

MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA DUTOS SANDUÍCHE APLICADOS EM ÁGUAS ULTRA-PROFUNDAS

Allan Ribeiro de Souza¹ (COPPE-UFRJ), Theodoro Antoun Netto¹ (COPPE-UFRJ), Ilson Paranhos Pasqualino¹ (COPPE-UFRJ)

¹Programa de Engenharia Oceânica, CP 68508, Rio de Janeiro, RJ, 21945, Brasil, allan@lts.coppe.ufrj.br

Estudos recentes indicam grande potencial da concepção de dutos sanduíche para cenários de produção de óleo e gás natural em águas ultra-profundas. Sua configuração é bastante simples, consistindo-se basicamente em dois dutos metálicos concêntricos contendo uma camada sólida de material leve e isolante entre eles. As principais funções da camada anular são: manter um isolamento térmico satisfatório de forma a evitar a formação de produtos indesejáveis como parafina e hidratos ao longo da linha durante eventuais paradas de produção; e ao mesmo tempo contribuir na resistência estrutural global do duto acompanhado de uma significativa redução de seu peso submerso. Até o presente momento, o polipropileno e o cimento têm sido propostos como materiais constituintes da camada anular desta nova concepção de dutos submarinos, devido aos seus baixos custos e fácil acesso no mercado. Neste trabalho, o método sistemático da *lógica digital* foi empregado no processo de seleção de materiais poliméricos alternativos ao anular de polipropileno. As propriedades que o material candidato deverá apresentar para atender a presente aplicação são discutidas. O processo de seleção gerou como resultado um pequeno grupo de materiais com potencial de aplicação, incluindo o polipropileno. Na segunda etapa um modelo baseado em elementos finitos foi desenvolvido para determinar a pressão de colapso de dutos sanduíche com anulares de polipropileno. As análises numéricas envolveram simulações sob temperatura ambiente e sob efeitos de gradiente térmico de 25 à 90°C. O polímero poliamida 6.6 também foi empregado nas análises como material alternativo para a constituir a camada anular

Dutos Sanduíche, Seleção de Materiais, Aplicações em Águas Ultra-profundas, Resistência Estrutural.

1. INTRODUÇÃO

Para a produção de petróleo e gás natural em águas profundas, a linha de dutos submarinos deve atender basicamente a duas exigências básicas: resistência estrutural a diferentes carregamentos externos (pressão externa, flexão, tração uniaxial, fadiga, etc.) [1]; e garantia de escoamento dos produtos do poço até a unidade de produção evitando assim a formação indesejável de parafinas e hidratos ao longo da linha e conseqüentemente seu bloqueio [2].

Uma das soluções empregadas para o transporte de hidrocarbonetos sem a formação desses produtos indesejáveis é o sistema *pipe-in-pipe*, PIP [2,3]. A concepção PIP consiste basicamente de dois tubos de aço concêntricos com um espaçamento anular entre eles, podendo estar contido nesse espaçamento uma espuma polimérica, gás inerte ou vácuo. Essa concepção apresenta um excelente isolamento térmico, porém sua aplicação se torna impraticável em lâminas de águas muito profundas [4]. Sua resistência à pressão de colapso fica debilitada diante dos altos valores de pressão externa encontrados nestas profundidades. Com isso, Netto et.al. [5] e Pasqualino et.al. [6] propõem uma nova concepção de dutos a ser utilizada em águas ultra-profundas: Dutos Sanduíche, DS. Sua geometria é muito similar ao do sistema PIP, porém, a diferença reside no fato de a camada anular ser preenchida por uma camada sólida, seja de polímero ou de cimento. Outro aspecto que difere esta classe de dutos com o conceito PIP é a função que a camada anular desempenhará em serviço: Enquanto na concepção PIP, a função da camada anular é exclusivamente isolar termicamente os hidrocarbonetos do meio externo (água gelada); na concepção DS, o objetivo primário desta camada é contribuir na resistência estrutural do duto como um todo e ao mesmo tempo, fornecer um isolamento térmico satisfatório. Outra característica importante para os DS é a seleção de materiais anulares de baixa densidade, essencialmente abaixo da densidade da água do mar, reduzindo o peso submerso da linha e facilitando o processo de lançamento através de embarcações de apoio. Todas essas características credenciam a concepção DS para aplicações como dutos de exportação e eventualmente *risers* em campos marítimos situados em águas ultra-profundas.

