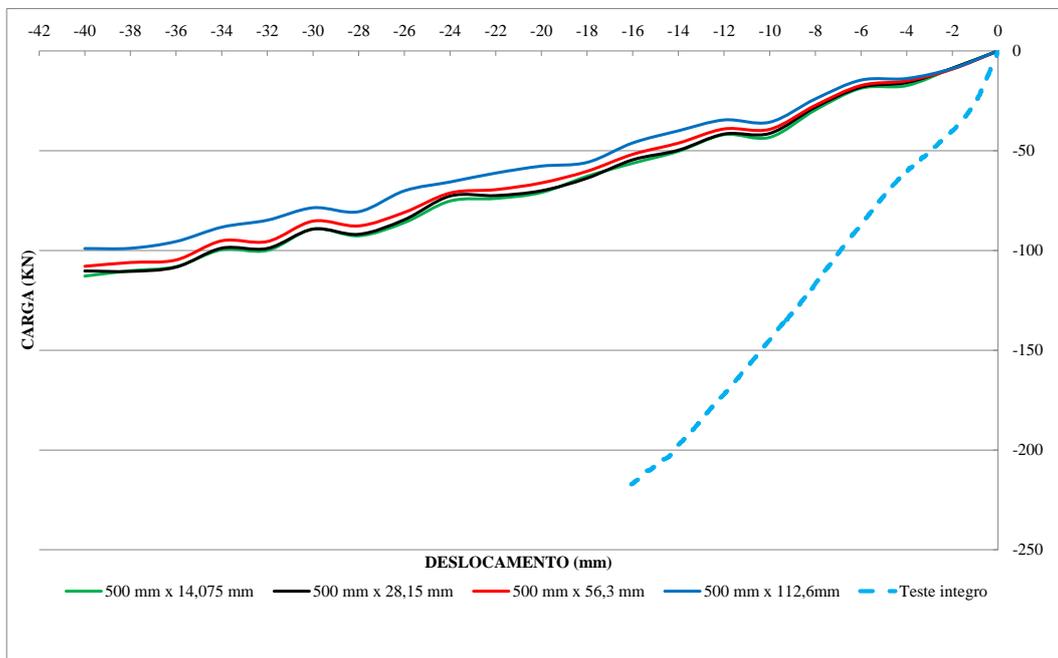


Figura 4.26: Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 500 mm.

4.3.8 Grupo do defeito com comprimento de 600 mm

A Figura 4.27 demonstra a relação entre carga e deslocamento para o grupo.

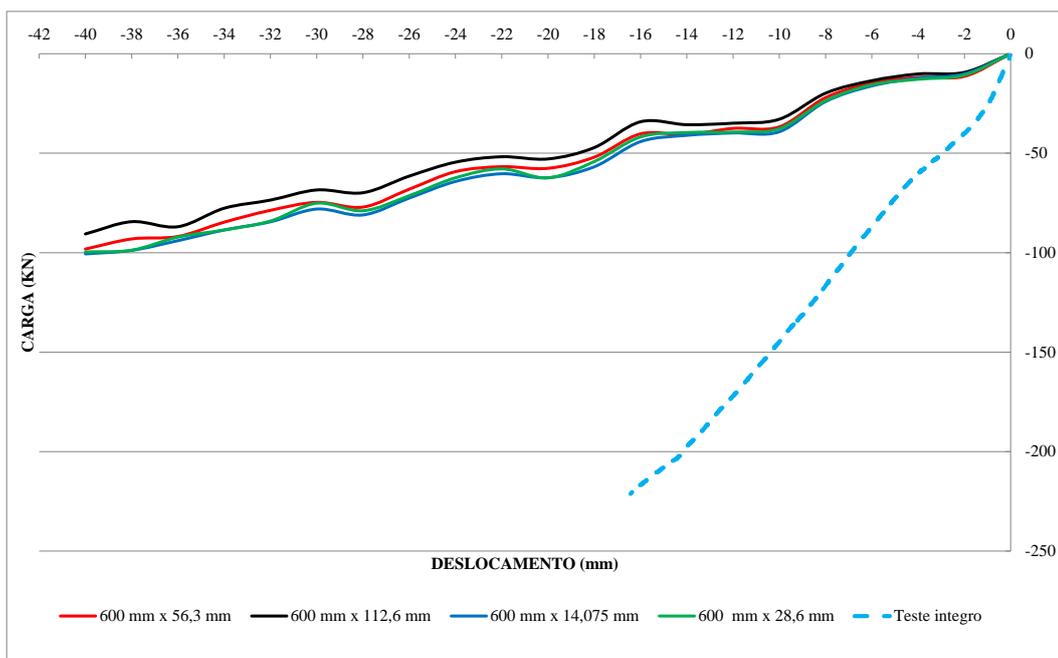


Figura 4.27: Relação entre carga e deslocamento para os testes experimentais e computacionais do grupo de 600 mm.

4.3.9 Todos os Resultados Numéricos

Para uma comparação geral entre os resultados é de fundamental importância a apresentação de todas as condições em um mesmo gráfico. A Figura 4.28 demonstra a relação entre carga e deslocamento de todos os testes experimentais e computacionais.

