Estudos Tecnológicos em Engenharia, 10(1):24-34, janeiro-junho 2014
© 2014 by Unisinos - doi: 10.4013/ete.2014.101.03

Instabilidade radial em dutos flexíveis com defeitos na bandagem de alta resistência sujeitos a cargas axiais compressivas

Radial instability of flexible pipes with defects in the high resistance bandage submitted to axial compressive loads

Otaviano Luis Talgatti[1], Telmo Roberto Strohaecker[1], Amauri Mosquen[1], Marcelo Favaro Borges[1], Cristian Nunes[1], Otávio de Oliveira Pinto[1], Tayron Zilli Stapasolla[1]
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
otaltti@gmail.com, telmo@demet.ufrgs.br, amauri.mosquen@gmail.com, marcelofavaro@gmail.com, cristian.lamef@gmail.com, otavio.pnt@gmail.com, tayron000@gmail.com

Resumo: O *riser* flexível é composto por várias camadas estruturais, as quais geram, em conjunto, características de resistência, estanqueidade e flexibilidade desejadas tanto em sua instalação quanto em sua operação. Em relação à resistência mecânica, a estrutura desses dutos flexíveis deve suportar os mais variados tipos de solicitações atuantes de forma combinada ou isolada. Uma das formas isoladas de solicitação é a compressão axial, a qual é responsável pela instabilidade radial do duto flexível. A instabilidade radial ocorre principalmente quando o *riser* apresenta danos na bandagem externa, a qual é responsável pela resistência às deformações radiais. Esse dano na bandagem é gerado devido à logística de lançamento, defeitos de projeto ou materiais, carregamentos excessivos ou quedas. Os danos na bandagem externa do duto, juntamente com a carga axial compressiva podem levar o *riser* a falhas catastróficas devido às deformações radiais, também conhecidas por gaiola de passarinho (*birdcaging*), gerando, assim, uma complexa análise local para a busca de soluções capazes de prever o comportamento do *riser*. Portanto, este estudo objetiva mensurar o tamanho do defeito na bandagem externa de *risers* flexíveis sujeitos a cargas compressivas que levam à geração da gaiola de passarinho e, por consequência, à perda de rigidez do duto. As medidas serão realizadas através de um modelo tridimensional em elementos finitos desenvolvido no *software* de simulação Abaqus e de testes em escala real nos equipamentos de teste do LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física), de forma a validar o modelo.

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

Abstract: Flexible risers comprise multiple structural layers, which combined lead to characteristics of resistance, airtightness and desired flexibility, both for their installation and operation. Regarding mechanical strength, flexible riser structure must withstand several kinds of loads acting together or isolatedly. Within this context, axial compression acting individually is responsible for radial instability of the flexible pipe. Radial instability occurs mainly when the flexible pipe presents damage on the outer layer, which is responsible for radial strain resistance. Radial instability occurs mainly when the flexible pipe presents damage on the outer layer, which is responsible for radial strain resistance. This damage on the external bandage occurs due to launching procedures, project or material failures, excessive loading or possible falling. Damages on the external bandage layer together with the axial compressive load may lead to catastrophic failures due to radial strains, also known as birdcaging, thereby leading to a complex local analysis in the search for solutions capable of predicting riser behavior. Therefore, this study intends to measure the size of the defects in the external bandage of flexible risers subjected to compressive loads that lead to birdcage formation which consequently reduces pipe stiffness. The measurements were performed using a finite element method developed in the Abaqus FEM software and the compression tests in full scale were performed using LAMEF facilities to validate the model.

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

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Avenida Paulo Gama, 110, Farropilhas, 90040-060, Porto Alegre, RS, Brasil

Introdução

A extração do petróleo ocorrendo em lâminas de água cada vez mais profundas demanda investimentos de forma contínua na área de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias capazes de atender os novos desafios impostos ao longo dos anos. Esses desafios podem ser diretamente aplicados quando se trata das linhas flexíveis dinâmicas responsáveis pelo transporte de substâncias em alto mar. O projeto das linhas flexíveis dinâmicas ainda não está totalmente entendido. Isso se deve à alta complexidade que as inúmeras variáveis podem gerar pelo envolvimento das mais variadas áreas da engenharia e à existência de inúmeros possíveis mecanismos de falhas que podem ocorrer.

As solicitações, agindo de forma isolada ou em conjunto, podem gerar instabilidade nos dutos flexíveis. Um caso local de instabilidade ocorre devido às cargas compressivas atuarem de forma extrema, gerando assim flambagem radial (gaiola de passarinho). Tal flambagem pode 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 (Custódio, 2005).