Diversos estudos numéricos e experimentais, no que diz respeito à resistência estrutural e às características de isolamento térmico dos dutos sanduíche, foram recentemente conduzidos [5-10]. Até então todos os experimentos realizados empregavam o polipropileno como a alternativa de material polimérico para a camada anular devido ao seu baixo custo e alta disponibilidade no mercado. Entretanto, nenhum estudo sistemático de seleção de materiais foi empregado para avaliar a aplicabilidade de outros materiais poliméricos para constituir a camada anular.

Este trabalho foi dividido em duas partes: a primeira diz respeito ao processo de seleção de materiais onde os critérios de projeto para a seleção foram reavaliados, bem como a lista de materiais candidatos foi ampliada e o método da lógica digital modificada [11-13] foi utilizada para a obtenção de uma classificação dos materiais poliméricos em função de seus índices de performance. A segunda parte do estudo objetiva a avaliação estrutural de dutos sanduíche providos de anulares de polipropileno, principalmente a análise da contribuição estrutural deste polímero sobre o efeito de gradientes térmico. A análise deve-se à implementação de um modelo numérico baseado em elementos finitos, software ABAQUS, capaz de determinar os valores de resistências à pressão externa. O polímero nylon 6.6 (poliamida 6.6) foi considerado como alternativa de camada anular para efeitos de comparação.

2. PARTE 1 - METODOLOGIA PARA A SELEÇÃO DO MATERIAL ANULAR.

Foi pré-selecionado inicialmente um grupo de polímeros termoplásticos, além do polipropileno. Os critérios limites de pré-seleção do grupo foram: a elongação ao escoamento mínima, excluindo polímeros de elevada rigidez (e.g. acrílico), porém frágeis e as variações de polímeros reforçados com elementos enrijecedores (fibras de vidro, e.g.); e a temperatura mínima de operação de 100°C, eliminando da análise polímeros bastante comuns no cotidiano como as diferentes classes de polietileno (LDPE, HDPE, UHMWPE) e o PET. Os termoplásticos escolhidos para avaliação foram: polipropileno (PP), policarbonato (PC), poliamida 6 (PA 6), poliamida 66 (PA 66), poliamida 11 (PA 11), dois tipos de fluoreto de polivinilideno (PVDF 60512 e PVDF 6010) e o poli-éter-éter-cetona (PEEK). Suas propriedades normalizadas (cálculos expostos a subseção 2.2) podem ser encontradas na tabela 1. Os materiais envolvidos não possuem nenhum tipo de elemento de reforço, seja eles particulados ou fibras, tampouco o emprego de aditivos como estabilizantes de chamas e raios UV, como exemplos.

Para a avaliação de cada material pré-selecionado, levantou-se uma lista de propriedades que o material candidato deverá desempenhar na camada anular do duto sanduíche. Os atributos são listados e discutidos na subseção 2.1. Como foram considerados vários atributos para a escolha do material polimérico, utilizou-se a metodologia sistemática da lógica digital para a seleção dos materiais mais apropriados para desempenhar as funções da camada anular. A descrição do método é apresentada na subseção 2.2.

Tabela 1: Polímeros escolhidos para a avaliação e suas propriedades normalizadas (eq.3).

Material	Densidade	Lim. escoamento	Elong. escoamento	Módulo elasticidade	Cond. térmica	Tmax. serviço	Custo
PP	100,0	33,7	91,8	42,9	90,9	41,7	100,0
PC	75,4	65,0	57,3	68,6	100,0	54,2	57,1
PA 6	80,1	80,0	40,9	85,7	74,1	41,7	44,4
PA 66	80,1	80,0	45,5	91,4	76,9	41,7	41,7
PA 11	87,9	41,0	54,5	42,9	69,0	45,8	20,0
PVDF 60512	51,1	36,5	100,0	37,1	100,0	50,0	9,5
PVDF 6010	50,8	55,0	68,2	68,6	100,0	50,0	9,5
PEEK	71,8	100,0	45,5	100,0	80,0	100,0	1,8

2.1. Atributos considerados na escolha do material constituinte da camada anular

1.*Densidade*. Quanto mais leve for o material da camada anular, menores serão os esforços sob a embarcação devido à redução do peso próprio. Além disso, menores esforços de tração serão solicitados à linha.

2.*Limite de escoamento*. O material constituinte da camada anular deverá resistir aos carregamentos externos sem escoar.

3.*Elongação no escoamento*. Durante o lançamento por carretel o material polimérico deve se deformar sem ocasionar a plastificação. Essa propriedade foi considerada como uma das propriedades limites para a eliminação de materiais indesejáveis da lista.

