

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



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE ESTRUTURAL DE TUBOS EXPANSÍVEIS PARA POÇOS DE PETRÓLEO

AUTORES:

Ana Carolina Caldas Aguiar, Theodoro Antoun Netto

INSTITUIÇÃO:

Engenharia Naval e Oceânica COPPE/UFRJ

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela 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.

ANÁLISE ESTRUTURAL DE TUBOS EXPANSÍVEIS PARA POÇOS DE PETRÓLEO

Abstract

Solid expandable tubular technology has many advantages when compared to conventional wells. The expansion of tubes in situ allows developing reserves in many of the challenging scenarios found in oil industry, as pre-salt layer, deep reservoirs, or ultra-deep water. Besides, this procedure has good compatibility with directional and horizontal wells and facilitates side-tracks operations. Although the expansion of tubes is very attractive, a better understanding of its influence on the tube mechanical strength is necessary. In this work, experimental tests and numerical analyses were performed in order to determine the effect of parameters such as diameter-to-thickness ratio and expansion rate on the collapse resistance of expandable tubes. An experimental apparatus was designed and built to reproduce full-scale tube expansion. Three 2 meter long specimens were expanded 10% their original diameters and subjected to hydrostatic pressure inside a vessel until collapse. Three non-expanded tubes were also tested for comparison. At the same time, non-linear numerical models were developed using the finite element method. After calibration, they were used to further analyze the mechanical behavior of solid expandable tubes and the influence of expansion on its resistance against collapse.

Keywords: Expandable Tubular, Collapse Resistance, Experimental Tests, Numerical Model.

Introdução

Empresas de petróleo buscam intensificar esforços para acompanhar a demanda mundial de energia. Tais esforços são feitos na área de exploração e produção (E&P), especialmente na descoberta e desenvolvimento de novas reservas, e na superação de desafios através do aumento de desempenho, do desenvolvimento de novas tecnologias e da redução de custos. Uma vez que perfuração e completação representam uma percentagem significativa do custo total do desenvolvimento de um campo, não é surpresa as companhias concentrarem-se nesses segmentos. Os desafios atuais nas áreas de perfuração e completação são: perfuração HPHT; perfuração através de zonas de sal; poços profundos; lâminas de água ultra-profundas; poços de longo alcance; poços com trajetórias complicadas; e disponibilidade de sondas de perfuração.

Com mais de 1000 instalações em campo, a tecnologia de tubos sólidos expansíveis provou ser uma alternativa viável e econômica à tecnologia convencional de perfuração/completação, como um meio de superar os desafios previamente mencionados. Originalmente desenvolvida para aumentar a profundidade perfurada mantendo o diâmetro do poço (poço *monobore* ou *slimwell*), apresenta aplicações tanto nas áreas de construção, completação e remediação de poços. Mesmo sendo uma tecnologia promissora e economicamente viável, ainda há a necessidade de se entender melhor as exigências do processo de expansão e sua influência na resistência mecânica do tubo.

Processo de Expansão

A expansão de tubos sólidos é um processo de conformação a frio realizado dentro do poço que consiste em expandir o diâmetro do tubo *in situ* através da passagem de um cone expensor. Resulta na diminuição da espessura e na variação do comprimento do corpo expandido, este último parâmetro podendo aumentar ou diminuir dependendo do coeficiente de atrito entre o cone de expansão e a parede interna do tubo. De acordo com Seibi et al. (2002) esta tecnologia foi desenvolvida pela Shell com o objetivo de construir um poço com mono-diâmetro e foi testada em 1993. As capacidades requeridas a um processo de expansão *in situ* são: Expandir o tubo até o diâmetro desejado sem

fraturar, colapsar ou danificá-lo; Manter as capacidades hidráulicas necessárias do tubo expandido para prover resistência suficiente à pressão interna e externa de serviço; Alcançar um diâmetro e uma espessura de parede constante ao longo de todo o comprimento da seção expandida; Manter a integridade das conexões; Expandir longas seções a altas taxas.