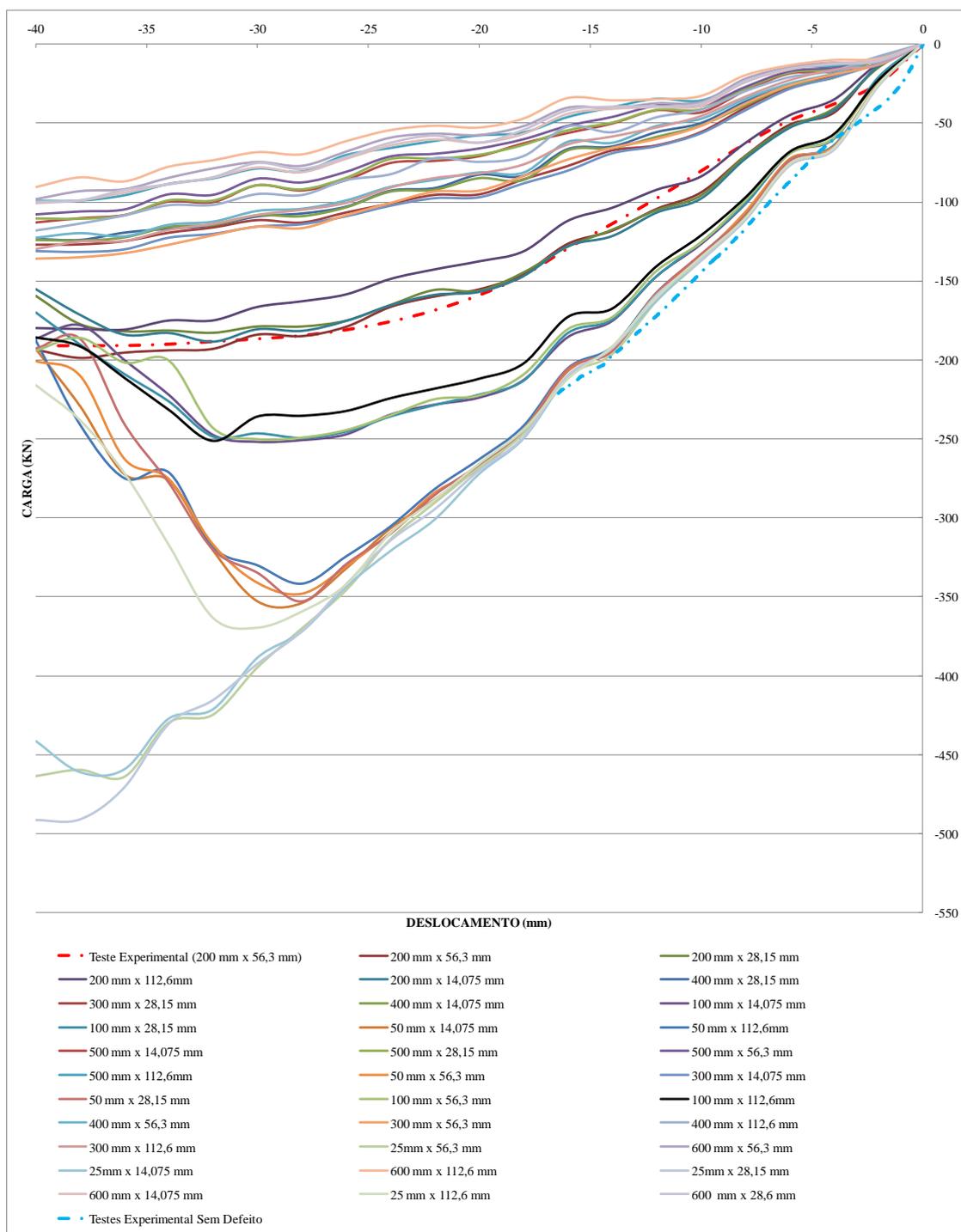


Figura 4.28: Relação entre as cargas e deslocamentos para todos os testes experimentais e computacionais.

4.3.10 Medição da altura da gaiola de passarinho

A gaiola de passarinho pode ser caracterizada pela sua altura conforme a Figura 4.29 que representa o teste experimental.

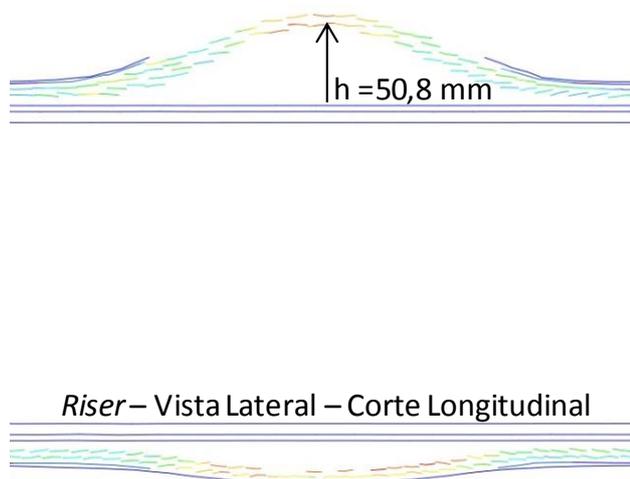


Figura 4.29: Altura da gaiola de passarinho do teste experimental

O valor da altura “h” conforme a figura acima para o teste experimental é de 50,8 mm.

4.3.11 Resultados Segundo Critério de Falha Proposto

A Tabela 4.5 quantifica o ponto crítico segundo o critério de falha apresentado. Essa tabela não somente pode ser interpretada como um critério de falha teórico, mas sim utilizada como tomada de decisão quando verificada a existência de um defeito no duto em atividade ou no momento da instalação, já que com uma simples medição no tamanho de defeito pode-se prever o deslocamento máximo axial do riser, a carga máxima a ser aplicada, a altura da gaiola a ser gerada e a rigidez do mesmo.