Para a determinação da elongação limite foi proposto o seguinte cenário: Um duto de 16 polegadas de diâmetro externo, D, sendo lançado pelo método de *reeling*, cujo raio do carretel, R_C , seja de 6 metros (o menor valor encontrado para embarcações de lançamento).

$$\varepsilon_{\text{lim}} \approx \pm \frac{D}{2 \cdot \left(R_C + \frac{D}{2} \right)} \quad (1)$$

O resultado da elongação limite calculada é de 3,125%. Polímeros que apresentaram valores de elongação menores do que o valor crítico; foram eliminados do grupo de materiais candidatos.

7. *Custo*: O componente deve *desempenhar* tais funções prescritas pelo projeto com o mínimo custo.

2.3 – Resultados da seleção de materiais

Para reduzir o grau de subjetividade de um único avaliador durante a determinação dos valores peso α_i , diversas cópias da planilha foram entregues a pessoas que mantêm ou tiveram contato com a pesquisa sobre dutos sanduíche, totalizando 7 avaliadores. A fig.1a reporta os resultados sem considerar o atributo custo na análise, enquanto a fig.1b leva em consideração o mesmo atributo na avaliação.

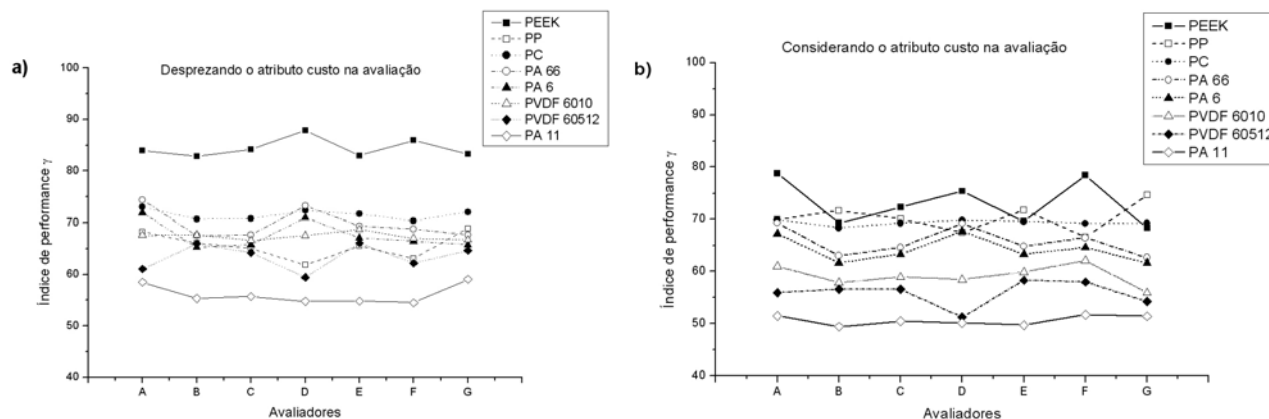


Figura 1: Classificação dos materiais candidatos através de seus índices de performance. a) O atributo custo foi descartado. b) O atributo custo é considerado na avaliação.

Quando o custo não é levado em consideração, o polieter-éter-cetona, PEEK, mostrou uma grande potencialidade como material constituinte da camada anular dos dutos sanduíche devido aos altos valores de índice de performance obtidos, independente do avaliador entrevistado. Por outro lado, ao se considerar o custo como um dos atributos no cálculo do valor peso, os índices de performance dos materiais policarbonato (PC) e o polipropileno (PP), alcançam valores comparáveis ao do PEEK. Este último, por sua vez, apresenta uma queda nos valores de γ , confirmando o alto custo como uma significativa desvantagem para este polímero alternativo. Observem na figura 2b que esses três polímeros alternam posições em função do julgamento de cada avaliador.

Nas tabelas 1, 3 e 4, alguns dados foram realçados intencionalmente para evidenciar os valores máximos de α_i e de β_i que mais contribuem para a escolha de um determinado polímero candidato, em termos de γ . Cruzando as informações das tabelas supracitadas com os resultados da figura 1, podemos observar que para os avaliadores que deram maior importância às propriedades estruturais (limite de escoamento e módulo de elasticidade) e máxima temperatura em serviço, o polímero de maior potencial foi o PEEK. Em se tratando de condutividade térmica e custo, o PP ganhou destaque. O PC, por sua vez, ocupou sempre entre a segunda e terceira colocação na figura 1. Isto pode ser atribuído aos valores normalizados β_i sempre permanecerem próximos do valor máximo para cada atributo.