A expansão pode ser realizada tanto em poços abertos, como em poços revestidos. No primeiro caso, o tubo é expandido contra a formação e no segundo, contra um revestimento previamente instalado no poço. São vários os métodos de expansão, mudando de acordo com a empresa encarregada do processo.

Objetivo do Trabalho

Reproduzir o processo de expansão de tubos sólidos e avaliar sua influência na resistência mecânica sob carregamento de pressão radial. Fazer a correlação numérico-experimental dos processos de expansão e dos processos realizados na câmara hiperbárica onde tubos intactos e expandidos são submetidos a uma pressão externa até o colapso. Por fim, realizar um estudo paramétrico variando-se a geometria do tubo (diâmetro e espessura) e o grau de expansão visando obter a influência desses parâmetros na pressão de colapso. Os resultados desse estudo poderão ajudar na escolha dos tubos expansíveis mais adequados para aplicação em determinado campo, no tocante a suas características geométricas e razões de expansão usadas, e ainda inferir suas resistências mecânicas após a expansão *in situ*.

Metodologia

Testes Experimentais

Os testes experimentais foram feitos em corpos de prova retirados de tubos expansíveis dedicado a aplicações em poços de petróleo e gás natural. Para realizar os testes experimentais em laboratório, com representatividade do fenômeno estudado (expansão radial de elementos tubulares), um aparato de expansão foi projetado e construído.

Propriedades do Material

Como as características do constituinte dos tubos não foram fornecidas pelo fabricante, as propriedades do material foram determinadas a partir de ensaios de tração uniaxial, realizados em nove corpos de prova retirados dos tubos na direção longitudinal (3 corpos de prova por tubo). A Tabela 1 contém as médias das propriedades elásticas determinadas para cada um dos 3 tubos usados nesse estudo (T1, T2 e T3).

Tabela 1. Propriedades elásticas do material.

Tubo	E (Mpa)	V	σ_y (MPa)
T1	207255,6	0,264	410
T2	207408,9	0,273	408
T3	205180,2	0,286	347

Teste de Expansão

Aparato de Expansão

Como mencionado anteriormente, um aparato de expansão foi projetado e construído para reproduzir a expansão de elementos tubulares em escala real com diâmetro externo de até 152,4 mm (6 polegadas). Sua função é expandir o tubo sob tração. As partes principais são: cilindro, garra, cone expensor e fuso. A Figura 1 esquematiza o aparato de teste.

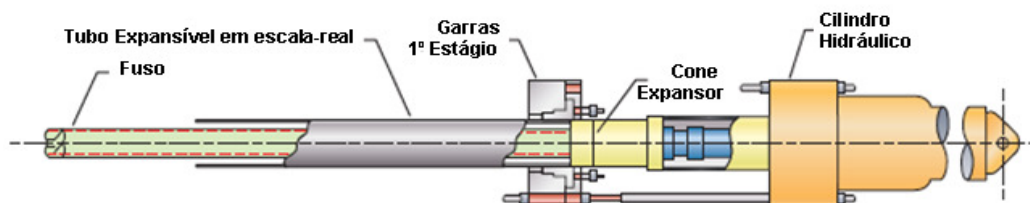


Figura 1. Desenho esquemático do aparato desenvolvido para expansão de tubos em escala real.

Expansão do tubo sólido

Três corpos de prova de 2000 mm de comprimento, retirados de tubos destinados a este tipo de trabalho (tubos T1, T2 e T3), tiveram seus diâmetros originais expandidos em 10% (com base no diâmetro interno do tubo), Figura 2. Os testes foram realizados através do aparato construído e com o objetivo de avaliar o comportamento de deformação do tubo durante o processo de expansão e de calibrar e validar o modelo numérico desenvolvido. Mediram-se os diâmetros externos e as espessuras de cada amostra antes e após a expansão assim como as deformações longitudinais e transversais em três diferentes pontos de uma das amostras (T2SFE-03).

