



## **CONCEPÇÃO ESTRUTURAL DE MÓDULOS DE CONTENÇÃO DE GÁS PRESSURIZADO PARA NAVIOS GASEIROS FABRICADOS EM METAL - COMPÓSITO**

**PARISE, Luís F. S.,** [luis.parise@poli.usp.br](mailto:luis.parise@poli.usp.br)<sup>1</sup>  
**ARRUDA, Renan V.,** [renan.arruda@poli.usp.br](mailto:renan.arruda@poli.usp.br)<sup>1</sup>  
**MAGALHÃES, Lucas L.,** [l.m.laurindo@gmail.com](mailto:l.m.laurindo@gmail.com)<sup>1</sup>  
**OLIVEIRA, Alexandre L. G.,** [alexandrelgo@bol.com.br](mailto:alexandrelgo@bol.com.br)<sup>1</sup>  
**MARINUCCI, Gerson,** [marinuci@ipen.br](mailto:marinuci@ipen.br)<sup>2</sup>  
**RUGGIERI, Claudio,** [claudio.ruggieri@usp.br](mailto:claudio.ruggieri@usp.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PNV – EPUSP, Av. Professor Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP 05508-030,

<sup>2</sup>IPEN, Av. Prof. Dr. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP 05508-000,

***Resumo:** O transporte de gás comprimido sob elevadas pressões em navios gaseiros tornou-se uma solução técnica e econômica eficiente para o escoamento e abastecimento de gás natural em regiões extremamente distantes ou onde não se justifique a construção de sistemas dutoviários. Nestes navios o gás é comprimido sob elevadas pressões e armazenado em contentores adequados. Conseqüentemente, um dos elementos chave do projeto de navios gaseiros é a concepção e viabilização técnica do sistema de armazenagem do gás comprimido sob alta pressão. Alguns sistemas propostos apresentam custo elevado e maiores dificuldades de fabricação. Outros se utilizam de contentores de elevada massa estrutural, o que reduz significativamente a capacidade de carga útil do navio. Uma alternativa estruturalmente eficiente e de menor peso é a utilização de tubos híbridos metal-compósito dispostos em pacotes (células) de armazenagem. Neste sistema, tubos de aço grau API são revestidos por camadas de material compósito de modo a formar uma seção híbrida/bimaterial. A pressurização do tubo é feita de modo a provocar o escoamento da seção de aço, ao mesmo tempo em que a camada de compósito permanece em regime elástico (devido à sua maior resistência mecânica), seguida de despressurização do sistema híbrido que resulta em tensões residuais compressivas no aço e trativas no compósito. Como produto final obtém-se um tubo mais leve e capaz de resistir a pressões mais elevadas. Entretanto, a aplicação deste conceito como um sistema de armazenagem de gás sob pressões elevadíssimas requer estudos adicionais sobre, entre outros aspectos, as características estruturais da seção híbrida. Este trabalho apresenta uma contribuição a estes estudos. Por meio de análises computacionais detalhadas, avaliam-se as tensões e deformações residuais que se obtém na seção híbrida quando da variação dos seguintes parâmetros: espessuras de aço e compósito, formulações de compósitos e orientações de laminados. Gera-se, dessa forma, uma coletânea de resultados que possibilitam analisar a adequação das características estruturais de cada combinação ao problema. Consegue-se, assim, identificar tendências que embasam e auxiliam a escolha das melhores combinações de valores para os parâmetros da seção híbrida, em função da redução de peso (isto é, da redução de espessura do aço) que se deseja conseguir.*

**Palavras-chave:** tanques de contenção de gás; estruturas metal-compósito; otimização estrutural

### **1. INTRODUÇÃO**

A maior parte dos navios gaseiros atualmente em uso são chamados LNG, sigla em inglês para “gás natural liquefeito”. Essas embarcações de transporte de gás possuem equipamentos de criogenia que liquefazem o gás a ser transportado. Há alguns pontos críticos no que diz respeito à produção, transporte e vaporização para uso do gás liquefeito. Para produção, o custo de liquefação é extremamente alto e os equipamentos utilizados são muito pesados. Para o transporte, a dificuldade é manter o gás liquefeito sempre a baixíssimas temperaturas, evitando ao máximo a troca de calor com o ambiente. Já para o consumo, o gás deve ser vaporizado, o que também envolve um custo muito alto e uma planta de processo de grandes dimensões. Além disso, ocorrem perdas de 10 a 15 % do gás durante o processo, muito mais que num transporte equivalente por gasoduto, caso no qual as perdas se situam entre 1 e 2 %. Isto faz com que a escolha do LNG fique restrita aos casos em que gasodutos não são tecnicamente viáveis, como, por exemplo, em travessias de mares profundos, ou onde as distâncias de transporte tornem os gasodutos economicamente

pouco atrativos. Com a atual tecnologia, a partir de 4000 km, os custos de um sistema de LNG tornam-se equivalentes aos do transporte em gasodutos (Espindola et al., 2006).

Uma alternativa que recentemente vem sendo apresentada ao transporte de LNG é a tecnologia CNG, sigla em inglês para “Gás Natural Comprimido”. Esta nova tecnologia de transporte utiliza-se de sistemas compressores para armazenamento do gás. O gás é comprimido à temperatura ambiente, permitindo o armazenamento de uma maior quantidade de gás em um mesmo volume, quando comparado ao gás sob pressão atmosférica e temperatura ambiente. Diferentemente da tecnologia LNG, a produção e transporte por CNG, que compreendem o tratamento do gás natural e sua compressão, são processos muito mais conhecidos e com custos muito menores que a liquefação. A planta de transformação do CNG em condições de consumo requer pequenos investimentos em comparação com a planta do LNG, sendo que a maior parte do custo do sistema está concentrada na embarcação. Cubitt (2005) mostra que a tecnologia CNG é menos custosa do que a LNG para transporte em rotas de até 4600 km.