As etapas a seguir do presente trabalho dedicam-se apenas à avaliação do desempenho estrutural de um dos três polímeros pré-selecionados, a alternativa empregada na literatura até o momento, o polipropileno. Estudos mais aprofundados sobre as duas alternativas restantes, o policarbonato e o PEEK, como potenciais materiais constituintes da camada anular de dutos sanduíche devem ser elaborados.

Tabela 3: Valores peso de cada propriedade. O custo foi desconsiderado na análise.

Propriedades	Valores α definido por cada avaliador						
	A	B	C	D	E	F	G
Densidade	0,20	0,10	0,12	0,12	0,08	0,10	0,18
Lim. de escoamento	0,13	0,18	0,22	0,22	0,23	0,15	0,12
Elong. no escoamento	0,12	0,18	0,15	0,08	0,18	0,13	0,12
Mod. de elasticidade	0,25	0,13	0,10	0,22	0,13	0,20	0,12
Cond. térmica	0,20	0,22	0,22	0,22	0,23	0,20	0,23
Max. temp. em serviço	0,10	0,18	0,20	0,15	0,13	0,22	0,23

Tabela 4: Valores peso de cada propriedade. O custo foi acrescentado à análise.

Propriedades	Valores α definido por cada avaliador						
	A	B	C	D	E	F	G
Densidade	0,12	0,08	0,10	0,12	0,07	0,10	0,14
Lim. de escoamento	0,15	0,15	0,19	0,19	0,19	0,14	0,10
Elong. no escoamento	0,14	0,15	0,13	0,07	0,17	0,13	0,10
Mod. de elasticidade	0,21	0,11	0,10	0,19	0,11	0,18	0,10
Cond. térmica	0,17	0,18	0,19	0,17	0,20	0,18	0,19
Max. temp. em serviço	0,08	0,15	0,15	0,12	0,11	0,19	0,19
Custo	0,12	0,17	0,14	0,14	0,15	0,08	0,19

3. PARTE 2: AVALIAÇÃO NUMÉRICA DOS ANULARES DE POLIPROPILENO E NYLON 6.6

Um modelo numérico baseado no método de elementos finitos foi desenvolvido para a obtenção da resistência à pressão externa em modelos de dutos sanduíche. Foram utilizados dois materiais constituintes para a camada anular do modelo: PP e PA 6.6. O efeito do gradiente de temperatura na resistência estrutural do duto sanduíche também foi incorporado às análises.

A ferramenta numérica utilizada foi o software comercial ABAQUS Standard versão 6.5 [14]. A geometria do modelo de análise foi igual ao encontrado nas referências [5,7], figura 2, com simetria em relação aos planos yz e xy. As dimensões do modelo são encontradas na tabela 5. Cada camada do duto sanduíche foi discretizada com elementos tridimensionais quadráticos contendo 20 nós (8 situados nos vértices e 12 na posição mediana de cada aresta do paralelepípedo). Na biblioteca do ABAQUS, os elementos pertencentes às duas camadas de aço foram escolhidos como C3D20. A camada polimérica foi admitida ser de um material incompressível (coeficiente de Poisson $\approx 0,5$) e seus elementos classificados como C3D20H de formulação híbrida.

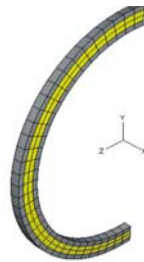


Figura 2: Modelo numérico tridimensional.

Tabela 5: Geometria da seção transversal.

Diâmetro interno [mm]	152,4
Espessura da camada interna [mm]	3,175
Espessura da camada anular [mm]	6,35
Espessura da camada externa [mm]	3,175
Ovalização inicial [%]	1

Um programa escrito em linguagem Fortran foi empregado para a geração da malha – coordenada dos nós e a conectividade dos elementos. Além disso, a imperfeição geométrica da seção transversal do tubo, traduzida na forma de ovalização inicial, Δ_0 , foi definida em termos de deslocamentos radiais, $w_0(\theta)$, dos nós com relação à seção do tubo perfeito em função da coordenada polar θ e a equação que representa este tipo de imperfeição é mostrada a seguir.

$$w_0(\theta) = -\frac{\Delta_0 D}{2} \cdot \cos 2\theta \quad , \quad (4)$$

onde D é o diâmetro externo do duto sanduíche. O valor de ovalização inicial adotado foi de 1%.

