

INFLUÊNCIA DA ADESÃO ENTRE CAMADAS NA RESISTÊNCIA ESTRUTURAL DE DUTOS SANDUÍCHE

Xavier Castello¹ (COPPE/UFRJ), Segen Estefen² (COPPE/UFRJ)

^{1,2}Departamento de Engenharia Oceânica, CxP.68508 CEP 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

¹xavier@lts.coppe.ufrj.br

²segen@lts.coppe.ufrj.br

Dutos de parede composta de camadas de aço separadas por anular de polipropileno (dutos sanduíche) podem ser utilizados para o transporte de petróleo em águas profundas, combinando aspectos associados à alta resistência estrutural com isolamento térmico para prevenção de bloqueio por parafina.

Protótipos de dutos sanduíche com geometria típica da empregada na indústria do petróleo foram fabricados para testes de pressão externa em câmara hiperbárica. O processo de fabricação envolveu o revestimento do duto interno com polipropileno pelo método de extrusão lateral seguido do encamisamento com o duto externo e aplicação de adesivo estrutural simultaneamente. Para verificar se o adesivo proposto para a fabricação era apropriado, alguns testes de cisalhamento e análises numéricas foram executados para prever o comportamento do duto nestas condições de fabricação.

A partir de estudos anteriores, sabe-se que existe grande influência da falta de adesão entre camadas na resistência limite de dutos sanduíche. Neste trabalho, apresenta-se um modelo numérico elaborado em programa de elementos finitos capaz de simular a variação da adesão entre camadas para determinar o comportamento estrutural do duto sob carregamento combinado de pressão externa e flexão longitudinal. As propriedades de adesão das interfaces de contato do duto interno e do duto externo com o polímero foram modeladas empregando-se finas camadas de elementos coesivos associadas a modelos constitutivos de aderência, de iniciação e de propagação de falha, que permitem o escorregamento das superfícies quando um determinado valor de tensão de cisalhamento na interface for alcançado. Estes modelos foram alimentados com dados de testes de cisalhamento com corpos de prova retirados dos protótipos de dutos sanduíche.

Os resultados indicam que a geometria analisada tem capacidade para instalação em 3000 metros de profundidade considerando materiais, ovalização da seção transversal e fatores de segurança usuais. A condição de adesão assumida nesta análise corresponde a 10% da condição de adesão máxima.

Duto sanduíche, resistência limite, adesão, elementos finitos

1. INTRODUÇÃO

Dutos Sanduíche (SP) são compostos por dois tubos de aço montados concêntricamente com polipropileno no anular. Alta resistência estrutural é obtida devido a estrutura sanduíche (um caso particular de compósito) ser caracterizada pela combinação de diferentes materiais colados, contribuindo com suas propriedades individuais para o desempenho global da estrutura. Geralmente, uma estrutura sanduíche é dividida em três camadas: duas externas finas e rígidas e uma central espessa e flexível. As camadas externas são coladas na interna para permitir a transferência de carregamento entre os componentes. Estudos numéricos e experimentais têm sido desenvolvidos para obter dados sobre o comportamento mecânico deste tipo de estrutura, como apresentado por Borsellino *et.al.* (2004) para estruturas sanduíche, empregando polímeros e fibra de vidro, e Sokolinsky *et.al.* (2002), para colapso de painéis sob carregamento compressivo com camada central completa ou parcialmente colada. Estruturas sanduíche, i.e. painéis leves e rígidos têm sido empregados na indústria naval, buscando as vantagens associadas à redução de peso, economia de combustível, estabilidade durante a navegação e resistência à corrosão, como mencionado por Mouring (1999). Muitas aplicações multicamadas são encontradas com o propósito de isolamento térmico para dutos e equipamentos submarinos na indústria *offshore*, mas o benefício do aumento do desempenho estrutural não tem sido perseguido para dutos submarinos, como é o caso do presente trabalho.

Estudos numéricos e experimentais desenvolvidos por Estefen *et.al.* (2005) para a resistência limite sob carregamento combinado de pressão externa e flexão indicam que dutos sanduíche são aplicáveis em profundidades de até 3000 metros de profundidade. Observou-se que o comportamento do contato entre as camadas, i.e. o grau de adesão, tem grande influência na pressão de colapso. Entre as vantagens em relação ao duto de parede simples foi notada uma resistência à flexão significativamente superior para uma pressão externa equivalente, com peso de aço similar. A resistência estrutural é também muito afetada pela propriedade mecânica do material anular. Polipropileno foi adotado no presente trabalho devido às razões de baixo custo, boas propriedades mecânica e térmica. Essencialmente, a escolha do material anular é um compromisso entre a

resistência e o isolamento térmico. Novos materiais à base epóxi com micro e macro esferas de vidro suportam pressões e temperaturas nas condições de operação em águas ultra profundas, proporcionando ainda boas propriedades de isolamento térmico.

