

ESTUDO DA PRESSÃO DE COLAPSO EM DUTOS SANDUÍCHES DANIFICADOS

Rodrigo Detoni Ribeiro¹ (UFRJ-PENO), Bianca de Carvalho Pinheiro² (UFRJ-COPPE), Ilson Paranhos Pasqualino³ (UFRJ-COPPE)

¹Centro de Tecnologia, Bloco I / 2000 – sl 108, Cidade Universitária, detoni@lts.coppe.ufrj.br

²Centro de Tecnologia Bloco I / 2000 – sl 108, Cidade Universitária, bianca@lts.coppe.ufrj.br

³Centro de Tecnologia Bloco I / 2000 – sl 108, Cidade Universitária, ilson@lts.coppe.ufrj.br

Uma das grandes preocupações na exploração de petróleo em alto mar é manter a integridade estrutural dos dutos submarinos que transportam o óleo do poço até a unidade flutuante ou até o continente. Estudos recentes têm mostrado que dutos sanduíches apresentam uma solução alternativa bastante viável para a indústria *offshore* devido à sua boa resistência mecânica à pressão externa e ao bom isolamento térmico, o qual evita a formação de parafina numa possível parada de produção. Durante sua vida útil, os dutos sanduíches podem ser danificados por impactos com âncoras ou outros tipos de objetos pesados que são comuns nos campos de exploração de petróleo submarinos. A presença de um dano mecânico em um duto submarino pode reduzir consideravelmente sua pressão de colapso.

O objetivo deste trabalho é investigar a redução de pressão de colapso de um duto danificado sob ação de pressão externa. Para isso um modelo numérico não linear tridimensional é desenvolvido utilizando o método de elementos finitos. O modelo é composto por dois dutos concêntricos de aço API X-60 e uma camada anular composta por um polímero. O modelo numérico simula as indentações (dano mecânico) e subsequente aplicação de pressão externa. Um estudo paramétrico é realizado para determinar a pressão de colapso para diferentes condições e dimensões de dutos. O material considerado para a camada anular é o polipropileno. Adicionalmente, duas diferentes condições de aderência para as diferentes camadas são consideradas: aderência perfeita e nenhuma aderência. A partir dos resultados numéricos obtidos é possível observar que a pressão de iniciação do duto danificado está diretamente relacionada à magnitude do dano e à condição de aderência entre os dutos de aço e a camada anular.

duto sanduíche, dano mecânico, pressão de colapso, método dos elementos finitos

1. INTRODUÇÃO

A indústria *offshore* de petróleo e gás enfrenta muitos desafios enquanto opera em águas profundas visto que a lâmina de água vem aumentando continuamente. Um desses desafios está em desenvolver dutos e *risers* capazes de suportar pressões internas e externas e garantir um bom isolamento térmico para evitar a formação de parafina. Neste caso, recentes estudos (Netto *et al.*, 2002) têm mostrado que dutos sanduíches representam uma solução alternativa para estes desafios devido à sua boa performance sob altas pressões externas e seu bom isolamento térmico. Dutos sanduíches são compostos por dois dutos de aço concêntricamente montados com um espaço anular, o qual pode ser preenchido com um material isolante não-estrutural apropriado. Este sistema eficaz é projetado para atender a combinação de resistência estrutural e térmica. Os dutos interno e externo são projetados para resistir à pressão interna e externa, respectivamente. As três camadas trabalham juntas para resistir às altas pressões externas (Netto *et al.*, 2002) e carregamentos de flexão (Pasqualino *et al.*, 2002), que são comuns durante o processo de instalação. Os fatores que governam da pressão de colapso e a propagação do colapso em sistemas *pipe-in-pipe* sob ação de pressão externa, foram estudados por Kyriakides (2002), Kyriakides e Vogler (2002) e Pasqualino *et al.* (2002).

Durante a operação, dutos sanduíches podem estar sujeitos a danos mecânicos devido a impactos de âncoras, rochas ou qualquer outro tipo de objeto pesado comum no campo marinho de exploração de petróleo, assim como equipamentos que podem cair das plataformas. Estes danos mecânicos induzem distorções geométricas, ou defeitos, como indentações, ovalizações, flambagens localizadas leves e dobras (Pinheiro *et al.*, 2006). A presença desses defeitos pode reduzir a pressão de colapso de um duto sanduíche e como consequência levar a um eventual colapso local da linha. Quando uma falha local ocorre, dependendo da pressão externa o dano pode se propagar por longas distâncias com altas velocidades, colapsando o duto por completo (Kyriakides e Netto, 2000, Netto e Kyriakides, 2000). A pressão mínima que pode iniciar a pressão de colapso é conhecida como pressão de iniciação (P_i), a qual depende da magnitude do dano, da geometria do dano e das propriedades dos materiais (Park e Kyriakides, 1996, Estefen *et al.*, 1992). Uma vez iniciado, o fenômeno de propagação apenas pode ser interrompido se a pressão externa for menor que o valor com o qual o colapso se propaga (pressão de propagação P_p) ou se o *buckle arrestors* forem usados (Netto e Estefen, 1996, Kyriakides *et al.*, 1998). A pressão de propagação depende da geometria e das propriedades do material do duto (Dyau e Kyriakides, 1993, Pasqualino and Estefen, 2001). Uma vez que o dano mecânico tenha ocorrido, é importante avaliar se o defeito

induzido representa perigo para a estrutura global e se isso pode causar um colapso local da linha, o qual dependendo da pressão externa pode se propagar e colapsar o duto por completo. Dessa forma, para se garantir uma operação segura, é necessário avaliar o defeito causado por dano mecânico, evitando o colapso da linha.