Dois modelos constitutivos foram empregados na modelagem numérica para reproduzir a resposta dos materiais ao carregamento externo. As camadas de aço API 5L X60 foram modeladas como materiais

elastoplásticos, sendo a resposta plástica representada pela teoria de fluxo J2 com encruamento isotrópico. Os dois polímeros foram modelados a partir do modelo hiperelástico de Marlow disponível na biblioteca do ABAQUS [14]. O modelo hiperelástico foi calibrado a partir de ensaios de compressão uniaxial em corpos de prova cilíndricos dos dois polímeros, obedecendo à norma ASTM D 695 02A. Os ensaios mecânicos foram realizados nas seguintes temperaturas 25, 50, 75 e 90°C. As figuras 3a e 3b mostram as curvas médias de tensão-deformação para o polipropileno e o nylon 6.6 respectivamente.

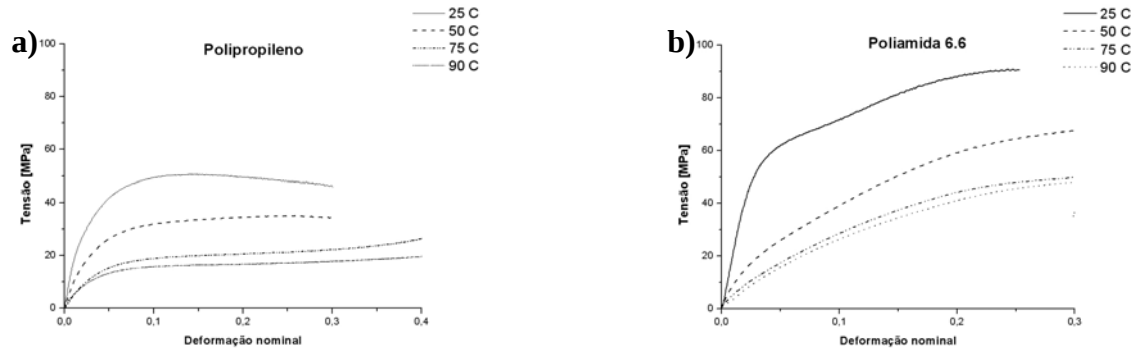


Figura 3: Curvas médias de ensaios de compressão uniaxial para várias temperaturas: a) Polipropileno, b) Poliamida 6.6 ou Nylon 6.6

Nas análises que envolveram o efeito da temperatura com o propósito de verificar a resistência mecânica dos polímeros, o gradiente térmico foi representado na forma de temperaturas nodais prescritas. O perfil de temperaturas foi então calculado a partir de um problema de transmissão unidimensional (direção radial) de calor por condução em dutos de paredes compostas no regime estacionário. Adotou-se o seguinte cenário: um duto sanduíche de comprimento unitário transportando óleo à temperatura de 90°C e na vizinhança água à temperatura de 25°C. Para a solução da eq.5, no interior do duto foi considerada a condição de contorno convectiva e para o meio externo, a temperatura na superfície externa foi a mesma do fluido externo. Os dados sobre os fluidos do interior e do exterior do duto e os valores de condutividade térmica dos materiais constituintes de cada camada necessários para a solução do problema são mostrados na tabela 6. O perfil de temperatura foi calculado com base na definição de resistência térmica [15].

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(k \cdot r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (5)$$

Tabela 6: Dados necessários para a solução do problema de condução de calor.

Camadas do duto	
Condutividade térmica do aço [W/m.°C]	54
Condutividade térmica do PP [W/m.°C]	0,22
Condutividade térmica do PC [W/m.°C]	0,2
Cond. térmica do PEEK [W/m.°C]	0,25
Fluido interno	
Condutividade térmica [W/m.°C]	0,14
Densidade [kg/m3]	875
Viscosidade [N.s/m2]	0,067
Capacidade térmica [J/kg.°C]	2700
Vazão volumétrica [BPD]	20000
Temperatura [°C]	80
Fluido externo	
Temperatura [°C]	20

Geralmente simulações numéricas de pressão externa em dutos envolvem falha por instabilidade ao qual o controle de aplicação de carga usual baseado no método incremental de Newton-Raphson não pode ser adotado. Por essa razão, foi utilizado o método de controle de carga de Riks para determinação da carga crítica por instabilidade, em outras palavras, a pressão de colapso do duto [14].