Tabela 4.5: Resultados obtidos nos testes segundo o critério de falha estabelecido.

| Condição do Defeito | Deslocamento Máximo (mm) | Força Máxima (KN) | Rigidez (KN / mm) | Altura da Gaiola (mm) |
|---------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 600 mm x 14,075 mm | -20,00 | -62,33 | -3,12 | 15,49 |
| 600 mm x 28,6 mm | -20,00 | -62,39 | -3,12 | 15,61 |
| 600 mm x 56,3 mm | -20,00 | -57,59 | -2,88 | 14,76 |
| 600 mm x 112,6 mm | -20,00 | -52,89 | -2,64 | 14,08 |
| 500 mm x 14,075 mm | -20,00 | -70,93 | -3,55 | 18,27 |
| 500 mm x 28,15 mm | -20,00 | -70,06 | -3,50 | 18,31 |
| 500 mm x 56,3 mm | -20,00 | -66,13 | -3,31 | 17,64 |
| 500 mm x 112,6mm | -20,00 | -57,70 | -2,89 | 16,86 |
| 400 mm x 14,075 mm | -20,00 | -85,04 | -4,25 | 20,86 |
| 400 mm x 28,15 mm | -20,00 | -82,80 | -4,14 | 20,87 |
| 400 mm x 56,3 mm | -20,00 | -81,20 | -4,06 | 20,81 |
| 400 mm x 112,6 mm | -20,00 | -74,66 | -3,73 | 20,23 |
| 300 mm x 14,075 mm | -20,00 | -97,09 | -4,85 | 24,15 |
| 300 mm x 28,15 mm | -20,00 | -95,19 | -4,76 | 24,45 |
| 300 mm x 56,3 mm | -20,00 | -92,87 | -4,64 | 24,33 |
| 300 mm x 112,6 mm | -20,00 | -81,97 | -4,10 | 23,89 |
| 200 mm x 14,075 mm | -20,00 | -156,74 | -7,84 | 24,95 |
| 200 mm x 28,15 mm | -20,00 | -156,32 | -7,82 | 24,84 |
| 200 mm x 56,3 mm | -20,00 | -155,38 | -7,77 | 24,97 |
| 200 mm x 112,6mm | -20,00 | -137,70 | -6,89 | 24,89 |
| 100 mm x 14,075 mm | -22,00 | -228,19 | -10,37 | 23,07 |
| 100 mm x 28,15 mm | -22,00 | -228,75 | -10,40 | 22,92 |
| 100 mm x 56,3 mm | -22,00 | -225,03 | -10,23 | 22,83 |
| 100 mm x 112,6mm | -22,00 | -218,37 | -9,93 | 23,51 |
| 50 mm x 14,075 mm | -26,00 | -332,25 | -12,78 | 8,85 |
| 50 mm x 28,15 mm | -26,00 | -329,13 | -12,66 | 11,07 |
| 50 mm x 56,3 mm | -26,00 | -330,87 | -12,73 | 10,71 |
| 50 mm x 112,6mm | -26,00 | -324,46 | -12,48 | 11,32 |
| 25 mm x 14,075 mm | -32,00 | -421,14 | -13,16 | 6,15 |
| 25 mm x 28,15 mm | -32,00 | -415,49 | -12,98 | 2,87 |
| 25 mm x 56,3 mm | -32,00 | -424,74 | -13,27 | 4,27 |
| 25 mm x 112,6 mm | -24,00 | -309,61 | -12,90 | 4,22 |

4.3.12 Relação entre as Rigidezas Segundo Critério de falha Proposto

A rigidez do *riser* flexível de parede lisa está diretamente ligada ao tamanho de defeito existente, portanto pode-se fazer uma comparação entre os testes com diferentes defeitos na bandagem de alta resistência e o teste experimental sem defeito. A Tabela 4.6 demonstra tal comparação de forma que os valores de rigidez estão acompanhados pelo deslocamento máximo permitido em compressão antes da instabilidade radial devido à formação da gaiola de passarinho.

Tabela 4.6: Relação entre as rigidezas obtidas nos testes com defeito e no teste experimental sem defeito.

| Tamanho do Defeito | Deslocamento Compressivo Máximo antes da Instabilidade Radial (mm) | Proporção das Rigidezas antes da Instabilidade Radial em Relação ao Riser Sem Defeito |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 600 mm x 112,6 mm | -20 | 5,11 |
| 600 mm x 56,3 mm | -20 | 4,69 |
| 500 mm x 112,6mm | -20 | 4,68 |
| 600 mm x 14,075 mm | -20 | 4,33 |
| 600 mm x 28,6 mm | -20 | 4,33 |
| 500 mm x 56,3 mm | -20 | 4,08 |
| 500 mm x 28,15 mm | -20 | 3,85 |
| 500 mm x 14,075 mm | -20 | 3,81 |
| 400 mm x 112,6 mm | -20 | 3,62 |
| 400 mm x 56,3 mm | -20 | 3,33 |
| 300 mm x 112,6 mm | -20 | 3,29 |
| 400 mm x 28,15 mm | -20 | 3,26 |
| 400 mm x 14,075 mm | -20 | 3,18 |
| 300 mm x 56,3 mm | -20 | 2,91 |
| 300 mm x 28,15 mm | -20 | 2,84 |
| 300 mm x 14,075 mm | -20 | 2,78 |
| 200 mm x 112,6mm | -20 | 1,96 |
| 200 mm x 56,3 mm | -20 | 1,74 |
| 200 mm x 28,15 mm | -20 | 1,73 |
| 200 mm x 14,075 mm | -20 | 1,72 |
| 100 mm x 112,6mm | -22 | 1,36 |
| 100 mm x 56,3 mm | -22 | 1,32 |
| 100 mm x 14,075 mm | -22 | 1,30 |
| 100 mm x 28,15 mm | -22 | 1,30 |
| 50 mm x 112,6mm | -26 | 1,08 |
| 50 mm x 28,15 mm | -26 | 1,07 |
| 50 mm x 56,3 mm | -26 | 1,06 |
| 50 mm x 14,075 mm | -26 | 1,06 |
| 25 mm x 112,6 mm | -24 | 1,05 |
| 25 mm x 28,15 mm | -32 | 1,04 |
| 25 mm x 14,075 mm | -32 | 1,03 |
| 25 mm x 56,3 mm | -32 | 1,02 |

4.3.10 Discussões dos resultados

4.1.4 Discussão dos Testes Experimentais

Nenhum defeito visível foi verificado fora da região de interesse durante os testes 1 e 2 de levantamento do perfil de carga e deslocamento, indicando uma boa condição das bandagens de alta resistência.

Durante os testes 3 e 4, com deformação de 1,7%, a expansão radial foi bastante pronunciada, provocando o rasgamento da capa nos cantos da região de defeito induzido. A expansão no teste com giro restrito foi superior àquela observada no teste com giro livre.

