

## **UM ESTUDO SOBRE MATERIAIS COMPÓSITOS E SUA APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE DUTOS PARA PERFURAÇÃO DE PETRÓLEO**

**Armando Carlos de Pina Filho, pina-filho@deg.ee.ufrj.br<sup>1</sup>**  
**Sérgio Ricardo Milki de Sousa, smilki@eletronuclear.gov.br<sup>2</sup>**  
**Max Suell Dutra, max@mecanica.coppe.ufrj.br<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Expressão Gráfica, CEP: 21949-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

<sup>2</sup>ELETRONUCLEAR, Gerência de Componentes Mecânicos, CEP: 20091-906, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica, CEP: 21945-970, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

**Resumo:** *O objetivo do trabalho aqui apresentado, a partir de uma revisão bibliográfica, é mostrar um estudo dos principais tipos de materiais compósitos, ressaltando suas propriedades estruturais para aplicação no desenvolvimento e produção de dutos para perfuração de petróleo em águas profundas, comumente chamados “risers”. Considerando o tema em estudo, apresentou-se os principais tipos de materiais compósitos: reforçados com partículas, reforçados com fibras e os compósitos estruturais. O foco principal do trabalho foram os compósitos reforçados com fibras, uma vez que esses são os mais importantes tipos de compósitos, com projetos para obtenção de características de alta resistência e/ou alta rigidez em relação ao seu peso. Para cada compósito, foram analisadas propriedades e aspectos de sua estrutura. Ao final do trabalho mostrou-se efetivamente a aplicação do material para produção de um riser rígido compósito. A partir do estudo realizado, observou-se que risers produzidos em material compósito apresentam uma melhor relação custo-benefício, quando comparados a risers metálicos (em aço). Apesar do alto custo de produção, é possível desenvolver risers compósitos com características estruturais adequadas, sendo mais leves e com maior vida útil, principalmente considerando-se a vantagem de serem resistentes a vários tipos de corrosão. Dessa forma, os risers compósitos se apresentam como uma alternativa viável em substituição aqueles fabricados em aço.*

**Palavras-chave:** *fabricação, materiais compósitos, risers.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Materiais compósitos são materiais multifásicos feitos através de processos artificiais ou de forma natural, como por exemplo, os ossos formados pela fase mole chamada de colágeno e a dura de apatita. Tais materiais exibem as propriedades das fases que são constituídos, obtendo melhor combinação de propriedades. As fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta. Assim sendo, materiais como algumas ligas metálicas e cerâmicas não se enquadram nesse contexto, pois suas múltiplas fases são formadas por consequência de fenômenos naturais.

Materiais compósitos são formados geralmente por apenas duas fases distintas: a matriz, que é contínua e envolve a outra fase, que é chamada dispersa. Existe uma classificação dos compósitos em três partes: compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e os compósitos estruturais. A fase dispersa dos compósitos reforçados com partículas tem eixos iguais, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções, enquanto os compósitos reforçados com fibra a fase dispersa tem a geometria de uma fibra. Nos compósitos estruturais as propriedades dependem dos materiais constituintes e do projeto geométrico dos elementos, sendo os tipos mais comuns os painéis em sanduíche e o laminares. Nos compósitos laminares, folhas de compósitos anisotrópicos são cimentadas umas sobre as outras alterando a direção de alta resistência com cada camada sucessiva, apresentando assim resistência relativamente alta em várias direções. Já nos painéis em sanduíche, duas folhas rígidas separadas por uma estrutura de recheio, fornecem resistência com baixo peso, proporcionando rigidez contra o cisalhamento ao longo dos planos perpendiculares as faces (Gibson, 1994).

O objetivo do trabalho aqui apresentado é mostrar um estudo dos principais tipos de materiais compósitos, ressaltando suas propriedades estruturais para aplicação no desenvolvimento e produção de risers.

Risers são dutos pelos quais as estruturas offshore recebem óleo e/ou gás dos poços do campo de produção, representando componentes críticos do sistema submarino, por estarem submetidos a elevados esforços. Os risers podem ser classificados de acordo com a sua configuração, material e finalidade. Risers rígidos são formados geralmente por seqüências de tubos metálicos ou compósitos, enquanto risers flexíveis são constituídos de camadas de aço intercaladas com polietileno. Os risers de perfuração e completação apresentam geometria vertical, enquanto que os risers de produção ou injeção podem assumir diferentes configurações em catenária.

## 2. COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS

Os compósitos reforçados com partículas são divididos em: compósitos com partículas grandes e compósitos reforçados por dispersão, essa classificação está relacionada ao mecanismo do reforço ou aumento da resistência. Na maioria dos compósitos, a fase particulada é mais rígida que a matriz. Essas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da fase matriz na sua vizinhança, ou seja, impedem a movimentação das discordâncias no mecanismo de aumento de resistência, enquanto a matriz suporta a maior parte da carga que é aplicada ao compósito. A matriz transfere parte da carga aplicada as partículas, com isso a melhoria das propriedades mecânicas depende da ligação matriz-partícula. Nos compósitos reforçados por dispersão, as partículas são muito pequenas, as interações partícula-matriz ocorrem ao nível molecular ou atômico enquanto que nos compósitos com partículas grandes as interações não podem ser tratadas assim. A matriz suporta a maior parte da carga enquanto as pequenas partículas dispersas evitam ou dificultam o movimento das discordâncias. Neste tipo de compósito há o aumento do limite de escoamento, da resistência à tração, da dureza, restringindo a deformação plástica.