3.1 Estudos de sensibilidade de malha

O estudo de sensibilidade de malha incluiu malhas contendo 12, 18, 24, 36 e 48 elementos na direção circunferencial; 4 e 8 elementos na direção radial; e 1 e 2 elementos na direção longitudinal. O comprimento do anel adotado foi de 5 mm. Vide resultados na tabela 7 de simulações envolvendo anular de polipropileno. Os resultados de pressão de colapso demonstraram serem sensíveis com o número de elementos na direção circunferencial (figura 4), convergindo a partir de 36 elementos. A malha adotada para as ulteriores análises foi de 36 x 4 x 1, como mostrada na figura 2.

Tabela 7: Estudo de sensibilidade de malha		
Malha	P _{co} [Mpa]	K _f [m ⁻¹]
12 x 4 x 1	24,75	0,69
12 x 4 x 2	24,79	0,70
12 x 8 x 1	24,78	0,69
12 x 8 x 2	24,79	0,70
18 x 4 x 1	24,51	0,69
24 x 4 x 1	24,46	0,69
18 x 8 x 1	24,54	0,68
36 x 4 x 1	24,33	0,68
48 x 4 x 1	24,27	0,68

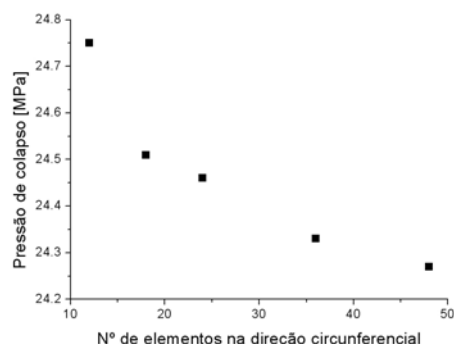


Figura 4: Sensibilidade da malha circunferencial na pressão de colapso.

3.2 Correlação Numérico-experimental da Pressão de Colapso

O modelo numérico foi simulado para tentar reproduzir os resultados experimentais de pressão externa em modelos em escala reduzida retirados de Netto et.al. [5]. Os modelos eram compostos de tubos de alumínio contendo uma camada anular de polipropileno, fig. 5. Informações mais detalhadas sobre a condução dos experimentos, a fabricação dos modelos reduzidos e o aparato empregado podem ser encontrados nos trabalhos de Netto et.al. [5] e Estefen et.al [7].



Figura 5: Modelo reduzido. Ref. 5 .

O modelo numérico procurou reproduzir as mesmas dimensões dos modelos em escala reduzida. As curvas mecânicas do polipropileno e dos tubos de alumínio obtidas nas referências bases [5,7] alimentaram a modelagem. A ovalização adotada no modelo numérico foi a mesma obtida para o tubo de alumínio externo do correspondente modelo experimental, vide tabela 8.

A tabela 8 apresenta a correlação numérica com quatro modelos experimentais. Como já mencionado, o modelo constitutivo hiperelástico utilizado para representar os polímeros foi o de Marlow,. Como o presente modelo numérico não tem a capacidade de reproduzir o verdadeiro grau de aderência entre as camadas presentes nos modelos reduzidos, foram criadas duas condições de interface: aderência perfeita cujos nós de duas camadas adjacentes são comuns entre elas; e a ausência total de aderência onde há sobreposição de nós das duas camadas na interface. As simulações com modelos de aderência perfeita representaram bem os resultados experimentais.

Tabela 8: Correlação numérico-experimental.

Modelos escala reduzida [Ref.5]	Ov. Adotada [%]	Modelo 3D - Marlow		Pco [Mpa] experimental
		Pco [Mpa] aderência perfeita	Pco [Mpa] sem aderência	
DTS.M2.G1.I02	0,301	32,71	12,30	37,64
DTS.M2.G1.I03	0,255	32,25	12,04	31,14
DTS.M2.G2.I01	0,801	20,23	6,50	20,31
DTS.M2.G2.I02	0,552	21,51	6,98	17,13

3.3 Resultados das Análises Numéricas

Após a validação do modelo numérico com os experimentos de pressão hidrostática mostrada na seção anterior, foi realizada a determinação dos valores de pressão de colapso para as duas alternativas de dutos sanduíche (PP e PA 6.6) para dois cenários propostos: simulações à temperatura de 25 graus centígrados e sobre um gradiente térmico de 25 a 90 °C. As dimensões geométricas da seção transversal são as mesmas encontradas na tabela 5. Os valores resultantes da modelagem numérica podem ser encontrados na tabela 9.