As cargas compressivas aplicadas axialmente aos dutos induzem 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 na linha flexível, sendo considerado um critério de falha para o duto conforme a Figura 1. Essa resistência ao movimento radial é desenvolvida pela camada externa e fita *anti-birdcaging* subsequente, ambas localizadas após a armadura externa de tração conforme detalhado na Figura 2. A forma mais observada de flambagem radial surge quando as camadas externas à armadura de tração são danificadas. A relação entre a carga compressiva e o tamanho de defeito na bandagem de alta resistência forma o defeito denominado gaiola de passarinho, que é o foco deste trabalho.

Figura 1. Aspecto dos arames da armadura de tração de uma linha flexível que apresentou falha por formação de "gaiola de passarinho" (Bectarte e Coutarel, 2004).
Figure 1. Aspect of the tensile armour wires submitted to *birdcaging* (Bectarte e Coutarel, 2004).

Linhas flexíveis de camadas não aderentes

As linhas flexíveis de parede lisa são utilizadas para transporte de substâncias que não possuem gases, evitando assim sua difusão através da camada polimérica mais interna, que está em contato direto com a substância em transporte. A Figura 2 demonstra o detalhamento das camadas de um duto flexível de parede lisa (da mais interna para a mais externa), a saber: 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. Detalhamento das camadas de um duto com parede lisa.
Figure 2. Layer specifications in a smooth wall pipe.

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 a rigidez da linha sobre compressão. Essa instabilidade radial no duto pode ser um critério de falha para sua substituição, dependendo de sua intensidade.

Figura 3. Defeito na bandagem de alta resistência gerado durante a instalação da linha flexível (Picksley, 2002).
Figure 3. Bandage defect occurred during flexible riser installation (Picksley, 2002).

Revisão bibliográfica

Para o desenvolvimento do presente trabalho, são 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 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 surgimento do efeito de gaiola de passarinho de forma controlada sem perda de rigidez.

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

Os modelos existentes na literatura seguem algumas teorias, tais como: as vigas curvas de Clebsch-Kirchhoff; tubos de parede espessa da teoria de Lamé; comportamento linear viscoelástico e as equações de continuidade e equilíbrio ou ambas as teorias aplicadas para o mesmo duto flexível de paredes não aderentes.

A Figura 3 demonstra o defeito registrado na bandagem de alta resistência do duto flexí-

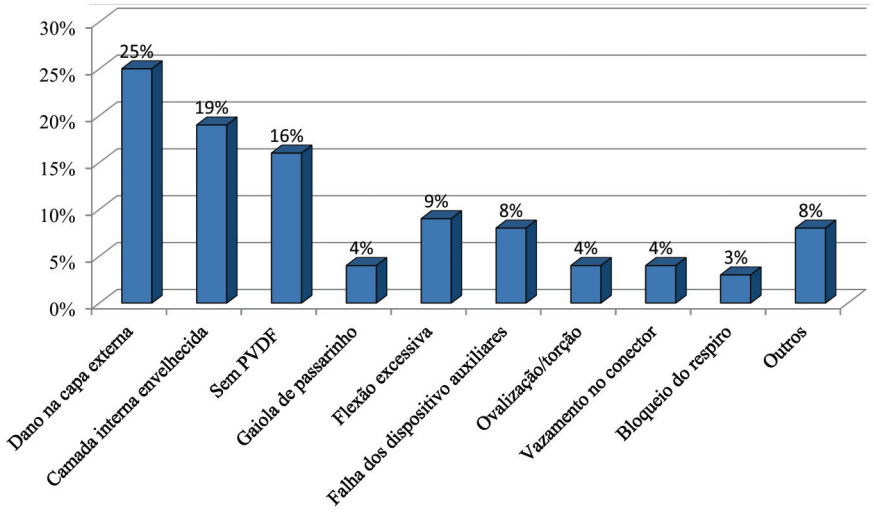

Figura 4. Comparativo entre os sistemas de Danos e Mecanismos de falha para os dutos flexíveis (Ukooa, 2001).
Figure 4. Frequency comparison between most usual failure mechanisms for flexible pipes (Ukooa, 2001).

vel no momento de sua instalação ou operação em alto-mar. As inspeções das linhas, com o objetivo de detectar defeitos na bandagem de alta resistência, são de extrema importância. Porém, há escassez de informações em relação às medidas a serem tomadas após sua detecção, sendo assim, uma das motivações para o desenvolvimento deste trabalho, uma vez que este relaciona 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. Os danos e os mecanismos de falha para dutos flexíveis podem ser vistos na Figura 4.