Nos testes 3 e 4 ocorreu de forma visível a formação da esperada gaiola de passarinho, portanto os resultados destes testes são de extrema importância para a calibração do modelo em elementos finitos objetivando mensurar justamente tais condições testadas, ou seja, carga compressiva axial com defeito na bandagem de alta resistência e geração da gaiola de passarinho.

A partir dos gráficos de deslocamento x força dos testes, foi possível perceber que há pouca modificação na rigidez do duto quando comparados os testes 1 e 2 com giro livre e giro restrito. Já para os testes 3 e 4 onde houve formação da gaiola de passarinho, existiu diferenças significativas entre giro livre e restrito.

4.1.4 Discussão sobre a Validação do Modelo

Segundo a Figura 4.14 pode-se verificar que o modelo satisfaz a equivalência do teste experimental, de forma que uma pequena variação fica visível, mas sem interferência significativa nos resultados a serem apresentados.

De acordo com a Tabela 4.3 pode-se verificar que o comportamento radial do modelo apresenta resultados equivalentes ao teste experimental, tendo uma variação insignificante não prejudicando os resultados do modelo a serem apresentados quanto ao propósito deste trabalho.

Segundo a Figura 4.15 pode-se verificar que o modelo satisfaz a equivalência do teste experimental, de forma que uma pequena variação fica visível, mas sem interferência significativa nos resultados a serem apresentados.

Segundo a Tabela 4.4 pode-se verificar que o modelo satisfaz a equivalência do teste experimental, de forma que uma pequena variação de 1,93% (1 mm) da altura da gaiola, mas sem interferência significativa nos resultados a serem apresentados.

De acordo com Figura 4.19 pode-se verificar que o modelo possui equivalência visual em relação ao teste experimental.

4.1.4 Discussão dos Testes Numéricos

A Figura 4.20 demonstra um comportamento inesperado para a condição de defeito (25 mm x 112,6 mm) em relação aos demais testes do mesmo grupo. Fazendo uma análise bem detalhada do ensaio, percebe-se uma mudança quanto à distribuição de deformação, não mais localizada no defeito pré-estabelecido, mas sim em regiões específicas. Essa distribuição da deformação ocorre devido a um tipo de instabilidade comentada na introdução deste trabalho, também conhecida como flambagem lateral no qual gera um aspecto que pode ser visualizado no detalhamento da Figura 4.30. Essa instabilidade lateral faz com que a rigidez diminua bruscamente para valores próximos ao grupo de defeito com comprimento de 50 mm conforme Figura 4.21. Cabe ressaltar que na posição

onde deveria surgir a gaiola de passarinho, os arames de tração não demonstram qualquer avaria após a flambagem lateral.

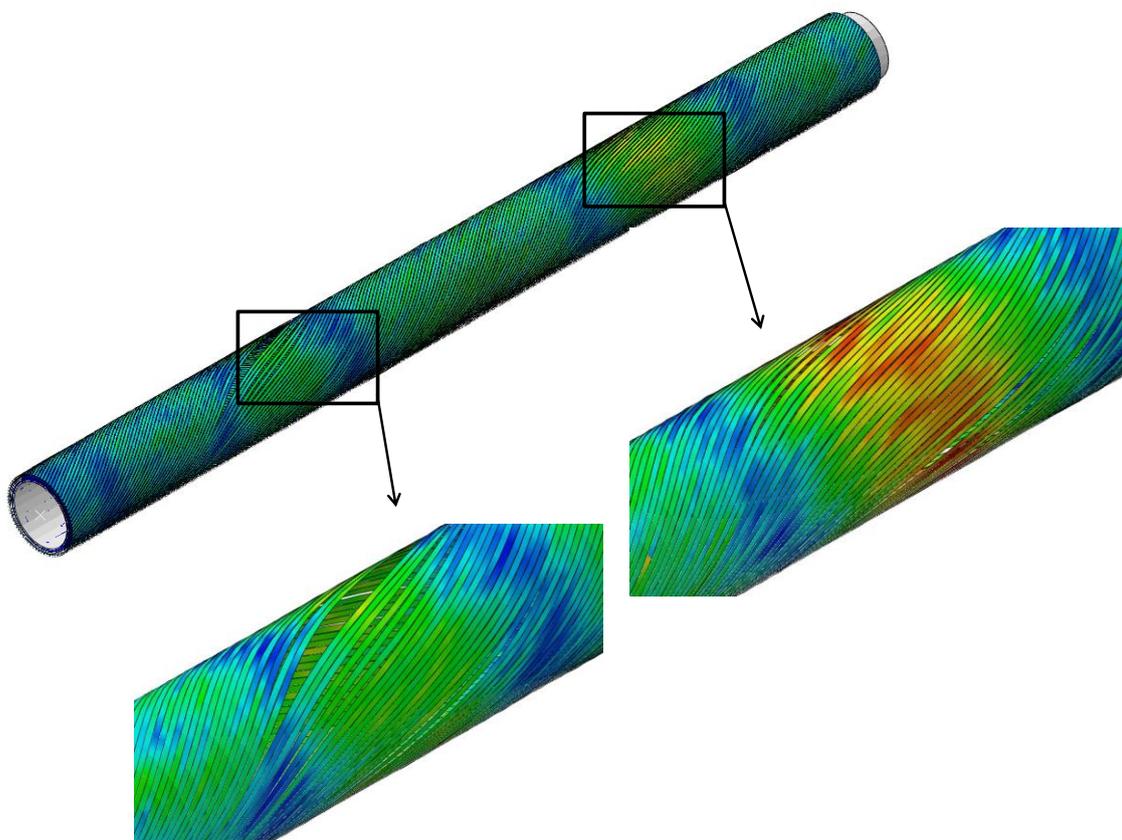


Figura 4.30: Flambagem lateral ocorrida segundo condição de defeito 25 mm x 112,6 mm

A Figura 4.31 apresenta o detalhamento para o tamanho de defeito 50 mm x 28,15 mm, desde a geração do defeito até deslocamento de 40 mm.