Tabela 9: Resultados do modelo numérico de pressão de colapso.

Material anular	Pressão de colapso [MPa]	
	25 °C	25-90 °C
PP	25,4	15,3
PA 6.6	25,7	14,7

Apesar do nylon 6.6 atingir resistência à compressão maior que a do polipropileno, as duas alternativas obtiveram resultados de pressão de colapso bastante semelhantes à temperatura ambiente. As figuras 6 e 7 mostram campos de deformações calculados pelo software numérico no momento de colapso para as quatro simulações. Como se pode ser observado, as duas alternativas simuladas à temperatura ambiente apresentaram valores máximos de deformação por volta de 1% no momento do colapso. Isso significa que os materiais anulares ainda se encontram no regime inicial de carregamento quando a falha ocorre. Em outras palavras, quanto maior o módulo de elasticidade aparente do polímero, maior será sua contribuição na resistência do duto à pressão externa. Tanto o polipropileno quanto o nylon 6.6 apresentam módulos de elasticidade bastante semelhantes à temperatura ambiente, vide figura 3; logo contribuirão na resistência ao colapso do duto de forma semelhante.

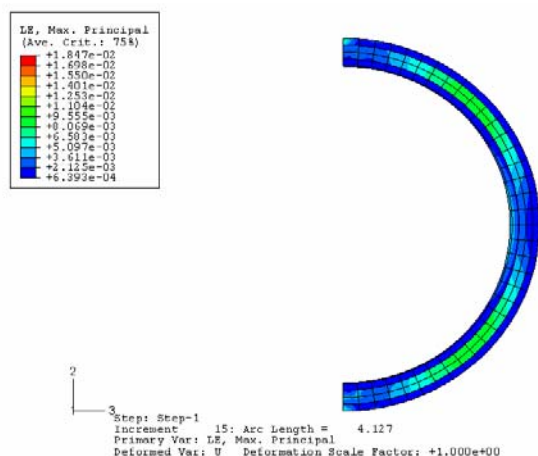


Figura 6: Campo de deformações logarítmicas no momento do colapso para o modelo DS com anular de polipropileno. Simulações à temperatura de 25°C

Quando o efeito do gradiente térmico é considerado nas análises, os dois polímeros demonstraram ser bastante sensível. Os resultados de pressão de colapso atingiram um decréscimo de cerca de 40% dos valores de pressão de colapso à temperatura ambiente. Estes decréscimos podem ser associados à queda de rigidez para os dois polímeros conforme a temperatura é aumentada.

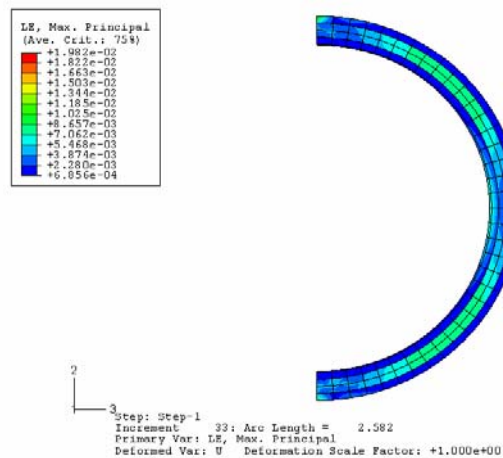


Figura 7: Campo de deformações logarítmicas no momento do colapso para o modelo DS com anular de nylon 6.6. Simulações à temperatura de 25°C

4. CONCLUSÃO

A primeira parte do trabalho consistiu numa reavaliação do material polimérico constituinte da camada anular de dutos sanduíche utilizando um método sistemático de seleção de materiais: o método da lógica digital. Da classificação a partir de um grupo de termoplásticos candidatos, três polímeros foram pré-selecionados para análise futura mais detalhada: o PEEK devido à sua excelente resistência estrutural tanto à temperatura ambiente quanto à elevadas temperaturas, embora possuindo um custo excessivamente elevado; o polipropileno em função de seu baixo custo e baixa densidade; e por último o policarbonato por ter boas propriedades mecânicas a um custo relativamente baixo.