Os tópicos específicos abordados neste trabalho envolvem a relação direta entre danos na bandagem de alta resistência e, por consequência, a formação de gaiola de passarinho. Portanto, a partir da análise da Figura 4, pode-se perceber que a maior parte, ou seja, 25% dos casos estão relacionadas com danos na bandagem de alta resistência dos dutos flexíveis enquanto falhas por *birdcaging* representam 4%. 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 para que o defeito não acarrete a falha do duto.

Materiais e métodos

Para a calibração do modelo 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; duto com dano na capa e duto com dano nas bandagens de alta resistência.

Os ensaios foram realizados na bancada de testes do LAMEF (Figura 5), a qual possui capacidade de carga de 500 tonf em testes estáticos.

Descrição dos testes

Foram realizados quatro testes de compressão variando alguns fatores pré-estabelecidos. A Tabela 1 demonstra a sequência de testes e suas respectivas condições. Tais dados foram utilizados para o desenvolvimento e a calibração do modelo em elementos finitos.

Metodologia dos ensaios

A sequência dos testes segue o planejado conforme a Tabela 1. A lógica adotada para a realização dos testes segue os passos:

- 1° passo - Montar a amostra na bancada de testes de compressão;
- 2° passo - Inspeção visual e dimensional da amostra;
- 3° passo - Aplicação de uma carga de compressão na amostra para determinar sua rigidez

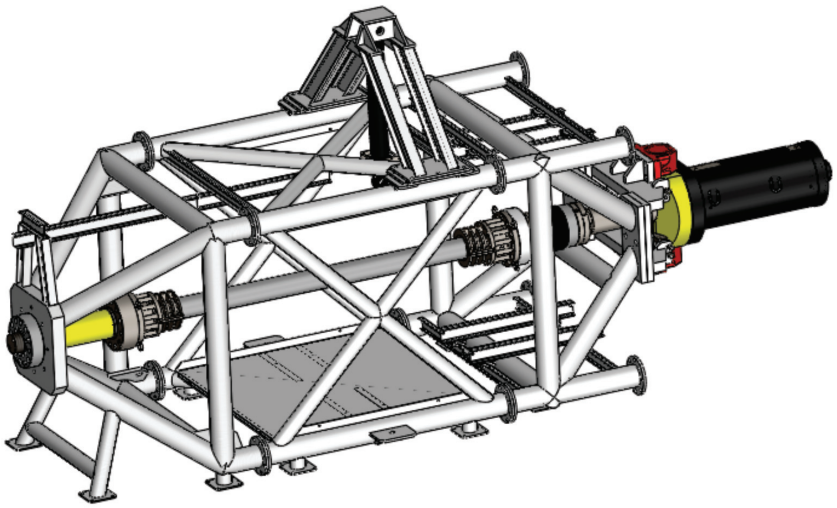

Figura 5. Configuração completa utilizada nos testes de compressão.
Figure 5. Full-scale test rig setup for compression test.

Tabela 1. Planejamento dos testes de compressão axial.
Table 1. Axial compressive tests planning.

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

axial. Contração de 0,7% do comprimento livre. Um teste com amostra livre para girar e, em seguida, com a amostra impedida de girar;

• 4° passo - Remoção da bandagem de alta resistência no centro da amostra correspondente às dimensões especificadas de 200 mm x 56,3 mm;

• 5° passo - Remoção completa da bandagem (fita *anti-birdcaging*) exposta no quarto passo;

• 6° passo - Aplicação de uma carga de compressão, prolongando a contração até 1,7% do comprimento livre, com a amostra livre para girar e, posteriormente, com a amostra impedida de girar.

Resultados dos testes

Seguem descritos a seguir os resultados obtidos nos testes, junto às observações pertinentes.

Testes de compressão 1 e 2

A Figura 6 apresenta a relação entre "Força x Deslocamento" para os testes 1 e 2.

Nenhuma anomalia foi verificada nos testes 1 e 2. A Figura 7 demonstra a amostra posicionada na bancada para a realização do teste. A Figura 8 demonstra o detalhe do corte na capa com as dimensões de 200 mm x 56,3 mm aplicado na parte central da amostra.

Testes de compressão 3 e 4

A Figura 9 traz a imagem da amostra na bancada. A Figura 10 apresenta a relação entre "Força x Deslocamento" para os testes 3 e 4.