Porém, os projetos de navios para transporte de gás natural que utilizam a tecnologia CNG mostram que a relação entre o peso do gás transportado e o peso do navio é muito pequena, pois tanques de gás comprimido inteiramente em aço totalizam cerca de 70 % do peso de uma embarcação especializada ao passo que sua carga corresponde apenas a 12,5 % (Espindola et al., 2006).

O objetivo do presente trabalho é estudar o comportamento mecânico de um cilindro em aço revestido por material compósito, a fim de reduzir a espessura de aço necessária para suportar a pressão de operação do cilindro e, conseqüentemente, sua massa estrutural. Essa medida visa a reduzir a parcela de peso em aço carregada por navios gaseiros CNG, e, assim, viabilizar essa solução para uma maior gama de situações. Modelos computacionais da estrutura em questão são analisados visando a determinar as espessuras de materiais compósitos necessárias para que se possa reduzir a espessura do aço a valores pré determinados.

## 2. MATERIAIS COMPÓSITOS

Não há uma definição absoluta, adotada por todos os compêndios, para materiais compósitos. Entretanto, uma definição comumente aceita, adotada por Hull (1981), por exemplo, para aplicações estruturais adequada a este estudo segue as três proposições abaixo:

1. Dois ou mais materiais (em proporções significativas) fisicamente distintos e mecanicamente separáveis.
2. O fabrico pode ser controlado de modo que a dispersão de um material no outro resulte em propriedades ótimas.
3. As propriedades dos compósitos são superiores às de seus materiais constituintes individuais.

A terceira proposição é a principal motivação para o desenvolvimento dos materiais compósitos. As vantagens desses materiais se destacam quando tratamos de grandezas específicas (isto é, grandezas por unidade de massa), como por exemplo, o módulo de elasticidade por unidade de massa e a resistência por unidade de massa. Este é um fator de grande importância para a movimentação de componentes e todas as formas de transporte, onde redução de peso se traduz em melhoria da eficiência e economia de energia.

### 2.1. Fibras reforçadoras

Os materiais compósitos mais importantes são aqueles nos quais a fase dispersa está na forma de fibra. Os casos de aplicação dos compósitos reforçados com fibras geralmente incluem necessidade de alta resistência e alta rigidez por unidade de massa. Quando as fibras são dispostas paralelamente formam lâminas que oferecem alta resistência à tração na direção do alinhamento das fibras. Nos cilindros de aço envoltos por compósitos as lâminas são sobrepostas formando várias camadas que podem ter o mesmo alinhamento, ou ter a direção das fibras alterada a cada camada, como ilustra a Fig. (1). No presente trabalho, apresentam-se análises de 3 disposições de fibras. Todas as camadas a 90°, todas a 54°, ou camadas alternadas de 0° e 90°. Segundo Marinucci (2009), para vasos de pressão fabricados pela técnica denominada *filament winding*, a disposição mais adequada para as fibras é 54°.

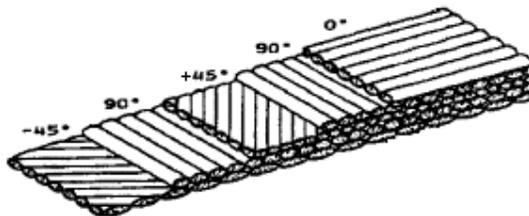


Figura 1. Ângulo de disposição das fibras.  
Fonte: Du (1996), com alterações.

#### 2.1.1. Fibras de Carbono

As fibras de carbono são as mais utilizadas em aplicações estruturais de alto desempenho, excedendo por boa margem as demais fibras (Hull, 1981). Propriedades como elevada resistência à tração, alto módulo de elasticidade e baixa densidade fazem deste o material de preferência para tais aplicações.

As propriedades das fibras de carbono são diretamente atribuídas à estrutura do cristal de grafite. Os átomos de carbono se organizam em camadas, também denominadas planos basais, alocando-se umas sobre as outras. Dentro do plano basal, os átomos são ligados por fortes ligações covalentes, enquanto as ligações na direção normal aos planos se dão por forças de Van der Waals, de grandeza muito inferior. Essa estrutura confere a anisotropia ao material, e por isso verifica-se que a resistência mecânica da fibra na direção transversal ao seu eixo é muito inferior àquela paralela ao mesmo.

As matérias-primas para a fabricação de fibras de carbono são a poliácridonitrila (PAN), o Rayon (fibra polimérica), e o piche mesofásico. Comercialmente, as fibras de carbono disponíveis vêm sobretudo da poliácridonitrila, por razões econômicas.

A poliácridonitrila é uma fibra acrílica que possui uma estrutura molecular semelhante ao polietileno. A síntese da fibra é feita utilizando-se acrilonitrila, acrilato de metila e ácido itacônico por um processo de fiação a úmido. As fibras passam então por duas etapas de estiramento, uma a frio e uma a quente, em temperatura pouco abaixo da temperatura de transição vítrea do polímero. Uma nova etapa aplica a encimagem (sizing), para aglutinação dos micro filamentos em fios e proteção superficial, sendo em seguida enrolados em novelos.

O processo de estiramento promove a reorientação das moléculas paralelas ao eixo da fibra, conferindo a anisotropia do material e podendo chegar a valores de resistência mecânica superiores a 3300 MPa e módulo de elasticidade superiores a 230 GPa (Chawla, 1987).

### 2.1.2. Fibras de Vidro

As fibras de vidro em geral têm boas propriedades elásticas e baixo custo, podendo ser utilizadas em substituição a metais não-ferrosos, como o alumínio, por exemplo, e em alguns casos, mesmo em substituição ao aço. Facilidade de corte, bom assentamento no molde, baixa formação de eletricidade estática e boa conformação em cantos vivos são algumas propriedades importantes da fibra de vidro.

O baixo custo da fibra de vidro se deve basicamente ao baixo custo de suas matérias-primas: silício, calcário, ácido bórico, carvão e argila. Os materiais são fundidos em um forno a temperaturas próximas de 1400° C e a fabricação das fibras se dá pelo processo de fiação por fusão, que consiste em passar a massa liquefeita através de uma placa de platina contendo micro-orifícios. Após a passagem por essa placa, denominada fieira ou peneira (bushing), os microfios são solidificados por resfriamento.