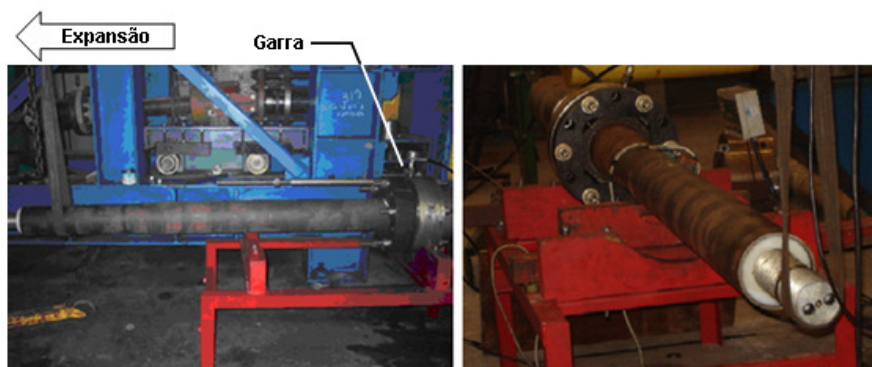


Figura 2. Expansão de um tubo sólido em 10% de seu diâmetro interno.

A pressão aplicada ao cilindro, limitada em 3000 psi, controla o experimento. Dessa forma, a taxa de expansão é baixa, realizando a expansão radial em um processo quase-estático, com deformação transiente apenas na região do corpo de prova que está sendo expandida. Uma vez que o tubo está encurtando em seu comprimento enquanto o diâmetro está sendo expandido, os extensômetros transversais mostram um aumento na deformação e os longitudinais uma redução.

Ensaio de Colapso

Os equipamentos utilizados no teste de colapso foram: Câmara hiperbárica com capacidade para 7500 psi; bomba hidráulica com acionamento pneumático para 30000 psi (Haskel); Malha para medição de pressão (certificado de calibração RBC N° PE-0330/2006, de 21/11/2006) contendo transdutor de pressão para 15000 psi WIKA (KTPP014), módulo condicionador de sinais SCXI-1001 National Instruments (AQD002M2) e Micro-computador com placa A/D para a aquisição e interpretação dos dados. Os tubos expandidos tiveram suas extremidades iniciais retiradas para evitar que as marcas impostas pela garra durante a expansão influenciassem de alguma maneira o ensaio. Desta forma, os

corpos de prova ficaram com um comprimento de 1500 mm. Ao invés dos 2000 mm iniciais. Três tubos sólidos expandidos foram testados na câmara hiperbárica para a determinação da pressão de colapso. Para efeito de comparação, três tubos sólido não expandidos também foram submetidos à pressurização no interior da câmara. O colapso ocorreu na porção central de cada um dos corpos de prova. A seção colapsada apresentou uma configuração “osso-de-cachorro” (*dogbone*), Figura 3.



Figura 3. Corpo de prova T2SFE-02 colapsado após ter sido submetido à pressão externa na câmara hiperbárica.

Os resultados dos ensaios de colapso podem ser visualizados graficamente através da Figura 4. O corpo de prova T3SFE-03 apresentou a maior resistência ao colapso entre os três elementos tubulares expandidos. No entanto, não há motivo significativo dentre as propriedades geométricas do tubo (ovalização, diâmetro externo, espessura da parede ou razão D/t) que justifique tal comportamento. Os tubos sólidos não expandidos (T3SFI-01, T3SFI-02 e T3SFI-03), como já esperado, apresentaram pressões de colapso significativamente maiores do que as apresentadas pelos tubos expandidos. Em média, as pressões de colapso dos tubos expandidos foram em torno de 50% mais baixas do que as dos tubos que não sofreram o processo de expansão.