Revestimento externo com materiais de baixa condutividade térmica, i.e. espuma de poliuretano, é amplamente empregado em dutos submarinos. Pode ser aplicado em multi-camadas com diferentes densidades para combinar propriedades térmicas, mecânicas, químicas e anti-corrosivas. Contudo, a pressão imposta pela coluna d'água limita a aplicação de espumas poliméricas a uma certa profundidade e o uso de sistemas Pipe-in-Pipe (PIP) torna-se necessário se o isolamento térmico for um requisito essencial.

Neste trabalho, a modelagem numérica da resistência limite para carregamento combinado de pressão externa e flexão longitudinal é empregada para uma geometria de SP. Protótipos com geometria similar, atualmente em fabricação, serão utilizados para testes de laboratório. O modelo numérico emprega características especiais de contato para simular os efeitos da adesão entre camadas. Testes experimentais com segmentos de duto sanduíche foram conduzidos para avaliar o comportamento do adesivo adotado. Os resultados numéricos mostraram grande influência do grau de adesão entre o polipropileno e o aço do tubo externo na resistência limite do duto sanduíche. Redução da condição ideal de adesão para apenas 10% de sua capacidade máxima, resultou em uma pressão de colapso superior a 3000 metros de profundidade.

2. MODELO NUMÉRICO PARA CARREGAMENTO COMBINADO

Análises estruturais foram implementadas pelo método dos elementos finitos utilizando o software ABAQUS (Hibbit *et al.*, 2004). A Figura 1 mostra o anel de duto sanduíche utilizado para as análises de resistência limite, onde um e dois elementos foram empregados na espessura para o aço e para a camada anular, respectivamente. O comprimento do modelo de anel é igual ao comprimento do elemento na espessura de aço. Condições de simetria foram aplicadas no plano X-Y e num dos planos Y-Z. O plano Y-Z oposto tem seus nós com graus de liberdade longitudinais (x) acoplados para simular estado plano de deformação, e assim, obter os mesmos resultados de um duto longo.

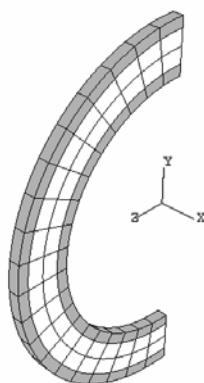


Figura 1: Malha de elementos finitos do modelo de anel de duto sanduíche

A Tabela 1 apresenta as dimensões do duto analisado, onde D_n é o diâmetro nominal, t é a espessura da camada considerada e D_e e D_i são os diâmetros interno e externo, respectivamente. Os dutos de aço foram selecionados de acordo com o padrão API 5L. A geometria foi definida com base na disponibilidade do fabricante e capacidade de teste dos equipamentos do laboratório, considerando que o programa de desenvolvimento inclui testes com protótipos.

Tabela 1: Propriedades geométricas do duto sanduíche

D_n (pol)	D_i (mm)	D_e (mm)	t (mm)
6 5/8	155,5	168,3	6,4
Anular	168,3	206,3	19
8 5/8	206,3	219,1	6,4

Ovalização inicial de 0.2 % foi incluída na malha de elementos finitos dos modelos de duto. A pressão de colapso é determinada pelo método de *Riks* de controle de incremento, enquanto que a resistência limite em flexão foi determinada pelo momento máximo na curva momento-curvatura. A flexão foi aplicada através de incrementos de rotação do plano da seção transversal (Y-Z) com o auxílio de equações de acoplamento cinemático. Assume-se que este plano permanece plano e perpendicular à linha neutra durante o carregamento.

Em todos os modelos a malha tridimensional foi gerada com elementos sólidos quadráticos de 27 nós (C3D27) de 3 graus de liberdade por nó. A camada anular foi gerada com elementos com formulação híbrida (C3D27H), a qual é necessária para a modelagem do material polimérico como hiperelástico e incompressível volumetricamente. O comportamento do aço API X-60 empregado nos dutos foi modelado por teoria de plasticidade de Lei de Fluxo J2 associada com encruamento isotrópico e critério de escoamento de Von Mises. Curvas de tensão-deformação resultante de ensaio de tração uniaxial do aço e do polipropileno são informadas ao programa.

Estudos de sensibilidade de malha foram feitos anteriormente e os modelos utilizados por Castello e Estefen (2006) são empregados neste trabalho com alterações para avaliar o efeito da adesão na resistência estrutural através do uso do modelo de coesão baseado em dados experimentais de resistência de adesão.

3. ADESÃO ENTRE AÇO E POLÍMERO

A fabricação dos protótipos de duto sanduíche envolve etapas similares às de fabricação de dutos simples com revestimento multi-camadas. Neste processo, o duto interno é jateado com granalhas de aço, pré-aquecido e revestido com FBE (*Fusion Bonded Epoxi*). Em seguida, uma camada de adesivo sobreposta por camadas de polipropileno são extrudadas lateralmente sobre o tubo, refazendo a segunda camada até que a espessura desejada de polímero seja alcançada. Este processo garante alta adesão do polímero ao aço, o qual é considerado padrão na indústria *offshore*. O duto interno revestido é então deslizado para o interior do duto externo na etapa final de montagem. Nesta fase, a adesão deve ser garantida pela aplicação de um adesivo estrutural no espaço remanescente entre o polímero e o duto externo.