O objetivo desse trabalho é investigar a redução da pressão de colapso de dutos sanduíches sob ação de pressão externa causado por danos mecânicos. O comportamento mecânico de um duto sanduíche é reproduzido com o desenvolvimento de um modelo numérico tridimensional não linear, utilizando o método dos elementos finitos (MEF). Um duto sanduíche é modelado consistindo de dois dutos de aço (API X60) concêntricos e uma camada anular preenchida com polipropileno. O modelo numérico simula a introdução de dano mecânico (indentação), seguida pela aplicação de pressão externa no duto sanduíche. Usando o modelo numérico, um estudo paramétrico é realizado para determinar a pressão de colapso para diferentes geometrias e profundidades de danos. Adicionalmente, a influência da aderência entre as superfícies das diferentes camadas é estudada, assumindo duas diferentes condições de aderência: aderência total e nenhuma aderência. A partir dos resultados obtidos, observa-se que a pressão de iniciação do duto sanduíche está diretamente relacionada à magnitude do dano e à condição de aderência entre os dutos de aço e à camada anular.

2. MODELO NUMÉRICO

O modelo tridimensional não linear foi desenvolvido com base no método dos elementos finitos, utilizando o programa comercial ABAQUS versão 6.5 (ABAQUS, 2006). O duto sanduíche foi modelado consistindo de dois tubos de aço concêntricos e uma camada anular. O material dos dutos externo e interno foi assumido como sendo aço o API X-60 e a camada a anular foi preenchida com polipropileno, devido sua grande disponibilidade no mercado e ao seu custo relativamente baixo. Os requisitos estruturais e térmicos do projeto são considerados globalmente isto é, o material da camada anular tem como objetivo não apenas produzir isolamento térmico, mas também garantir junto aos dutos internos e externos, resistência estática e ao colapso do sistema. O modelo inclui plasticidade e admite grandes deformações e grandes rotações (não linearidade geométrica).

Para investigar a redução da pressão de colapso do duto sanduíche danificado submetido à pressão externa, o indentador foi modelado através de uma superfície analítica rígida esférica. O contato entre o indentador e duto externo foi simulado com a ajuda de superfícies de contato, assumindo pequenos deslizamentos entre as superfícies.

Dois condições de aderência entre as interfaces dos dutos de aço e da camada anular foram consideradas: Aderência total e nenhuma aderência. Para a condição de aderência total, uma restrição do tipo *tie* (restrição que vincula os nós da superfície escrava em relação à mestre) foi aplicada aos nós ao longo das interfaces entre cada par de superfícies de contato. Para a condição de nenhuma aderência, o contato entre cada par de superfície ao longo de interfaces foi definidos assumindo pequenos deslizamentos e ausência atrito.

2.1 Geometria do Modelo

Três diferentes geometrias de duto sanduíche foram consideradas para o modelo numérico, referidas como Casos 1, 2 e 3. As geometrias consideradas são mostradas na Tabela. 1, onde D_i é o diâmetro interno do duto interno, t_i é a espessura do duto interno, t_a é a espessura da camada anular e t_e é a espessura da camada externa. Estas geometrias são definidas mantendo o diâmetro interno do duto interno constante e variando as espessuras t_i , t_e e t_a . A Figura 1 mostra esquematicamente a geometria de um duto sanduíche, mostrando sua seção transversal com dois dutos concêntricamente montados com uma camada anular entre eles. O comprimento do modelo (L) foi assumido como $5D$, onde D é o diâmetro externo do duto externo. Conseqüentemente, diferentes comprimentos de dutos sanduíches são assumidos, de acordo com a geometria considerada. Este comprimento foi escolhido para reduzir o tempo computacional sem afetar a precisão dos resultados da pressão de colapso. Adicionalmente, para minimizar o tempo da análise numérica, um quarto do modelo foi utilizado, considerando planos de simetria nas direções transversal e longitudinal, como mostrado em Figura 2 O indentador foi modelado como sendo uma superfície analítica rígida esférica de diâmetro igual a $0,5 D_i$.

Tabela1. Geometria dos dutos sanduíches dos casos estudados.

Caso	D_i (mm)	t_i (mm)	t_e (mm)	t_a (mm)	D (mm)
1	152,40	3,175	3,175	6,35	177,80
2	152,40	4,7625	4,7625	19,05	209,55
3	152,40	6,35	6,35	31,75	241,30

O modelo foi desenvolvido como uma imperfeição ao longo do perímetro (w_o), a qual é definida como a diferença entre os raios externos, real e nominal e distribuída ao longo da seção transversal de acordo com a equação :

$$w_o(\theta) = -\Delta_o \frac{D}{2} \cos 2\theta \quad (1)$$

onde θ é a coordenada polar e Δ_o é a ovalização inicial. A ovalização inicial (Δ_o) é dada por:

$$\Delta_o = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \quad (2)$$

onde $D_{\max}$ e $D_{\min}$ são os diâmetros máximo e mínimo, respectivamente. Dois diferentes valores de Δ_o são adotados, um valor correspondente a uma ovalização muito pequena e 0,5%

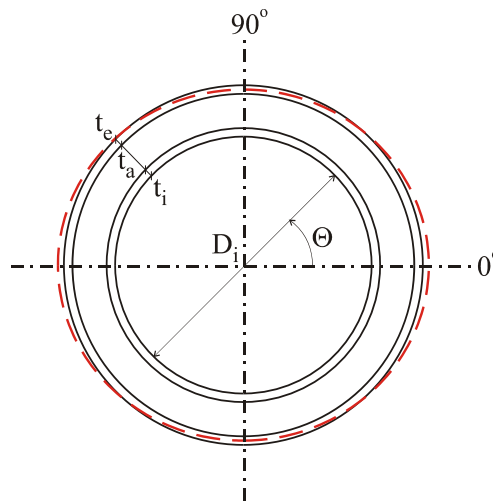


Figura1. Esquema da seção de um duto sanduíche, indicando a imperfeição inicial com a linha pontilhada.