As fibras resultantes do vidro comum (de garrafa) contêm grande quantidade de álcalis (aluminoborosilicato). São conhecidas, por isso, como A-glass (A de Álcalis) e não devem ser utilizadas em qualquer aplicação que requeira algum isolamento elétrico, mas possuem boas propriedades químicas.

Uma outra composição muito utilizada hoje, principalmente na indústria têxtil, é o E-glass (E de Elétrico). É resultante de uma combinação que apresenta baixo teor de álcalis, e tem excelentes propriedades de isolamento elétrico.

O C-glass (C de Corrosão) (sódio borosilicato) foi desenvolvido para aplicações onde resistência química elevada é necessária. Vasos de pressão ou dutos para escoamento de petróleo ou gases químicos são exemplos.

Para aplicações estruturais, foi desenvolvido ainda o S-glass, com alta resistência mecânica (até 40 % superior a do E-glass) e módulo de elasticidade moderado.

## 3. MÓDULOS DE CONTENÇÃO DE GÁS

A tecnologia GTM (Gas Transportation Module), desenvolvida pela empresa TransCanada (Market, 2007), consiste em revestir um vaso de pressão em aço com uma camada de compósito, como ilustram a Fig. (2) e a Fig. (3), de tal modo que a camada externa exerça uma tensão compressiva sobre a interna, aumentando a capacidade de carga do vaso para uma dada espessura de aço. O módulo de transporte de gás estudado segue o modelo do vaso de pressão desenvolvido pela TransCanada, que possui comprimento de 6 m e diâmetro interno de 1 m.

O objetivo principal é reduzir a espessura de aço necessária para determinada pressão de serviço, diminuindo assim a massa do vaso e reduzindo os custos de transporte. Para isso, a técnica utilizada envolve pressurizar o cilindro o suficiente para deformar o metal além do seu limite de escoamento e então retornar à pressão atmosférica. O material compósito, porém, permanece no regime elástico durante todo o processo e, como consequência, a camada de metal passa a receber uma tensão compressiva quando do descarregamento, o que reduz a tensão circunferencial (hoop stress) advinda do armazenamento do gás pressurizado. Essa tecnologia é utilizada para diversas aplicações, como o aparato de respiração para corpo de bombeiros, tubos de oxigênio para alpinistas e tanque de combustível em veículos automotivos movidos a gás natural.

Para a construção do módulo de contenção de gás é feito, primeiramente, um jateamento ou outro tratamento de superfície (como aplicação de abrasivos) no metal. Em seguida, o cilindro é préaquecido a aproximadamente 40° C para remover a umidade e preparar para a subsequente aplicação do compósito. O processo de aplicação do material compósito, chamado de *filament winding* consiste em bobinamento das fibras embebidas em matriz, e será descrito detalhadamente mais adiante. Uma película de poliéster pode ser colocada para a proteção contra efeitos ambientais.

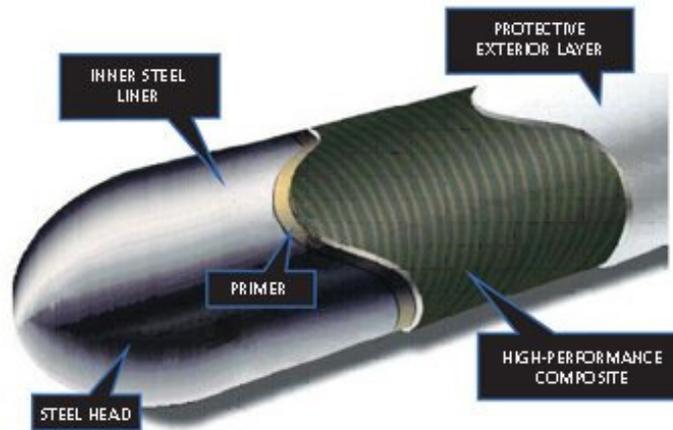


Figura 2. Módulo de transporte de gás.  
Fonte: Market (2007).



Figura 3. Detalhe da extremidade.  
Fonte: US Patent (2004), com alterações.

É realizado então o teste hidrostático, no qual é aplicada uma pressão de 25 % à 75 % superior à pressão de serviço, que é de 250 bar. (Nas análises numéricas deste estudo a pressão aplicada no teste hidrostático foi 50 % superior à pressão de serviço). A Fig. (4) ilustra as tensões trativas que agem tanto no aço quanto no compósito durante esse teste. Nessas condições, o aço é tensionado e deformado além do ponto de escoamento enquanto o material compósito permanece no regime elástico. A Fig. (5) apresenta as curvas tensão verdadeira *versus* deformação para o aço e para os materiais compósitos, podendo-se notar que, de fato, os compósitos se mantêm em regime elástico mesmo quando o aço apresenta plasticidade. Na faixa de deformações representada pela Fig. (5) o comportamento do aço é representado por um modelo constitutivo bilinear. De acordo com este modelo, tensão e deformação sempre obedecem uma relação de proporção linear entre si, porém o valor da constante de proporcionalidade muda de acordo com a região da curva em que se encontra o estado tensão-deformação de interesse.

Por fim, quando a pressão é retirada, o aço plasticamente deformado passa a sofrer uma tensão residual compressiva. A Fig. (6) ilustra as tensões presentes no aço e no compósito após o fim do processo.

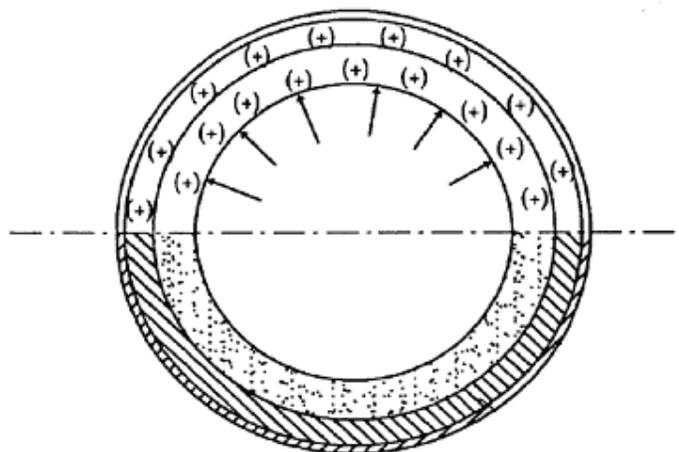


Figura 4. Tensões durante o teste hidrostático.  
Fonte: US Patent (2004), com alterações.

