

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Ensaio Experimental de um Duto Flexível Submetido a Cargas Axissimétricas.

AUTORES:

Héctor Edison Merino Muñoz
Carlos Magluta
Ney Roitman
José Renato Mendes de Sousa

INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Estruturas / COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

ENSAIO EXPERIMENTAL DE UM DUTO FLEXÍVEL SUBMETIDO A CARGAS AXISSIMÉTRICAS

Abstract

Dutos flexíveis são estruturas compostas constituídas de várias camadas metálicas e poliméricas concêntricas projetadas para resistir aos diferentes carregamentos que a estrutura está submetida durante sua vida útil. Em geral, as camadas poliméricas outorgam estanqueidade, isolamento e/ou atuam como componente anti-desgaste das camadas metálicas, enquanto estas resistem ao carregamento estrutural imposto. Neste estudo, um duto flexível de 4" é submetido a carregamentos de tração, torção horária e anti-horária, considerando duas condições de contorno, e os resultados obtidos são comparados aos resultados de um modelo analítico. Alguns aspectos destas respostas são discutidos tais como: o efeito da restrição ao alongamento ou rotação axial na seção extrema do duto. Os testes experimentais foram realizados na COPPE/UFRJ usando uma estrutura metálica capaz de aplicar simultaneamente carregamentos de tração e torção. Razoável concordância é observada entre os resultados indicando que nos ensaios de tração o duto analisado apresenta comportamento balanceado.

Introdução

A indústria do petróleo é uma das mais importantes no presente panorama econômico e seus insumos, os hidrocarbonetos, representam uma das maiores fontes de energia disponível na atualidade. Na procura por novos campos de petróleo e/ou gás, a indústria petrolífera está operando em águas cada vez mais profundas. Os sistemas de produção já trabalham em profundidades superiores a 2000 m, e, provavelmente, a tendência atual é que atinjam profundidades maiores nos próximos anos.

Com o aumento da profundidade de instalação das plataformas petrolíferas, também cresce a importância de alguns componentes estruturais como é o caso dos dutos de produção, os quais representam um dos maiores desafios tecnológicos da indústria do petróleo. Existem dois tipos de dutos para o transporte de fluidos na indústria petrolífera: os dutos estáticos ou *flowlines*, os quais são assentados no fundo do mar para escoar óleo e/ou gás do poço até o *manifold* e/ou para injetar água nos poços; e os dutos dinâmicos ou *risers*, que são amplamente empregados pela indústria de petróleo e gás no transporte de fluidos do fundo do mar até as unidades flutuantes de produção. É por esse motivo que os *risers* estão diretamente associados à viabilidade técnica e econômica do projeto.

Alguns autores apresentaram dados oriundos de ensaios experimentais de dutos flexíveis sob a ação de cargas axissimétricas como, por exemplo, os trabalhos de BECH *et al.* (1992), WITZ (1996) e RAMOS Jr. *et al.* (2008). Estes ensaios foram voltados para a avaliação do efeito de alguns parâmetros, tais como frequência, amplitude da carga e pressão interna, na resposta do duto flexível aos carregamentos axissimétricos de tração e torção. Neste trabalho os resultados obtidos experimentalmente em um *riser* flexível submetido a cargas de tração e torção são comparados com os resultados do modelo analítico de FERET & BOURNAZEL (1987) para a análise da resposta a carregamentos axissimétricos em duto flexível.

Metodologia

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



Figura 1 – Vista geral da Máquina Tração – Torção.

Descrição da instrumentação

A Figura 2 mostra um esquema da instrumentação utilizada, a qual constou basicamente dos sensores descritos a seguir.

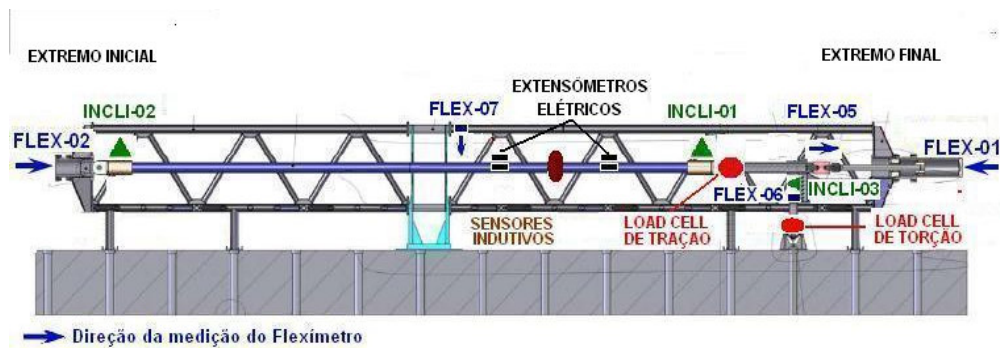


Figura 2 – Instrumentação utilizada no ensaio do duto flexível de 4".