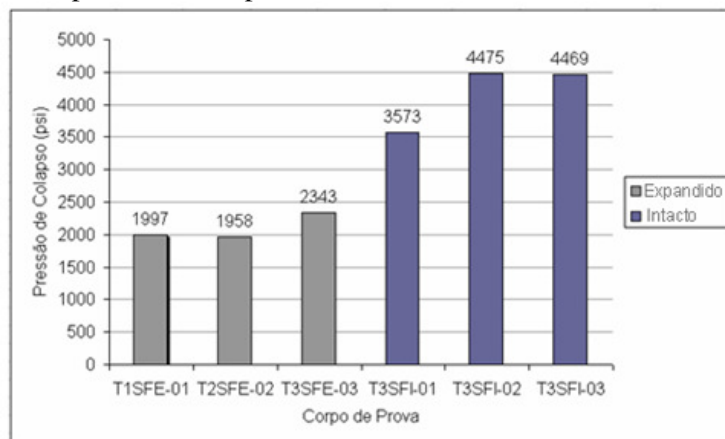


Figura 4. Resultados dos testes de colapso para tubos sólidos.

Modelagem Numérica

Descrição do modelo numérico

Geometria

Modelos de elementos finitos tridimensionais de um tubo sólido e um cone expensor foram criados através do programa comercial Abaqus (versão 6.5-1) como mostrado na Figura 5. Uma vez que não há simetria axial que permita reduzir o modelo, a geometria do tubo foi construída com o mesmo comprimento dos corpos de prova, após serem preparados para os testes de colapso (1500mm). O modelo conta com um plano de simetria definido pelos eixos 1 e 3 e outro definido pelos eixos 1 e 2. Dessa forma, apenas ¼ do tubo foi modelado, reduzindo o número de equações a serem calculadas e conseqüentemente, o tempo computacional requerido.

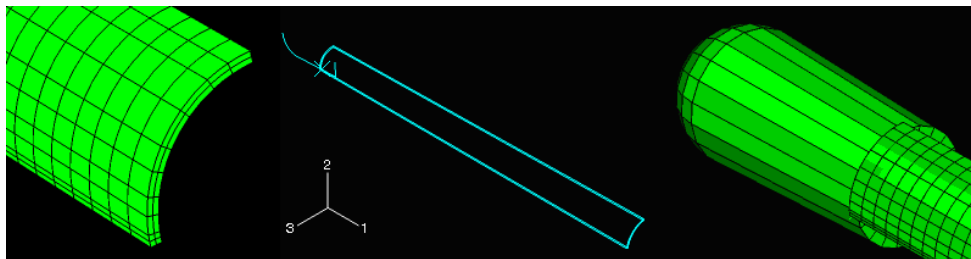


Figura 5. Detalhe do modelo tridimensional de elementos finitos de um tubo sólido e um cone expansor.

A geometria do tubo foi criada como um corpo deformável, cada modelo contém as propriedades geométricas correspondentes ao elemento tubular estudado. Os valores usados foram os diâmetros e espessuras médias, e a máxima ovalização encontrada ao longo do comprimento de cada corpo de prova. A malha foi criada em uma rotina externa ao programa ABAQUS escrita em Fortran. Esse recurso permite que a seção transversal do tubo modelado possua uma forma elíptica, proporcionando a ovalização desejada, que apresenta um valor máximo no meio do tubo e decai em direção às extremidades.

As dimensões reais do cone de expansão (L_1 , L_2 e L_3 respectivamente 154, 133 e 309 mm) foram obtidas para serem utilizadas no modelo numérico. O cone foi modelado como um corpo rígido analítico, com um ponto de referência (RP) para controlar seu deslocamento e permitir assim a expansão. Suas extremidades, onde o contato pode ocorrer, foram adaptadas para evitar qualquer possibilidade de induzir altas concentrações de tensão.

