

ANÁLISE DE TENSÕES EM ESTRUTURAS TUBULARES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Gustavo Porto Florido

e-mail gustavo.florido@poli.usp.br

Resumo. O objetivo deste projeto consiste na análise estrutural de estruturas tubulares do tipo pipe-in-pipe e do tipo riser através do método dos elementos finitos, utilizando os softwares PATRAN para a geração da geometria e o software MARC para a análise estrutural não-linear envolvendo contato entre superfícies. Os dutos pipe-in-pipe são compostos por dois dutos concêntricos de aço e por uma camada anular de polipropileno, o que confere, simultaneamente, resistência estrutural e térmica ao duto. Já um duto flexível é composto por cinco camadas estruturais: uma carcaça intertravada, duas armaduras de aço formada por tendões helicoidais e duas camadas de plástico. Essa configuração faz com que o duto flexível seja muito deformável quando submetido à flexão, mas forte e rígido em resposta às pressões interna e externa, tração e torção.

O produto desenvolvido é um tutorial específico para a modelagem dos dutos no Patran e para sua análise através do Marc. Neste contexto foram estudadas configurações distintas de carregamento para cada duto. As não-linearidades decorrentes do contato e atrito entre as diversas camadas concêntricas também foram consideradas nas análises por elementos finitos. Os resultados obtidos foram confrontados com soluções analíticas, a fim de se validar os modelos simulados em elementos finitos.

Palavras chave: tubos flexíveis, pipe-in-pipe, método dos elementos finitos

1. Introdução

A utilização de dutos submarinos para transportar petróleo e gás natural é um dos meios mais seguros, econômicos e, conseqüentemente, mais empregados para tal fim. No Brasil 70% da produção de petróleo da Petrobras é proveniente de poços submarinos (Ramos Jr. *et al*, 2008). Por essa razão a integridade estrutural dos dutos usados para o transporte destes fluidos do poço até a unidade flutuante, ou até o continente, é alvo de extensas pesquisas.

Neste contexto os dutos pipe-in-pipe, ou dutos sanduíche, são bastante usuais. Estes dutos são compostos por dois dutos concêntricos de aço e por uma camada anular de polipropileno.

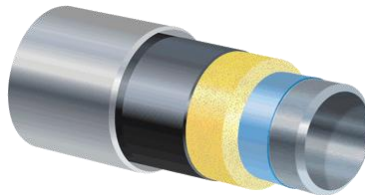


Figura 1: Esquema de pipe-in-pipe

Os dutos de aço possuem função estrutural, pois, devido às altas profundidades, os dutos submarinos estão sujeitos a enormes pressões externas. Os hidrocarbonetos também são extraídos do solo a altas pressões. Daí a necessidade do duto externo para resistir à pressão externa e do duto interno para resistir à pressão interna.

A camada anular confere ao pipe-in-pipe um maior isolamento térmico. A troca de calor entre o fluido escoando dentro do duto e o meio deve ser evitada, pois quando a temperatura do hidrocarboneto cai abaixo de um valor mínimo, ocorre formação de parafina, que leva à diminuição da vazão do escoamento e, desta forma, a uma queda de produção.

Um fato preocupante em dutos sanduíche é a propagação da flambagem. Quando o duto está danificado, seja por alguma falha de fabricação ou choque mecânico com alguma pedra ou âncora, ocorre uma diminuição da pressão necessária para o colapso local. Esta pressão é chamada de pressão de iniciação e depende da magnitude do dano, da geometria do duto e das propriedades do material. Caso a magnitude da pressão externa seja superior a um valor crítico (pressão de propagação), a flambagem pode se propagar por longas distâncias a altas velocidades, desta forma causando a falha de todo o duto.

Outro objeto de estudo relacionado a dutos pipe-in-pipe é a sua integridade estrutural no decorrer do tempo. O envelhecimento dos dutos em operação pode torná-los suscetíveis à ação de diversos mecanismos de corrosão, o que pode acarretar uma diminuição da integridade estrutural e, eventualmente, falhas.

Os objetivos deste trabalho, em relação aos dutos sanduíche, são: a modelagem e a simulação de um duto pipe-in-pipe sujeito a pressões interna e externa, flexão e tração através do método dos elementos finitos, ignorando efeitos térmicos. Esta modelagem é extremamente importante para compreender o funcionamento e o mecanismo de falha do duto.

Outra parte do trabalho será dedicada à modelagem de tubos flexíveis, ou risers. Os risers são vitais para os sistemas de produção submarinos, pois são responsáveis pelo transporte de petróleo e gás natural dos poços até a plataforma flutuante e, dessa forma, estão sujeitos a carregamentos estáticos e dinâmicos aplicados pelo ambiente oceânico e pela plataforma. Estas estruturas não possuem redundância estrutural, portanto uma falha causaria um enorme impacto ambiental, além da interrupção da produção e prejuízo financeiro.

Um duto flexível (Figura 2) é composto por cinco camadas estruturais: carcaça intertravada, camada de plástico, armadura de aço interna formada por tendões helicoidais, armadura de aço externa formada por tendões helicoidais e camada externa de plástico.