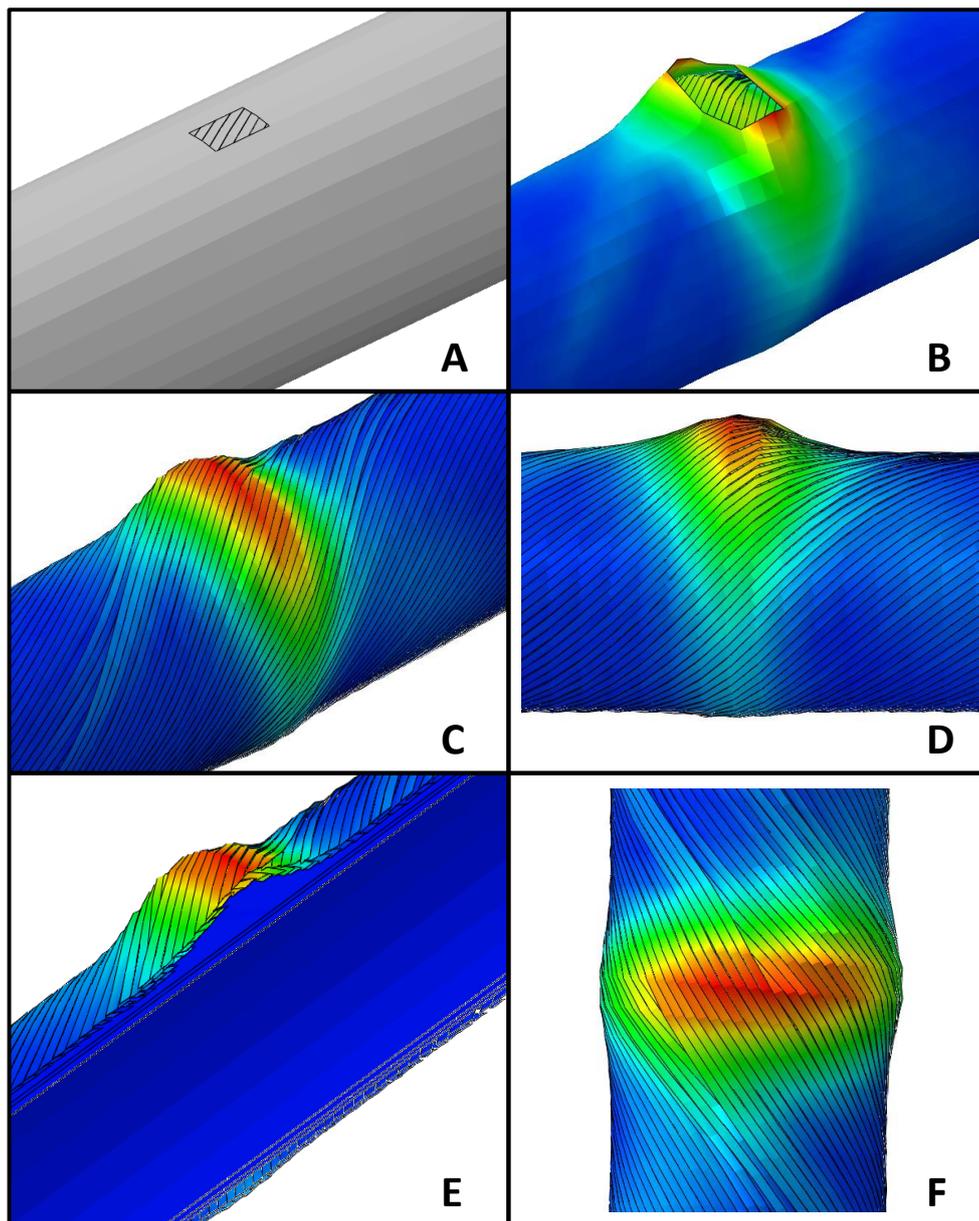


Figura 4.31: Detalhamento para o tamanho de defeito 50 mm x 28,15 mm: defeito aplicado (A). Geração da gaiola – vista isométrica (B). Deformação radial das armaduras de tração – vista isométrica (C). Deformação radial das armaduras de tração – vista lateral (D). Gaiola em corte - vista isométrica – (E) Deformação radial – vista superior (F)

A Figura 4.32 apresenta o detalhamento para o tamanho de defeito 100 mm x 56,3 mm, desde a geração do defeito até deslocamento de 40 mm.