Células de carga: Foram utilizadas duas células de carga calibradas previamente, para ter controle da tração e da torção aplicada no duto flexível.

Flexímetros elétricos: Para medir o deslocamento da estrutura foram utilizados dos flexímetros “Flex01” e “Flex02” um em cada extremo do equipamento (Figura 2). Adicionalmente foram utilizados dos flexímetros “Flex05” e “Flex06”, para medir o avanço dos eixos de tração e de torção (Figura 2).

Inclinômetros elétricos: Para medir a rotação axial do duto flexível com o aumento da carga, foram utilizados os inclinômetros “Inc01” e “Inc02” (Figura 2), os quais foram posicionados nos extremos do duto flexível.

Sensores indutivos: Para medir a variação radial da camada plástica externa, foram utilizados seis sensores sem contato, os quais foram montados em um anel metálico de forma hexagonal. Estes

sensores foram posicionados na parte central do duto com a finalidade de evitar qualquer perturbação associada aos conectores nas extremidades do duto (Figura 2)

Descrição dos testes realizados

Em todos os ensaios, os sinais dos sensores foram monitorados com uma frequência de aquisição de 5 Hz. O comprimento total do duto flexível (incluindo os conectores) foi de 10.0m e o comprimento efetivo (excluindo os conectores) foi de 8.9m. Foram realizados quatro tipos de ensaios. A Tabela 1 mostra os carregamentos e as condições de contorno consideradas no ensaio:

Tabela.1 – Tipos de Carregamento e Condições de Contorno.

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

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

(-) Sentido negativo de torção – horário

(+) Sentido positivo de torção – anti-horário

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

O carregamento de torção no duto flexível foi aplicado variando desde a posição zero até uma rotação máxima de $\approx 8^\circ$ tanto no sentido horário, quanto no sentido anti-horário. Três ciclos de carga foram aplicados com os extremos restritos axialmente.

Resultados e Discussão

Ensaio de tração

Foi feita a análise de tração, considerando os extremos livres à rotação axial, e as camadas livres ao deslizamento utilizando-se o modelo analítico de FERET & BOURNAZEL (1987) considerando algumas modificações feitas por BATISTA (1989). O valor obtido para a rigidez axial foi de 1454.25 kN m/m e os valores da rotação axial e a variação radial em relação ao alongamento foram de 0.66×10^{-2} grau m/m e 0.11×10^{-2} mm m/m, respectivamente.

A Figura 3 apresenta os resultados experimentais e analíticos do alongamento axial do duto flexível com respeito à força axial aplicada. Neste ensaio o extremo final do duto possuía rotação axial livre. A Figura 4 apresenta a mesma variação, mas, neste caso, o extremo final do duto é restrito à rotação axial.

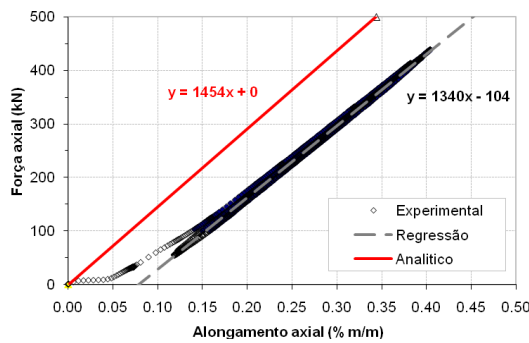


Figura 3 – Alongamento axial vs força axial aplicada no ensaio de tração com o extremo final livre à rotação axial.