Sempre que possível, as juntas devem ser projetadas para que o carregamento predominante seja o de cisalhamento, resultando em uma junta econômica e mais resistente à falha. Tração pura é também comparável ao cisalhamento puro em resistência, porém nem sempre é possível assegurar que o único carregamento presente seja o desejado, como descrito por Shield (1984).

Na maior parte dos casos, quanto mais espesso o adesivo, maior o nível de tensões e deformações. No caso de cisalhamento puro, as tensões máximas ocorrerão nas bordas da junta, como demonstrado por Li et.al. (1999). No caso do duto sanduíche, o aumento da ovalização da seção transversal causada pela pressão externa, flexão longitudinal ou a combinação destes, irá induzir cisalhamento na direção circunferencial. Adicionalmente, tração e compressão irão ocorrer entre as camadas, dependendo da condição de carregamento. A mistura destes carregamentos irá reduzir a resistência da junta, mas será suavemente distribuída e não existe borda na união circunferencial para que a concentração de tensões ocorra.

O comportamento das tensões e deformações do adesivo não foi analisado neste trabalho. A intenção é obter a resistência limite do duto sanduíche em função do nível de adesão, desprezando a influência da espessura do adesivo, tipo ou processo de falha. O nível de adesão do duto colado é avaliado pela máxima tensão de cisalhamento obtida nas superfícies de contato.

Testes de adesão foram conduzidos utilizando três tipos de corpos de prova. O teste de cisalhamento simples foi projetado para comparar diferentes adesivos. Os testes com corpos de prova de duto sanduíche foram utilizados para avaliar o nível de adesão alcançado na adesão do polipropileno ao duto interno (referente ao processo de extrusão lateral na fabricação) e ao duto externo (referente à colagem na fase de encamisamento).

4. CORPO DE PROVA DE CISALHAMENTO

Um corpo de prova constituído de duas peças metálicas e uma placa quadrada de polipropileno foi preparado para avaliar a tensão de cisalhamento da união aderida com dois produtos diferentes. As dimensões do corpo de prova são apresentadas na Figura 2 em milímetros. A intenção é comparar a resistência do adesivo utilizado na montagem dos dutos sanduíche em escala reduzida dos estudos anteriores de Netto *et al.* (2002) (adesivo PANG) com o adesivo proposto pela 3M para a construção dos protótipos (DP8005).

Na Figura 3 apresenta-se o resultado do teste de tensão de cisalhamento versus deslocamento do corpo de prova de tração para os dois adesivos citados. O corpo de prova foi tracionado até a falha do adesivo a uma velocidade de 1 mm/min em equipamento de ensaio de tração.

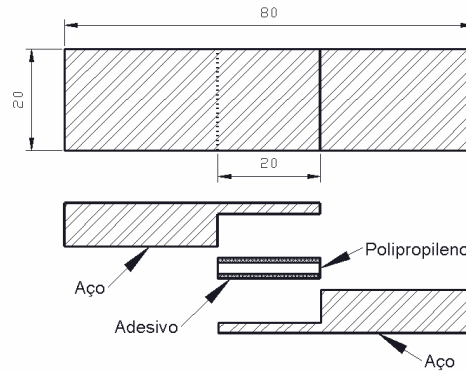


Figura 2: Dimensões do corpo de prova de cisalhamento

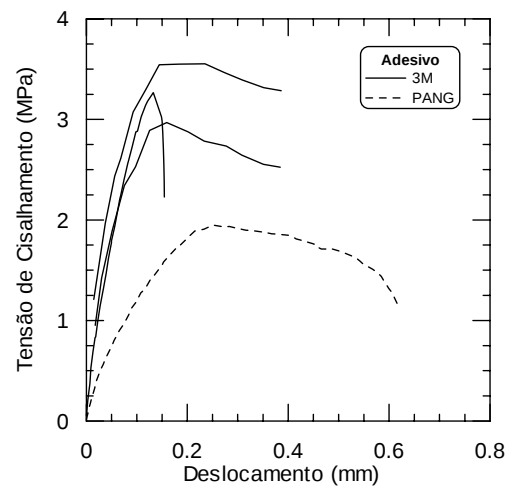


Figura 3: Resultados dos testes de cisalhamento

Valores entre 3 e 3,5 MPa de tensão de cisalhamento máximo foram obtidos para o adesivo 3M, os quais são significativamente superiores ao do adesivo PANG em torno de 2 MPa. O PANG tem base de borracha sendo indicado para vulcanização, enquanto que o 3M é estrutural com base acrílica, como se observa no módulo de elasticidade inicial dos testes.