## 3. COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

São os mais importantes tipos de compósitos, pois o objetivo dos seus projetos é a obtenção das características de alta resistência e /ou alta rigidez em relação ao seu peso (resistência específica e módulo específico)

Compósitos reforçados com fibras são fabricados com altos módulos específicos (razão entre o módulo de elasticidade e a densidade relativa) e altas resistências específicas (limite de resistência à tração/ densidade relativa), através do uso de materiais de baixa densidade para fibra e matriz (Gibson, 1994).

As propriedades mecânicas do compósito dependem das propriedades das fibras e da transmissão da carga pela matriz às fibras (Fig. (1)). Sendo assim, sob aplicação de uma carga, não existe um caminho a ser seguido em cada extremidade da fibra a partir da matriz, haverá sim uma deformação da matriz, pois a ligação fibra-matriz termina na extremidade da fibra. A Figura (2) mostra as possíveis disposições das fibras (parte dispersa) na fase matriz além de seus formatos.

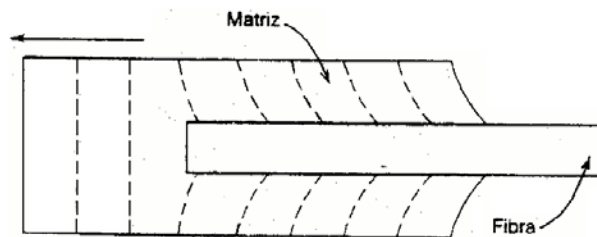


Figura 1. Fibra tracionada ocasionando deformação da matriz (Callister, 2000).

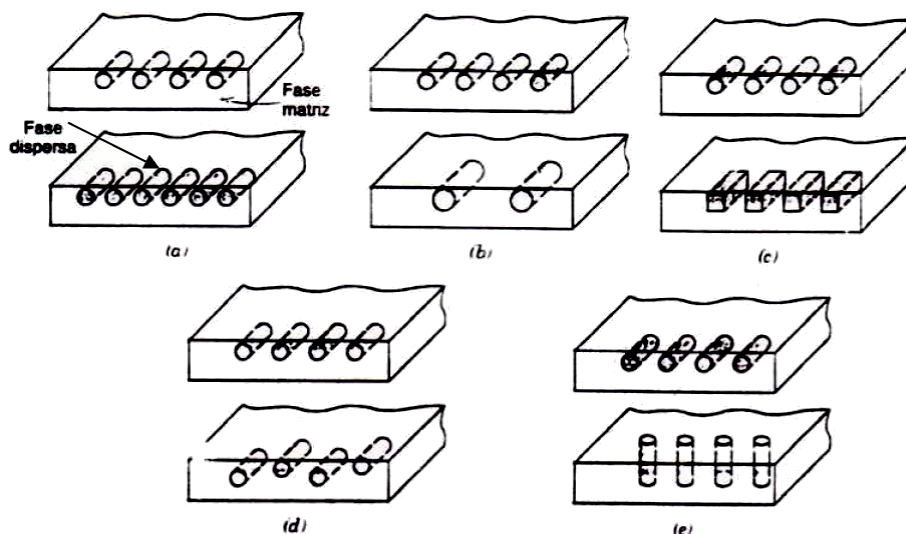


Figura 2. Várias distribuições das fases dispersas na matriz (Flinn e Trojan, 1990).

É necessário um determinado comprimento crítico de fibra para um aumento efetivo de resistência do material composto. O comprimento é dependente do diâmetro, do limite de resistência final da fibra, além da força de ligação da fibra-matriz (Gibson, 1994).

As propriedades e resistências dos compósitos são influenciadas pela concentração e arrumação (orientação) das fibras. As fibras podem ser orientadas paralelamente (fibras contínuas ou descontínuas) em uma só direção ou aleatoriamente (fibras descontínuas)

O comportamento mecânico dos compósitos com fibras contínuas e alinhadas depende do estado de tensão-deformação da fibra-matriz, das frações volumétricas das fases, da direção e valor da carga aplicada. Quando a tensão é aplicada ao longo da direção longitudinal (alinhamento), considerando fibra frágil e fase matriz dúctil, por exemplo, primeiro a matriz e a fibra se deformam elasticamente.