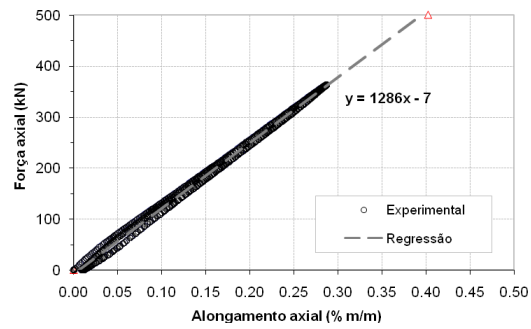


Figura 4 – Alongamento axial vs força axial aplicada: tração com o extremo final restrito à rotação axial.

A Figura 3 mostra que, depois da fase inicial de acomodação, o alongamento axial do duto varia linearmente com o carregamento de tração imposto. Também é possível observar que, durante as fases de carregamento ou descarregamento, não há modificação significativa na rigidez axial do duto. Uma função linear foi ajustada aos resultados experimentais, obtendo-se uma rigidez axial de 1340.00 kN m/m, a qual é 8% menor que os valores estimados pelo modelo analítico quando os extremos são livres à rotação axial (1454.25 kNm/m). A Figura 4 apresenta um comportamento similar, mas a acomodação inicial não foi observada. Nestes ensaios, o ajuste linear indica uma rigidez axial de 1286.00 kN m/m, a qual é 4% menor que a rigidez estimada nos ensaios experimentais com o extremo final livre à rotação axial.

As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, a rotação axial induzida (extremidade livre) e o torque necessário para manter o duto sem rotação. Na Figura 5, além dos resultados experimentais, mais três funções são apresentadas. Duas funções lineares que foram ajustadas aos dados experimentais após atingir um alongamento axial de 0.27 m/m; uma para a fase de carregamento e a outra para a fase do descarregamento. Além disso, a função obtida pelo modelo analítico também é apresentada. Na Figura 6 são apresentados os resultados experimentais e as funções ajustadas, as quais foram obtidas através do ajuste de funções lineares aos dados experimentais após atingir um alongamento axial de 0.20 m/m (uma para a carga e outra para a descarga).

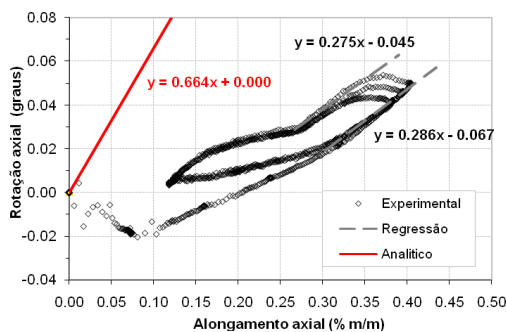


Figura 5 – Alongamento axial vs rotação axial: tração com o extremo final livre à rotação axial.

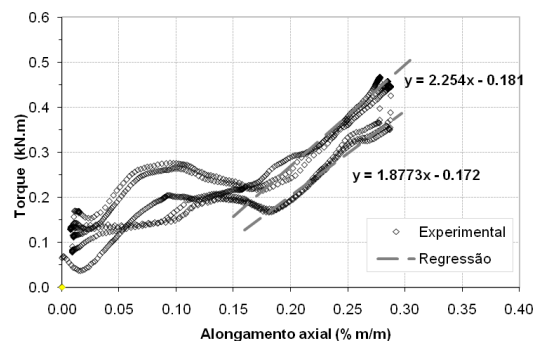


Figura 6 – Alongamento axial vs torque: tração com o extremo final restrito à rotação axial

As medidas experimentais das rotações axiais, apresentadas na Figura 6, sugerem que algum tipo de não linearidade ocorre na fase inicial de carregamento do duto. Isso pode ser explicado pela flexão inicial do duto devido a seu peso próprio, ou devido a uma pequena adesão que pode existir entre as camadas. O valor obtido para a relação entre a rotação axial e o alongamento (em média) depois da fase de acomodação é 2.4 vezes menor que o modelo analítico (0.66 grau m/m) quando os extremos são livres à rotação axial. Este alto valor é atingido quando uma força axial significativa é imposta e, conseqüentemente, um possível atrito interno do duto é superado.

As Figuras 7 e 8 ilustram a variação do deslocamento radial do duto com o alongamento axial para os casos no qual o extremo final está livre e restrito à rotação axial, respectivamente.