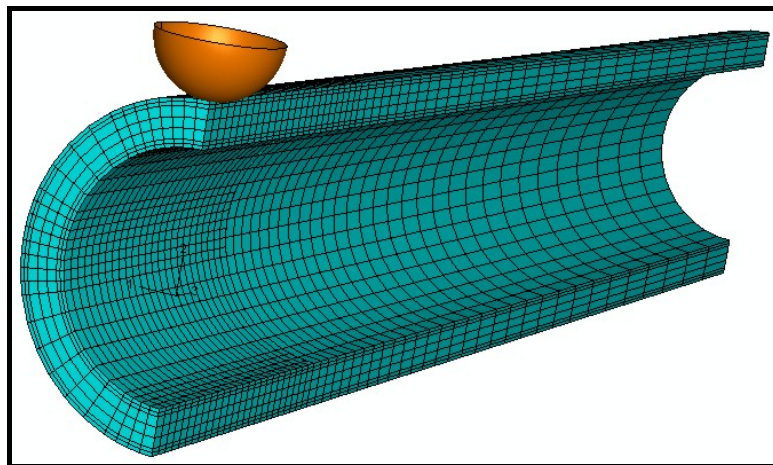


Figura 3. Malha do duto sanduíche e a superfície rígida simulando o indentador (Caso2).

2.2 Propriedades dos materiais

Para reproduzir o comportamento mecânico do duto sanduíche, modelos constitutivos de materiais distintos foram adotados no modelo numérico. Os dutos interno e externo foram assumidos como constitutivos de aço API X-60 e a camada anular foi preenchida com polipropileno. Para os dutos de aço, um comportamento plástico constitutivo foi usado de acordo com a regra de fluxo potencial, assumindo o critério de escoamento von Mises

sob encruamento isotrópico. O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, foram adotados 206 GPa e 0,3, respectivamente. A Figura 3 mostra a curva nominal de tensão verdadeira versus deformação plástica logarítmica do aço X-60 adotado. O polipropileno foi assumido como um material incompressível e hiperelástico. A curva de tensão axial obtida para o polipropileno Moplen (Castello e Estefen, 2006), empregado em revestimentos de dutos submarinos, foi usada para calibrar o modelo de potencial de energia de deformação (modelo Marlow) obtido no ABAQUS (ABAQUS, 2006). A Figura 4 mostra a curva de tensão-deformação obtida à temperatura ambiente para o polipropileno Moplen, o qual possui densidade e tensão máxima de 0,9 e 22,8 MPa, respectivamente. Efeitos térmicos nas propriedades dos materiais não foram considerados neste trabalho; estes efeitos serão considerados em trabalhos futuros.

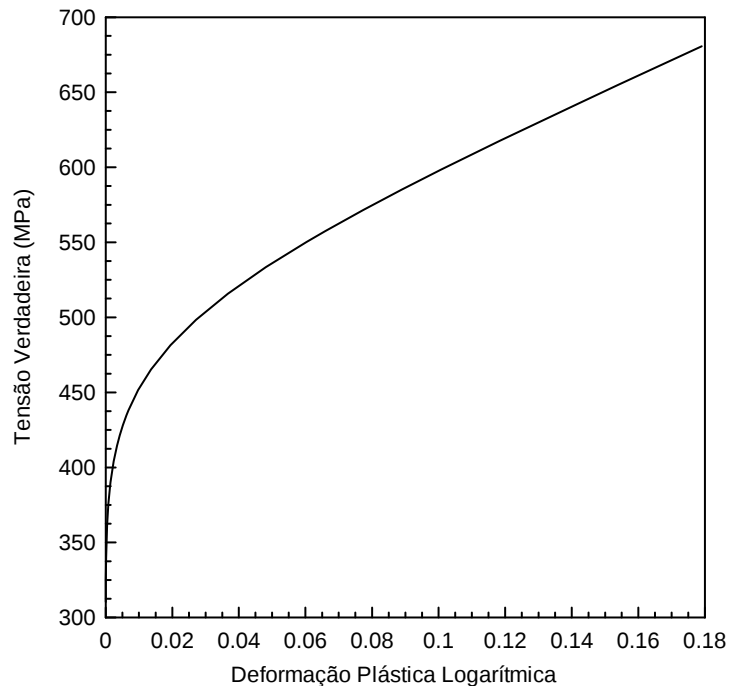


Figura 3. Tensão verdadeira versus deformação plástica logarítmica do aço API X-60.

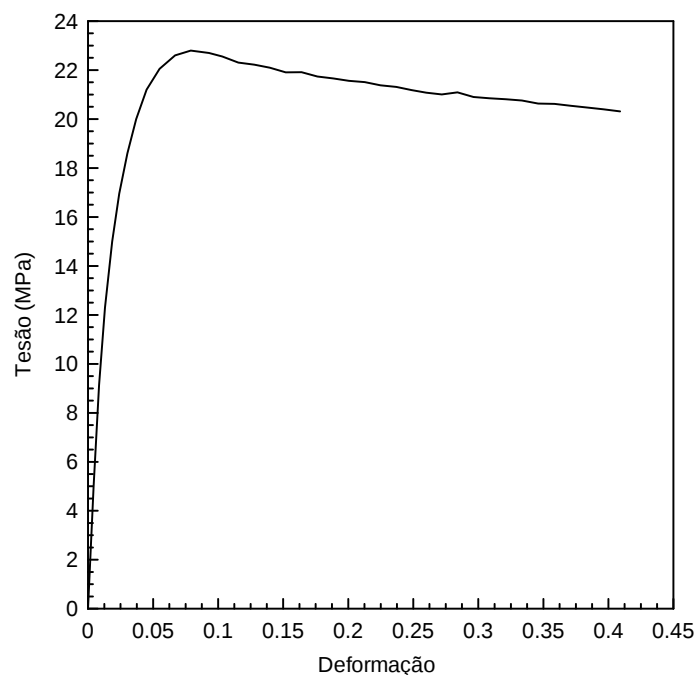


Figure 4. Curva tensão versus deformação do polipropileno Moplen (temperatura ambiente)

2.3. Estudo de Sensibilidade de Malha

Um estudo de sensibilidade de malha foi realizada em um modelo de duto bidimensional submetido à pressão externa para determinar o refinamento nas direções circunferencial e radial (plano 1-2). O objetivo desse estudo foi selecionar um refinamento capaz de gerar resultados precisos da pressão de colapso sem requerer um excessivo tempo de análise computacional. As três diferentes geometrias de dutos sanduíches, descritos na Tabela 1 (Casos 1, 2 e 3) foram consideradas e seis diferentes refinamentos de malhas foram analisados para cada geometria (Malhas 1 a 6). Com o objetivo de minimizar o tempo computacional da análise numérica, um modelo de um quarto de simetria foi usado, adotando dois planos de simetria. O modelo do duto sanduíche bidimensional foi desenvolvido com uma imperfeição inicial ao redor do perímetro do duto (w_0), prescritas de acordo com a “Equação 1”, no qual é induzido uma imperfeição inicial com ovalização (Δ_0) de 0,5%.