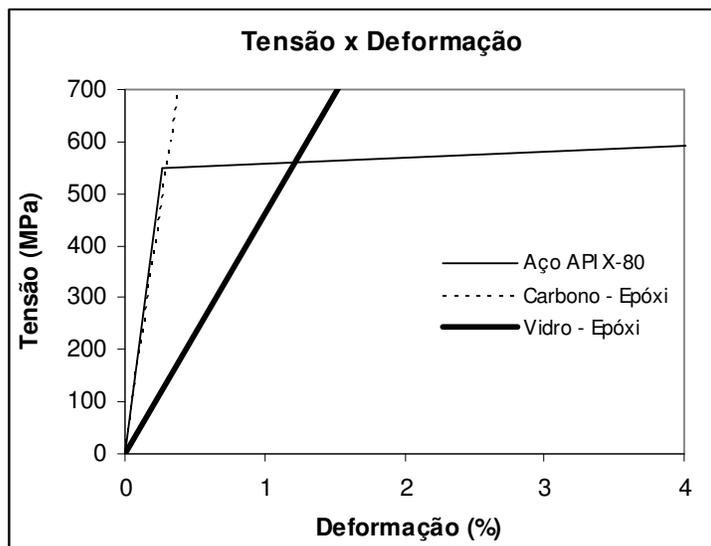


Figura 5. Gráficos tensão x deformação dos três materiais.

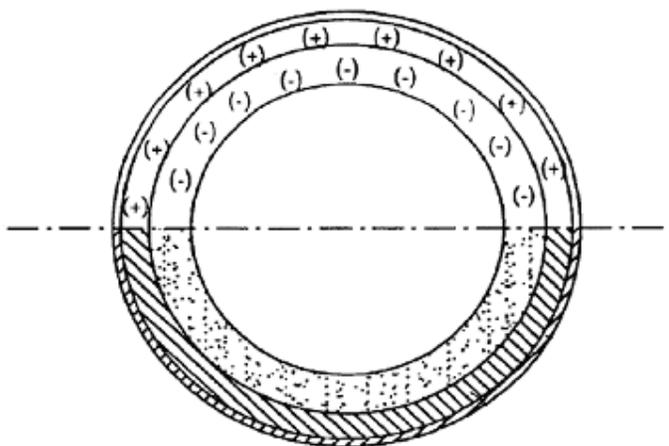


Figura 6. Tensões após o teste hidrostático.  
Fonte: US Patent (2004), com alterações.

### 3.1. Filament Winding

O *filament winding* ou enrolamento filamentar é uma técnica de construção que consiste em bobinar a fibra previamente embebida em matriz sobre um molde que gira à velocidade determinada. Esse processo, no qual as fibras de reforço são dispostas de maneira precisa com orientação predeterminada, para compor uma forma oca, é o mais adequado para a fabricação em materiais compósitos de componentes com formas cilíndricas, como tubos, tanques e dutos.

A Fig. (7) ilustra o processo *filament winding*. Na figura pode-se ver que fibras contínuas (*rovings*), são desenroladas sob condições controladas e mergulhadas em sistemas de “imersão completa” que impregnam e controlam a quantidade de resina nos filamentos. Os filamentos são então enrolados sobre um molde rotatório (mandril) em várias camadas. Após essa fase de enrolamento úmido, o mandril com a estrutura compósita é removido, sempre em rotação, para ser polimerizado em um forno ou à temperatura ambiente. Posteriormente à cura da resina, o mandril é removido ou mantido como parte do composto final. Nas análises deste estudo, interessa apenas o segundo caso, já que o próprio corpo em aço do módulo de contenção de gás pressurizado é utilizado como mandril.

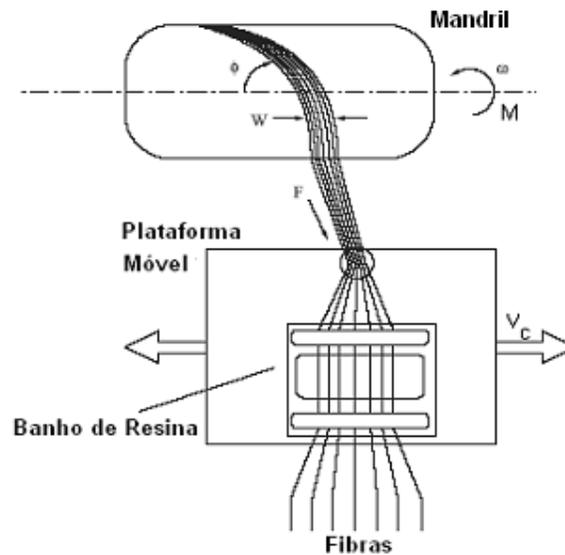


Figura 7. Esquema do processo de *filament winding*.  
Fonte: Faro (2008), com alterações.

## 4. ANÁLISES NUMÉRICAS

### 4.1. Modelos de Elementos Finitos

Para as análises numéricas realizadas foram utilizados modelos detalhados de elementos finitos que representam um oitavo do corpo cilíndrico do módulo de contenção de gás. Modela-se apenas um oitavo da estrutura real devido às simetrias existentes tanto na geometria quanto nos carregamentos do problema em questão. São aplicadas ao modelo condições de contorno representando essas simetrias. A quantidade de elementos empregados nos modelos foi definida realizando-se uma série de iterações de refinamento da malha, até que um aumento maior produzisse apenas alterações desprezíveis nos valores calculados das grandezas de interesse, quais sejam, tensões, deformações e deslocamentos do aço e do material compósito. Obteve-se, dessa forma, uma malha composta por 4850 elementos sólidos hexaédricos de formulação quadrática, uniformemente distribuídos pela estrutura.