Durante os testes 3 e 4, com deformação de 1,7%, a expansão radial foi bastante pronunciada, provocando o rasgamento da capa nos cantos do defeito induzido. A expansão no

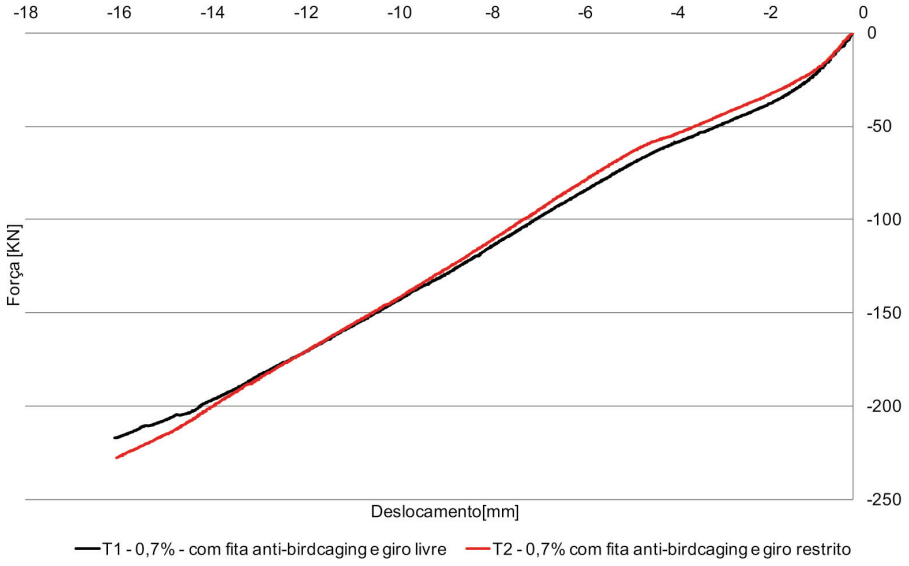

Figura 6. Gráfico de força x deslocamento para os testes 1 e 2.
Figure 6. Load x displacement graphic for tests 1 and 2.

Figura 7. Amostra posicionada na bancada nos testes 1 e 2.
Figure 7. Sample position during tests 1 and 2.

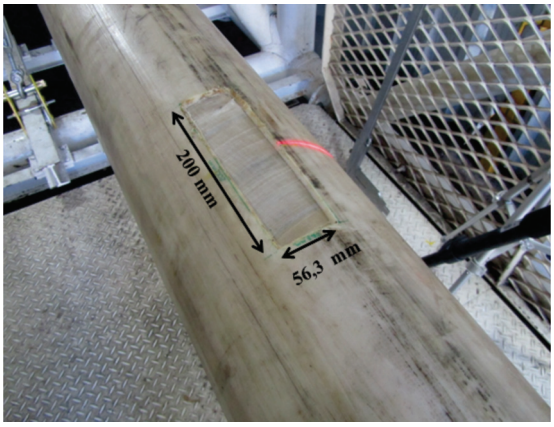

Figura 8. Detalhe da região com capa cortada (testes 1 e 2).
Figure 8. Bandage cut detail for tests 1 and 2.

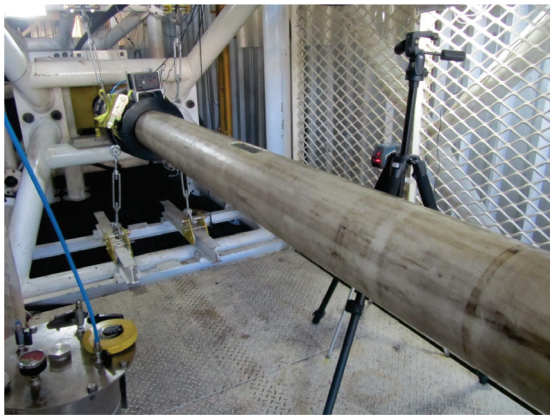

Figura 9. Posicionamento da amostra na bancada durante os testes 3 e 4
Figure 9. Sample position during tests 3 and 4.

teste com giro restrito foi superior àquela observada no teste com giro livre. O grande espaçamento entre arames permitiu a medição da altura da gaiola com relação à superfície base da armadura. A Figura 11 mostra a condição da amostra durante o teste 3.

Desenvolvimento 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 diversas amostras. Tem-se, ainda, a praticidade de obtenção dos resultados de forma rápida e precisa, além do baixo investimento financeiro em relação aos testes experimentais.

Para a validação do modelo, foi realizado um teste prático em escala real do *riser* com um tamanho de defeito proposital na bandagem de alta resistência. Com os resultados do ensaio experimental, mais especificamente o levantamento da rigidez da amostra em diferentes condições de teste, foi feita uma comparação com os resultados obtidos no modelo em elementos finitos. Cabe ressaltar que o modelo desenvolvido é tridimensional, empregando as dimensões da amostra experimental, de forma que este reproduz condições de um ensaio em escala real.