A malha do modelo bidimensional para os dutos interno e externo foi gerada usando o elemento biquadrático de deformação plana ABAQUS CPE8, com oito nós e dois graus de liberdade de translação por nó (ABAQUS, 2006). Para a camada anular, este tipo de elemento foi usado com formulação híbrida (CPE8H) para considerar o comportamento hiperelástico do material (ABAQUS, 2006). Para os dutos internos e externos, as Malhas 1, 2 e 3 compreendem um elemento na direção radial, enquanto as Malhas 4, 5 e 6 apresentam dois elementos nesta direção. Este esquema de refinamento na direção radial é a mesma para as três geometrias de dutos sanduíches. Para a camada anular, dois, três e quatro elementos foram utilizados na direção radial para os Casos 1, 2 e 3 respectivamente. A Figura 5 mostra as seis malhas analisadas no estudo de sensibilidade de malha para o Caso 2. Como elevadas deformações plásticas são esperadas na direção circunferencial próxima às posições 0° e 90° , a malha é mais refinada circunferencialmente nessa região. O número de elementos usados em cada malha analisada para o Caso 2 é indicada na Tabela 2. Ambas as condições de perfeita aderência e nenhuma aderência entre as interfaces dos dutos de aço e a camada anular são analisadas. A condição de perfeita aderência é obtida compartilhando os nós ao longo das interfaces.

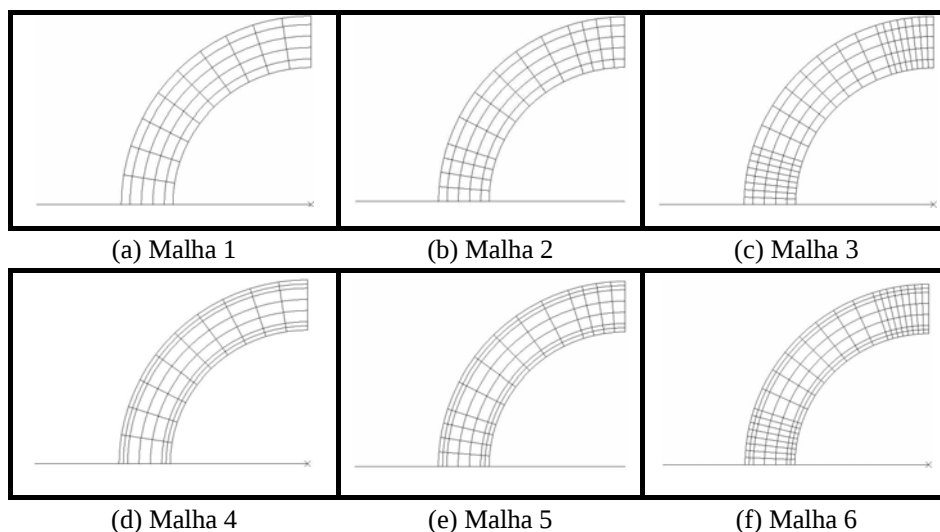


Figura 5. Malhas consideradas no estudo de sensibilidade de malha (Caso2)

Tabela 2. Número de elementos para cada malha (Caso2).

Malha	Número de Elementos		
	Direção Circunferencial	Direção Radial	Total
1	10	5	50
2	14	5	70
3	24	5	120
4	10	7	70
5	14	7	98
6	24	7	168

Tabela 3. Resultados do estudo de sensibilidade de malha para a condição sem aderência.

Caso	Malha 1		Malha 2		Malha 3		Malha 4		Malha 5		Malha 6	
	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)
1	5,70	88,50	5,67	110,00	5,58	269,00	5,70	93,70	5,58	165,10	5,55	290,40
2	14,40	116,80	14,38	128,50	14,24	273,00	14,40	94,00	14,32	232,20	14,24	292,80
3	25,62	90,50	25,62	134,10	25,48	284,30	25,50	94,20	25,48	261,80	25,44	293,50

Tabela 4. Resultados do estudo de sensibilidade de malha para a condição com aderência.

Caso	Malha 1		Malha 2		Malha 3		Malha 4		Malha 5		Malha 6	
	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)	P _{co} (MPa)	Tempo CPU (s)
1	20,00	68,00	20,00	150,30	19,92	201,40	19,98	89,90	19,92	183,20	19,20	221,40
2	39,56	83,60	39,56	151,00	39,40	223,00	39,44	100,00	39,40	208,00	39,36	247,80
3	56,52	126,30	56,52	154,80	56,28	236,00	56,46	156,60	56,36	221,70	56,28	252,00

Os resultados da pressão de colapso (P_{co}) obtidos pelo estudo da sensibilidade de malha são mostrados nas “Tabelas 3 e 4” para as condições de nenhuma aderência e aderência perfeita, respectivamente. Como pode ser observado, para cada condição de aderência os valores da pressão de colapso obtidos para as seis malhas foram muito similares, mostrando que não há diferença significativa entre elas. A Malha 5 foi selecionada considerando que seu refinamento pode gerar resultados precisos da pressão de colapso sem requerer um tempo de análise numérica excessiva.

2.4. Malha do Modelo

A malha do modelo tridimensional para os dutos internos e externos foi gerada usando o elemento linear hexaédrico de oito nós ABAQUS C3D8, com três graus de liberdade de translação por nó (ABAQUS, 2006). Para a camada anular, este tipo de elemento foi usado com uma formulação híbrida (C3D8H) para considerar o comportamento hiperelástico (ABAQUS, 2006). O refinamento da malha nas direções circunferencial e radial (plano 1-2) foram determinadas de acordo com o estudo de sensibilidade de malha realizada no modelo do duto sanduíche bidimensional submetido à pressão externa.