Num segundo estágio a matriz escoar deformando-se plasticamente, enquanto as fibras continuam a se deformar elasticamente. Na falha de um compósito, as fibras não fraturam ao mesmo tempo, devido a variação de resistência entre as fibras. Após as fraturas das fibras, elas continuam a resistir a cargas inferiores, a medida que ainda estão inseridas na matriz. Entretanto se ocorrerem aplicações de cargas de tração transversais, pode ocasionar falha prematura do compósito, pois a resistência à tração da fibra em geral é menor que a da matriz nessa condição, pois as fibras orientadas perpendicularmente à direção de carregamento comportam-se como concentradores de tensão na matriz e na interface, provocando falhas no compósito (Hull, 1981).

Os compósitos com fibras descontínuas e alinhadas são de eficiência inferior aos de fibra contínua (Gibson, 1994). Existem, porém, compósitos de fibras picadas com módulos de elasticidade e limite de resistência compatíveis com os de fibras contínuas.

Os reforços são divididos em “whiskers”, fibras e arames. Os “whiskers” (grafita, carbetto de silício, nitreto de silício e óxido de alumínio) são monocristais com a relação diâmetro-comprimento grandes. Devido ao pequeno tamanho, apresenta elevado grau de perfeição cristalina, o que resulta em elevadas resistências. Como desvantagens tem-se o alto custo e a dificuldade de incorporá-lo na matriz (Gibson, 1994).

Os materiais classificados como fibras são geralmente as aramidas e polímeros (aramidas poliméricas, vidro, carbono). São policristalinos ou amorfos e de pequenos diâmetros. Os materiais classificados como arames possuem diâmetros comparativamente grandes como por exemplo: aço, molibdênio e tungstênio.

### 3.1. Fase Matriz

A matriz pode ser feita de metais, polímeros ou cerâmicas. Normalmente são feitas de metal ou polímero, devido a ductilidade, no entanto, na utilização dos cerâmicos um componente de reforço é adicionado para melhorar a tenacidade.

A matriz é responsável por fazer a ligação entre as fibras, e atua como meio de distribuição das tensões para as fibras, apenas parte da carga é suportada pela matriz.

Uma outra função da matriz é de proteger as fibras contra agressões superficiais, pois podem provocar defeitos como trincas, levando a falhas (Gibson, 1994). A matriz separa umas fibras das outras, evitando a propagação de trincas entre elas. Embora algumas fibras possam falhar, o compósito só falha se um grande número de fibras adjacentes falharem. É de suma importância que as forças de ligação matriz-fibra sejam grandes para minimizar as extrações das fibras.

### 3.2. Compósitos com Matrizes Poliméricas

Freqüentemente a matriz determina a temperatura de trabalho, pois ela suporta uma temperatura inferior a de degradação das fibras de reforço (Gibson, 1994). As resinas poliméricas mais utilizadas e mais baratas são os poliésteres e os vinis ésteres. As de epóxi são as mais caras, são muito utilizadas em compósitos de aplicações aeroespacial, apresentam melhores propriedades mecânicas e resistência a umidade que os poliésteres e resinas vinílicas. Para aplicações a altas temperaturas, até aproximadamente 230°C em regime contínuo, são usadas a poliimidas.

#### 3.2.1. Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra de Vidro

São compósitos que consistem em fibras de vidro contidas no interior da matriz polimérica. O E-Glass é a forma de vidro mais usualmente estirado em fibras (Gibson, 1994). Os diâmetros das fibras variam entre 3 a 20  $\mu\text{m}$  (Folkes, 1982). As razões para utilização do vidro como reforço com fibras são:

- facilmente estirado a partir de seu estado fundido;
- pode ser fabricado economicamente devido a ser um material amplamente disponível e empregado em diversas técnicas distintas;
- quando no interior de uma matriz plástica, já que é uma fibra muito forte, o compósito adquire alta resistência específica;
- quando combinado com diferentes tipos de plásticos, apresenta inércia química (resistência química), tornando-se útil para aplicação em diversos meios corrosivos.

Defeitos de superfícies devido ao atrito entre superfície e material duro, assim como exposição de partes de vidro à atmosfera, afetam as propriedades relativas à tração (Agarwal e Broutman, 1990). Durante a etapa de estiramento, as fibras são revestidas com uma capa para proteger da ação ambiental, ela é removida antes da fabricação do compósito, sendo substituída por um agente de acoplamento chamado finish, responsável pela adesão matriz/fibra, resultante da afinidade entre grupos orgânicos presentes no composto (fibra/matriz), originários de tratamentos oxidativos ou eletroquímicos, melhorando a ligação matriz-compósito.

Os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro são materiais que apresentam algumas limitações. Apesar de terem resistências elevadas, não exibem rigidez para algumas aplicações (partes estruturais de aviões e pontes, etc), limitadas a temperaturas abaixo de 200°C. Temperaturas mais elevadas podem ser alcançadas com uso de sílica fundida de alta pureza para fibras e de polímeros de alta temperatura para a matriz (Gibson, 1994).