Com o modelo validado, variações nos tamanhos de defeitos na bandagem de alta resistência foram aplicadas, de forma que, para cada condição, gráficos fossem gerados e registrados para, no final dos testes, construir curvas que representassem o propósito deste trabalho.

O desenvolvimento do modelo não linear em elementos finitos será relatado a seguir de acordo com as camadas existentes no *riser* em análise. A Figura 12 demonstra globalmente o modelo tridimensional com vista isométrica, vista frontal e detalhe do defeito aplicado.

O modelo é capaz de englobar todas as camadas da linha flexível e suas interações, tais como: carregamento desejado, folgas existentes, possíveis condições de contorno e no caso específico, mudanças no tamanho de defeito.

Para o desenvolvimento do modelo, baseado na literatura analisada, utiliza-se atrito interno desprezível e pressão externa não atuante como uma resistência às deformações radiais dos arames.

Para o desenvolvimento do modelo composto por camadas com características constru-

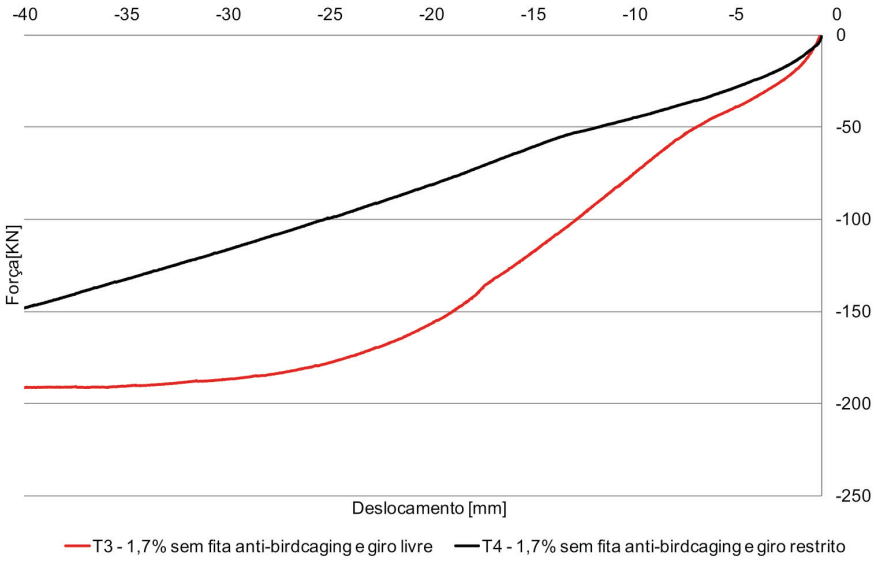

Figura 10. Gráfico de força x deslocamento para os testes 3 e 4.
Figure 10. Load x Displacement graphic for tests 3 and 4.

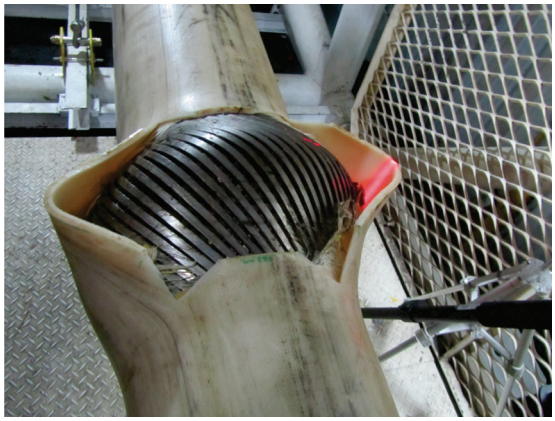

Figura 11. Formação da gaiola de passarinho - Teste 3.
Figure 11. Birdcaging formation for test 3.