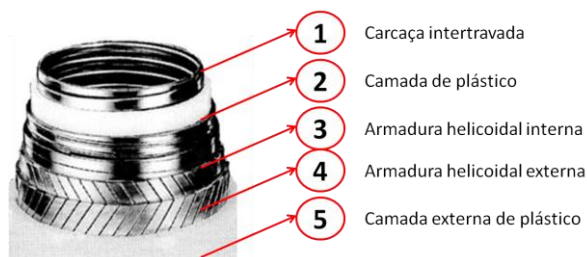


Figura 2: Imagem de um corte de um tubo flexível (Custódio & Vaz, 2002)

A carcaça intertravada confere resistência a carregamentos de pressão e as armaduras helicoidais conferem resistência à tração e torção, enquanto os polímeros concêntricos fornecem vedação e isolamento térmico (Saevik & Bruaseth, 2005). Essa configuração faz com que o riser seja muito deformável quando submetido à flexão, mas forte e rígido em resposta à pressão interna e externa, tração e torção.

Cada camada tem um papel específico na estrutura do duto flexível, entretanto informações sobre as interações entre elas e entre elementos de uma mesma camada são fundamentais para se determinar o comportamento do duto. O maior exemplo dessa interação entre diferentes elementos é o reforço helicoidal, onde diferentes tendões da armadura entram em contato e, por causa do atrito, ocorre uma não linearidade com acoplamento entre deformações axiais e torcionais (Witz & Tan, 1992).

O projeto de um duto flexível requer duas etapas (Custódio & Vaz, 2002): uma análise global e uma análise da seção transversal. A primeira serve para determinar carregamentos operacionais e a configuração do duto, enquanto a análise da seção transversal avalia a resistência e a rigidez longitudinal, a rigidez à torção e as pressões de contato entre as camadas. Geralmente modelos analíticos são utilizados em etapas preliminares do projeto e modelos em elementos finitos são empregados quando respostas específicas de algumas camadas são necessárias.

Os efeitos de atrito entre as camadas do duto causam um comportamento altamente não linear, o que tem motivado muitas pesquisas no desenvolvimento de modelos de elementos finitos para risers. Entretanto, as soluções numéricas, devido, aos algoritmos de contato, exigem computadores muito potentes e um tempo de simulação muito elevado.

Este trabalho apresenta um modelo de elementos finitos para um duto flexível submetido a carregamentos combinados, sendo que o objetivo é estimar o comportamento do duto considerando o atrito entre os diferentes elementos da estrutura.

O método dos elementos finitos fornece uma solução aproximada para equações diferenciais com condições de contorno definidas. O domínio é dividido em vários elementos de tamanho finito, daí o nome elementos finitos. Dentro destes elementos são definidas funções aproximadas que podem ser desenvolvidas matematicamente fornecendo um sistema de equações para o domínio discretizado, que é solucionado numericamente. O tamanho do sistema depende da quantidade de elementos finitos e sua solução representa a solução da equação diferencial.

Neste trabalho será empregado o software “Patran” da empresa MSC-Software na modelagem do duto em elementos finitos. O usuário só necessita modelar a geometria, definir a malha, as propriedades do material e condições de contorno. O software é capaz de modelar diversos tipos de problema, como, por exemplo, térmico e estrutural. Após a modelagem o sistema está apto para ser resolvido em um “solver”. Neste trabalho há necessidade de um “solver” não-linear devido ao contato entre os dutos. Será utilizado então o software da mesma empresa chamado “Marc”.

O resultado deste trabalho será a elaboração de um tutorial para a modelagem dos diferentes dutos através do “Patran”, tornando os modelos aptos para a resolução através do “Marc”. Para esse fim a construção dos modelos é descrita passo a passo e as ferramentas fundamentais são apresentadas. Os resultados obtidos através do “Marc” são confrontados com resultados de soluções analíticas do problema estrutural.

2. Revisão Bibliográfica

Não é surpreendente que as regiões do globo onde há mais pesquisas sobre dutos submarinos são aquelas onde ocorre uma exploração offshore mais intensa. Diversos estudos são conduzidos sobre dutos pipe-in-pipe, especialmente na área de análise da estabilidade, sendo que um tópico bastante explorado é a propagação de flambagem. Nesse contexto a criação de um modelo para simulações, que é o objetivo deste trabalho, se torna uma etapa preliminar.

Uma formulação teórica para a simulação numérica da propagação da flambagem em dutos de águas profundas é proposta em (Pasqualino & Estefen, 2001). O método baseia-se na teoria de casca fina e incorpora grandes rotações e comportamento elastoplástico. As equações são resolvidas numericamente através de um computador, utilizando o método das diferenças finitas, e os resultados são comparados com dados experimentais.

Experimentos e simulações numéricas são empregados em (Kyriakides & Netto, 2004) para estudar a dinâmica e a interrupção da propagação da flambagem em dutos pipe-in-pipe. Na primeira etapa de experimentos a velocidade de propagação da flambagem foi medida em função da pressão. Na segunda etapa foi conduzida uma simulação numérica. Os valores obtidos para a velocidade seguem a mesma tendência nos dois casos. O modelo de elementos finitos utilizado foi gerado através do software não-linear “ABAQUS”. Os dutos foram discretizados utilizando-se elementos

sólidos tridimensionais e conduziu-se estudos de convergência para determinar a distribuição da malha. Devido às condições de simetria, apenas um quarto da geometria do duto foi modelado. Foram adotadas duas condições de aderência: aderência completa ou nenhuma aderência.

O trabalho (Ribeiro, Pinheiro, & Pasqualino, 2007) estuda a redução da pressão de colapso de um duto danificado sob ação de pressão externa. Um modelo numérico não-linear tridimensional é utilizado para simular o dano mecânico e a aplicação da pressão externa. Feito isso é realizado um estudo paramétrico para determinar a pressão de colapso para diferentes condições e dimensões de dutos. O modelo de elementos finitos é o mesmo empregado em (Kyriakides & Netto, 2004).

