

MODELAMENTO NUMÉRICO DE UM CILINDRO DO TIPO 2 PARA ARMAZENAMENTO DE GNV¹

*Giselle Barbosa de Mattos²
Anaisa de Paula Guedes Villani³
Thiago de Carvalho Silva³
Luiz Carlos Rolim Lopes⁴
Jayme Pereira de Gouvêa⁴
Luciano Pessanha Moreira⁴
Adriano de Senne⁵*

Resumo

A norma ISO 11439 admite 4 tipos de cilindros para armazenamento seguro do GNV. Dentre estes, o cilindro do tipo selante metálico envolvido na circunferência por compósito bobinado de fibras, é objeto de análise neste projeto de P&D, realizado numa parceria da EEIMVR/UFF com a White Martins/CILBRAS. Este trabalho descreve um modelo numérico, construído com o auxílio do código de elementos finitos ANSYS, empregado no cálculo de tensões no selante metálico e nas camadas de compósito. Através da adoção de um critério de projeto para compósitos laminados e de uma expressão analítica, estudou-se a otimização da espessura da camada bobinada, em função do ângulo e da seqüência de bobinamento das fibras sobre o selante metálico. Empregando-se o elemento de casca multicamada (“shell multilayer”) do código ANSYS versão 8.1 construiu-se um modelo de cilindro tipo 2 que permitiu o cálculo das tensões e deformações no selante e no material compósito. Analisou-se as tensões principais e cisalhantes em cada camada de compósito fibra de vidro-epóxi. O critério de falha de Hill-Tsai, para materiais compósitos laminados, foi empregado para análise de falha de cada uma das camadas. Os resultados são analisados tendo em vista o desempenho do cilindro sob condições de carregamento de teste, isto é, 30 MPa.

Palavras-chave: Simulação numérica; Elementos finitos; Compósito; Cilindro do tipo 2.

NUMERICAL MODELING OF A HIGH-PRESSURE TYPE 2 CYLINDER FOR STORING NATURAL GAS FOR VEHICLES

Abstract

ISO 11439 standards consider 4 types of high-pressure cylinders to storing natural gas for vehicles applications. Among them the type 2, metal-lined hoop wrapped cylinder, is the aim of this work. It describes a numerical model built using ANSYS application to determine stress and strain on the metal liner and on the composite material applied on the liner via filament winding process. Using design criterion for laminate composites, the total thickness of the composite layer has been evaluated to get an optimized value. Employing the element shell multilayer of ANSYS 8.1 and a model of the type 2 cylinder, the stress state in the metal liner and in each layer of the composite system of epoxy-glass fibre has been studied. The failure criterion of Hill-Tsai for composite laminates was used to analyse failure of each layer. The results are analysed considering the performance of the cylinder under test conditions of loading of 30 MPa.

Keywords: Numerical modeling; Finite elements method; Composite material; Type 2 high-pressure cylinder.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Eng^a. metalúrgica, mestranda, UFF/EEIM-VR, Bolsista CNPq.*

³ *Graduandos em Eng. Mecânica UFF/EEIM-VR; Bolsistas de Iniciação Científica – CNPq,*

⁴ *Professor UFF/EEIM-VR*

⁵ *Eng. Mecânico, Gerente da Qualidade – CILBRÁS.*

1 INTRODUÇÃO

A norma ISO 11439⁽¹⁾ admite 4 tipos de cilindros para armazenamento seguro do GNV. Dentre estes, o cilindro do tipo 2, selante metálico envolvido na sua circunferência por compósito bobinado de fibras, é objeto de análise neste projeto de P&D, realizado numa parceria da EEIMVR/UFF com a White Martins/CILBRÁS. O processo de fabricação de cilindro do tipo 2 se inicia com a fabricação do selante metálico que pode se dar por embutimento profundo de uma chapa de aço ou, alternativamente, por extrusão rotativa de tubos de aço. A ambos os processos segue-se o fechamento das extremidades, pelo processo de *spinning*.⁽²⁾ O selante metálico é fabricado de aço ligado possuindo alta resistência, que é atingida através de tratamento térmico adequado. Como o selante metálico possui espessura inferior (aproximadamente a metade) à do cilindro tipo 1, unicamente metálico, ele recebe uma camada de material compósito aplicada através do processo de bobinamento de fibras/filamentos. A camada de compósito bobinada oferece reforço e compartilha o carregamento, devido à pressão interna com o selante metálico. Isto permite a obtenção de um cilindro leve que resiste à pressão interna especificada. No tipo 2, a camada de compósito é bobinada somente sobre a parte cilíndrica do vaso de pressão, como mostra a Figura 1.