A malha é dividida em duas partes com diferentes graus de refinamento. A malha é mais refinada na região em que se espera que ocorra o contato com o indetador, definido com um comprimento igual a D a partir da seção média. Essa malha mais refinada é composta por vinte e cinco elementos ao longo da direção axial e trinta elementos na direção circunferencial, considerando uma mudança na Malha 5 do modelo bidimensional para que fosse mantida uma razão de aspecto de 1 para 1 na região onde são induzidos elevados gradientes de tensão durante o processo de indentação. A parte a menos refinada da malha, definida com um comprimento igual a $4D$, compreende em vinte elementos na direção circunferencial e trinta elementos na direção axial, com seu refinamento diminuindo suavemente na direção axial até o bordo do duto. As duas partes da malha possuem refinamentos distintos nas direções circunferencial e radial e são unidas através de uma restrição do tipo *tie*. A Figura 2 mostra a malha do modelo usado para o duto sanduíche com geometria referente ao Caso 2.

2.5. Condição de Contorno e Carregamento:

Para simular as condições de simetria, os deslocamentos dos nós nos planos 1-2 e 2-3 foram restringidos. Uma condição de restrição axial foi aplicada no bordo do duto simulando um grande comprimento. O modelo compreende em três passos de carga, simulando o processo de indentação, retorno elástico (*spring back*) e a aplicação da pressão externa (hidrostática). Para induzir o dano mecânico, o deslocamento do indetador (superfície analítica rígida) foi prescrito com o objetivo de gerar diferentes magnitudes de danos, equivalentes a $0,1D_i$, $0,25D_i$ e $0,5D_i$. A simulação da pressão hidrostática foi feita usando o método de Riks (controle do comprimento do arco).

3. RESULTADOS

A Figura 6 mostra a distribuição de tensões de von Mises no fim do passo de carga da indentação para a geometria referente ao Caso2, com uma ovalização (Δ_0) de 0,5% e deslocamento de $0,5D_i$. O nível de tensão verificado na camada externa ao redor da região danificada é consideravelmente maior que tensão de escoamento do material (413MPa). O mesmo não é observado para a camada de polipropileno, cuja tensão máxima é indicada na Figura 4. Isto mostra que o polipropileno continua se comportando elasticamente mesmo depois do passo de indentação.

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os resultados obtidos para os Casos 1, 2 e 3, respectivamente, onde d_i é o deslocamento do indentador, d é a profundidade residual (depois do retorno elástico) e P_i é a pressão de iniciação do duto sanduíche danificado. Duas condições de aderência entre as camadas de metal e polipropileno, aderência perfeita e nenhuma aderência foram avaliadas. Além disso, também foi analisada a ovalização do duto considerando valores de ovalização inicial de 0,5% e infinitesimalmente pequena.

As Figuras 7 e 8 apresentam o resultado do método dos elementos da pressão de iniciação versus a profundidade do indentador em relação ao diâmetro do duto interno (d/D_i) para as condições de não aderência e aderência total, respectivamente. A partir dos resultados obtidos, observa-se que a pressão de iniciação do duto sanduíche danificado está diretamente relacionado à magnitude do dano e à condição de aderência entre os dutos de aço e camada anular. Considerando as mesmas geometria e condição de aderência, a pressão de iniciação é diminuída conforme a profundidade do dano é aumentada. Adicionalmente, as pressões de iniciação mais altas foram obtidas para a condição de perfeita aderência. Pode-se notar que, para a mesma condição de aderência, a pressão de iniciação do duto sanduíche aumenta com o aumento da rigidez. Os resultados da pressão de iniciação obtidos para a geometria referente ao Caso1 (menor rigidez) são mais baixos que os obtidos para os Casos 2 e 3 para ambas condições de aderência. O efeito da ovalização na pressão de iniciação é bastante pequeno. Para ambas as condições de aderência, a ovalização inicial de 0,5% diminui a pressão de iniciação, verificados nos Casos 1 e 2. O inverso ocorre para a camada anular mais espessa (Caso3), onde a pressão de colapso é aumentada.

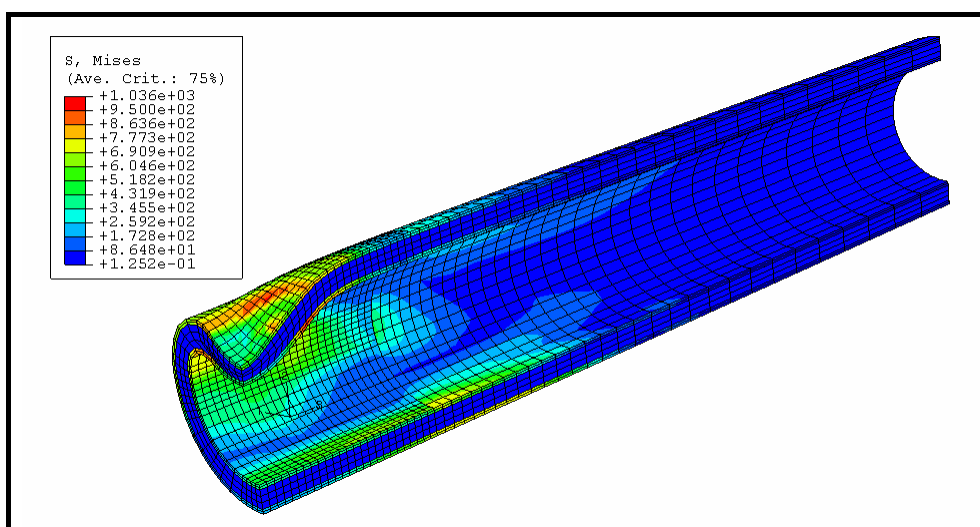


Figura 6. Distribuição das tensões de von Mises no fim do passo de carga da indentação (Caso 2 e $\Delta_0 = 0,5\%$)