### 3.2.2. Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra de Carbono

O carbono é um material de fibra de alto desempenho e o reforço mais utilizado em compósitos avançados. As razões para sua utilização são as seguintes:

- dentre os materiais de fibras de reforços são os que possuem os maiores módulos e resistências específicas;
- mesmo a temperaturas elevadas as suas propriedades mecânicas são mantidas;
- não são afetadas, à temperatura ambiente, pela umidade ou solventes;
- os compósitos com essas fibras adquirem propriedades mecânicas específicas para uso na engenharia;
- os compósitos são relativamente baratos, com boa relação custo- benefício.

A forma estável do carbono cristalino nas condições ambientais é a grafita, logo o uso do nome de fibra de carbono pode parecer estranho já que ele é um elemento (Gibson, 1994). No entanto as fibras de carbono não são totalmente cristalinas, mas são compostas por regiões grafiticas e não cristalinas (desprovidas de arranjo ordenado tridimensional de redes hexagonais de carbono, característico da grafita).

As técnicas de fabricação de fibras de carbono são complexas, contudo três materiais precursores orgânicos diferentes são utilizados: Raiom, poliacrilonitrila (PAN) e piche. As técnicas de fabricação dependem do precursor, da mesma forma que a característica da fibra. As fibras de carbono se classificam de acordo com o módulo de tração em: Módulo padrão, intermediário, alto e ultra-alto. Os diâmetros das fibras variam de 4 a 10 µm, e encontram-se disponíveis nas formas picadas e contínuas. As fibras de carbono apresentam-se revestidas por uma capa protetora em epóxi, que melhora a adesão com o polímero.

### 3.3. Compósitos com Matriz Metálica

Podem ser utilizados em temperaturas elevadas sem o risco de inflamar. O reforço pode melhorar a resistência específica, resistência à abrasão, resistência à fluência, a condutividade térmica, resistência contra a degradação por fluidos orgânicos e a estabilidade dimensional. A maior desvantagem desse compósito é seu custo elevado em relação ao da matriz polimérica, por isso sua utilização é muito restrita. As ligas de alumínio, magnésio, titânio e cobre são empregadas como materiais de matriz. Os materiais de reforços incluem o carbono, boro, a alumina, o silício. Como exemplo de aplicação de compósitos em matriz metálica tem-se: motores de automóveis com matriz em liga de alumínio e reforços com fibras de alumina e fibras de carbono. Em aplicações aeroespaciais, mais especificamente no telescópico espacial Hubble, a matriz utilizada foi em liga de alumínio e reforços em fibras contínuas de grafita.

### 3.4. Compósitos com Matriz Cerâmica

Os materiais cerâmicos são resistentes à oxidação e a deterioração à temperaturas elevadas. A desvantagem é sua alta fragilidade. A resistência à fratura dos materiais cerâmicos tem melhorado significativamente pelo desenvolvimento de uma série de compósitos com matriz cerâmica (Gibson, 1994), particulados, fibras ou “whiskers” de um material cerâmico que se encontram no interior de uma matriz de um outro material cerâmico. Mesmo assim a resistência à fratura está entre 6 e 20 MPa, aproximadamente, enquanto os valores para os metais estão entre 15 e 150 MPa.

### 3.5. Compósitos Carbono-Carbono

Tanto o reforço de fibras como a matriz são feitos em carbono. São relativamente novos e caros, por isso não são muito utilizados. Suas melhores propriedades são: altos módulos de tração, limites de resistência à tração mantidos até temperaturas acima de 2000°C (Gibson, 1994), resistência à fluência e valores de tenacidade à fratura relativamente altos. Apresentam baixos coeficientes de expansão térmica, além de condutividades térmicas altas, com isso resulta uma baixa suscetibilidade aos choques térmicos. Como desvantagem, além do alto custo, temos a propensão à oxidação a altas temperaturas.

Os compósitos carbono-carbono são muito mais caros que os outros devido a sua complexidade de fabricação. Os procedimentos iniciais são iguais aos compósitos com matriz polimérica e fibra de carbono, ou seja, as fibras são impregnadas com resina fenólica, a peça é conformada para obter a forma final e a resina é deixada para curar. Depois então, a resina da matriz é convertida em carbono pelo aquecimento em uma atmosfera inerte, assim sendo, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio são eliminados deixando grandes cadeias de moléculas de carbono para trás. Para a matriz de

carbono ficar mais resistente e densa são necessários tratamentos térmicos subsequentes a altas temperaturas. O compósito ficará então restrito as fibras de carbono inalteradas no interior da matriz de carbono.

### 3.6. Compósitos Híbridos

São compósitos formados por várias combinações de fibras de materiais diferentes para uma só matriz. Como exemplo mais usual tem-se fibras de vidro e carbono inseridas no interior de uma matriz polimérica. O híbrido é mais resistente ao impacto, e pode tornar seu custo de fabricação mais barato que os compósitos produzidos totalmente com fibra de carbono ou com fibra de vidro. As fibras podem ser combinadas de uma determinada forma que o produto final obterá propriedades específicas em função dos materiais empregados, ou seja, as fibras de carbono são resistentes e rígidas e proporcionam reforços de baixa densidade, enquanto as fibras de vidro são mais baratas, mas não têm a rigidez das de carbono. Com o híbrido vidro-carbono pode-se fabricar compósitos mais rígidos, mais resistentes ao impacto, a um menor custo, comparativamente aos produzidos somente em fibra de carbono ou vidro.