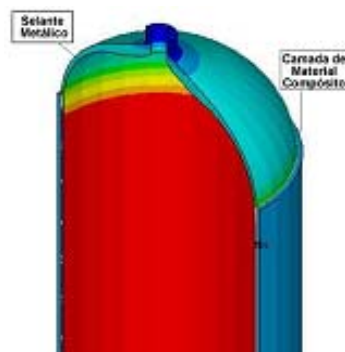
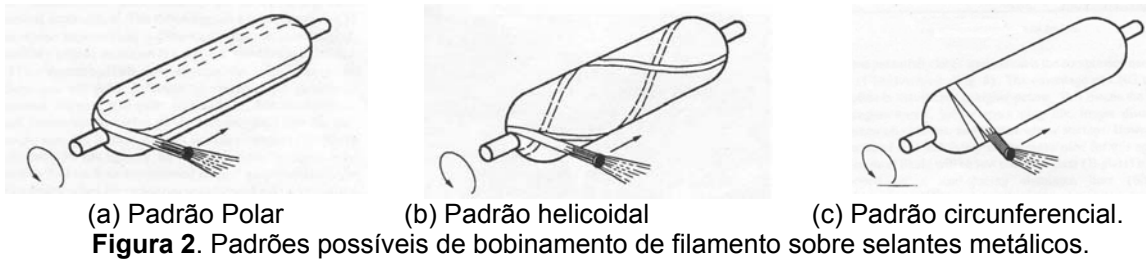


Figura 1. Detalhe do cilindro do tipo 2, como classificado pela norma ISO 11439.

Este vaso de pressão deve ser capaz de suportar a pressão interna, com uma vida em fadiga longa, para resistir aos inúmeros ciclos de pressurização-despressurização a que estão submetidos em serviço. A seleção dos materiais que compõem o compósito e o ângulo de bobinamento do filamento sobre o selante metálico, bem como seu dimensionamento, são de extrema importância para o desempenho e custo do cilindro, envolvendo assim elevada responsabilidade.

A camada de reforço pode ser bobinada em ângulos que variam de 0° a 90° em relação ao eixo longitudinal do cilindro, como mostra a Figura 2 (2). O padrão polar é empregado para cobrir o selante de filamentos com orientação próxima a 0° , longitudinalmente ao eixo do selante, Figura 2(a). O filamento passa em torno dos pólos do selante e cada bobinamento completo cobre o selante com uma única camada de reforço. O padrão helicoidal é usado para deitar filamento com ângulos entre 5° e 80° em relação ao eixo longitudinal do selante, Figura 2(b). Os filamentos são bobinados sobre a superfície do selante com orientações alternadas, positiva e negativa, formando uma camada dupla sobre o selante. O padrão circunferencial, Figura 2(c), deposita

filamentos com orientação próxima a 90° em relação ao eixo longitudinal do selante e, geralmente é aplicado à parte cilíndrica ou reta do selante.



Este trabalho descreve um modelo numérico construído com o auxílio do código de elementos finitos ANSYS, empregado no cálculo de tensões e deformações no selante metálico e nas camadas de compósito bobinado. Através da adoção de um critério de projeto para compósitos laminados e de uma expressão analítica, estudou-se a otimização da espessura da camada bobinada, em função do ângulo e da seqüência de bobinamento das fibras sobre o selante metálico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS - METODOLOGIA

2.1 Modelo Analítico para a Camada do Reforço Compósito

Para o modelamento analítico da camada de reforço em material compósito adotou-se os passos descritos na Figura 3.