Tabela 5. Resultado numéricos obtidos para o Caso 1

Δ_0	d_i	d_i (mm)	Sem Aderência			Aderência Perfeita		
			d (mm)	d/D_i (%)	P_i (MPa)	d (mm)	d/D_i (%)	P_i (MPa)
$\approx 0\%$	$0,10D_i$	15,24	13,77	9,03	19,14	12,71	8,34	27,57
	$0,25D_i$	38,10	33,73	22,13	13,74	38,94	25,55	19,77
	$0,50D_i$	76,20	67,26	45,44	8,43	67,03	43,99	14,01
0,5%	$0,10D_i$	15,24	13,72	9,00	18,00	13,27	8,71	26,70
	$0,25D_i$	38,10	33,74	22,14	13,29	33,14	21,74	19,45
	$0,50D_i$	76,20	67,29	44,15	8,31	67,06	44,00	14,05

Tabela 6. Resultado numéricos obtidos para o Caso 2

Δ_0	d_i	d_i (mm)	Sem Aderência			Aderência Perfeita		
			d (mm)	d/D_i (%)	P_i (MPa)	d (mm)	d/D_i (%)	P_i (MPa)
$\approx 0\%$	$0.10D_i$	15.24	12.44	8.16	34.16	12.98	8.52	47.94
	$0.25D_i$	38.10	33.18	21.77	25.00	33.08	21.71	36.60
	$0.50D_i$	67.20	66.19	44.75	16.80	66.09	43.37	27.56
0,5%	$0.10D_i$	15.24	12.41	8.14	29.16	12.96	8.50	46.76
	$0.25D_i$	38.10	33.15	21.75	23.28	33.00	21.65	36.19
	$0.50D_i$	76.20	68.16	44.72	16.32	66.03	43.32	27.37

Os mesmos resultados são apresentados nas Figuras 9 e 10 com valores da pressão de iniciação normalizados, em relação à pressão de colapso do duto sanduíche intacto. A pressão de colapso usada para normalizar a pressão de iniciação, dada na Tabela 8, foi obtida a partir de análise numérica usando o modelo bidimensional (desenvolvido para o estudo de sensibilidade de malha). Como esperado, a pressão de iniciação é menor que a pressão de colapso para uma ovalização muito pequena (geometria perfeita) em ambos os casos de aderência. De maneira oposta o mesmo não é verificado para a condição sem aderência, e Δ_0 é igual a 0,5%. O mesmo ocorre para aderência perfeita e pequeno danos. Isto pode ser explicado pela pressão de colapso do duto sanduíche, que é fortemente reduzida pelo aumento da ovalização inicial, principalmente quando a condição de não aderência é assumida (ver Tabela 8). Como mencionado, a influência da ovalização inicial na pressão de iniciação é muito pequena, desde que o dano induzido seja bem maior que a ovalização inicial. O modo de colapso também explica esse fenômeno. O duto danificado colapsa sob modo de falha U, enquanto o duto ovalizado colapsa sob modo de falha “dog-bone”. A primeira forma requer mais energia que a segunda, o que explica as mais altas pressões de colapso.

Tabela 7. Resultado numéricos obtidos para o Caso 3

Δ_0	d_i	d_i (mm)	Sem Aderência			Aderência Perfeita		
			d (mm)	d/D_i (%)	P_i (MPa)	d (mm)	d/D_i (%)	P_i (MPa)
$\approx 0\%$	$0,10D_i$	15,24	11,39	7,48	41,52	15,76	11,00	58,56
	$0,25D_i$	38,10	32,52	21,34	31,68	36,10	23,69	45,30
	$0,50D_i$	76,20	74,34	48,78	22,98	67,62	44,37	37,02
0,5%	$0,10D_i$	15,24	11,33	7,44	42,30	12,46	8,18	66,69
	$0,25D_i$	38,10	32,50	21,32	35,46	33,08	21,70	52,47
	$0,50D_i$	76,20	67,53	44,31	26,64	67,97	44,60	38,79

Tabela 8. Pressão de colapso (modelo bidimensional) usado para normalizar as pressões de iniciação.

Caso	P_{co} (MPa)			
	$\Delta_0 \approx 0\%$		$\Delta_0 = 0,5\%$	
	Sem Aderência	Aderência Perfeita	Sem Aderência	Aderência Perfeita
1	26,43	37,65	5,67	25,25
2	44,88	64,90	15,60	46,65
3	65,20	89,10	29,00	64,90

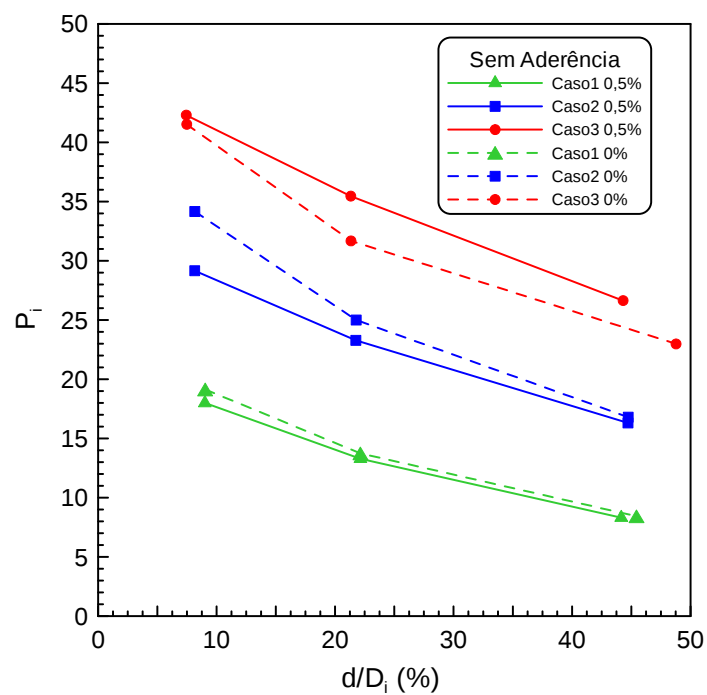


Figura 7. P_i versus profundidade da massa (d/D_i) para a condição sem aderência.