## 4. DUTOS OU RISERS COMPÓSITOS

Funcionalmente, risers compósitos devem ter a performance semelhante aos de aço. Geralmente, as funções do riser são: controlar o fluido contido e pressões no poço; ser um membro estrutural do sistema; ser o envoltório contendo o conduto para transportar fluidos para o reservatório, e do reservatório; e ser um dispositivo para guiar perfuradoras e ferramentas para dentro do poço. Nessas funções, risers compósitos não exigem nenhuma técnica especial de manuseio ou equipamentos. Risers compósitos podem chegar aos requisitos estruturais dos serviços offshore, fornecendo melhores propriedades do que risers metálicos, apesar do custo efetivo mais caro.

### 4.1. Parede Tubular

Para tornar seu custo mais competitivo, o corpo do riser compósito pode ser uma estrutura híbrida, composta de fibra de carbono e fibra de vidro numa matriz de epóxi, com o tubo sendo fabricado através do processo de “Filament Winding”, no qual as fibras reforçadas (impregnadas por uma resina de epóxi) são aplicadas num mandril girante com precisão nas orientações e espessuras. A estrutura composta é então curada pela aplicação de calor, resultando em um tubo sólido. Depois da extração do mandril, as camadas termoplásticas ou elastoméricas (internas e externas) são instaladas. Alguns trabalhos interessantes sobre o processo de “Filament Winding” são apresentados por Ellyin et al. (2000), Carrino et al. (2003), e Souza (2007).

No projeto do riser compósito, a quantidade de fibra de carbono circunferencial é determinada pela pressão exercida na extremidade do topo do poço, próximo à árvore de natal (Shut-in Well Head Pressure - SIWHP). Esse material é igualmente distribuído nas superfícies internas e externas da parede do tubo, para maximizar a capacidade de resistência pela pressão externa. Essas camadas são híbridas, com epóxi e fibra de vidro, aumentando a resistência à avaria e impacto. Um feixe de fibras circunferencial de epóxi e fibra de vidro, localizado na metade das paredes do tubo, é também usado como parte de maior importância do material, a qual serve para aumentar a estabilidade da seção transversal, aumentando a distância entre os reforços circunferenciais de carbono internos e externos. As camadas de carbono de enrolamento longitudinal no riser compósito fornecem rigidez e resistência a esforços axiais. Esse aumento de resistência axial resulta numa parede de tubo mais que adequada para resistência a cargas axiais geradas pela SIWHP (Fig. (3)).

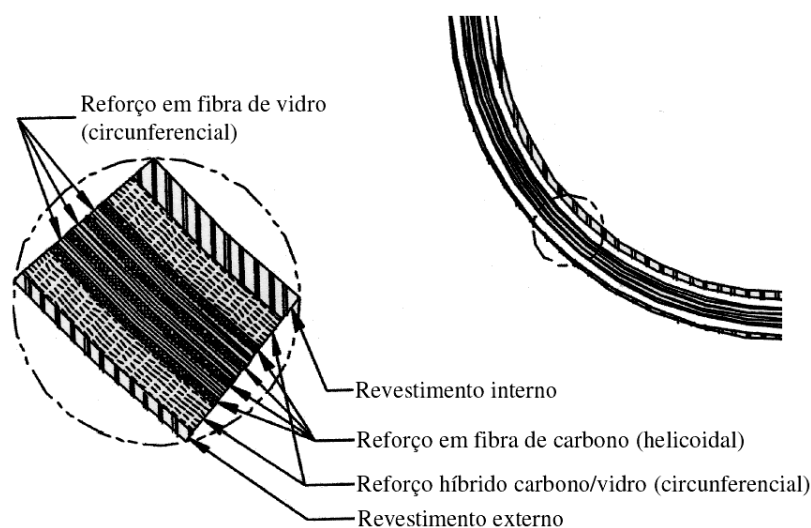


Figura 3. Composição da parede tubular (Baldwin et al., 1997).

## 4.2. Interface Compósito-Metal

Admitindo-se que o riser suporte primeiramente tração axial e pressão de carregamento (interna e externa), a interface selecionada do projeto é uma múltipla configuração de fechamento, na qual cada parte final adequada será incorporada dentro de cada parte final do tubo composto durante o processo de "Filament Winding" (veja Fig. (4)).