Em (Sakakibara, Kyriakides, & Corona, 2008) estuda-se o efeito da corrosão no colapso de dutos submarinos sob pressão externa. Os resultados foram obtidos numericamente utilizando um software (BEPTICO) e também através do método dos elementos finitos. O modelo de elementos finitos foi gerado através do “ABAQUS”. A malha é composta por elementos sólidos tridimensionais e sua distribuição foi determinada através de estudos de convergência.

No trabalho apresentado por (Lourenço *et al*, 2008) é conduzido um extenso estudo paramétrico da propagação da flambagem em dutos sanduíche com um modelo não-linear tridimensional de elementos finitos. O objetivo é investigar a influência do material anular sobre a pressão de propagação da flambagem. O modelo de elementos finitos utilizado é o mesmo empregado em (Kyriakides & Netto, 2004).

Na pesquisa de (Teixeira *et al*, 2008) estuda-se a confiabilidade de dutos com defeitos corrosivos sujeitos a pressão interna. Diversas análises de pequenos experimentos e de modelos tridimensionais não-lineares de elementos finitos foram realizadas. Uma análise de sensibilidade foi conduzida para diferentes magnitudes de corrosão para identificar a influência de diversos parâmetros.

No caso dos dutos flexíveis a abordagem é um pouco diferente. A estrutura destes tubos, devido à presença das armaduras helicoidais, é mais complexa e sua modelagem é alvo de extensas pesquisas. Os estudos sobre tubos flexíveis seguem três linhas: modelos analíticos, modelos numéricos e testes experimentais.

No trabalho de (Witz & Tan, 1992) um modelo analítico para uma estrutura flexível foi criado baseado na interação entre as diferentes camadas do duto. Esse modelo fornece relações entre carregamentos axiais e torcionais e deslocamentos. Também traz outras informações úteis, como previsão de separação de camadas, amplitude do gap e mudanças nas espessuras das camadas.

Em (Seyed & Patel, 1992) são apresentados cálculos da pressão e das forças induzidas pelo escoamento interno em dutos flexíveis. Esse estudo aponta que o escoamento interno contribui com um novo termo na expressão da tensão efetiva e demonstra que equações de equilíbrio de um riser flexível são um meio rápido e seguro para determinar o perfil estático de dutos flexíveis.

(McNamara & Harte, 1992) elaboram um modelo analítico 3D para um duto flexível sem desprendimento entre camadas e submetido a pressões interna e externa, tração, torção e flexão. Esse modelo fornece informações sobre deformação, tensão e pressão nas diferentes camadas e serve também como base para estimar ruptura, colapso da carcaça e falha dos tendões da armadura helicoidal.

No trabalho (Patel & Seyed, 1995) é feita uma revisão histórica do desenvolvimento de técnicas de análises hidrodinâmicas para risers flexíveis. Esse estudo ressalta fatos marcantes, como a inclusão dos efeitos das pressões interna e externa e do escoamento interno. Comenta também sobre áreas ignoradas até então como, por exemplo, amortecimento estrutural, carregamento de arrasto hidrodinâmico e interações com o fundo do mar.

(McIver, 1995) gerou um modelo detalhado para o comportamento das seções de um duto flexível considerando tanto aderência completa entre as camadas quanto desprendimento. Foram considerados carregamentos de tração, torção, cisalhamento, flexão, pressão nas paredes do duto e diferenças de temperatura, sendo que o efeito do atrito também foi incluído. O modelo permite que as camadas do duto se separem e que tendões da armadura helicoidal façam contato. Através do modelo são obtidas informações detalhadas sobre as tensões e tensões de contato, além do escorregamento entre as camadas e entre os tendões da armadura.

Outro modelo é proposto por (Custódio & Vaz, 2002), onde são feitas formulações e soluções para a resposta de cabos umbilicais e dutos flexíveis submetidos a tração, torção e pressões interna e externa, ou seja, apenas carregamentos axissimétricos. O modelo leva em consideração não linearidades do material, formação de gap, contato entre tendões e variação na curvatura dos tendões. As equações algébricas não lineares são resolvidas através de um algoritmo iterativo e servem para estimar tensões e deslocamentos em cada camada e a resposta global da estrutura.

(Ramos Jr. & Pesce, 2004) apresentam uma solução analítica para dutos flexíveis submetidos a carregamentos combinados: flexão, torção, tração e pressões interna e externa. A principal hipótese simplificadora desse modelo é a consideração de escorregamento total entre os tendões das armaduras helicoidais após a flexão, no entanto o modelo se mostra consistente quando comparado a resultados experimentais.

Uma formulação em elementos finitos para prever o comportamento de um cabo umbilical sujeito a tração, torção, pressões interna e externa e contato com corpos externos é apresentada por (Saevik & Bruaseth, 2005). Esse modelo considera não linearidade do material, formação de gap, contato entre as camadas e mudança na curvatura dos tendões da armadura. O modelo estima tensões e deslocamentos de elementos individuais da estrutura e mostra boa correlação com testes experimentais.

Procedimentos experimentais foram conduzidos por (Ramos Jr. *et al*, 2008), onde uma descrição detalhada da estrutura interna do riser é feita. Os resultados experimentais foram comparados com modelos analíticos e a rigidez obtida experimentalmente concorda com os valores numéricos. Neste trabalho também é demonstrado que a hipótese de uniformidade na deformação axial nos tendões de uma armadura helicoidal não ocorre na prática.