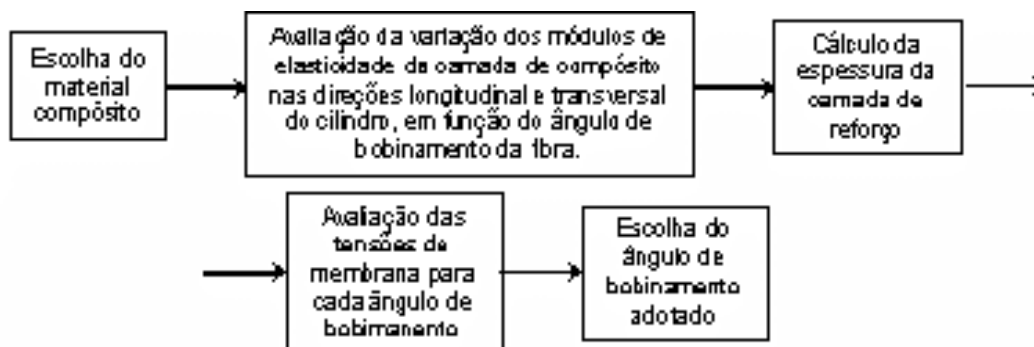


Figura 3. Seqüência de passos do modelamento analítico da camada de reforço em compósito.

Para o material do selante metálico selecionou-se o aço baixa liga 41B30H empregado na fabricação de tubos. Suas propriedades depois de conformado e tratado termicamente, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H

E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_R (MPa)
210	0,3	815	906
E = Módulo de Young		ν = Coeficiente de Poisson	
σ_y = Limite de escoamento;		σ_R = Resistência à ruptura	

O material compósito adotado constituiu-se de fibra de vidro e resina epóxi, com volume de fibras de 55%, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do compósito (fibra de vidro-0,55/epóxi-0,45) (4)

E_{long} (GPa)	E_{transv} (GPa)	ν_{lt}	G_{lt} (GPa)	σ_{lR} (MPa)	σ_{tR} (MPa)	τ_{ltR} (MPa)
41	10,4	0,28	4,3	1140	39	89

E_{long} = Módulo de Young na direção longitudinal

E_{transv} = Módulo de Young na direção transversal

ν_{lt} = Coeficiente de Poisson no plano da camada

G_{lt} = Módulo de cisalhamento no plano da camada

σ_{lR} = Resistência à ruptura na direção longitudinal

σ_{tR} = Resistência à ruptura na direção transversal

τ_{ltR} = Resistência à ruptura por cisalhamento no plano da camada.

Para o modelamento da espessura da camada de compósito fez-se necessária a adoção de um novo sistema de eixos, compatível à análise das tensões de membrana. O sistema adotado (Figura 4) segue as orientações preferenciais do cilindro (x- radial, y- circunferencial, z- longitudinal) e é o mesmo usado para o modelamento numérico.

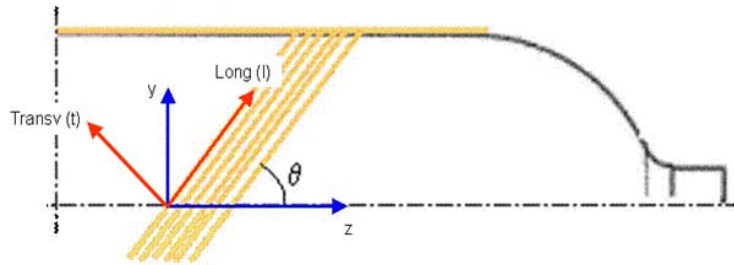


Figura 4. Esquema de bobinamento helicoidal dos filamentos sobre o selante metálico