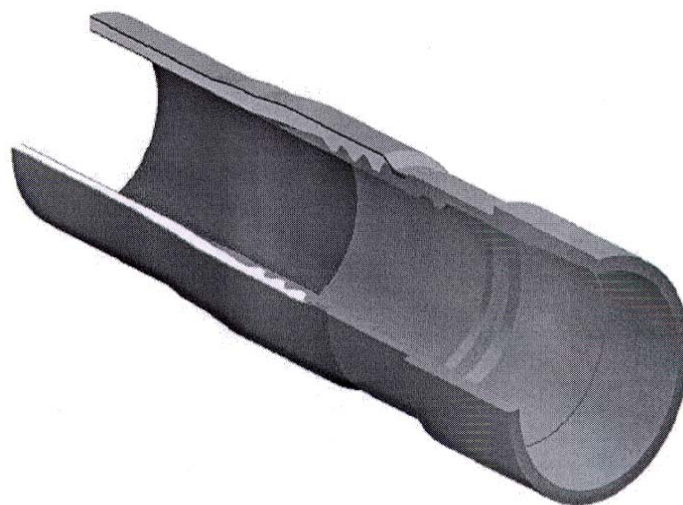


Figura 4. Interface compósito-metal de fechamento múltiplo do riser (Baldwin et al., 1997).

Em risers compósitos, a ausência de cargas de torção significativas faz o uso do fechamento atrativo. O mecanismo de transferência de cargas em um múltiplo fechamento pode variar muito, dependendo da parte geométrica. Cargas axiais são transferidas entre o tubo composto e encaixes de aço através das faces amarradas. No intuito de obter boa distribuição das cargas entre múltiplos fechamentos, deve-se levar em conta a relativa rigidez do aço e do material compósito. Devido aos vários fatores que afetam o desempenho, o projeto e análise de uma união de múltiplo fechamento devem ser executados usando o método de elementos finitos.

Quando modos de falhas observados em testes são correlacionados às previsões de esforços em análises por elementos finitos, esses dados são usados para avaliar o desempenho de uma dada configuração relativa ao material de projeto. Tendo estabelecido boa correlação entre testes observados e análises, o projeto poderá então, seguramente, ser avaliado pelos efeitos geométricos e mudanças de materiais.

## 4.3. Fabricação do Riser

Uma vez que a performance dos compósitos depende do processo de fabricação, é importante escolher um método mais adequado para fabricação, proporcionando melhores propriedades finais. Nesse caso, o processo mais aconselhável é o "Filament Winding" (Fig. (5)).

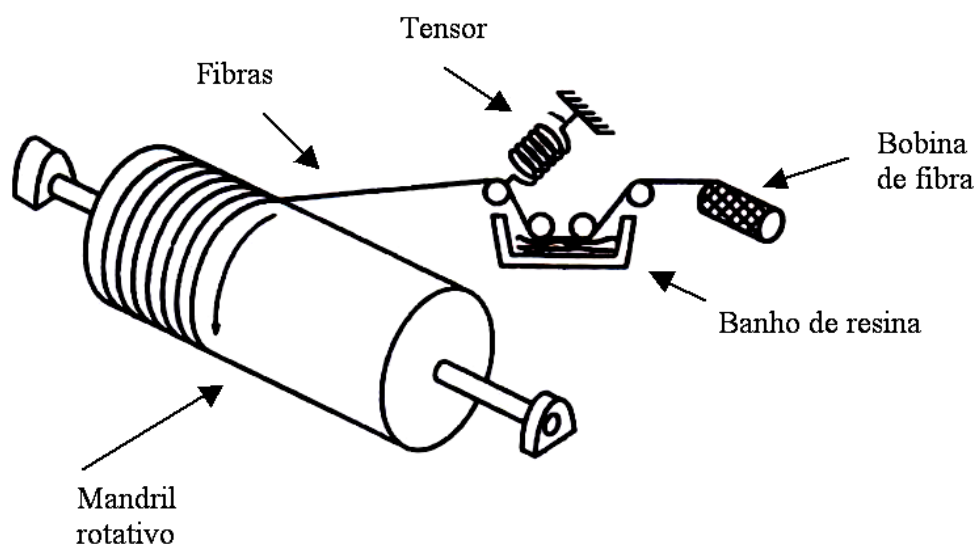


Figura 5. Processo de "Filament Winding" (Gibson, 1994).

As amostras devem ser fabricadas com a laminação sugerida, e interface compósito-metal com tubo de compósito de comprimento pré-determinado entre os encaixes metálicos das extremidades. Devem ser utilizadas linhas internas e externas de borracha nitrílica hidrogenada (HNBR).

As juntas de fixação finais para as amostras de risers compósitos devem ser fabricadas em um centro multi-ferramental de Comando Numérico Computadorizado (CNC). Inspeções das juntas finais incluem: verificação dimensional, certificação do material e inspeção não destrutiva. As juntas são fosfatizadas e embaladas para embarque. Quando no recebimento pelo fabricante do compósito, cada junta deverá estar desengraxada com solvente, e todas as superfícies e rosca protegidas. Por fim, HNBR pré-moldado é depositado sobre o perfil na interface da junta compósito-metal, e a montagem colocada num molde de cura num forno.