Material

O modelo de elementos finitos demanda as propriedades do material constituinte dos tubos sólidos para estudar a resposta estrutural sob expansão a frio e carregamento externo. Uma vez que o tubo sofre deformações plásticas significativas, um comportamento elástico-plástico foi utilizado. A lei de encruamento cinemático foi utilizada juntamente com a de encruamento isotrópico para simular o efeito Bauschinger (redução da tensão de escoamento sob carregamento reverso após ocorrência de deformação plástica durante a carga inicial). As propriedades de material inseridas no programa dependem do tubo que está sendo analisado e são baseadas nas propriedades determinadas a partir dos testes de tração uniaxial anteriormente mencionados.

Malha

Elementos sólidos quadráticos tridimensionais (C3D27) com número variável de nós foram utilizados. Um estudo de sensibilidade de malha foi realizado para determinar a malha mais adequada. Um modelo típico apresenta 80 elementos na direção axial, dois elementos na espessura e dez elementos na direção angular. A direção angular foi dividida de acordo com a seguinte configuração, onde cada porção apresenta um elemento: 10° ; 10° ; 15° ; 15° ; 10° ; 10° ; 7.5° ; 7.5° ; 2.5° ; 2.5° . Dessa forma, as partes que supostamente sofrerão maiores deformações e carregamentos se encontram mais refinadas. Detalhes da malha do tubo podem ser vistos na Figura 5.

Contato, Carregamento e Condições de Contorno

O contato entre o cone expansor e a superfície interna do tubo foi modelado de acordo com a lei de fricção de Coulomb, no entanto, uma vez que o teste experimental foi realizado com graxa entre as superfícies, o coeficiente de fricção utilizado foi zero. Em simulações futuras, este parâmetro pode ser facilmente modificado visando introduzir a influência do atrito. Durante o primeiro passo, referente ao processo de expansão, nenhuma carga foi aplicada. No segundo passo, para simular o teste de colapso, foi aplicada pressão na direção radial sobre a superfície externa do tubo. Uma pressão equivalente a

anterior foi aplicada na direção axial sobre a área lateral do tubo, a fim de simular o carregamento hidrostático que ocorre dentro da câmara hiperbárica.

Com o objetivo de reproduzir os testes experimentais, algumas condições de contorno específicas foram usadas. Durante o primeiro passo, a extremidade do tubo onde a expansão começa foi restringida de movimentar-se na direção axial, simulando o conjunto de garras. Somado a isso, um deslocamento na mesma direção foi imposto ao ponto de referência do cone para movê-lo através do tubo, realizando a expansão sob tração. Para o passo de colapso, uma extremidade do tubo foi presa em todas as direções enquanto a outra permanecia livre para mover-se na direção 1, permitindo o alongamento que eventualmente ocorre sob pressão externa.

Resultados e Discussão

Durante a análise do primeiro passo, a deformação do tubo foi monitorada e comparada aos resultados obtidos nos testes experimentais. A Figura 6 apresenta um gráfico referente ao nó 50171 situado nas coordenadas (656,2500; 75,7703; 0,0000) mm, pertencente ao modelo numérico T2SFE-02, onde o deslocamento na direção 2 é plotado contra o tempo. A deformação plástica equivalente ao longo do tubo (modelo T1SFE-01) durante o passo 1 também é mostrada na Figura 6. Observa-se que o modelo numérico reproduz a natureza quase estática do experimento de expansão realizado, onde a deformação ocorre apenas na região que está sendo expandida.

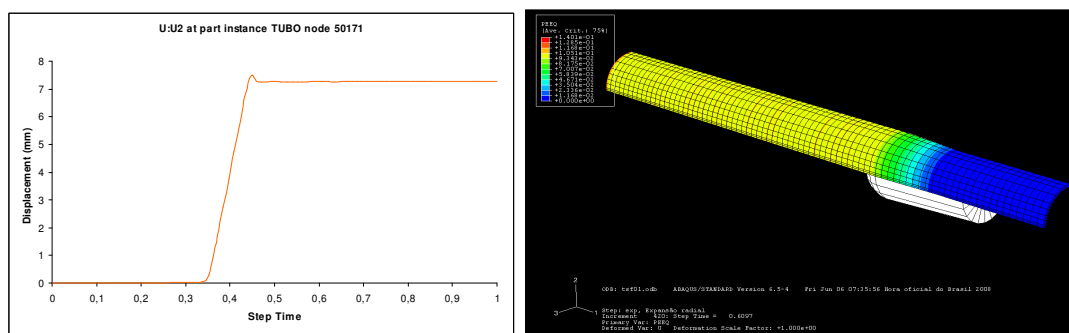


Figura 6. Deslocamento na direção 2 para o nó e deformação plástica equivalente.