Foram analisados modelos representando dois materiais compósitos e três orientações de reforço para cada material. São eles matriz epóxi reforçada por fibra de vidro e matriz epóxi reforçada por fibra de carbono, com fração volumétrica de reforço adequada à que se obtém pelo processo *filament winding*, e orientações do reforço de  $90^\circ$ ,  $54^\circ$  e  $0^\circ/90^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do módulo. Cada modelo foi processado diversas vezes, variando-se a cada vez a espessura do compósito em 0,5 mm, até que se obtivesse a espessura adequada para viabilizar a seção híbrida em cada caso.

### 4.2. Procedimentos Numéricos

Todas as etapas da análise dos modelos de elementos finitos (pré-processamento, processamento e pós-processamento) foram efetuadas utilizando-se o software Abaqus, desenvolvido pela Dassault Systèmes. Neste software definiu-se a geometria do modelo, os materiais que o constituem, os carregamentos e condições de contorno aos quais está sujeito, a malha de elementos finitos que o discretiza e os passos de análise, que no presente caso são três. O primeiro passo representa a simulação numérica do teste hidrostático do módulo de contenção, no qual a pressão interna aplicada é de 375 bar. O segundo passo representa o descarregamento - no qual simplesmente não é aplicada nenhuma pressão interna - e o terceiro sua operação normal, na qual a pressão de serviço considerada é de 250 bar. Tais pressões são aplicadas pelo usuário sobre toda a superfície interna dos módulos, e o software se encarrega automaticamente de convertê-las em cargas nodais equivalentes. O mesmo software processa o modelo assim elaborado e apresenta os resultados em forma gráfica conveniente.

Um particular destas análises é que, como não foi modelada a calota esférica existente na extremidade do vaso, seu efeito - que é o de gerar tensões na direção longitudinal do corpo do módulo - necessitou ser incorporado por meio da aplicação de uma tração equivalente na extremidade do módulo, tração esta com sentido paralelo ao eixo longitudinal do corpo cilíndrico.

### 4.3. Comportamento dos Materiais

Para representar adequadamente a plastificação que ocorre na parte da seção híbrida fabricada em aço é necessário, naturalmente, empregar uma descrição matemática não linear do comportamento deste material. O código de elementos

finitos utilizado permite representar a plasticidade de materiais isotrópicos de maneira bastante conveniente, bastando informar ao programa pares de valores tensão verdadeira-deformação plástica a partir do ponto de escoamento. Embora desta forma o código gere um comportamento que é linear entre os pontos fornecidos, basta informar uma quantidade adequada de pares para que se obtenha uma tradução bastante fidedigna do comportamento real do material. Este modelo constitutivo linear por partes é uma extensão daquele apresentado anteriormente na Fig. (5).

A implementação numérica deste modelo constitutivo foi realizada utilizando-se para o aço API X80 uma tensão de escoamento  $\sigma_{ys}=550$  Mpa, módulo de elasticidade  $E=206$  GPa e os seguintes pares tensão verdadeira-deformação plástica: (605;0,05), (645;0,10), (665;0,15) e (676;0,275). Tais pares buscam representar adequadamente as curvas experimentais deste aço, consultadas pelos autores em Silva (2004), e o uso dos mesmos levou à obtenção da curva tensão verdadeira - deformação mostrada na Fig. (8).

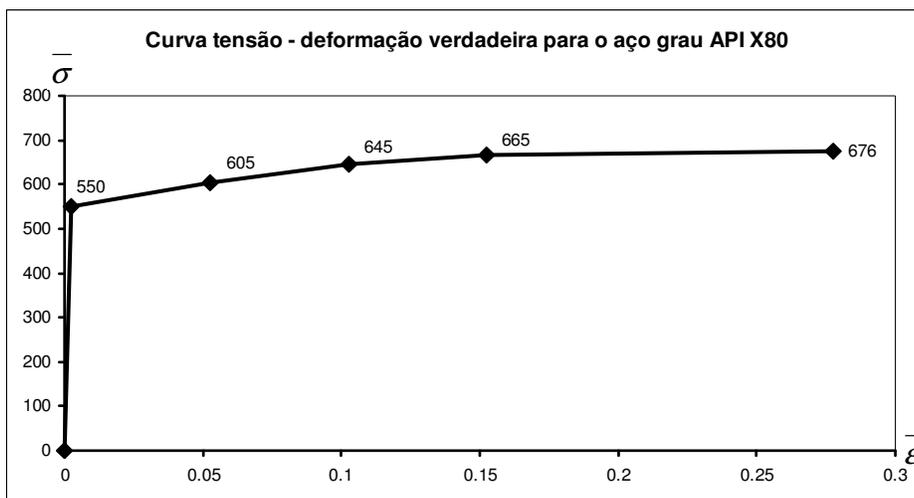


Figura 8. Curva tensão-deformação verdadeira utilizada para consideração da plasticidade no modelo de elementos finitos.

O mesmo software possui também uma interface bastante útil para representar o comportamento de laminados de materiais compósitos. Basta definir as propriedades de uma lâmina, disponíveis na literatura, e utilizar a interface para montar o laminado que se quer empregar no modelo. O software calcula automaticamente as propriedades mecânicas globais desse laminado e as aplica aos elementos que discretizam a parte da seção híbrida fabricada em material compósito. As propriedades dos materiais compósitos utilizados nas análises deste artigo foram obtidas em Mendonça (2005). Para o compósito fibra de carbono-matriz epóxi consideraram-se as seguintes propriedades: módulo de elasticidade longitudinal  $E_1=181,0$  GPa, módulo de elasticidade transversal  $E_2=10,3$  GPa e módulo de cisalhamento  $G_{12}=7,17$  GPa. Para o compósito fibra de vidro-matriz epóxi as propriedades utilizadas foram:  $E_1=46,3$  GPa,  $E_2=8,7$  GPa e  $G_{12}=4,14$  GPa.