Em relação à fabricação do corpo do riser, antes de começar o enrolamento do compósito, as juntas finais de união são instaladas no mandril. As juntas são precisamente localizadas e suspensas por ferramentas especiais em cada extremidade do mandril. Depois, o HNBR (não curado) é enrolado sobre o mandril para formar o revestimento interno. As camadas de enrolamentos longitudinais, que fornecem resistência a esforços axiais e rigidez às juntas do riser, são enroladas de um lado para outro das extremidades das juntas e invertidas através de um pequeno contorno, que finaliza o formato final, localizado para fora (cúpula).

Após completar as camadas helicoidais, elas ficarão firmes entre a geometria de fechamento e a cúpula (domos). As fibras helicoidais serão então compactadas nos sulcos das juntas pela fibra estrutural que está acima. Reforços axiais são incorporados dentro do fechamento para melhorar a qualidade da junta. Para facilitar alta produtividade, fibra de vidro e fibra de carbono são impregnadas com resinas durante o processo de enrolamento. O método de impregnação é uma propriedade que é consistentemente controlada, para manter o percentual de resina na faixa de 2% por peso. A tração na fibra é outra propriedade controlada pelo ponto de impregnação. As seqüências de camadas e ângulos de enrolamentos, assim como a composição da resina e tração na fibra, são todos controlados pelo programa de enrolamento.

Numa próxima etapa, o mandril/montagem do enrolador será removido da máquina e colocado num dispositivo de cura. Após a cura, o compósito será visualmente examinado por dobramento de fibras e distorção, e o processo de cura também será verificado. Depois a peça será montada de volta dentro da máquina de enrolamento, onde uma grossa camada de HNBR envolverá o diâmetro externo do compósito. Sobre o HNBR será enrolado uma camada de fibra de vidro na sua circunferência, e uma outra camada de forma helicoidal, que compactará a borracha e fornecerá proteção extra para abrasão ao HNBR.

Com o término do recobrimento, o mandril/montagem retornará para cura no forno. Após resfriamento, o mandril será removido e a peça inspecionada, antes do procedimento do teste de aprovação. Como parte do processo de fabricação, cada junta do riser compósito estará sujeita a teste hidrostático e de estanqueidade, para comprovar integridade do material. Depois a peça será pesada, e finalmente a inspeção dimensional realizada (veja maiores detalhes em Johnson et al., 1999).

#### 4.4. Características do Riser

Risers compósitos devem resistir às ações de tração axial, pressões internas e externas, e as combinações dessas cargas. A partir de testes específicos, realizados por Baldwin et al. (1997), pode-se concluir que a falha por efeito de tração axial ocorre na interface compósito-metal em torno de 3747 KN. Testes de pressão com efeitos combinados (pressão combinada com carga axial) resultam em falhas na interface compósito-metal e falhas nos corpos dos tubos em torno de 84 MPa (Fig. (6)).

No sentido de estabelecer confiança industrial no comportamento do riser compósito a longo prazo, as juntas devem ser testadas sob condições de fadiga estática (tensões de ruptura). Nesse caso, os resultados de testes cíclicos de fadiga são fornecidos por curvas S-N. A inclinação das curvas de fadiga depende do tipo de material (carbono ou vidro) e do modo de falha (tração, compressão ou cisalhamento). O valor da resistência à fadiga é igual a resistência estática das juntas na temperatura de trabalho. Tais testes demonstram a perda de resistência por volta de 2,5% por década.

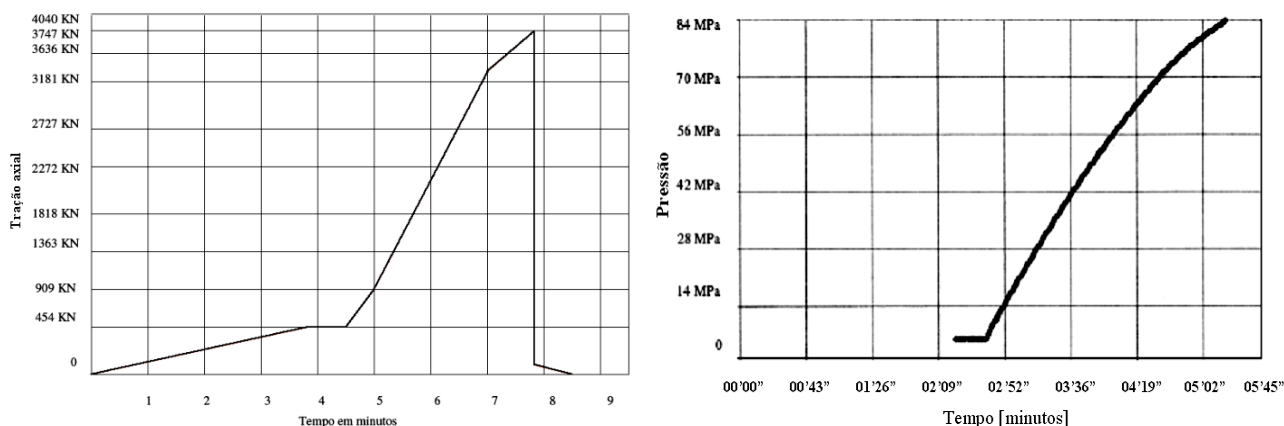


Figura 6. Testes em risers compósitos (Baldwin et al., 1997).