Uma formulação analítica e um modelo de elementos finitos com várias camadas considerando desprendimento foram propostos por (Bahtui, Bahai, & Alfano, 2009). Neste estudo todas as camadas do riser foram modeladas separadamente e interações do contato foram consideradas. Os resultados obtidos pelo modelo de elementos finitos são relações de força e deslocamentos, que pareceram concordar com os resultados analíticos. Este trabalho mostra que um modelo de elementos finitos pode ser utilizado para conduzir estudos paramétricos em um riser e prever seu comportamento submetido a várias condições de carregamento.

3. Modelagem

Este capítulo dedica-se à modelagem dos dutos sanduíches (pipe-in-pipe) e dos dutos flexíveis (riser) e está dividido em duas partes, sendo uma para cada tipo de duto.

3.1 Duto sanduíche

Existem diversas maneiras de modelar um duto pipe-in-pipe no “Patran”. A forma mais simples é a modelagem com elementos axissimétricos (Figura 3) que, devido à sua simetria, possui uma malha de elementos finitos menor. Portanto menos nós são gerados e, dessa forma, exige-se menos tempo de processamento computacional para a obtenção dos resultados.

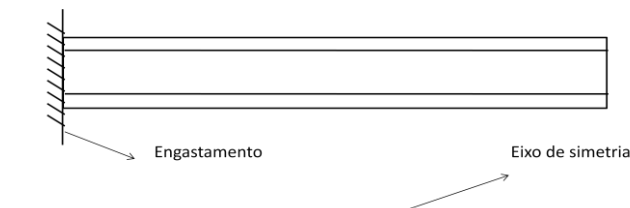


Figura 3: Modelo com elementos axissimétricos

Neste trabalho serão realizados os dois tipos de modelagem, axissimétrica (para estudar a tração) e tridimensional com elementos sólidos (para estudar a flexão), para fins didáticos e de comparação de resultados.

O modelo e os parâmetros geométricos do pipe-in-pipe a ser analisado estão indicados na Figura 4:

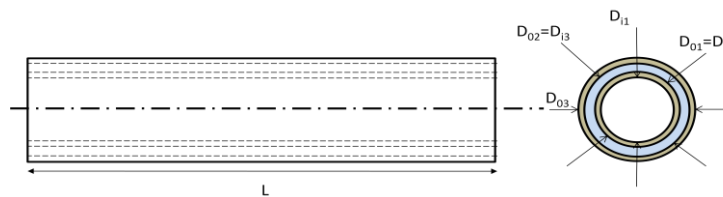


Figura 4: Desenho do pipe-in-pipe

Foram adotadas as seguintes dimensões, retiradas de (Ribeiro, Pinheiro, & Pasqualino, 2007), para o pipe-in-pipe:

$D_{03} = 120$ mm (Diâmetro externo da camada externa)

$D_{02} = D_{13} = 116$ mm (Diâmetro externo da camada anular e interno da camada externa)

$D_{01} = D_{12} = 100$ mm (Diâmetro externo da camada interna e interno da camada anular)

$D_{11} = 96$ mm (Diâmetro interno da camada interna)

$L = 500$ mm (comprimento)

Concluída a modelagem obtêm-se as seguintes malhas:

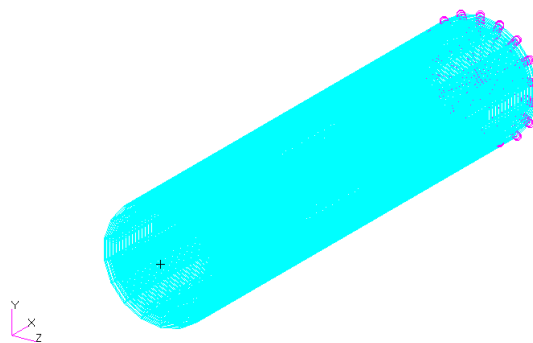


Figura 5: Malha do pipe-in-pipe tridimensional



Figura 6: Malha do modelo axissimétrico

3.2 Duto flexível

A modelagem do duto flexível é mais complexa e, portanto, exige um conhecimento mais profundo das funcionalidades do “Patran”, assim como um tempo maior de simulação. O modelo gerado nesse trabalho tem suas propriedades geométricas e materiais retiradas de (Ramos Jr *et al*, 2008):

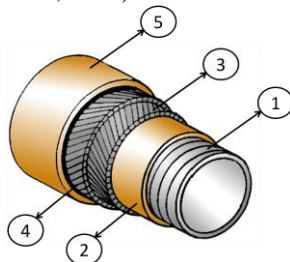


Figura 7: Propriedades do Riser (Ramos Jr. *et al*, 2008)

Para cada camada são usadas as seguintes propriedades:

D_0 : diâmetro externo

D_i : diâmetro interno

E: módulo de elasticidade

ν : coeficiente de Poisson

1- Carcaça intertravada

Devido à complexidade geométrica, a modelagem dessa cama será simplificada adotando-se um duto equivalente de aço com as seguintes propriedades:

Tabela 1: Propriedades carcaça intertravada

D_i (mm)	D_0 (mm)	E (MPa)	ν
64,72	70,00	200000	0,3

2- Camada interna de plástico

Tabela 2: Propriedades da camada interna de plástico

D_i (mm)	D_0 (mm)	E (MPa)	ν
70,00	82,00	280	0,3

3- Armadura helicoidal interna

Para a modelagem das armaduras helicoidais são necessárias outras informações geométricas, além dos diâmetros, pois os tendões precisam ser definidos individualmente.