## 5. RESULTADOS

As Fig. (9), Fig. (10) e Fig. (11) apresentam os resultados das simulações numéricas. Essas figuras mostram, para uma dada orientação das fibras reforçadoras, a espessura de compósito necessária para viabilizar a seção híbrida e a redução de massa conseguida, para ambos os compósitos avaliados. Os valores numéricos junto aos pontos correspondem às leituras do eixo das ordenadas.

Ao observar a Fig. (9) nota-se que tanto a espessura de compósito necessária quanto a economia de massa obtida diminuem conforme aumenta a espessura de aço utilizada, para ambos os compósitos. Este comportamento está presente também nas demais figuras, e portanto independe da orientação dos reforços. Tal efeito é, logicamente, esperado, uma vez que é o aço o principal responsável tanto pela massa quanto pela resistência estrutural do módulo, de modo que o emprego de maiores espessuras de aço diminui a possibilidade de economia de massa, porém faz com que o compósito necessite ser responsável por uma menor parcela da resistência estrutural, diminuindo assim a espessura necessária desse material.

Nota-se também, nas três figuras, que os comportamentos representados pelos gráficos são praticamente lineares, e os resultados acompanhariam ainda mais o regime linear caso os modelos numéricos fossem processados com incrementos de espessura do compósito menores que 0,5 mm. Dessa forma, existe evidência de que mesmo a quantidade relativamente pequena de modelos analisados já permite obter, por interpolação linear a partir dos gráficos, as espessuras de compósito necessárias para a fabricação de seções híbridas para módulos de contenção cujas espessuras de aço estejam entre 14 mm e 22 mm.

Todos os resultados, exceto um, indicam também que a proposta de empregar materiais compósitos para reduzir a massa estrutural de módulos de contenção de gás é viável. A exceção se encontra na Fig. (10), na qual, para o caso do

módulo reforçado por fibra de vidro orientada a 54°, ocorre um aumento de massa de 8 %. É preciso, no entanto, interpretar os resultados de maneira mais pormenorizada antes de garantir que todas as demais combinações analisadas são vantajosas em relação às seções transversais fabricadas exclusivamente em aço. Tais interpretações adicionais serão feitas a seguir.

Comparando-se os gráficos das três figuras percebe-se que, para uma mesma espessura de aço, a orientação de reforços ao longo da direção circunferencial do módulo, isto é, a 90°, é a que permite o emprego da menor quantidade de material compósito para obter a resistência necessária, qualquer que seja a fibra escolhida. Em consequência disso, a orientação de 90° é também aquela que permite a maior economia de massa dos módulos. Não parece ser interessante, portanto, fabricar seções híbridas orientando os reforços a 54° em relação à longitudinal do módulo, nem utilizar um laminado bidirecional 0°/90°. Isso ocorre porque, embora uma dessas duas configurações tenha de ser adotada para vasos de pressão fabricados inteiramente em material compósito, no presente caso a seção híbrida é parcialmente constituída de aço, que por ser isotrópico fornece igual resistência mecânica nas direções longitudinal e circunferencial. Como a menor espessura de aço analisada, 14 mm, já permite resistir às tensões longitudinais induzidas pela pressão interna, não é necessário que o material compósito contribua para a resistência da seção híbrida nessa direção. É por esta razão que o bobinamento circunferencial dos reforços torna-se o mais interessante.

Voltando a atenção, novamente, para a Fig. (9), notamos que o emprego de um material compósito formado por matriz epóxi reforçada por fibra de vidro requer, para dar resistência suficiente à seção híbrida, espessuras mais que duas vezes superiores às espessuras necessárias caso se utilize a mesma matriz reforçada com fibra de carbono. Embora o custo da fibra de carbono seja significativamente superior ao da fibra de vidro, esta ainda assim parece constituir alternativa mais interessante para a construção das seções híbridas, pois, tendo em vista que, segundo Faro (2008) uma espessura típica para uma camada de material compósito é de 0,125 mm, seria necessário utilizar um grande número de camadas de fibra de vidro para obter a resistência necessária. Isto introduz um problema tecnológico, pois durante o bobinamento as camadas mais internas poderiam chegar a um estágio razoavelmente avançado de sua cura enquanto as camadas mais externas ainda estivessem sendo bobinadas, o que introduziria tensões residuais indesejadas no material. Caso se utilizasse uma matriz com tempo bastante longo até o início da cura a liberação de calor no momento da iniciação desta seria muito intensa, devido ao grande volume de matriz que iniciaria a cura no mesmo momento. Além desses fatores, o grande aumento de diâmetro externo que o módulo de contenção sofreria caso fosse reforçado por uma espessa camada de fibra de vidro poderia reduzir a quantidade de módulos que um navio para transporte de gás comprimido seria capaz de transportar.

Um último ponto que merece ser discutido atentamente é o da redução de massa propriamente dita. Utilizando a fibra de carbono percebe-se que há uma redução, na pior das hipóteses, de 12 % na massa estrutural do módulo de contenção, o que já representa um valor significativo. Caso se utilizasse apenas 14 mm de aço seria possível reduzir a massa em praticamente 40 %. No entanto, pequenas espessuras de aço requerem grandes espessuras de compósito, e a necessidade de empregar grandes quantidades de fibra de carbono para fabricar cada módulo provavelmente os inviabilizaria economicamente, devido ao alto custo desse material. É necessário realizar uma complexa análise de custos para determinar acuradamente se a operação como um todo de transporte de gás comprimido por navios se beneficiaria economicamente do emprego de módulos de contenção bimateriais, uma vez que o aumento da capacidade de transporte de cada navio, e o conseqüente aumento da receita gerada em cada viagem poderiam ser superados pelo aumento no custo de fabricação de cada módulo. Não obstante essa consideração, a Fig. (9) mostra que existe um ponto, em torno da espessura de aço de 20 mm, em que o emprego de fibra de carbono permite reduzir a massa do módulo de contenção em significativos 20 % empregando apenas cerca de 5mm de material compósito. Nesse ponto parece quase certo que o ganho com a economia de massa seria superior ao aumento no custo de fabricação dos módulos, evidenciando que a concepção estrutural de seção híbrida apresentada neste artigo pode de fato ser uma alternativa para a fabricação de módulos de transporte de gás comprimido para uso em navios CNG.