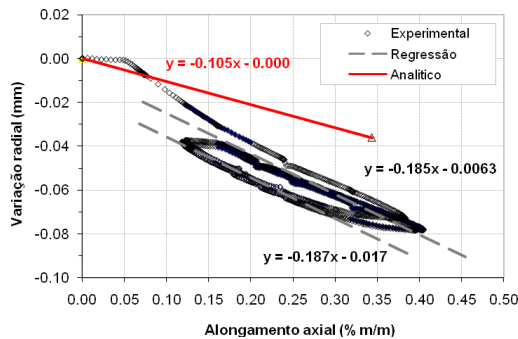


Figura 7 – Alongamento axial vs variação radial: tração com o extremo final livre à rotação axial.

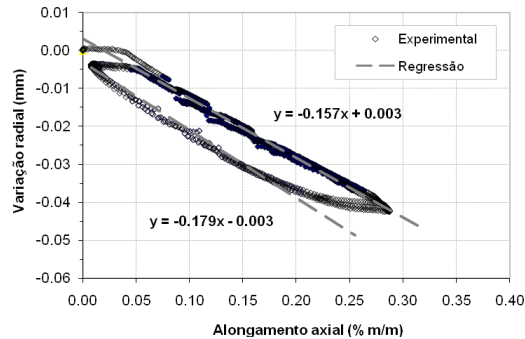


Figura 8 – Alongamento axial vs variação radial: tração com o extremo final restrito à rotação axial.

Os resultados apresentados nestas figuras mostram um mesmo tipo de comportamento. Existe uma fase de acomodação inicial do duto seguida por uma variação linear entre a contração radial e o alongamento axial. Quando a carga é invertida, é apresentada novamente uma fase inicial de acomodação e, após isso, o deslocamento radial tende a apresentar um comportamento linear em relação ao alongamento axial. As funções lineares ajustadas aos resultados experimentais apresentados nas Figuras 7 e 8 conduzem a valores médios em torno de -18.6 mm, e -16.8 mm, respectivamente. Estes resultados indicam que a restrição à rotação axial apresenta pouca influência nos deslocamentos radiais no duto. O valor obtido experimentalmente é aproximadamente 1.7 maior (extremidade livre à rotação axial) que aqueles obtidos no modelo analítico (-10.51 mm m/m).

Ensaio de torção

Também foram realizadas análises aplicando-se uma torção no sentido horário e anti-horário utilizando o modelo analítico, considerando os extremos livres ao deslocamento axial, e as camadas livres ao deslizamento. O valor obtido na simulação de torção horária para a rigidez torsional foi de 6.438 kN m²/grau e os valores do alongamento e a variação radial em relação à rotação axial foram de 0.030 x 10⁻² m/grau e 0.039 mm m/grau, respectivamente. O valor obtido na simulação de torção anti-horária para a rigidez torsional foi de 3.217 kN m²/grau e os valores do alongamento e a variação radial em relação à rotação axial foram de -0.043 x 10⁻² m/grau e 0.13 mm m/grau, respectivamente.

Nos ensaios experimentais de torção horária e anti-horária, foi aplicado uma pré-carga inicial no duto de aproximadamente 100 kN, necessária para manter o duto esticado na posição horizontal.

A Figuras 9 e 10 apresentam os resultados experimentais da rotação axial do duto com respeito ao momento de torção aplicado nos ensaios de torção horária e anti-horária, respectivamente, e com o extremo final restrito ao deslocamento axial. Nessas figuras, é apresentada a resposta considerando o nível de pré-tração inicial (100kN, aproximadamente).

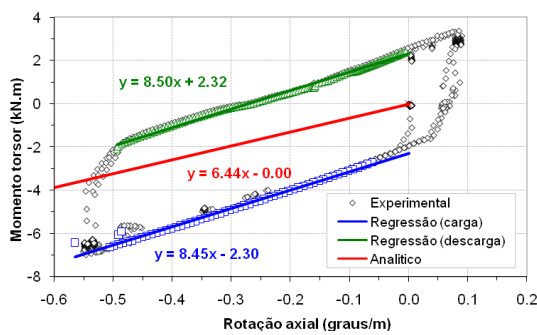


Figura 9 – Rotação axial vs momento de torção aplicado no ensaio de torção horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.