Tabela 3: Propriedades da armadura helicoidal interna

D_i (mm)	D_0 (mm)	E (MPa)	ν
82,00	86,00	200000	0,3

Cada camada possui 29 tendões com seção transversal retangular (5mm x 2mm). Os tendões têm um ângulo de assentamento (α) de $\pm 55,5^\circ$ em relação ao eixo longitudinal, ou seja, as camadas possuem tendões com orientações opostas. Serão modelados dois passos completos da armadura, o que implica que o duto terá cerca de 237 mm.

4- Armadura helicoidal externa

Os tendões da armadura helicoidal externa apresentam as mesmas características da armadura interna. As únicas divergências entre as duas armaduras são os diâmetros.

Tabela 4: Propriedades da armadura helicoidal externa

D_i (mm)	D_0 (mm)	E (MPa)	ν
86,00	90,00	200000	0,3

5- Camada externa de plástico

Tabela 5: Propriedades da camada externa de plástico

D_i (mm)	D_0 (mm)	E (MPa)	ν
90,00	100,00	320	0,3

Concluída a modelagem obtêm-se as seguintes malhas:

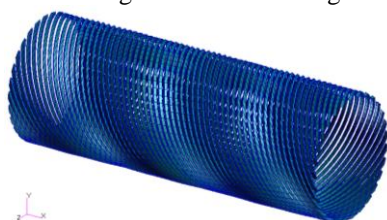


Figura 8: Malha dos tendões da armadura interna

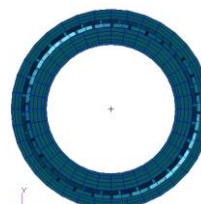


Figura 9: Malhas de todas camadas do riser

4. Resultados

4.1 Duto sanduíche (pipe-in-pipe)

O duto pipe-in-pipe foi simulado através do Método dos Elementos Finitos, seguindo os modelos discutidos no Capítulo 3. Foram analisados 3 carregamentos distintos:

- 1- Tração pura (modelo axissimétrico)
- 2- Tração e pressões interna e externa (modelo axissimétrico)
- 3- Flexão (modelo tridimensional)

Os parâmetros de cada carregamento estão reunidos na Tabela 6. Em todos os casos foi considerado o atrito entre as camadas, que foi modelado como atrito de Coulomb com coeficiente de atrito igual a 0,5. A tração foi modelada como um deslocamento prescrito na extremidade livre do duto.

Tabela 6: Tabela de parâmetros dos carregamentos

Carregamento	p_0 (Mpa)	p_i (MPa)	M (N.mm)	Δl (mm)
1	-	-	-	1
2	10	1	-	1
3	-	-	500000	-

4.1.1 Análise de pipe-in-pipe sob carregamentos axissimétricos

A análise da tração partiu do modelo ilustrado na Figura 10:

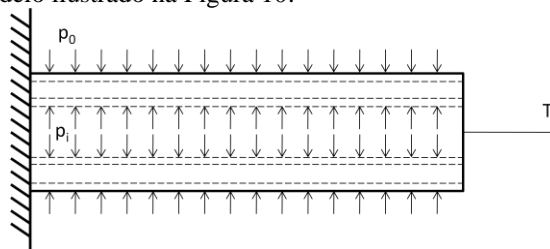


Figura 10: Modelo de pipe-in-pipe sob carregamentos axissimétricos

Onde as pressões interna e externa só se aplicam para o caso 2 e a tração T foi simulada impondo-se um deslocamento (1 mm) na extremidade livre do duto. Os resultados obtidos através do Método dos Elementos Finitos foram comparados com soluções analíticas, onde algumas simplificações são feitas. O modelo analítico baseia-se na teoria clássica da elasticidade (Timoshenko & Goodier, 1970).

Caso 1 (tração pura)

Os valores encontrados estão no Gráfico 1 e na Tabela 1.

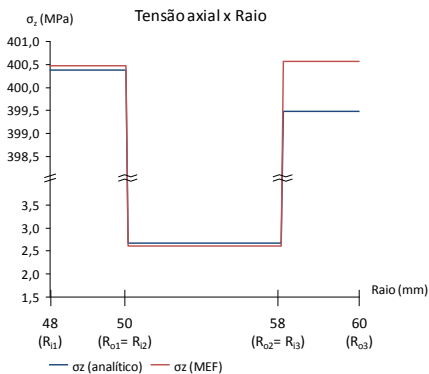


Gráfico 1: Tensão axial x Raio (Caso 1)

Tabela 1: Resultados para o caso 1

σ (MPa)	Modelo Analítico			Elementos Finitos		
	R_{ij}	$(R_{ij}+R_{oj})/2$	R_{oj}	R_{ij}	$(R_{ij}+R_{oj})/2$	R_{oj}
σ_{r1}	0,00	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00
σ_{z1}	400,37	400,37	400,37	400,46	400,46	400,46
σ_{r2}	0,05	0,05	0,06	0,00	0,00	0,00
σ_{z2}	2,67	2,67	2,67	2,61	2,61	2,61
σ_{r3}	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
σ_{z3}	399,48	399,48	399,48	400,56	400,56	400,56

Os resultados evidenciam que o modelo analítico se aproxima com uma precisão razoável do modelo em elementos finitos. As tensões axiais mostraram o mesmo comportamento nos dois modelos, sendo constantes dentro de cada camada e apresentando valores bastante similares em ambos os modelos.