Para a determinação da pressão de colapso, através do algoritmo modificado de Riks para controle de incrementos, pressão foi aplicada na face externa. Este tipo de análise foi escolhido, pois a carga é proporcional e a solução exibe instabilidade. A Figura 7 apresenta a configuração pós colapso para o modelo numérico T2SFE-02. Como observado nos testes experimentais, o tubo assume uma configuração pós-colapso comumente conhecida como “osso-de-cachorro” (*dogbone*).

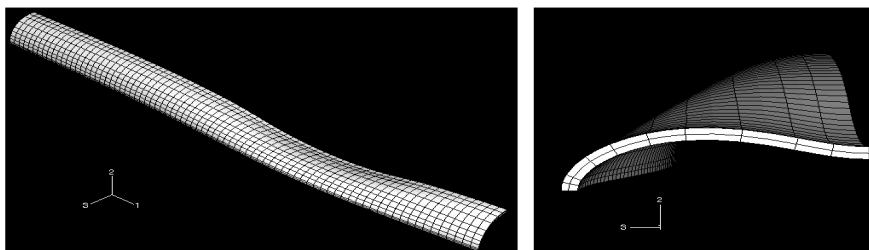


Figura 7. Configuração pós colapso para o modelo T2SFE-02.

A Figura 8 demonstra graficamente como o efeito Bauschinger e o carregamento hidrostático (carga axial devido ao tamponamento das extremidades do tubo durante o teste realizado na câmara

hiperbárica) são importantes na análise numérica para determinação da pressão de colapso buscada neste trabalho. Dois modelos extras foram criados em alternativa ao modelo original T2SFE-02, um não levando em consideração o efeito Bauschinger (T2SFE-02NBE) e outro desconsiderando o carregamento hidrostático durante o teste de colapso (T2SFE-02NHL). A linha pontilhada apresentada no gráfico é referente ao resultado obtido no experimento realizado em laboratório. Apesar da diferença entre o modelo original e o modelo sem carga axial ser pequena para este caso (5,4%), ela varia em função da geometria e do processo sendo analisado. Quando o efeito Bauschinger é desprezado a diferença entre as pressões de colapso determinadas é significativamente maior. O modelo T2SFE-02NBE mostrou resistência ao colapso 65% maior do que a resistência mostrada pelo modelo original (com carregamento hidrostático e encruamento cinético). Por tanto, a inclusão de ambos os efeitos é de extrema importância para a confiabilidade do modelo desenvolvido. Pela figura 8 pode-se notar que o modelo T2SFE-02 foi o que apresentou melhor correlação numérico-experimental e, portanto, foi o modelo utilizado no restante desse trabalho.

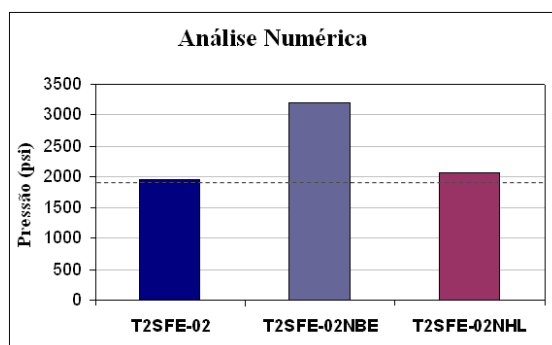


Figura 8 - Comparação da pressão de colapso determinada para o modelo original (T2SFE-02), modelo sem encruamento cinético (T2SFE-02NBE) e modelo sem carregamento axial (T2SFE-02NHL).