A segunda parte foi dedicada à determinação da pressão de colapso de dutos sanduíche a base de polipropileno tanto a temperatura ambiente quanto à aplicação de um gradiente térmico de 25 a 90°C. A modelagem foi realizada a partir de um programa baseado no método dos elementos finitos. Para efeitos de comparação o polímero nylon 6.6 foi adicionado às análises. Para as duas alternativas de material anular, o acréscimo de temperatura causou um efeito deletério na resistência estrutural do duto sanduíche. Os resultados numéricos indicam que o fator temperatura de operação na linha merece atenção especial no projeto de dutos sanduíche, no que tange a escolha do material anular. Isso reforça o estudo de termoplásticos que apresentem rigidez com pouca variação com o aumento da temperatura, no caso o PEEK e o policarbonato.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Agência Nacional de Petróleo e à FINEP pelo apoio financeiro e à equipe técnica do Laboratório de Tecnologia Submarina pelo auxílio na obtenção dos resultados experimentais.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Murphey, C.E., e Langner, C.G.,(1985), "Ultimate Pipe Strength under Bending, Collapse and Fatigue.", Proceedings on the 4th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, pages 467-477.
- [2] Grealish, F., e Roddy, I.,(2002), "State-of-art on deep water thermal insulation systems.", Proceedings on the 21th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE..
- [3] Trout, S., e Sahota, B.,(1999), "Shell ETAP high pressure and temperature pipe-in-pipe pipeline design and fabrication.", Proceedings on the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE
- [4] Kyriakides, S., e Vogler, T.J.,(1985), "Buckle propagation in pipe-in-pipe systems – Part 1 e 2.", International Journal of Solids and Structures, Volume 39, pages 351-392.
- [5] Netto, T.A., e Santos, J.M.C.,(2002), "Sandwich pipes for ultra-deep waters.", Proceedings on the 4th International Pipeline Conference, IPC, Calgary, Canadá.

- [6] 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, OMAE.
- [7] Estefen, S.F., Netto, T.A., e Pasqualino, I.P.,(2005), “Strength analyses of sandwich pipes for ultra deepwaters.”, Journal of Applied Mechanics, Volume 72, pages 599-608.
- [8] Castello, X., e Estefen, S.F.,(2006), “Adhesion effect on the ultimate strength of sandwich pipes.”, Proceedings on the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE.
- [9] Jian, S., Cerqueira, D.R., e Estefen, S.F. (2003), “Thermal analysis of sandwich pipes with active electrical heating.”, Proceedings on the 22th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE.
- [10] Jian, S., Cerqueira, D.R., e Estefen, S.F. (2004), “Simulation of transient heat transfer of sandwich pipes with active electrical heating.”, Proceedings on the 23th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE.
- [11] Dieter G.E. (2000), “Engineering Design – A Materials and Processing Approach”, 3 ed. Nova York, McGraw Hill.
- [12] Dieter G.E., (1997). “Overview of the materials selection process”, ASM Handbook – Materials Selection and Design, v. 20, ASM International, pages. 243-253..
- [13] Manshad, B.D., Mahmudi H., Abedian A., Mahmudi R., (2005) “A novel method for materials selection in mechanical design: Combination of non-linear normalization and a modified digital logic method”, *Materials and Design*, article in press.
- [14] ABAQUS User’S and Theory Manuals (2003), Version 6.5, Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc.
- [15] Incropera, F.P.; e de Witt, D.P., (2003), “Fundamentos de transferência de calor e de massa” – 5Ed., Editora LTC, Rio de Janeiro

POLYMERIC MATERIALS FOR SANDWICH PIPES FOR ULTRA DEEPWATERS APPLICATIONS

Recent researches point to the great potential of the sandwich pipe conception for ultra deepwater exploitation and production of oil and natural gas. Its configuration is very simple and comprises two concentric metallic pipes with a core material, polymeric or ceramic, in the annulus. The main functions of the annular layer are: to provide satisfactory thermal insulation so as to avoid the formation of wax and hydrates along the pipeline during production shutdown; to improve the overall structural strength of the system. Polypropylene and cement have been recently proposed for these applications. The reason for the choice of these materials was the low cost and the extensive availability in industry. Here a systematic material selection approach is employed in order to assess the applicability of other polymeric materials. The attributes of materials needed to meet the design specification are thoroughly studied. The material approach has generated as result a group of potential materials, including polypropylene. In the second part a finite element method-based model was developed in order to assess the collapse pressure of polypropylene-based sandwich pipe. The numerical analyses embrace simulations either room temperature or under a thermal gradient ranging from 25 up to 90°C. Polyamide 6.6 has been also added in the analyses as alternative material for filling the annular layer.

Sandwich Pipe, Material Selection, Ultra-deepwater Applications, Structural Strength

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.