Caso 2 (tração mais pressões)

Os valores encontrados estão no Gráfico 2, no Gráfico 3 e no Gráfico 4.

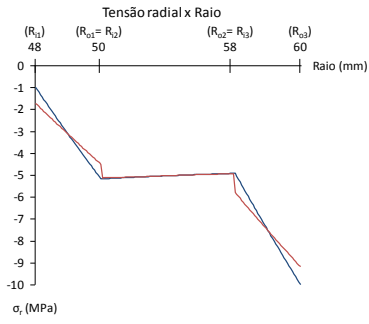


Gráfico 2: Tensão radial x Raio

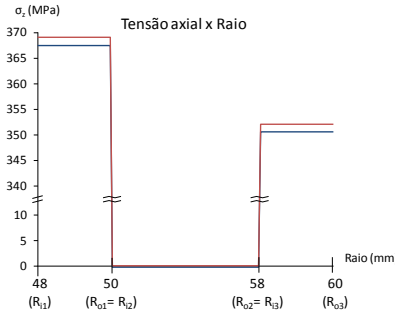


Gráfico 3: Tensão axial x Raio

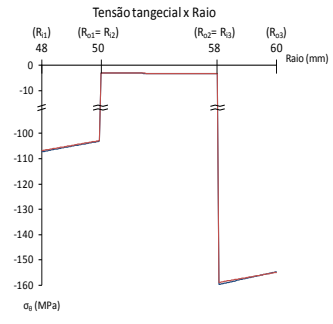


Gráfico 4: Tensão tangencial x Raio

Os resultados apontam que as tensões, calculadas nos dois modelos, estão de acordo. As tensões axiais apresentam, novamente, valores constantes dentro das camadas em ambos os modelos e seus valores são bem parecidos. No caso da tensão tangencial os valores obtidos são quase idênticos e apresentam a mesma variação linear com o raio nas camadas. No entanto as tensões radiais são causadoras de discordâncias. As tensões radiais nos elementos finitos não coincidem com as condições de contorno impostas (pressões interna e externa) e também apresentam valores diferentes numa região de contato entre as camadas. No decorrer das simulações notou-se que esse erro das condições de contorno está atrelado à interpolação da tensão feita pelo Marc nos nós da malha de elementos finitos. Os valores da tensão tendem às condições impostas quanto mais refinada for a malha.

4.1.2. Análise de pipe-in-pipe sob flexão pura

A análise da flexão foi feita utilizando-se o modelo ilustrado na Figura 11:

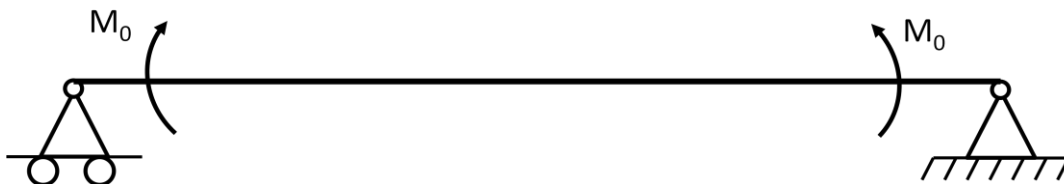


Figura 11: Modelo de carregamento de flexão

Devido à simetria o modelo pode ser simplificado:

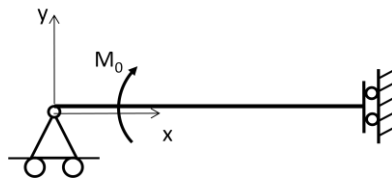


Figura 12: Simplificação do carregamento de flexão

Assim como foi feito na análise da tração, esse modelo será avaliado através do Método dos Elementos Finitos e através de um modelo analítico. Os resultados obtidos numericamente foram confrontados com os obtidos analiticamente analisando-se os valores das tensões axiais nas diferentes camadas.

Caso 3 (flexão pura)

Os valores encontrados estão no Gráfico 5.

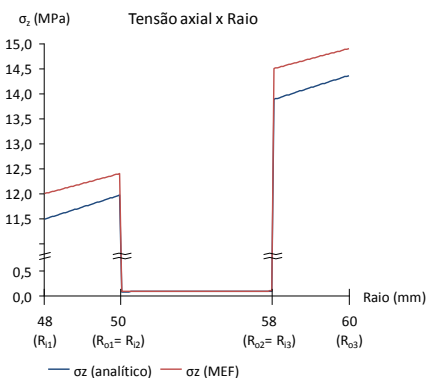


Gráfico 5: Tensão axial x Raio (Caso 3)

Os resultados obtidos nos dois modelos, numérico e analítico, estão de acordo, só ocorrendo pequenos desvios. A variação linear da tensão radial em relação ao raio foi observada nos dois modelos, tanto no analítico quanto no de elementos finitos.

4.2 Duto flexível (riser)

O modelo do duto flexível gerado na seção 3.2, devido aos inúmeros pares de contato e à geometria complexa, é incapaz de ser simulado em um computador pessoal. Esse modelo requer uma quantidade de memória de processamento superior às encontradas nos computadores comuns. Por essa razão será simulado apenas um tendão da armadura helicoidal para fins de validação do modelo.