Correlação Numérico-Experimental

Seis análises foram realizadas, três referentes a cada um dos tubos expandidos e três a cada um dos tubos não-expandidos. A Tabela 2 contém os resultados dos testes experimentais e das análises numéricas, mostrando também a diferença em porcentagem entre as duas pressões de colapso obtidas para cada tubo ($\Delta P_c\%$). Para alcançar essa correlação, o modelo numérico foi ajustado para ser capaz de reproduzir os experimentos. Uma boa correlação entre as análises e os testes em laboratório é observada, provando a capacidade do modelo numérico de estimar o comportamento do tubo em função da expansão realizada. Uma vez validado, o modelo pôde ser utilizado para analisar mais detalhadamente o comportamento do tubo expandido e para realizar um estudo paramétrico.

Tabela 2– Comparação numérico-experimental das pressões de colapso dos tubos sólidos.

Corpo de Prova	Experimental Pc (psi)	Numérico Pc (psi)	ΔP_c (%)
T1SF-01	1997	2045	+2,40
T2SF-02	1958	1984	+1,32
T3SF-03	2343	1810	-22,50
T3SFI-01	3573	3868	+8,26
T3SFI-02	4475	4303	-3,84
T3SFI-03	4469	4235	-5,24

Estudo Paramétrico

Os parâmetros variados no estudo paramétrico foram razão de expansão (RE) e razão diâmetro-espessura (D/t). As pressões de colapso foram determinadas para razões de expansão entre 5% e 20%. Para cada razão de expansão, diferentes análises foram realizadas variando-se a razão diâmetro-espessura (D/t) do elemento tubular entre 14 e 32, Figura 9. As propriedades de material utilizadas no estudo foram aquelas referentes ao corpo de prova T2SFE-02. Este estudo paramétrico permite determinar a D/t necessária para obter uma pressão de colapso específica depois que um tubo foi expandido em diferentes magnitudes. A fim de encontrar essa razão diâmetro-espessura, a pressão de colapso original (Pco) do tubo, assim como seus parâmetros geométricos, deve ser calculada. Caso a razão diâmetro-espessura do revestimento seja fixa, pode-se escolher uma razão de expansão adequada para a pressão de projeto específica.

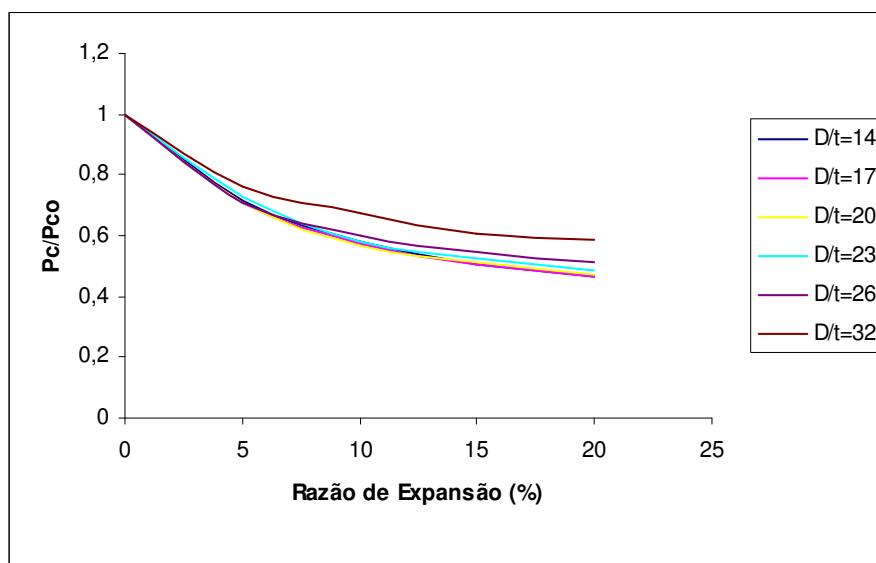


Figura 9 - Razão entre a pressão de colapso do tubo expandido (Pc) e a pressão de colapso do tubo original (Pco) versus razão de expansão para tubos com diferentes valores de D/t.