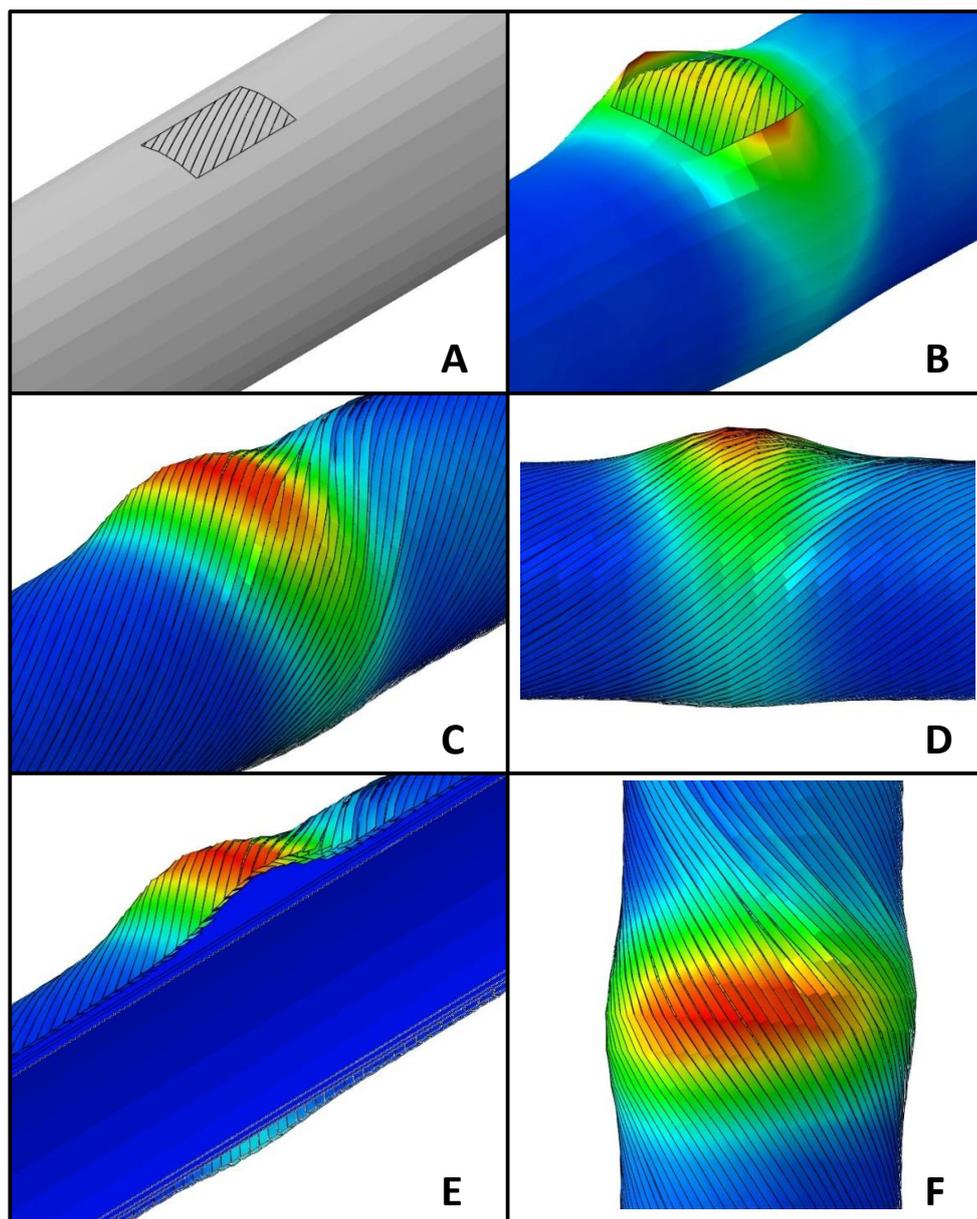


Figura 4.32: Detalhamento para o tamanho de defeito 100 mm x 56,3 mm: defeito aplicado (A). Geração da gaiola – vista isométrica (B). Deformação radial das armaduras de tração – vista isométrica(C). Deformação radial das armaduras de tração – vista lateral (D). Gaiola em corte - vista isométrica – (E) Deformação radial – vista superior (F)

A Figura 4.33 apresenta o detalhamento para o tamanho de defeito 400 mm x 56,3 mm, desde a geração do defeito até deslocamento de 40 mm.