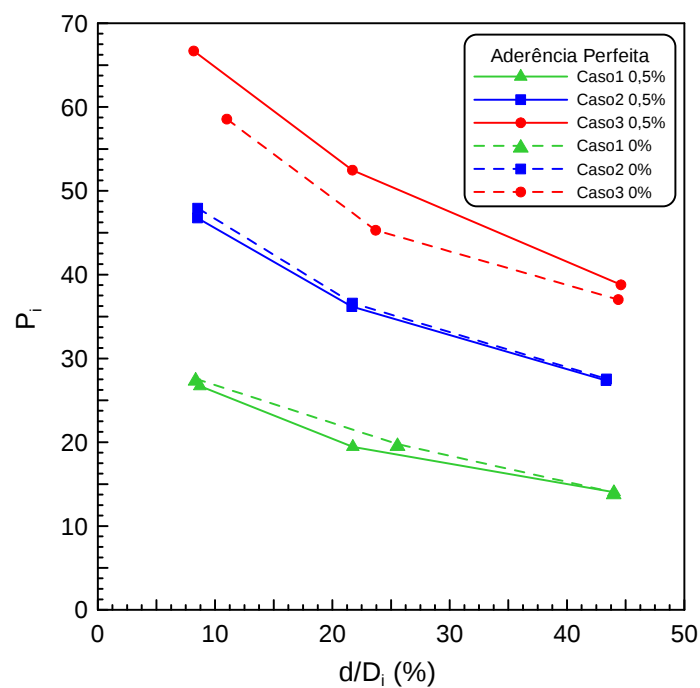


Figura 8. P_i versus profundidade da massa (d/D_i) para a condição de perfeita aderência.

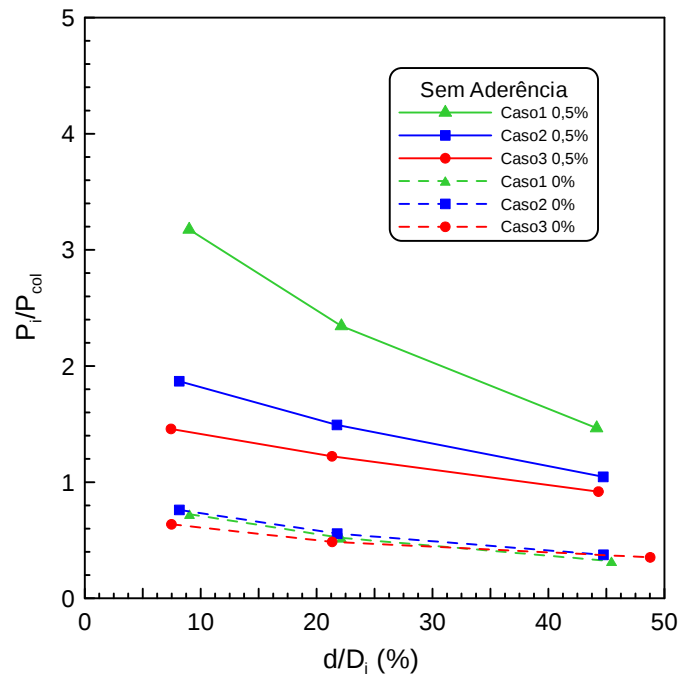


Figura 9. P_i/P_{col} versus profundidade da mocha (d/D_i) para a condição sem aderência.

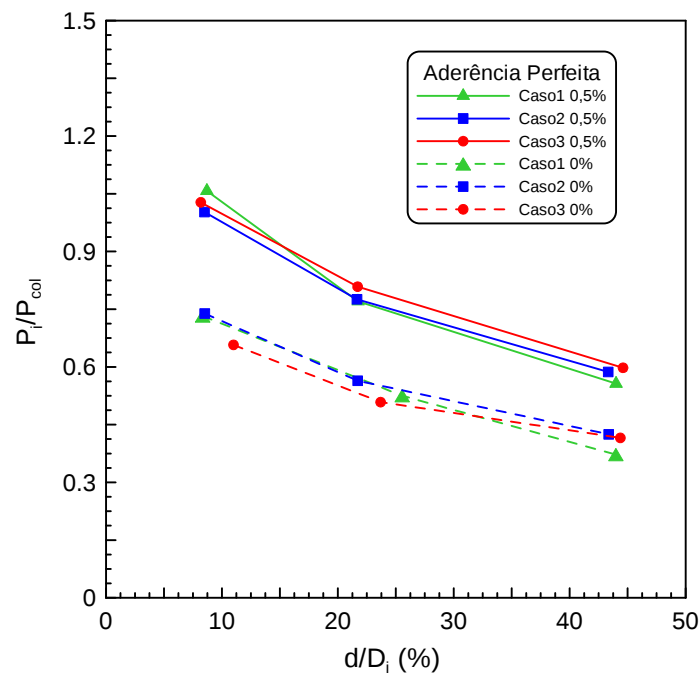


Figura 10. P_i/P_{col} versus a profundidade da mocha (d/D_i) para o caso de perfeita aderência.

4. CONCLUSÕES

A redução da pressão de colapso dos dutos sanduíches contendo danos mecânicos e submetidos à pressão externa é numericamente estudada. Um modelo de elementos finitos é desenvolvido para reproduzir o comportamento mecânico de um duto sanduíche submetido à indentação (dano mecânico) e à aplicação de pressão externa. O duto sanduíche é modelado com dois dutos de aço API X-60 montado concentricamente à uma camada anular de polipropileno. Usando o modelo numérico, um estudo paramétrico é realizado para determinar a pressão de colapso para diferentes geometrias de dutos sanduíches e profundidades de indentação. Duas diferentes condições de aderência entre as interfaces das diferentes camadas foram assumidas: nenhuma aderência e aderência total. O efeito da ovalização inicial também é investigado.