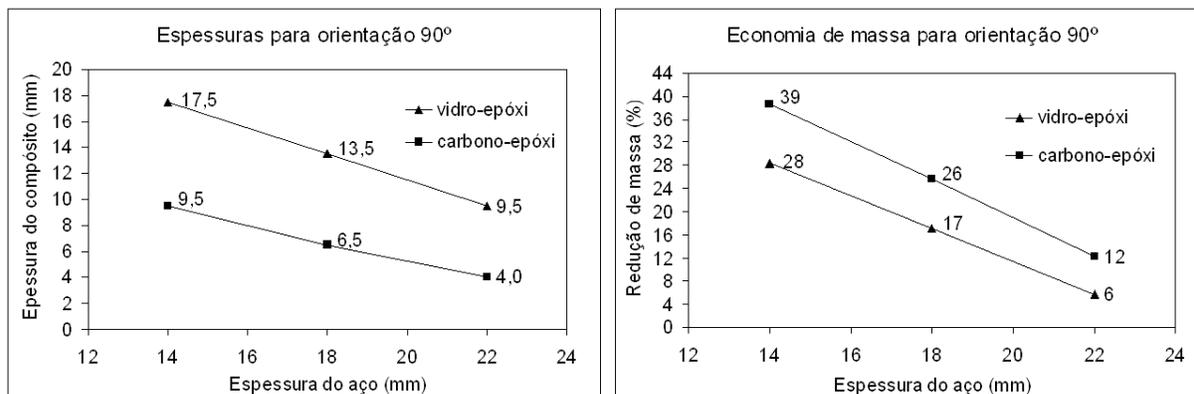
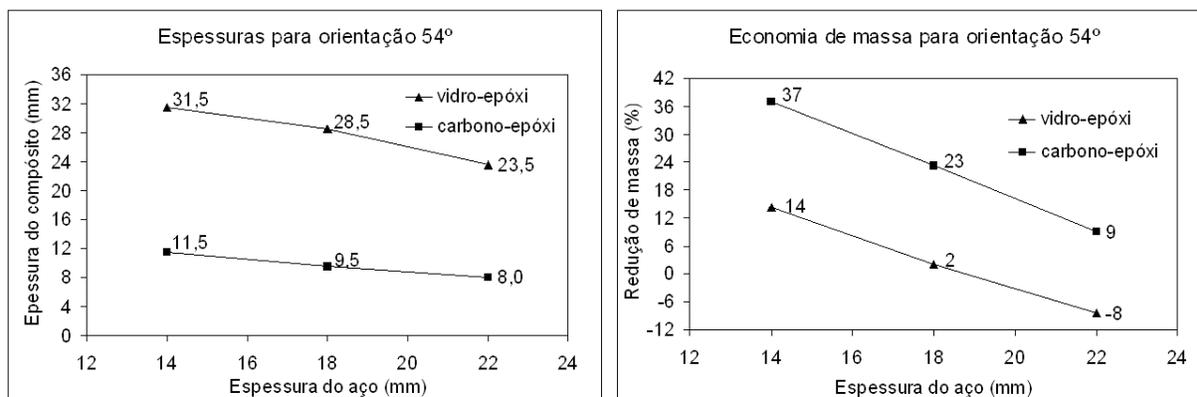
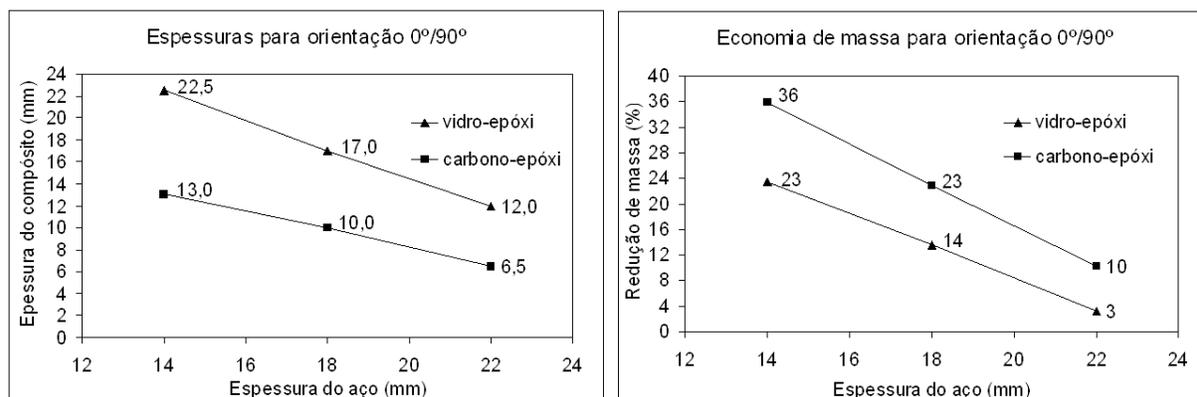


Figura 9. Espessuras de compósito necessárias e respectiva redução de massa para fibras orientadas a 90°.



**Figura 10. Espessuras de compósito necessárias e respectiva redução de massa para fibras orientadas a 54°.**



**Figura 11. Espessuras de compósito necessárias e respectiva redução de massa para fibras orientadas a 0°/90°.**

## 6. CONCLUSÕES

Este estudo procurou apresentar as principais características do transporte de gás comprimido por meio de navios CNG, e investigar a adequação de uma possível solução a um dos problemas que dificultam a implantação dessa tecnologia. O transporte de gás comprimido em navios é uma alternativa atraente dependendo do tamanho da parcela de gás que necessita ser transportada e da distância pela qual esse transporte deve ser feito. No entanto, o embarque de módulos de contenção de gás totalmente fabricados em aço faz com que o peso estrutural dos módulos responda por 70 % de todo o peso do navio, deixando apenas 12,5 % do peso para a carga útil, o que impacta negativamente a viabilidade desse tipo de operação (Espindola et al., 2006).