5. TESTE DE ADESÃO DO POLÍMERO AO DUTO EXTERNO

Seções com 100 mm de comprimento foram utilizadas para avaliar a adesão do adesivo 3M em duas condições de rugosidade superficial do polipropileno, sendo dois corpos de prova lisos e dois com rugosidade aplicada por esmerilhamento. A interface colada do duto externo com o polipropileno foi feita manualmente, aplicando o adesivo com bisnagas simultaneamente ao encamisamento. A folga radial média entre o polímero e o duto de aço externo é de 2 mm. O volume total disponível para o adesivo estrutural na folga dos corpos de prova foi preenchido em aproximadamente 60%. A superfície interna de todos os dutos externos foi jateada para aumentar a rugosidade. Na Figura 4 observa-se o segmento de duto sanduíche antes e depois da falha. Foi utilizada uma prensa hidráulica com monitoramento por célula de carga e deslocamento por relógios comparadores com saída analógica. O teste consistiu em cisalhar a união através da aplicação de esforços axiais contrários sobre o duto interno e externo, com o auxílio de anéis de aço com diâmetros coincidentes aos do duto sanduíche para apoiar o corpo de prova na base e na célula de carga da prensa, permitindo um deslocamento total de 30 mm após a falha. A Figura 5 apresenta os resultados de tensão de cisalhamento versus deslocamento.

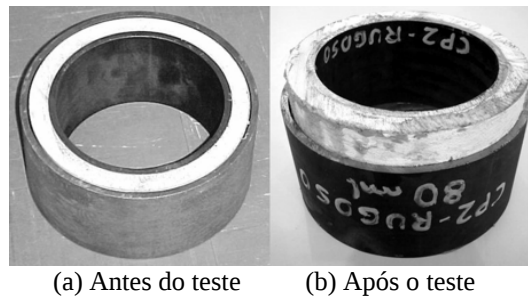


Figura 4: Corpos de prova de duto sanduíche

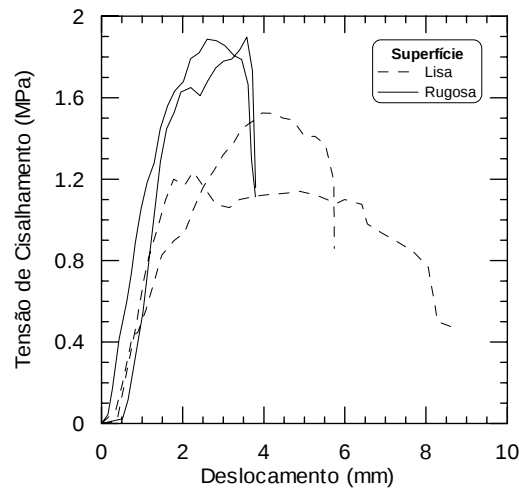


Figura 5: Resultados dos testes com corpos de prova de duto sanduíche

Os resultados mostram um valor máximo de tensão de cisalhamento em torno de 1,9 MPa para os corpos de prova com rugosidade na superfície do polipropileno. Valores entre 1,2 e 1,5 MPa foram obtidos para os testes sem aplicação de rugosidade no polímero. Nota-se que os resultados máximos de tensão equivalem a aproximadamente 60% dos obtidos no teste com corpo de prova de cisalhamento. Defeitos e imperfeições associadas à dificuldade de aplicação do adesivo na montagem dos segmentos de duto também causaram diminuição na eficiência da união em relação ao teste anterior, por exemplo, a excentricidade e o desalinhamento.

Estes resultados serão utilizados como base para avaliar numericamente a capacidade estrutural do duto sanduíche nestas condições e ajudar na avaliação do adesivo especificado na construção dos protótipos.

6. TESTE DE ADESÃO DO POLÍMERO AO DUTO INTERNO

Após o teste anterior, um segmento de duto interno revestido com polipropileno foi cortado longitudinal e transversalmente de forma a obter corpos de prova compostos por duas peças de aço (duto interno) aderidas ao polímero no revestimento, como visto na figura 6.

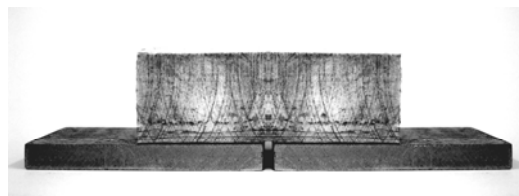


Figura 6: Corpo de prova para teste de adesão retirado do duto interno revestido

A seção de polipropileno está aderida às duas peças metálicas pelo processo original de fabricação por extrusão lateral, onde uma camada de FBE (*primer* epóxi) é inicialmente aplicada no metal e o polipropileno é aderido a este com uma camada de adesivo também à base de polipropileno. Cada seção aderida é quadrada e tem área de 1 pol². As peças de aço foram tracionadas nas mesmas condições do teste com corpo de prova de cisalhamento até a falha da união. Os resultados de tensão de cisalhamento versus deslocamento são apresentados na Figura 7.