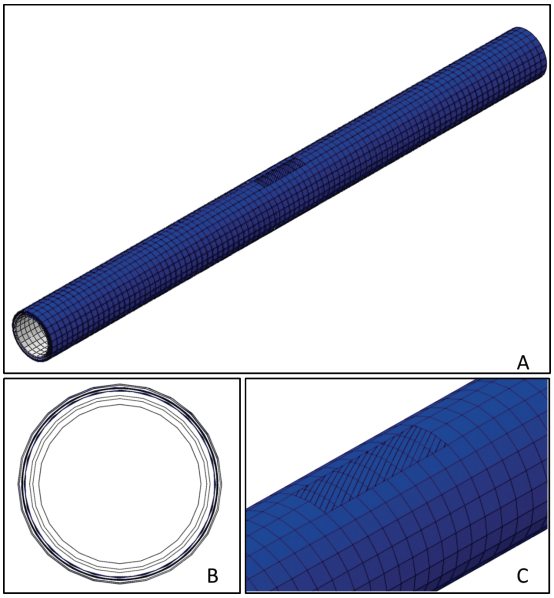

Figura 12. Modelo tridimensional com vista isométrica (A), frontal(B) e detalhe do defeito aplicado (A).
Figure 12. Three-dimensional model with isometric view (A), frontal view(B), and defect view (C).

tivas 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 na direção da espessura podem ser desconsideradas. Para utilização de elementos de cascas, é necessário informar a espessura da casca e o material utilizado.

As armaduras de tração são construídas com elementos de cascas 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 são danificadas com a formação da gaiola de passarinho desejada. Assim, essas camadas são tratadas de forma fidedigna para manter os resultados mais próximos possíveis do teste experimental.

As camadas poliméricas são constituídas com elementos de cascas isotrópicos e presen-

tes no modelo no formato tubular, inclusive a bandagem *anti-birdcaging*, a qual possui equivalência com as propriedades reais do material.

A armadura de pressão (camada zeta), devido ao seu formato diferenciado, é tratada segundo analogia entre grelhas e cascas ortotrópicas proposta por Timoshenko e Woinowsky-Krieger (1959).

Validação do modelo

A validação do modelo consiste na relação entre a rigidez do ensaio experimental e a rigidez 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, os quais possuem as mesmas condições tanto geométricas como estruturais.

Rigidez do riser sem defeito na bandagem de alta resistência

A Figura 13 apresenta a relação entre a rigidez do teste experimental e a rigidez do modelo desenvolvido em elementos finitos para o duto flexível sem defeito na bandagem de alta resistência.

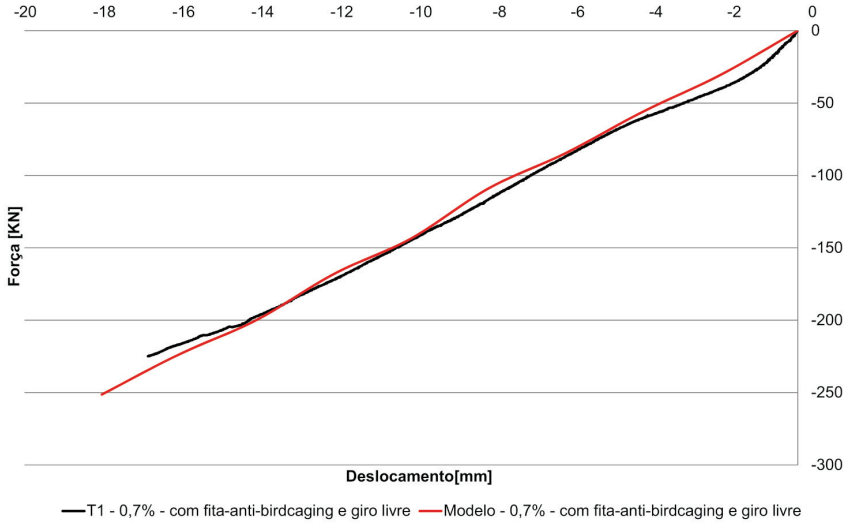

Figura 13. Relação entre as rigidezas do teste experimental e do modelo desenvolvido.
Figure 13. Relationship between test stiffness and finite element model stiffness.

Tabela 2. Relação entre o teste experimental e o modelo desenvolvido.
Table 2. Relationship between the experimental test and the developed model.

Medições - Posições	Teste Experimental	Simulação Elementos Finitos	Diferença (%)
Diâmetro (mm) – 0º	218,00	216,00	0,92%
Diâmetro (mm) – 90º	218,50	216,20	1,05%
Perímetro (mm)	686,00	679,21	0,99%
Comprimento livre (mm)	2388,00	2388,00	0,00%