Baseado nos resultados numéricos, é observado que a pressão de iniciação do duto sanduíche danificado é diretamente proporcional à magnitude do dano e à condição de aderência entre os dutos de aço e a camada anular. Considerando a mesma geometria e condição de aderência, conforme a profundidade do dano é aumentada, a pressão de iniciação é diminuída. Adicionalmente, as mais altas pressões de iniciação foram obtidas para a condição de aderência perfeita. Pode-se notar que, para a mesma condição de aderência quanto maior a rigidez do duto sanduíche maior é sua pressão de iniciação.

O efeito da ovalização inicial na pressão de colapso é pequeno mas significativo. Para ambas as condições, ela diminui a pressão de colapso. A tendência é invertida para a camada anular mais espessa (Caso3), quando a ovalização inicial aumenta levemente a pressão de iniciação.

Como esperado, a pressão de iniciação é menor que a pressão de colapso para a geometria perfeita para ambos os casos de aderência, onde a ovalização é infinitesimalmente pequena. De maneira oposta, o mesmo não é verificado para a condição de não aderência, quando uma ovalização de 0,5% é considerada. Isto pode ser explicado pelo modo de colapso. O duto sanduíche danificado colapsa sob modo de falha U, enquanto o duto ovalizado colapsa sob o modo de falha *dog-bone*. O primeiro modo requer mais energia que o segundo, o que explica as mais altas pressões de colapso.

Efeitos térmicos nas propriedades do material do polipropileno serão considerados em trabalho futuro. Adicionalmente, diferentes materiais serão adotados na camada anular como o PEEK (poli-éter-éter-cetona) por exemplo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a ajuda financeira do Programa de Recursos Humanos da Agencia Nacional de Petróleo (ANP) e o Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE/UFRJ pelo desenvolvimento desse trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- ABAQUS, 2006, User's and Theory Manuals, Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc.
- Castello, X. and Estefen, S.F., 2006, "Limit Strength and Reeling Effects of Sandwich Pipes with Bonded Layers." International Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 49, No. 5, pp. 577-588.
- Dyau, J. Y. and Kyriakides, S., 1993, "On the Propagation Pressure of Long Cylindrical Shells under External Pressure", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 35, No. 8, pp. 675-713.
- Estefen, S.F., Netto, T.A. and Alves, T.M.J, 1992, "Residual Strength of Damaged Offshore Pipelines", Proceedings of the 11th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Calgary, Canada.
- Kyriakides, S., Babcock, C. D and Elyada, D., 1984 " Initiation of Propagating Buckles From Local Pipeline Damages", Journal of Energy Resources Technology; Vol 106; pp. 79-87.
- Kyriakides, S., Park, T.D. and Netto, T.A., 1998, "On the Design of Integral Buckle Arrestors for Offshore Pipelines", Applied Ocean Research, Vol. 20, pp. 95-104.
- Kyriakides, S. and Netto, T.A., 2000, "On the Dynamics of Propagating Buckles in Pipelines", International Journal of Solids and Structures, Vol. 37, No. 46-47, pp. 6843-6897.
- Kyriakides, S., 2002, "Buckle Propagation in Pipe-in-pipe Systems, Part I: Experiments", International Journal of Solids and Structures, Vol. 39, pp. 351-366.
- Kyriakides, S. and Vogler, T.J., 2002, "Buckle Propagation in Pipe-in-Pipe Systems, Part II: Analysis", International Journal of Solids and Structures, Vol. 39, pp. 367-392.
- Netto, T.A. and Estefen, S.F., 1996, "Buckle Arrestors for Deepwater Pipelines", Journal of Marine Structures, Vol. 9, pp. 873-883.
- Netto, T.A. and Kyriakides, S., 2000, "Dynamic Performance of Integral Buckle Arrestors for Offshore Pipelines", Part I: Experiments. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 42, No. 7, pp. 1405-1423.
- Netto, T.A., Santos, J.M.C. and Estefen, S.F., 2002, "Sandwich Pipes For Ultra-Deep Waters", Proceedings on 4th International Pipeline Conference, Calgary, Canada.
- Pasqualino, I.P. and Estefen, S.F., 2001, "A Nonlinear Analysis of the Buckle Propagation Problem in Deepwater Pipelines", International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, No. 46-47, pp 8481-8502.
- Pasqualino, I.P., Pinheiro, B.C. and Estefen, S.F., 2002, "Comparative Structural Analyses Between Sandwich and Steel Pipelines for Ultra-Deep Water", 21st International Conference On Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 23-28, Oslo, Norway.
- Park, T.D. and Kyriakides, S., 1996, "On the collapse of dented cylinders under external pressure", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 38, No. 5, pp. 557-578.
- Pinheiro, B. C., Pasqualino, I. P., and Cunha, S. B., 2006, "Stress Concentration Factors of Dented Pipelines", IPC2006-10598, Proceedings of the 6th International Pipeline Conference, Calgary, Canada.

COLLAPSE PRESSURE OF DAMAGED SANDWICH PIPES

Sandwich pipes represent an alternative solution for the offshore industry due to their good performance under external pressure and improved thermal insulation, which avoids paraffin formation. During operation, sandwich pipes can be damaged by the impact of anchors, rocks or any kind of heavy objects that are common in marine petroleum fields. The presence of mechanical damage can reduce the collapse pressure of a sandwich pipe. The aim of this work is to investigate the reduction of the collapse pressure of sandwich pipes under external pressure caused by mechanical damage. A three-dimensional nonlinear numerical model is developed according to the finite element method. A sandwich pipe is modeled, consisting of two concentric API X-60 grade steel pipes and an annular layer filled with polypropylene. The numerical model simulates the introduction of mechanical damage (denting process) followed by the application of external pressure on the sandwich pipe. Using the numerical model, a parametric study is carried out to determine the collapse pressure for different sandwich pipe geometries and dent depths. Additionally, two different adhesion conditions between the interfaces of the different layers are considered: no adhesion and perfect adhesion. From the obtained results, it is observed that the initiation pressure of damaged sandwich pipes is directly related to the magnitude of the damage and the condition of adhesion between the steel pipes and the annular layer.

Sandwich Pipe, Mechanical Damage, Collapse Pressure, Finite Element Method.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.