Tensões de cisalhamento máximas em torno de 9 MPa foram obtidas na maioria dos testes, nos quais ocorreu falha de adesão do lado do metal sem arrancar a camada de tinta epóxi (*primer* FBE) do aço. Em alguns casos parte do adesivo permaneceu colado, ocorrendo cisalhamento entre a primeira e a segunda camada de extrusão. Isto demonstra que o nível de adesão obtido pela união é suficientemente alto para alcançar a resistência do polímero na região próxima ao contato com o adesivo. O nível de adesão do FBE também se mostrou adequado, já que o adesivo do polipropileno falhou antes deste e sem arrancá-lo do aço.

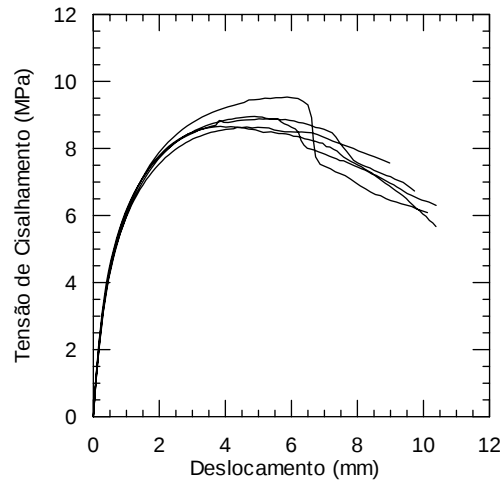


Figura 7: Resultados do teste de adesão do polímero ao duto interno

7. MODELO DE COESÃO ENTRE CAMADAS

Modelos de simulação da adesão entre camadas foram desenvolvidos nos trabalhos recentes dos autores, Castello and Estefen (2006), no qual foram comparados os resultados de pressão de colapso para um modelo de contato considerando fricção entre superfícies e um modelo empregando molas não-lineares para simular a propriedade variável de adesão. A correlação entre os modelos foi boa e o uso do modelo de molas também permitiu a obtenção de resultados para carregamento de flexão. Neste trabalho, um novo modelo de contato baseado em elementos de coesão foi proposto para verificar os resultados anteriores e avançar nas pesquisas, uma vez que o modelo é capaz de simular iniciação e evolução de dano.

O objetivo é analisar o comportamento estrutural do duto quanto a uma limitada adesão entre as interfaces de materiais distintos, portanto o modelo de adesão assume que o adesivo tem espessura próxima a zero e não são analisadas as tensões e deformações da camada de adesivo. Apenas suas características macroscópicas são empregadas em um modelo de tração-separação. Este elemento modela a iniciação de dano e a sua propagação que levará a eventual falha da interface. No modelo de anel de SP (tridimensional) a separação assume três componentes: uma na direção normal à superfície (separação propriamente dita) e duas tangentes a esta, as quais são representativas do cisalhamento.

O elemento coesivo empregado (COH3D8) tem a forma característica de um elemento contínuo de 8 nós, sendo idealizado por duas superfícies separadas por uma espessura. O deslocamento relativo entre as duas superfícies representa a abertura e fechamento da interface. O deslocamento na direção perpendicular à espessura quantifica o comportamento em cisalhamento.

A seção coesiva é modelada por material linear elástico, associado a um modelo de iniciação de dano e outro de evolução. O material inicialmente elástico depende do valor de espessura constitutiva para obter as deformações, independentemente do valor da espessura geométrica. Adotando-se um valor unitário, a separação se iguala à deformação, como visto na Equação 1, onde ε e δ são deformação e separação na respectiva direção i e T_0 é a espessura constitutiva inicial.

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{T_0} \quad (1)$$

A rigidez do adesivo foi considerada isotrópica, definindo-se a componente de tração igual às de cisalhamento. Na Equação 2 a rigidez da interface é definida em função da elasticidade do material E_i e a espessura inicial T_0 .

$$K_i = \frac{E_i}{T_0} \quad (2)$$

O critério de iniciação de dano (falha do adesivo) de tensão nominal máxima (t_i^0) foi adotado. A falha inicia quando a razão de tensão atuante ($\bar{t}_i$) pela tensão máxima alcança o valor unitário ($\max_{crt} = 1$), conforme a Equação 3, onde n é a componente normal e s e t são as cisalhantes. O uso do símbolo $\langle \rangle$ representa os colchetes de Macaulay, definindo que uma função se torna nula se for negativa, ou seja, um estado de tensão compressivo não inicia a falha.

$$\max_{crt} \left\{ \frac{\langle \bar{t}_n \rangle}{t_n^0}, \frac{\bar{t}_s}{t_s^0}, \frac{\bar{t}_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (3)$$

Desta forma, qualquer uma das razões de tensão que satisfazer o critério inicia a falha.