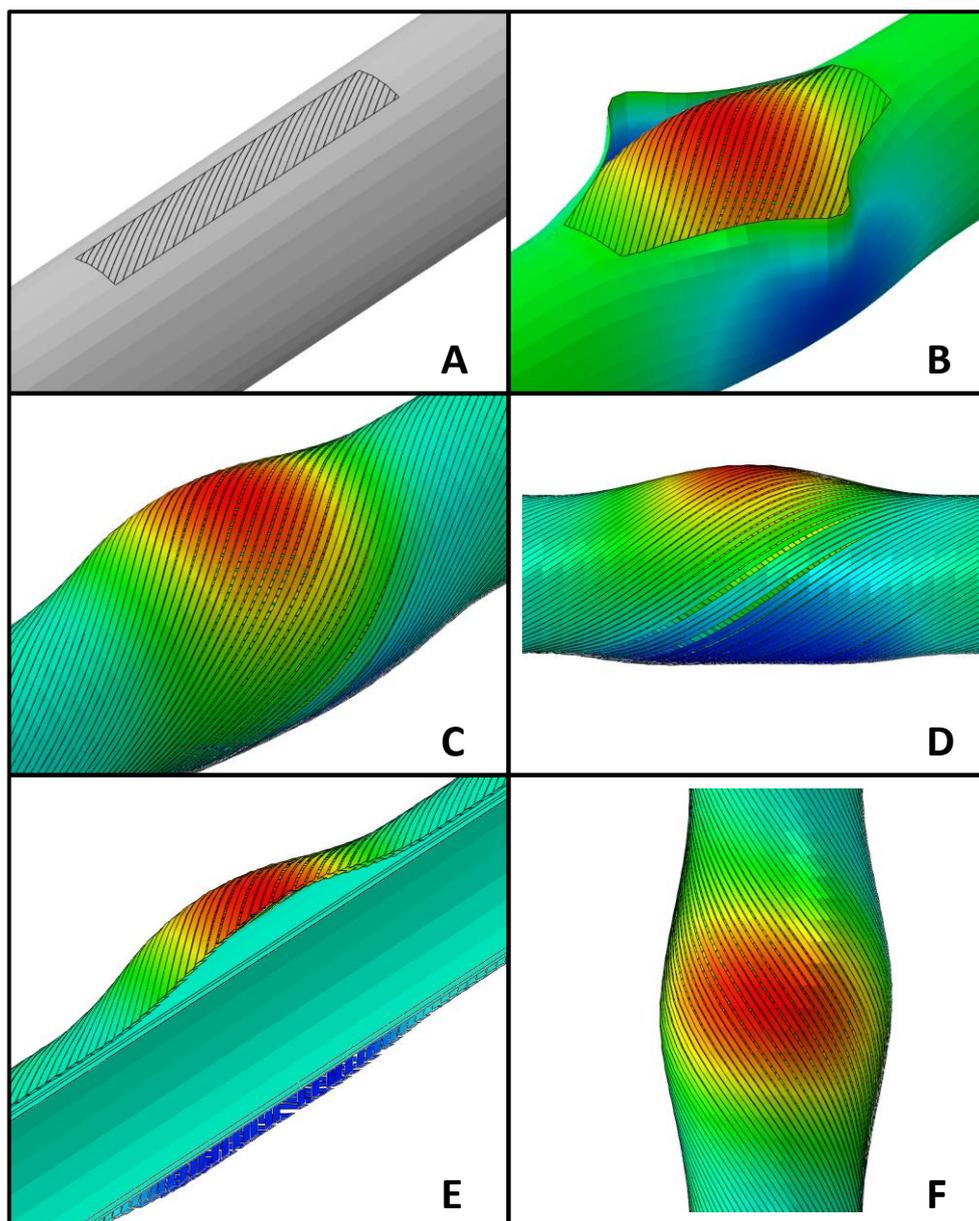


Figura 4.33: Detalhamento para o tamanho de defeito 400 mm x 56,3 mm: defeito aplicado (A). Geração da gaiola – vista isométrica (B). Deformação radial das armaduras de tração – vista isométrica (C). Deformação radial das armaduras de tração – vista lateral (D). Gaiola em corte - vista isométrica – (E) Deformação radial – vista superior (F)

De acordo com o a Figura 4.28, percebe-se claramente os grupos referentes aos comprimentos dos defeitos, de 25 mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm. Já os grupos de comprimento iguais a 300 mm, 400 mm, 500 mm e 600 mm os resultados encontram-se muito próximos se comparado com os demais.

Os testes experimentais com e sem defeito podem ser visualizados na Figura 4.28 de forma tracejada. O teste sem defeito na bandagem de alta resistência é posto no gráfico com o objetivo de realizar uma comparação com o menor defeito simulado no modelo

desenvolvido, pois os valores devem aproximar-se à medida que o tamanho de defeito tende a zero. Tal comparação demonstra que os resultados estão de acordo com o esperado e mais próximos possíveis da realidade do teste experimental.

Segundo a Figura 4.28, os grupos com defeitos no comprimento de 400 mm, 500 mm e 600 mm apresentam resultados muito próximos de forma que tamanhos de defeitos com tais dimensões se comportam de forma semelhante para esse tamanho de riser.

A Tabela 4.5 agrupa os diferentes defeitos pelo comprimento pré-estabelecido e demonstra de forma prática e direta informações a respeito do comportamento estrutural do riser segundo o critério de falha adotado neste trabalho. Utilizando como exemplo o tamanho de defeito de 200 mm x 56,3 mm, que foi o defeito do teste experimental, pode-se observar, que o riser terá uma rigidez de 7,77 kN/mm até um deslocamento axial máximo de 20 mm ou aplicação de uma carga máxima compressiva de 155,38 KN sem sofrer falha por instabilidade radial mesmo com a formação de gaiola de passarinho que terá um deslocamento radial no defeito com altura de 24,97 mm.

A dimensão de largura do defeito pré-estabelecido não possui influência significativa, uma vez que os valores para cada grupo são muito próximos, existindo, no entanto, uma influência direta com o comprimento do defeito. A utilização da Tabela 4.5 está diretamente ligada à detecção de um defeito na bandagem de alta resistência do riser, no qual se faz uma medição no comprimento do defeito e através de uma análise simples tem-se o comportamento do riser quanto à instabilidade radial através da formação de gaiola de passarinho. Se o tamanho de defeito não estiver relacionado na tabela dos resultados apresentados, utiliza-se do modelo para buscar tais valores, ou seja, o modelo absorve qualquer tamanho de defeito desejado objetivando mensurar a instabilidade radial como um limitador de carga e deslocamento para o riser.

Segundo a Tabela 4.6, pode-se perceber que os valores extremos entre as rigidezas são justamente os defeitos de maior e menor comprimento pré-estabelecidos. Para a condição de defeito 600 mm x 112,6 mm fica visível que o mesmo possui uma rigidez aproximada de 5 vezes menor que a rigidez do riser sem defeito, isso demonstra o quanto o tamanho de defeito pode contribuir para o comportamento estrutural do duto flexível em análise. Já a condição de defeito de 25 mm x 56,3 mm demonstra praticamente uma equivalência entre as rigidezas, sendo aproximadamente apenas 1 vez menor que a rigidez do duto sem defeito. Isso demonstra que para tamanhos de defeitos nesta proporção, o duto não sofrerá uma mudança significativa em sua estrutura quanto à instabilidade radial devido à formação da gaiola de passarinho.

5 CONCLUSÕES

Baseado no trabalho desenvolvido é possível concluir que:

- ✓ O modelo trouxe resultados satisfatórios quando comparado com os testes em escala real.
- ✓ Quanto à rigidez do duto flexível de parede lisa com defeito na bandagem de alta resistência, a instabilidade radial não é um critério de falha, mas sim um limitador para aplicação da carga compressiva, ou seja, a formação da gaiola de passarinho é permitida até um determinado nível de deslocamento.
- ✓ A variação do tamanho de defeito na bandagem de alta resistência dos dutos flexíveis de paredes lisas sujeitos às cargas compressivas influencia na instabilidade radial, podendo alterar a rigidez em torno de cinco vezes.
- ✓ A variação na rigidez do *riser* está diretamente ligada às dimensões do defeito, mais especificamente ao comprimento do defeito, sem muita dependência quando a largura do defeito.
- ✓ Os grupos de teste com comprimento de defeito de 25 mm apresentaram os melhores resultados se comparados aos demais grupos, obtendo maior rigidez, suportando maiores deslocamentos axiais antes da instabilidade radial, gerando menores alturas de gaiola de passarinho e também suportando as maiores cargas compressivas aplicadas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Segundo análise dos resultados obtidos baseado nos testes do modelo desenvolvido em elementos finitos e calibrado através de ensaios experimentais pode-se sugerir como trabalhos futuros:

- ✓ Após análise dos dados fica visível que as variações dos resultados se devem ao comprimento do defeito e não à largura, portanto seria interessante aumentar a quantidade de pontos a serem analisados baseados no comprimento do defeito.
- ✓ A condição 25 mm x 112,6 mm apresentou flambagem lateral, portanto como forma de complementação a este trabalho seria interessante uma análise da flambagem lateral que também é considerada uma instabilidade do duto flexível, podendo a ser desenvolvido um novo critério de falha.
- ✓ A análise deste trabalho se limitou a instabilidade radial como um critério de falha para a variação de rigidez do riser estudado. Seria interessante uma análise específica após este limite, no qual deformações plásticas, encruamento, tensões residuais, entre outros devem ser compreendidas.
- ✓ Sendo a instabilidade radial não considerada um critério de falha, mas sim um limitador para aplicação da carga compressiva ou deslocamento axial, seria interessante uma análise da fadiga dos arames no qual ocorre à gaiola de passarinho.
- ✓ O modelo está desenvolvido para análise em risers com parede lisa e diâmetro de 6 polegadas. Seria interessante adaptar o mesmo para diferentes diâmetros e variações das camadas que compõe o duto flexível.
- ✓ Uma análise do comportamento das tensões na gaiola de passarinho seria uma sugestão para mensurar o comportamento estrutural das armaduras de tração.
- ✓ Realizar ensaios com a amostra curvada de forma a verificar o comportamento quanto à instabilidade radial ou lateral.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas <<http://www.abntcatalogo.com.br/>>
Acesso em maio de 2013.

ABAQUS theory and user's manual, version 6.8. Pawtucket, RI, USA: Hibbitt, Karlsson and Sorensen. Inc.; 2001.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 17B**. Recommended practice for flexible pipe. 2nd ed. Washington: American Petroleum Institute; 1998.

BRAGA, M. J. P. **Instabilidade de Armaduras de Tração de Linhas Flexíveis**. Tese. COPPE: UFRJ, 2003.

CARNEVAL R. A; MARINHO M. G, **Flexible Line Inspection**, The European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT) - poster 106, 2006.

COSTA, C. H. O. **Correlação Analítico - Experimental de Risers Flexíveis Submetidos a Cargas Radiais**. Dissertação. COPPE: UFRJ, 2003.

CRUZ, F. T. L. **Análise Estrutural de Risers Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos**, Dissertação. Escola Politécnica, USP, 1996.

CUSTÓDIO, A. B. **Modelagem Numérica do Comportamento Axissimétrico de Cabos Umbilicais Submarinos**. Dissertação. COPPE: UFRJ, 1999.

CUSTÓDIO, A. B. **Modelo Analítico para Avaliação de Instabilidade nas Armaduras de Dutos Flexíveis**. Tese. COPPE: UFRJ, 2005.

MARANHÃO, F. A. F. Estudo Comparativo entre Modelos na Análise Local de Tubos Flexíveis. Dissertação. Escola Politécnica, USP, 2011.

MEDINA, A. R. **Análise Estrutural Viscoelástica Axissimétrica de Dutos Flexíveis**. Dissertação. COPPE: UFRJ, 2008.

PARLOC 2001: **The Update of Loss of Containment Data for Offshore Pipelines**, 5th ed. London: Energy Institute, 2003.

Petrobras < <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/nossa-historia/>> Acesso em maio de 2013.

Picksley, J.W., Kavanagh, K., Gamham, S. and Turner, D. **Managing the Integrity of Flexible Pipe Field Systems: Industry Guidelines and their Application**, OTC 14064, Offshore Technology Conference, 2002.

RIZZO, N. A. S. **Análise da Instabilidade das Armaduras de Dutos Flexíveis pelo Método de Elementos Finitos**. Dissertação. COPPE: UFRJ, 2010.

SOUSA, J. R. M. **Análise Numérica de Risers Flexíveis** Dissertação. COPPE: UFRJ, 1999.

SOUSA, J. R. M. **Análise Local de linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos** Tese. COPPE: UFRJ, 2005.

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

UKOOA, **State of the Art Flexible Riser Integrity Issues**, prepared by MCS, under the auspices of Oil & Gas UK, 2001.

VAZ, M.A; RIZZO, N.A.S. **A finite element model for flexible pipe armor wire instability**, Marine Structures; 24, 3; 275-291, ISSN: 0951-8339, 2011.

YONG BAI; QIANG BAI, **Subsea pipeline and risers**. Part IV: **Riser Engineering**. Chapter 31- Integrity Management of Flexibles and Umbilicals.

ANEXOS

A Figura A.1 apresenta os dados de entrada e saídas das Equações 2.1 a 2.8, no qual faz analogia entre grelhas e cascas para o cálculo da armadura de pressão.

Figura A.1: Dados de entrada e saída para a analogia entre grelha e casca ortotrópica.

| Dados de Entrada | | | | |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|---------------|
| Notação | L_p | n_{ar} | A | ν |
| Descrição | Passo da camada (mm) | Nro. Arames da Camada | Área do Perfil (mm^2) | Coef. Poisson |
| Valor | 14,57 | 1 | 74,99 | 0,3 |
| | | | | |
| Notação | h | I_x | E | |
| Descrição | Espessura do Perfil (mm) | Menor Momento de Inércia do Perfil (mm^4) | Módulo de Elasticidade do Material (Mpa) | |
| Valor | 8 | 203,81 | 205000 | |
| | | | | |
| Valores Calculados | | | | |
| Notação | K | I_{eq} | | |
| Descrição | Fator de Compacidade | Momento de Inércia Equivalente (mm^4) | | |
| Valor | 0,298344897 | 60,80567355 | | |
| | | | | |
| Dados de Saída | | | | |
| Notação | h_{casca} | E_z | | |
| Descrição | Espessura da Casca (mm) | Módulo de Elasticidade da casca (MPa) | | |
| Valor | 3,119327673 | 338249,1118 | | |