Esse tendão será submetido a carregamentos de flexão pura e os resultados obtidos serão comparados aos do modelo analítico desenvolvido por (Costello, 1977). O carregamento será o ilustrado abaixo:

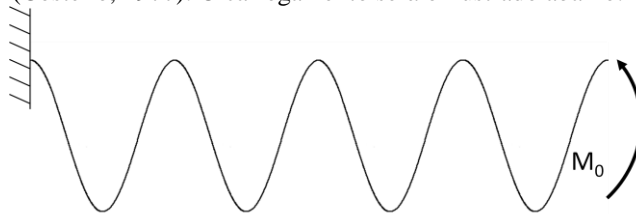


Figura 13: Flexão pura no tendão helicoidal

Serão estudados dois casos, um com uma mola helicoidal de 5 espiras (Caso 4) e outro com 10 espiras (Caso 5). Será analisada a variação dos deslocamentos na extremidade do tendão em função do momento aplicado. Para cada caso será avaliada uma seção transversal circular (raio 2,5 mm), que pode ser comparada ao modelo de (Costello, 1977). A espira da mola analisada possui 44 mm de raio e seu passo apresenta 118,5 mm de comprimento ao longo do eixo central da espira.

Caso 4 (Mola com 6 espiras)

Os valores encontrados estão no Gráfico 6 e no Gráfico 7.

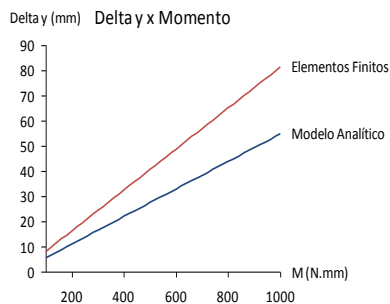


Gráfico 6: Variação no eixo y da extremidade da mola

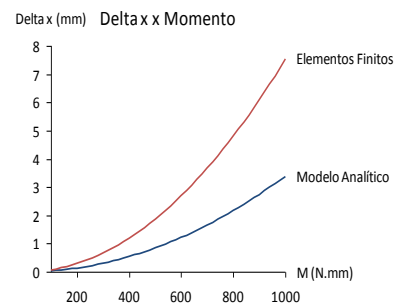


Gráfico 7: Variação no eixo x da extremidade da mola

Os resultados apresentam grandes discrepâncias para grandes deslocamentos.

5. Conclusão

A principal dificuldade enfrentada no desenrolar do projeto foi o manuseio do software Patran. O software foi criado pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) nos anos 60, o que comprova a sua potência, entretanto a interface com o usuário é confusa acarretando um longo período de aprendizado. Algumas vezes foram notados também alguns “bugs” no software.

A modelagem do duto pipe-in-pipe não se mostrou, após um período de aprendizado no Patran, muito complexa. A aplicação das condições de contorno, que foi a parte mais trabalhosa e que demandou mais tempo, é intuitiva e facilmente corrigida. No entanto, os resultados obtidos para a tensão radial no modelo axissimétrico sujeito a pressões interna e externa mostram que, apesar de as condições de contorno de deslocamentos serem satisfeitas, os carregamentos não coincidem perfeitamente com as condições de contorno impostas.

Os resultados das simulações para o duto pipe-in-pipe, com exceção da tensão radial na tração que já foi comentada, foram bastante satisfatórios. Pode-se afirmar que o modelo analítico validou o modelo de elementos finitos, já que mesmo não sendo utilizada uma malha muito refinada os valores são quase idênticos.

Neste trabalho o atrito no pipe-in-pipe, apesar de considerado nas simulações, não foi estudado a fundo. Uma análise mais cuidadosa poderia estudar a resposta do sistema com diferentes coeficientes de atrito. A flexão, que era o único carregamento atuante no caso 3, poderia também ser estudada em combinação com outros esforços, como pressões internas e externas, o que simularia, com uma precisão maior, as condições sobre as quais os dutos pipe-in-pipe estão sujeitos.

Em relação a dutos flexíveis pode-se afirmar que a modelagem é bem mais trabalhosa. Modelar corretamente os tendões helicoidais das armaduras do riser é uma tarefa bastante desafiadora e complexa, no entanto o modelo apresentado neste trabalho aparenta estar correto. Infelizmente não foi possível verificar a funcionalidade do modelo apresentado, já que o mesmo, por apresentar geometria complexa e inúmeras superfícies de contato, não converge quando simulado em computadores domésticos.

Devido à essa limitação a proposta do projeto foi alterada, com intuito de simplificar o modelo analisado, e apenas um tendão da armadura helicoidal do riser foi simulado, o que configura uma mola helicoidal. A simulação do tendão isolado dos demais não foi tão bem-sucedida quanto a simulação do duto pipe-in-pipe. Os resultados do modelo analítico divergiram dos resultados do modelo de elementos finitos. Um possível causa é a hipótese de curvatura constante adotada no modelo analítico e que não é válida no modelo de elementos finitos. Outra possível razão seriam erros na modelagem do tendão.

Mesmo sem haver a possibilidade de se simular o modelo do duto flexível como um todo, o que seria ideal, ainda há espaço para novos estudos. O contato poderia ser simplificado analisando-se apenas alguns pares por vez, como, por exemplo, o atrito entre um tendão com seus vizinhos da mesma armadura e alguns tendões da armadura adjacente. A armadura helicoidal também poderia ser analisada individualmente sob algum carregamento. Dessa forma a interação entre os tendões de uma mesma armadura ficaria mais evidente e uma resposta global do sistema seria mais tangível. Neste trabalho adotou-se um cilindro de aço para simplificar a modelagem da carcaça intertravada. Entretanto, essa simplificação torna-se um fator limitante do modelo, pois ignora o atrito que ocorre na própria carcaça. Uma modelagem da carcaça mais fiel à realidade iria contribuir bastante para a validade do modelo.