A evolução do dano deve ser adotada para simular a queda de resistência da união assim que a falha for iniciada. A variável D representa o acúmulo de dano desenvolvido pelo efeito dos mecanismos adotados. Inicialmente, D é nulo e evolui para 1 quando a falha total for alcançada, e desta forma, a tensão trativa será nula e nenhuma resistência na junta existirá, conforme demonstrado na Equação 4, para carregamento normal, e na Equação 5, para carregamentos cisalhantes:

$$t_n = \begin{cases} (1-D)\bar{t}_n, \bar{t}_n \geq 0 \\ \bar{t}_n, \bar{t}_n < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$t_{s,t} = (1-D)\bar{t}_{s,t} \quad (5)$$

Assim como no modelo de iniciação de falha, a tração normal compressiva ($\bar{t}_n < 0$) não causa evolução de dano.

Um descarregamento linear baseado em deslocamento foi empregado, onde a separação efetiva δ_m (Equação 6) é utilizada para o cálculo da evolução de D após a iniciação de falha (Equação 7), onde δ_i define as componentes de separação nas respectivas direções. $\delta_m^{\max}$, δ_m^0 e δ_m^f são a separação máxima obtida no histórico de carregamento e a separação no início e no final da falha, respectivamente.

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2} \quad (6)$$

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (7)$$

O valor de δ_m^0 depende da rigidez do adesivo E_i e a diferença $\delta_m^f - \delta_m^0$ corresponde ao deslocamento total após início de falha até a falha completa, como visto na Figura 8, que ilustra o comportamento do modelo de dano explicado. O valor de tensão máxima (t_i^0) para início de falha corresponde ao valor de tensão de falha do adesivo que se deseja modelar (tensão de cisalhamento máxima).

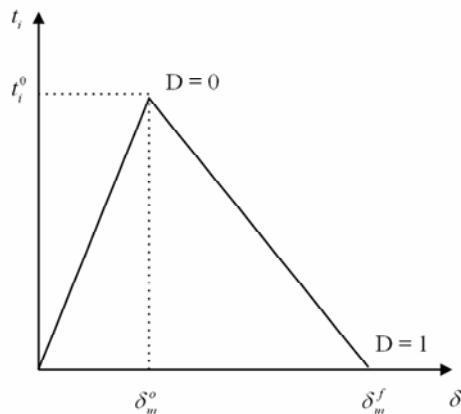


Figura 8: Modelo de acumulação de dano

8. EFEITO DA ADESÃO NA RESISTÊNCIA LIMITE

Resultados de pressão de colapso para o duto sanduíche, empregando o modelo de coesão entre camadas, foram comparados aos resultados obtidos no trabalho anterior em que foi empregado o modelo de molas não-lineares, Figura 9.

No modelo coesivo foram adotados rigidez de 2500 MPa, deslocamento total para falha do adesivo de 0,1 mm e tensão de cisalhamento máxima de 1,5 MPa (baseados nos testes de adesão), mantendo-se a interface entre polímero e duto interno perfeitamente aderida. Foi considerada ovalização inicial de 0,2%.

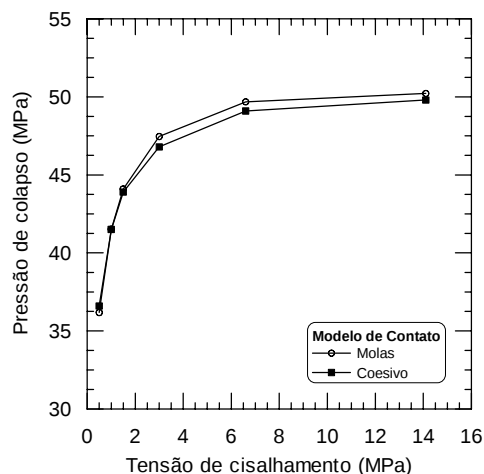


Figura 9: Comparação da pressão de colapso para os modelos de coesão e de molas

Observa-se influência significativa da variação do nível de adesão na camada colada (entre polímero e duto externo) na resistência à pressão externa, com uma redução de 25% da pressão de colapso quando se reduz a adesão de 14 para 0,5 MPa (90% de redução).

A correlação entre os modelos é adequada. Além disso, os resultados utilizando o modelo de molas não-lineares foram bem correlacionados ao modelo de fricção de Coulomb no trabalho anterior, portanto, os três modelos geram resultados coerentes para pressão de colapso.

Curvas de resistência limite foram obtidas empregando o modelo coesivo de adesão e comparadas à curva obtida com o modelo de molas não-lineares, para uma tensão de cisalhamento de 1,5 MPa para a interface colada e perfeitamente aderida para a interface extrudada. Além disso, a resistência máxima considerando adesão perfeita (tensão de cisalhamento acima de 14 MPa) também foi plotada na Figura 10 (a), para permitir a comparação.