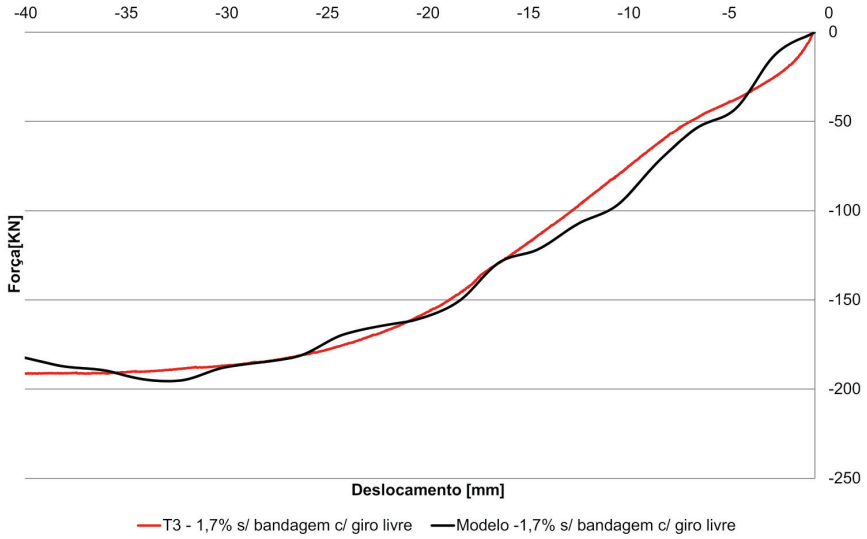

Figura 14. Relação entre as rigidezas do teste experimental e do modelo desenvolvido.
Figure 14. Relationship between experimental test stiffness and finite element model stiffness.

Diâmetro do riser sem defeito na bandagem de alta resistência

Um ponto importante, para a calibração do modelo, é o comportamento radial antes da realização do defeito no *kevlar* (*anti-birdcaging*). Desta forma, a Tabela 2 demonstra a relação entre o diâmetro do teste experimental e o diâmetro do modelo desenvolvido em elementos finitos no ponto máximo de deformação, como previsto (0,7%).

Rigidez do riser com defeito na bandagem de alta resistência

A Figura 14 apresenta a relação entre a rigidez do teste experimental e a rigidez do modelo desenvolvido em elementos finitos para o duto flexível com defeito proposital na bandagem de alta resistência. O tamanho de defeito possui comprimento de 200 mm e largura de 56,3 mm.

A Figura 15 demonstra, de forma isométrica, o estado final da amostra após a aplicação do deslocamento prescrito, segundo teste experimental.

Altura radial da gaiola de passarinho do riser com defeito

A Tabela 3 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 %).

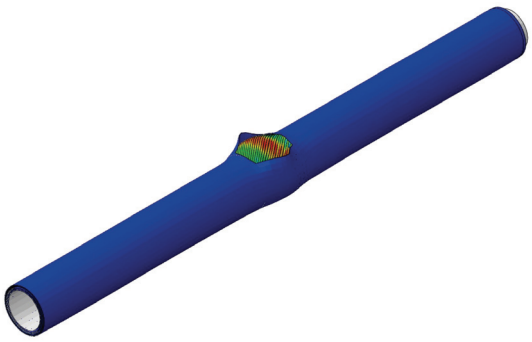

Figura 15. Estado final da amostra após aplicação do deslocamento prescrito segundo teste experimental.
Figure 15. Sample final appearance after applying the prescribed displacement according to the experimental test.

Inspeção visual comparativa

A Figura 16 demonstra a relação visual entre a gaiola do teste experimental em relação à gaiola do modelo desenvolvido em elementos finitos.

Segundo os gráficos e as tabelas acima, pode-se verificar uma pequena variação, mas sem interferência significativa.

Conclusões

• O modelo desenvolvido satisfaz as equivalências em relação ao teste experimental para as dimensões de defeito 200 mm x 56,3 mm;

Tabela 3. Relação entre as alturas das gaiolas de passarinho do teste experimental e do modelo.
Table 3. Relation between the birdcaging height of the experimental test and the model.