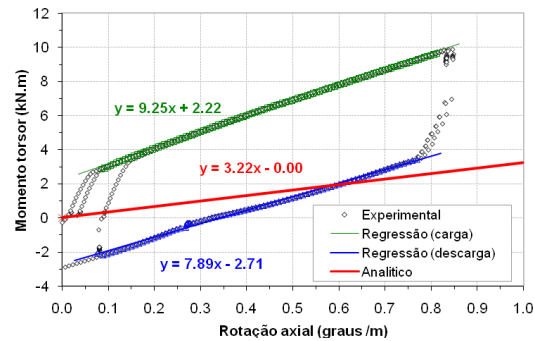


Figura 10 – Rotação axial vs momento de torção aplicado: torção anti-horária com o extremo final restrito ao deslocamento axial.

Os resultados apresentados na Figura 9 mostram que durante as fases de carregamento ou descarregamento, não há modificação significativa na rigidez à torção do duto, funções lineares foram ajustadas aos resultados experimentais, tanto na fase de carregamento como na de descarregamento. Pode-se observar que os valores das rigidezes à torção horária obtidas experimentalmente são em média 1.3 vezes maior aos obtidos no modelo analítico (6.438 kNm²/grau).

A Figura 10 apresenta um comportamento similar ao da Figura 9. Em média, a rigidez à torção anti-horária obtida experimentalmente é 2.7 vezes maior que a obtida pelo modelo analítico (3.217kNm²/grau). A rigidez experimental à torção no sentido anti-horário é similar ao valor estimado na rigidez horária (Figura 9). Isto é devido a pré-carga inicial (100 kN), a qual opõe resistência a rotação axial do duto no sentido anti-horário (abertura do duto) e por conseguinte valores similares de rigidezes experimentais horária e anti-horária são obtidas.

Segundo o apontado pelo modelo analítico os valores de alongamento axial e variação radial obtidos nos ensaios de torção foram muito pequenos, isso foi corroborado nos ensaios experimentais.

Conclusões

Os resultados obtidos dos ensaios experimentais de tração apontaram uma pequena fase inicial de acomodação com variação não linear do alongamento axial com a força imposta. Isso se deve à presença de folgas iniciais que provocam uma acomodação do duto.

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

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

Os resultados obtidos através do modelo analítico mostraram uma boa concordância com as medidas experimentais no que se refere a rigidez à tração, sendo verificado que este apresenta um valor 8% maior para a situação de extremidades livres à rotação axial e 13% para a situação restringida. De maneira semelhante o modelo analítico conseguiu representar de maneira adequada a rigidez a torção nos dois sentidos analisados.

Porém, o modelo analítico não conseguiu representar adequadamente a razão entre a variação radial do duto e o seu alongamento axial, apresentando um valor 70% menor que o obtido experimentalmente. Esta mesma observação também vale para as rotações.

Estes resultados demonstram que os modelos analíticos não conseguem representar completamente o comportamento dos dutos, sendo necessário buscar outras maneiras para que se possa obter uma melhor previsão do comportamento. Os modelos numéricos baseados no método de elementos finitos podem ser uma solução para este problema, principalmente os que permitem também representar situações de danos nas camadas dos dutos.

Referências Bibliográficas

Batista, R. C., Bogarin, J. A. G., Ebecken, N. F. F., 1989, "Local Mechanical Behaviour of Multilayered Flexible Risers", In: Proceedings of the 7th International Symposium on Offshore Engineering, pp. 494-510, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Agosto.

Bech, A., Skallerud, B., Sohdal, N., 1992, "Structural Damping in Design Analysis of Flexible Risers", In: Proceedings of the First European Conference on Flexible Pipes, Umbilicals and Marine Cables (MARINFLEX), London, Nov.

Ferét, J. J., and Bournazel, C. L., 1987, "Calculation of Stresses and Slip in Structural Layers of Unbonded Flexible Pipes," Journal of Offshore and Arctic Engineering, 109, pp. 263-9.

Ramos Jr., R., Martins, C. A., Pesce, C. P., and Roveri, F. E., 2008, "A Case Study on the Axial-Torsional Behavior of Flexible Risers," Proceedings of the ASME 27th OMAE, 57514, Estoril.

Sousa, J. R. M., 1999, "Numerical Analysis of Flexible Risers," M.Sc. dissertation, COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil. (In Portuguese).

Witz, J. A., 1996, "A Case Study in the Cross-Section Analysis of Flexible Risers," Marine Structures, 9, pp. 885-904.