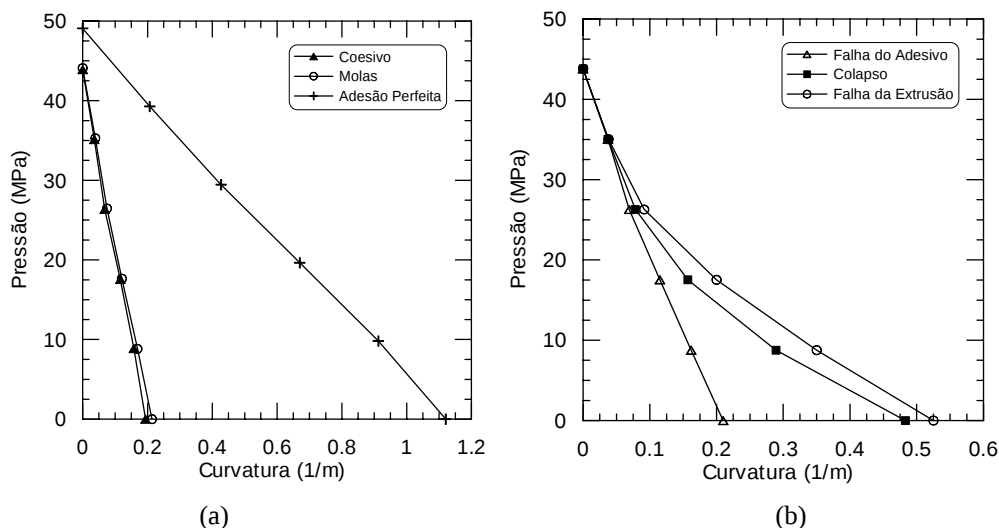


Figura 10: Curvas de resistência limite em função da adesão (a) para os modelos coesivo e de molas não-lineares e (b) obtida nos testes para as interfaces colada e extrudada

Novamente, a correlação com o modelo de molas é boa. A curva de resistência do modelo coesivo é referente ao início da falha do adesivo.

A comparação com a curva de adesão perfeita indica que o efeito da perda de adesão é maior na resistência à flexão. Foi observado que no momento do colapso por curvatura, o duto apresenta ovalização geométrica em torno de 2,5 vezes a ovalização no instante de colapso por pressão externa pura. Associando esta observação ao

fato de a tensão de cisalhamento na união na direção longitudinal ser desprezível, conclui-se que o aumento da ovalização é a principal causa da falha do adesivo.

Resultados de resistência limite para a condição de fabricação dos protótipos, incluindo os dados dos testes de adesão para ambas as interfaces (colada: polímero com o duto externo; extrudada: polímero com o duto interno) também foram obtidos. O modelo de coesão da interface extrudada foi definido com tensão de cisalhamento máxima de 9 MPa, sendo o módulo de elasticidade e o deslocamento total para falha idênticos ao modelo de coesão da interface colada.

Observou-se que o uso deste modelo permite observar o comportamento progressivo dos danos causados pelo carregamento no duto. A Figura 10 (b) mostra as curvas para a falha do adesivo, colapso do duto por resistência limite e falha da adesão da interface extrudada. A falha do adesivo ocorre com a iniciação de dano (quando $\max_{crt} = 1$ na interface colada e mais fraca). O colapso do duto sanduíche é devido à instabilidade estrutural quando o carregamento crescente permitiu a evolução do dano ($D = 0$ até 1, Figura 8) e, consequentemente, o escorregamento entre camadas. A curva de falha da extrusão indica que o duto colapsa para valores menores de carregamento que os necessários para causar a falha desta união.

A configuração deformada do duto no instante de colapso por flexão pura ($0,48 \text{ m}^{-1}$) é visualizada na Figura 11, onde se observa que a camada de aço externa está deslocada em relação ao polipropileno do anular, pois desde a curvatura de $0,21 \text{ m}^{-1}$ a falha de adesão ao duto externo se iniciou.

O mesmo efeito não é observado para o carregamento de pressão externa pura, no qual o colapso do duto ocorre quase simultaneamente à falha do adesivo.

A curva de momento versus curvatura para carregamento de flexão pura é vista na Figura 12, onde o momento máximo corresponde à curvatura de colapso e os instantes onde ocorreu perda de resistência devido à falha do adesivo e da extrusão são indicados. Nota-se que a curvatura de falha do adesivo corresponde ao indicado na curva de resistência limite e que o colapso somente ocorreu para a curvatura de $0,48 \text{ m}^{-1}$, instante no qual o duto é visualizado na Figura 11. O descarregamento pós-colapso é brusco, pois a instabilidade da estrutura é afetada pela perda da característica de compósito quando o esforço no duto de aço não é mais transmitido para o polímero com o escorregamento entre as camadas.