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

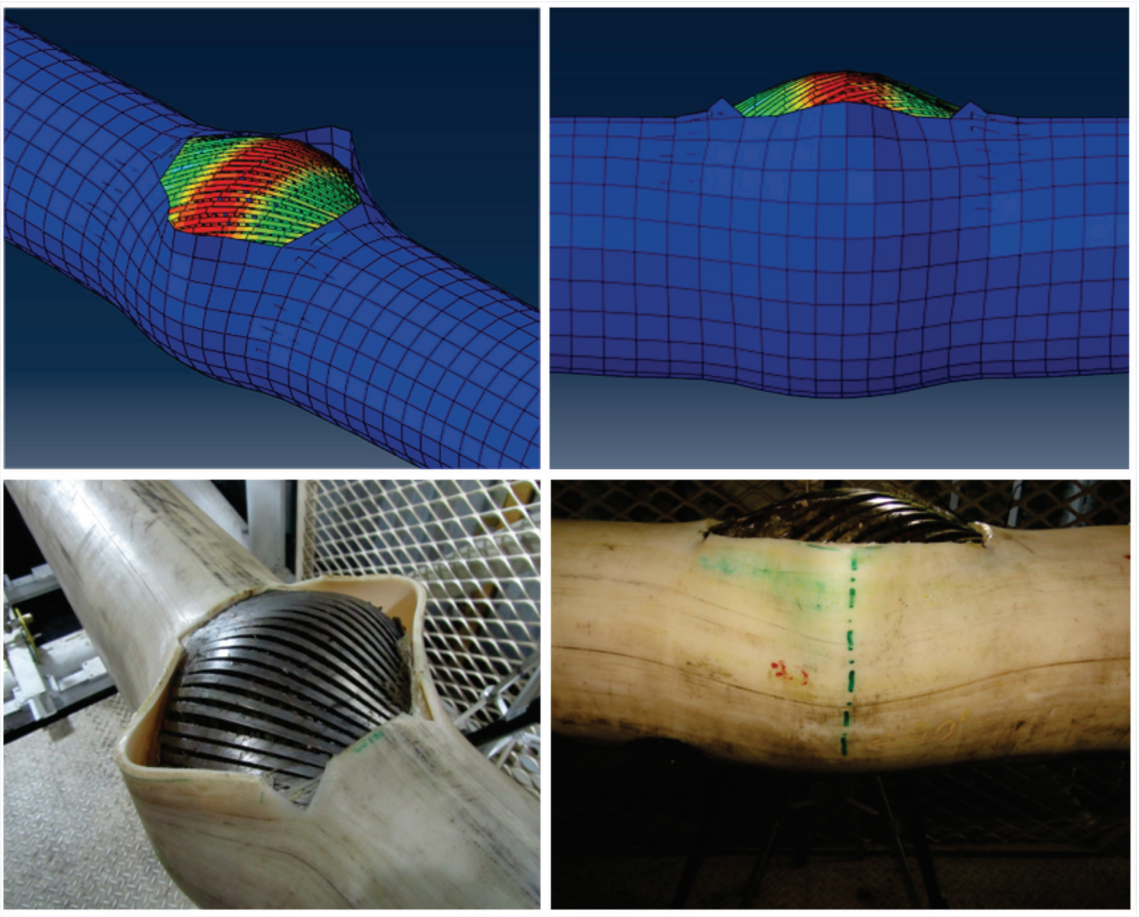

Figura 16. Relação visual entre os resultados experimentais e teóricos quanto à formação da gaiola de passarinho desenvolvida.
Figure 16. Visual relationship between the experimental and the theoretical results related to *birdcaging* formation.

• A metodologia adotada para desenvolvimento e validação do modelo, quanto á instabilidade radial do *riser*, demonstrou ser eficiente;

• O modelo poderá ser utilizado para mensurar as rigidezas com variações do tamanho de defeito no *riser* em análise;

• A restrição no giro, segundo os testes 1 e 2, demonstrou não alterar os resultados quanto ao levantamento da rigidez do *riser*;

• Após a geração da gaiola de passarinho, a rigidez do teste subsequente demonstra mudanças significativas segundo os testes 3 e 4.

Referências

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

BECTARTE, F., COUTAREL, A. 2004. Instability of Tensile Armour Layers of Flexible Pipes Under External Pressure. *In:* Proceedings of the OMAE2004 Conference, 51352, Vancouver, 2004. *Anais…* **3:**155-161.

CUSTÓDIO, A.B. 2005. *Modelo Analítico para Avaliação de Instabilidade nas Armaduras de Dutos Flexíveis.* Rio de Janeiro. RJ. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 167 p.

PICKSLEY, J.W., KAVANAGH, K., GAMHAM, S. TURNER, D. 2002. Managing the Integrity of Flexible Pipe Field Systems: Industry Guidelines and their Application. *In:* Offshore Technology Conference, Houston, 2002. *Anais…* http://dx.doi.org/10.4043/14064-MS

TIMOSHENKO, S.P.; WOINOWSKY-KRIEGER, S., 1959, *Theory of Plates and Shells*. 2ª ed., Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 580 p.

UKOOA, 2001. *State of the Art Flexible Riser Integrity Issues*, prepared by MCS, under the auspices of Oil & Gas UK, 40 p. Disponível em: http://www.hse.gov.uk/pipelines/seminar08/03-technologyinitiatives.pdf. Acesso em 01/08/2014.

Submissão: 10/08/2013
Aceite: 02/06/2014