Conclusões

Neste trabalho um estudo teórico e experimental foi realizado para avaliar o comportamento estrutural de tubos sólidos expansíveis. Um aparato de expansão foi projetado e construído. Testes de tração uniaxial, para a caracterização do material, testes de expansão e testes de colapso em uma câmara hiperbárica foram feitos com o objetivo de ajustar e validar os modelos numéricos desenvolvidos. Três tubos sólidos foram expandidos e colapsados. Três tubos não expandidos também foram colapsados para propósito de comparação. Modelos numéricos considerando as propriedades de material e geométricas de cada corpo de prova foram desenvolvidos, ajustados e validados. Após sua validação o modelo pôde ser utilizado para a realização de um estudo paramétrico onde valores de razão de expansão (RE) e razão diâmetro-espessura (D/t) foram variados. Por fim, um breve estudo de caso foi apresentado. Abaixo, algumas conclusões e observações são apresentadas:

- Aparato experimental e modelo numérico foram desenvolvidos e validados, obteve-se boa correlação numérico-experimental;

- As análises numéricas devem levar em conta o efeito Bauschinger e o carregamento hidrostático;
- A expansão tubular resulta em mudanças na geometria e no material;
- Pressão de colapso obtida experimentalmente para tubos, após expansão de 10%, foi em média 50% da pressão original para a geometria e os materiais testados;
- Diferentes geometrias de tubos e cones, razões de expansão e condições de contorno devem ser testadas com o objetivo de analisar mais profundamente o comportamento estrutural de tubos expandidos.

Deve-se notar que as curvas mostradas fornecem uma ferramenta confiável desde que os parâmetros geométricos e de material do tubo sendo projetado não desviem significativamente daqueles que formam a faixa de propriedades usada para gerá-las. Caso os parâmetros do problema desviem-se consideravelmente daqueles presentes no corpo deste trabalho, novos experimentos e análises devem ser realizados.

Referências Bibliográficas

- SEIBI, A.C., PERVEZ, T., AL-HIDDABI, S., KARRECH, A., “Finite Element Modeling of a Solid Tubular Expansion – A Typical Well Engineering Application”, *Soc. of Petroleum Engineers*, 84943, Louisiana, EUA, 20-21 Fev. 2002.
- CAMPO, D., WILLIAMS, C., COOK, L., BRISCO, D., DEAN, B., RING, L. “Monodiameter drilling Liner – From Concept to Reality”, *SPE/IADC Drilling Conference* 79790, Amsterdam, The Netherlands, 19-21 February 2003.
- GRANT, T., BULLOCK, M., “The evolution of Solid Expandable Tubular Technology: Lessons Learned Over Five Years”, *Offshore Technology Conference*, 17442, Houston, TX, E.U.A, 2-5 Mai. 2005.
- STEWART, R. B., MARKETZ, F., LOHBECK W.C.M., FISHER, F. D., DAVES, W., RAMMERSTORFER, F. G., BOHM, H. J. “Expandable Wellbore Tubulars” SPE Technical Symposium “Quest for Solutions in a Changing Industry”, 60766, Dhahran, Saudi Arabia, Out. 1999.
- FONSECA, C.E., “Análise do Comportamento Estrutural Sob Pressão Externa de Tubos Expansíveis para Poços de Petróleo” Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Oceânica, 2007.
- ASTM E8M, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]”, ASTM international, 2001.
- PERVEZ, T., QAMAR, S.Z., SEIBI, A.C., AL-JAHWARI, F.K., “Use of SET in cased and open holes: Comparison between aluminum and steel”, *Journal of Materials & Design*, 2007, article in press doi:10.1016/j.matdes.2007.01.009.