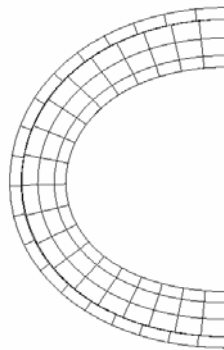


Figura 11: Deformada do duto sanduíche para o instante de colapso por flexão pura

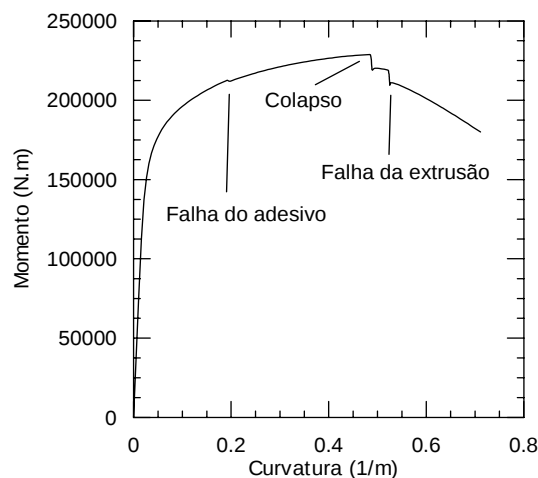


Figura 12: Curva de momento versus curvatura para flexão pura do duto sanduíche

9. CONCLUSÕES

Um modelo numérico capaz de determinar a resistência limite para carregamento combinado de pressão externa e flexão, incluindo propriedades de adesão entre camadas, foi elaborado. Testes com corpos de prova para avaliar o nível de adesão entre os materiais empregados foram executados tanto para a interface colada do duto externo e o polímero quanto para a interface unida por extrusão lateral referente ao processo de revestimento de dutos. As propriedades mecânicas obtidas nestes testes foram utilizadas para correlacionar modelos de adesão diferentes, aumentando desta forma a confiabilidade em relação aos resultados obtidos.

O modelo de coesão empregado neste trabalho permite a análise da iniciação e evolução do dano causado pelo carregamento até o colapso e no pós-colapso. Observou-se diferentes comportamentos da resistência do duto quanto à iniciação e acumulação de dano. No caso da resistência à pressão externa, o colapso do duto coincide com o momento de iniciação de dano, indicando que o estado limite depende fortemente da adesão. No caso da flexão pura a iniciação da falha do adesivo diminui a resistência à flexão, mas esta só ocorre para valores maiores de carregamento, indicando resistência residual.

As curvas de resistência limite para a geometria de protótipo de duto sanduíche, nas condições de adesão perfeita e de adesão com propriedades obtidas nos testes com corpos de prova, mostram que a queda de resistência é mais significativa para o carregamento de flexão, devido à maior ovalização causada por este tipo de carregamento. Como no projeto de dutos submarinos o carregamento de pressão externa é dominante em relação ao de flexão longitudinal, a perda de resistência em curvatura pode ser admissível. A pressão de colapso caiu 12% para uma redução de 90% da adesão em relação à condição ideal (14 MPa de tensão de cisalhamento para a interface colada).

10. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo suporte financeiro ao primeiro autor, à 3M pela cooperação e fornecimento de material para testes de adesivos e à TENARISCONFAB pelo projeto de colaboração tecnológica com a COPPE/UFRJ para construir os protótipos de duto sanduíche.

11. REFERÊNCIAS

- Borsellino, C., Calabrese, L. and Valenza, A. Experimental and numerical evaluation of sandwich composite structures. *Journal of Composites Science and Technology*, 2004, Vol 64, pp. 1709-1715.
- Castello, X. and Estefen, S.F. Adhesion effect on the ultimate strength of sandwich pipes. 25th *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Proceedings of OMAE'06*. Hamburg, Germany, 2006.
- Estefen, S.F., Netto, T.A. and Pasqualino, I.P. Strength analyses of sandwich pipes for ultra deepwaters. *Journal of Applied Mechanics*, 2005, Vol 72, pp. 599-608.
- Hibbitt, Karlsson, Sorensen Inc. ABAQUS User's and Theory Manuals. Version 6.5, 2004.
- Li, G., Lee-Sullivan, P. and Thring, R.W. Nonlinear finite element analysis of stress and strain distributions across the adhesive thickness in composite single-lap joints. *Journal of Composite Structures*, Vol. 46, 1999, pp. 395-403.
- Mouring, S.E. Buckling and postbuckling of composite ship panels stiffened with preform frames. *Journal of Ocean Engineering*, 1999, Vol 26, pp. 793-803.
- Netto, T.A., Santos, J.M.C., Estefen, S.F. (2002), "Sandwich Pipes for Ultra-Deep Waters". 4th *International Pipeline Conference, Proceedings of IPC'02*, Alberta, Canadá.
- Shield, J. ADHESIVES HANDBOOK. 3rd ed. ButterWorth e Co Ltd. 1984.
- Sokolinsky, V.S., Frostig, Y. and Nutt, S.R. Special behavior of unidirectional sandwich panels with transversely flexible core under statical loading. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2002, Vol 37, pp. 869-895.