Para reduzir a parcela de peso do navio ocupada pelos módulos é necessário reduzir a massa estrutural desses módulos. Uma maneira de fazer isso é fabricá-los com uma seção transversal híbrida, formada por uma associação entre uma camada de aço e uma capa de material compósito que a recobre. São necessários, no entanto, estudos que auxiliem a determinação de diversas características dessa seção híbrida, tais como o compósito que nela deve ser empregado, a direção de orientação dos reforços desse compósito e a espessura da camada interna de aço.

Este artigo procurou fazer um estudo dessa natureza, elaborando modelos computacionais da estrutura de interesse e analisando o impacto da variação das características acima mencionadas sobre a viabilidade da solução proposta.

Os resultados obtidos indicam que, do ponto de vista puramente mecânico, poucas são as configurações de seção híbrida que não permitem uma diminuição efetiva da massa dos módulos de contenção. Considerações tecnológicas e econômicas, no entanto, levam a concluir que a solução que parece mais viável é a de uma seção híbrida fabricada utilizando-se matriz epóxi reforçada por fibra de carbono, com reforços orientados circunferencialmente sobre a camada de aço, que passará a ter em torno de 75 % da espessura que teria caso não fosse reforçada pelo outro material. Para o caso específico dos módulos de contenção utilizados como base deste estudo, que seguem a tecnologia GTM desenvolvida pela TransCanada, conclui-se que uma redução da espessura de aço de 26 mm para 20 mm e o emprego de cerca de 5 mm de fibra de carbono para reforçar a seção levam a uma significativa economia de massa, de aproximadamente 20 %, sem que haja um aumento proibitivo no custo de construção dos módulos de contenção. Tal

conclusão fornece indício de que a proposta de emprego de seções híbridas neste tipo de estrutura é tanto viável quanto interessante.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chawla, K.K., 1987, "Composite Materials: Science and Engineering", Springer-Verlag, New York, USA.
- Cubitt, H., 2005, "Shipping, The vital Link", The Operators Viewpoint 5th Doha Conference on Natural Gas.
- Du, G. W. and Ko, F., "Analysis of Multiaxial Warp-Knit Preforms for Composite Reinforcement", Compos. Sci. Techn.,56, p. 253, 1996.
- Espindola, F.M., Pereira, F.R., Rueda, G.E., Sartini, A.P., 2006, "Projeto de Navio Gaseiro para Alívio de Sistemas FPSOs de Gás na Costa Brasileira", Trabalho de Formatura, São Paulo, Brasil.
- Faro, A. A. S., 2008, "Desenvolvimento de Tubos Compósitos Produzidos Por Enrolamento Filamentar Para Possíveis Aplicações Como Risers Rígidos", Dissertação de Mestrado, COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Hull, D., 1981, "Introduction to Composite Materials", Cambridge University Press.
- Market Wire News, 2007, "Marine CNG Poised for Commercialization as Numerous Projects Reach Funding Stage, Conference to Examine Ramifications"
- Marinucci, G., 2009, "Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos Tecnologia e Aplicações", Apostila da disciplina TNM 5796, IPEN, São Paulo, Brasil.
- Mendonça, Paulo de Tarso R., 2005, "Materiais Compostos e Estruturas-Sanduiche: Projeto e Análise", Ed. Manole, Barueri, Brasil
- Silva, M. C., 2004, "Caracterização das Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas do Aço API 5L X 80 e Determinação Experimental de Curvas J-R para Avaliação da Tenacidade à Fratura", Dissertação de Mestrado. São Paulo, 2004
- US Patent 6,779,656 B1, 2004

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# STRUCTURAL CONCEPTION OF METAL-COMPOSITE COMPRESSED GAS CONTAINMENT MODULES FOR GAS TRANSPORTATION SHIPS

PARISE, Luís F. S., [luis.parise@poli.usp.br](mailto:luis.parise@poli.usp.br)<sup>1</sup>  
ARRUDA, Renan V., [renan.arruda@poli.usp.br](mailto:renan.arruda@poli.usp.br)<sup>1</sup>  
MAGALHÃES, Lucas L., [lm.laurindo@gmail.com](mailto:lm.laurindo@gmail.com)<sup>1</sup>  
OLIVEIRA, Alexandre L. G., [alexandrelgo@bol.com.br](mailto:alexandrelgo@bol.com.br)<sup>1</sup>  
MARINUCCI, Gerson, [marinuci@ipen.br](mailto:marinuci@ipen.br)<sup>2</sup>  
RUGGIERI, Claudio, [claudio.ruggieri@usp.br](mailto:claudio.ruggieri@usp.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PNV – EPUSP, Av. Professor Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP 05508-030,

<sup>2</sup>IPEN, Av. Prof. Dr. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP 05508-000

**Abstract:** *The transportation of pressurized gas in dedicated ships is a technically and economically efficient solution for supplying gas to remote regions, or to regions where the construction of pipelines is not justifiable. In these ships, gas is stored under high pressure in appropriate containers. Therefore, the conceptual design of such containers and an assessment of their technical viability are key elements pertaining to the design of gas transportation ships. Some of the proposed solutions are based on all-steel containers, which dramatically reduce the ship's payload capacity due to their high structural mass. Hybrid metal-composite containment modules may present a better alternative. In these modules API grade steel tubes are encased in a jacket made of composite material, thus forming a hybrid section. When this hybrid tube is pressurized the steel yields while the composite material remains elastic. When the pressure is released, compressive stresses are induced in the steel tube due to the contraction imposed by the composite jacket. The resulting product is a lighter container module which is capable of resisting higher pressures. However, the application of this concept still requires further studies about key structural aspects. In this work, detailed computational analyses are carried out to evaluate residual stresses and strains obtained in the hybrid section when the following parameters are altered: thicknesses of the steel and composite parts of the section, composite material formulations and laminate orientations. Results are compiled and can then be used to assess the adequacy of each combination of structural characteristics to the problem. One can, therefore, identify tendencies which point to the best possible combinations of parameters for each intended reduction in the structural mass of the modules.*

**Keywords:** *gas containment modules; metal-composite structures; structural optimization*