6. Referências

- Bahtui, A., Bahai, H., & Alfano, G. (2008). A Finite Element Analysis for Unbonded Flexible Risers Under Torsion. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* .
- Bahtui, A., Bahai, H., & Alfano, G. (2009). Numerical and Analytical Modeling of Unbonded Flexible Risers. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* .
- Costello, G. A. (1977). Large Deflections of Helical Spring due to Bending. *Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 103, No. 3* , pp. 481-487.
- Custódio, A. B., & Vaz, M. A. (2002). A nonlinear formulaion for the axisymmetric response of umbilical cables and flexible pipes. *Applied Ocean Research* , 21-29.
- Estefen, S. F. (s.d.). *Concepções Alternativas para Tubos Flexíveis*. Acesso em 15 de Junho de 2009, disponível em <http://www.coppe.ufrj.br/recope/teclub/tubos.htm>
- Kyriakides, S., & Netto, T. (2004). On the dynamic propagation and arrest of buckles in pipe-in-pipe systems. *International Journal of Solids and Structures* , 5463-5482.
- Lourenço, M. I., Pasqualino, I. P., & Palermo, T. d. (2008). Core material performance on the propagation pressure of sandwich pipes. *ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Estoril, Portugal.
- McIver, D. B. (1995). A method of modelling the detailed component and overall structural behaviour of flexible pipe sections. *Engineering Structures* , 254-266.
- McNamara, J. F., & Harte, A. M. (1992). Three-Dimensional Analytical Simulation of Flexible Pipe Wall Structure. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* .
- Pasqualino, I., & Estefen, S. (2001). A nonlinear analysis of the buckle propagation problem in deepwater pipelines. *International Journal of Solids and Structures* , 8481-8502.
- Patel, M. H., & Seyed, F. B. (1995). Review of flexible riser modelling and analysis techniques. *Engineering Structures* , 293-304.
- Ramos Jr., R., & Pesce, C. P. (2004). A Consistent Analytical Model to Predict the Structural Behavior of Flexible Risers Subjected to Combined Loads. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* .
- Ramos Jr., R., Martins, C. d., Pesce, C. P., & Roveri, F. E. (2008). A Case Study on the Axial-torsional Behavior of Flexible Risers. *27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Estoril, Portugal.

- Ribeiro, R. D., Pinheiro, B. d., & Pasqualino, I. P. (2007). Estudo da pressão de colapso em dutos sanduíches danificados. *4º DPETRO*. Campinas.
- Saevik, S., & Bruaseth, S. (2005). Theoretical and experimental studies of the axisymmetric behaviour of complex umbilical cross-sections. *Applied Ocean Research* 27 , 97-106.
- Sakakibara, N., Kyriakides, S., & Corona, E. (2008). Collapse of partially corroded or worn pipe under external pressure. *International Journal of Mechanical Sciences* , 1586-1597.
- Seyed, F. B., & Patel, M. H. (1992). Mathematics of Flexible Risers Including Pressure and Internal Flow Effects. *Marine Structures* 5 , 121-150.
- Teixeira, A., Guedes Soares, C., Netto, T., & Estefen, S. (2008). Reliability of pipelines with corrosion defects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* , 228-237.
- Timoshenko, S. P., & Goodier, J. N. (1970). *Theory of Elasticity*. New York: McGraw-Hill.
- Witz, J. A., & Tan, Z. (1992). On the Axial Torsional Structural Behaviour of Flexible Pipes, Umbilicals and Marine Cables. *Marine Structures* , 205-227.

STRESS ANALYSIS IN TUBULAR STRUCTURES THROUGH THE FINITE ELEMENT METHOD

Gustavo Porto Florido

e-mail gustavo.florido@poli.usp.br

Abstract. The objective of this project is the structural analysis of pipe-in-pipe and flexible pipes pipelines through the finite element method using the softwares PATRAN to generate the geometry and the software MARC for the nonlinear structural analysis involving contact between adjacent layers. The pipe-in-pipe pipelines consist basically of two concentric steel tubes and an annular polypropilene layer, what provides, simultaneously, structural and thermal resistance. The flexible pipe presents five structural layers: an interlocked steel carcass, two tensile helical armor layers and two plastic sheaths. This configuration makes the flexible pipe highly deformable in bending, but strong and stiff in response to both internal and external pressure, tension and torque.

The developed product is a specific tutorial for the pipelines' modeling in Patran and theirs analysis through Marc. In this context different load configurations were studied for each kind of pipeline. The nonlinearities caused by contact and friction between the several layers were also considered in the finite elements analyses. The obtained results were then compared with analytical solutions to validate the simulated models.

The objective of this project is the structural analysis of pipe-in-pipe pipelines through the finite element method using the softwares PATRAN to generate the geometry and the software MARC for the nonlinear structural analysis involving contact between adjacent layers. These pipelines consist basically of two concentric steel tubes and an annular polypropilene layer, what provides, simultaneously, structural and thermal resistance.

The developed product is a specific tutorial for the pipeline's modeling in Patran and its analysis through Marc. In this context three different load configurations were studied: pure traction, traction combined with internal and external pressures and pure bending. The nonlinearities caused by the contact and the friction between the several layers were also considered on the analysis through finite elements. The obtained results were then compared with analytical solutions to validate the simulated model.

Keywords. flexible pipes, pipe-in-pipe, finite element method