## 5. CONCLUSÃO

O trabalho aqui apresentado procurou mostrar os principais tipos de materiais compósitos e sua aplicação na produção de risers. Testes específicos demonstram que o corpo do tubo e a interface compósito-metal final do riser fabricado com material compósito têm margem de segurança adequada, no que se refere às cargas em serviço para risers. Risers compósitos têm um grande potencial de redução de custos, principalmente pela redução de peso que resultará em baixa tração no topo do riser, e conseqüentemente baixas cargas suportadas pela plataforma. Uma redução de cargas no convés possibilita redução estrutural no peso do mesmo, reduzindo tensões nos risers e nos sistemas de suporte, possibilitando uma menor unidade flutuante ou casco, reduzindo o sistema de amarras, e simplificando a ancoragem ou fundação. Dessa forma, uma maior aceitação do riser compósito ajudaria a reduzir ou eliminar a necessidade de sistema de tração no topo, resultando em uma melhor relação custo-benefício na construção da plataforma. Outros benefícios em potencial do riser fabricado em materiais compósitos incluem: a redução de manutenção e inspeção no revestimento, redução nos custos de instalação, redução da proteção catódica e aumento da resistência térmica.

## 6. REFERÊNCIAS

- Agarwal, B.D. e Broutman, L.J., 1990, "Analysis and Performance of Fiber Composites", 2a ed. New York: John Wiley & Sons.
- Baldwin, D.D., Newhouse, N. e LO, K.H., 1997, "Composite Production Riser development", In: 2nd International Conference on Composite Materials for Offshore Operations, CMOO-2, Houston, USA.
- Callister, W.D.Jr., 2000, "Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução", 5a ed. LTC, Brasil.
- Carrino, L., Polini, W. e Sorrentino, L., 2003, "Modular structure of a new feed-deposition head for a robotized filament winding cell", Composites Science and technology, Vol. 63, No. 15, p. 2255-2263.
- Ellyin, F., Wolodko, J., Dorling, D., Glover A. e Jack, T., 2000, "Fiber Reinforced Composites in Pipelines Applications: Designs Issues and Current Research", In: 3rd International Pipeline Conference, American Society of Mechanical Engineering.
- Flinn, A.R. e Trojan, P.K., 1990, "Engineering Materials and Their Applications", Ed. 4, New York: John Wiley & Sons.
- Folkes, M.J., 1982, "Short Fiber Reinforced Thermoplastics", 1a ed., New York: John Wiley & Sons.
- Gibson, R.F., 1994, "Principles of Composite Material Mechanics", McGraw Hill.
- Hull, D., 1981, "An Introduction to Composite Materials", Cambridge.
- Johnson, B.D., Baldwin, D.D. e Long, J.R., 1999, "Mechanical Performance of Composite Production risers", In: Offshore Technology Conference, OTC 11008, Houston, USA.
- Souza, S.R.M.de, 2007, "Estudo de uma Máquina de Enrolamento de Filamentos e Análise de seu Produto por Elementos Finitos", Dissertação de Mestrado, Orientadores: Dutra, M.S., Pina Filho, A.C.de, Programa de Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 148p.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.



## A STUDY ON COMPOSITE MATERIALS AND ITS APPLICATION IN THE PRODUCTION OF PIPES FOR DRILLING OIL

Armando Carlos de Pina Filho, pina-filho@deg.ee.ufrj.br<sup>1</sup>  
Sérgio Ricardo Milki de Sousa, smilki@eletronuclear.gov.br<sup>2</sup>  
Max Suell Dutra, max@mecanica.coppe.ufrj.br<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Polytechnic School, Graphical Engineering Department, 21949-900, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

<sup>2</sup>ELETRONUCLEAR, Management of Mechanical Components, 20091-906, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Mechanical Engineering Program, 21945-970, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

**Abstract.** *The objective of the work presented here, from a bibliographic review, is to show a study of the main types of composite materials, emphasizing its structural properties for application in the development and production of pipes for drilling oil in deepwater, commonly named “risers”. Considering the subject in study, the main types of composite materials were presented: reinforced with particles, reinforced with fibers and the structural composites. The main focus of the work were the composites reinforced with fibers, since these are the most important types of composites, with projects for acquisition of characteristics of high resistance and/or high rigidity in relation to its weight. For each composite, properties and aspects of its structure were analyzed. In the end of the work, the application of the material for production of rigid composite riser revealed effectively. From the performed study, it was observed that risers produced in composite material presents better relation cost-benefit, when compared to metallic risers (in steel). Although the high cost of production, is possible to develop composite risers with adequate structural characteristics, being lighter and with bigger useful life, mainly considering the advantage to resist diverse types of corrosion. Thus, composite risers are a viable alternative in substitution to those risers manufactured in steel.*

**Keywords:** *manufacture, composite materials, risers.*

### RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.