Inicialmente, é necessária a determinação das propriedades do compósito tendo como base o ângulo de bobinamento do filamento, através de um modelo analítico.⁽³⁾ Uma importante característica deste modelamento é levar em consideração não somente os efeitos do E_{long} e E_{transv} do material, como também do G_{lt} e ν_{lt} , como se pode ver nas equações abaixo, onde “s” e “c” são respectivamente o seno e o cosseno do ângulo de bobinamento da fibra sobre o selante metálico:

$$E_y(\theta) = \frac{1}{\frac{s^4}{E_{long}} + \frac{c^4}{E_{transv}} + s^2 \cdot c^2 \left(\frac{1}{G_{lt}} - 2 \frac{\nu_{lt}}{E_t} \right)} \quad (1)$$

$$E_z(\theta) = \frac{1}{\frac{c^4}{E_{long}} + \frac{s^4}{E_{transv}} + s^2 \cdot c^2 \left(\frac{1}{G_{lt}} - 2 \frac{\nu_{lt}}{E_t} \right)} \quad (2)$$

Passou-se então ao dimensionamento da camada de reforço, para o qual considerou-se o equilíbrio de rigidez entre as partes constituídas dos dois diferentes materiais, como mostrado abaixo.

$$E_{y_{comp}} \cdot t_{comp} = E_{selante} \cdot t_{selante} \quad (3)$$

As tensões de membrana foram obtidas através de uma modificação introduzida na equação básica para este tipo de estrutura, composta de dois materiais diferentes. As equações modeladas e adotadas são apresentadas a seguir:

No selante metálico:

$$\sigma_{y_{selante}} = \frac{p \cdot R}{\left(\frac{E_{y_{comp}}}{E_{selante}} \right) \cdot t_{comp} + t_{selante}} \quad (4)$$

$$\sigma_{z_{selante}} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot \left[\left(\frac{E_{z_{comp}}}{E_{selante}} \right) \cdot t_{comp} + t_{selante} \right]} \quad (5)$$

No reforço compósito:

$$\sigma_{y_{comp}} = \frac{p \cdot R}{\left(\frac{E_{selante}}{E_{y_{comp}}} \right) \cdot t_{selante} + t_{comp}} \quad (6)$$

$$\sigma_{z_{comp}} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot \left[\left(\frac{E_{selante}}{E_{z_{comp}}} \right) \cdot t_{selante} + t_{comp} \right]} \quad (7)$$

Todos os passos do modelamento analítico foram desenvolvidos para ângulos entre 0° e 90°, com um passo de 0,5° permitindo desta forma a determinação, através de critérios de minimização de tensões, de um ângulo ótimo de bobinamento.

2.2 Modelo Numérico para Análise de Tensões do Cilindro Leve

No modelamento numérico adotou-se o método de elementos finitos (MEF), através do programa ANSYS versão 8.1, realizando-se o cálculo de tensões no selante metálico e nas camadas de compósito. A análise é focada em um trecho da região cilíndrica do vaso de pressão em estudo, visando a avaliação da camada de reforço em compósito. Tendo em vista as características de ortotropia e multicamadas do material compósito, optou-se pelo uso de um elemento do tipo *shell multilayer* (SHELL99) que permite a inserção de até 250 camadas de diferentes materiais com suas respectivas espessuras e ângulos de bobinamento. Abaixo detalhe da malha criada.

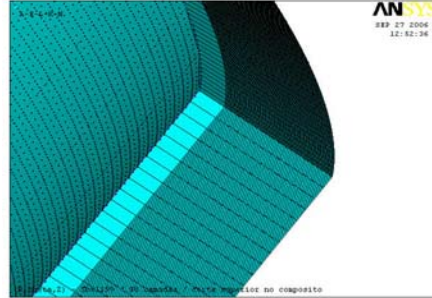


Figura 5. Detalhe da malha mostrando a camada mais interna em aço (selante) e as camadas mais externas de compósito (reforço).

As análises realizadas através deste modelo permitiram a obtenção de tensões máximas e mínimas e também as tensões equivalentes em cada camada, viabilizando assim a análise de falha tanto para o selante metálico quanto para o reforço.

2.3 Modelo para Análise de Falha do Cilindro

- Falha no Selante Metálico

O critério de falha aplicado ao selante metálico é o de escoamento através da tensão equivalente pelo critério de von Mises.

- Falha no Reforço de Compósito – Critério de Hill-Tsai

O critério de falha para o reforço de compósito pode ser aplicado a cada uma das camadas, considerando a sua orientação/ângulo de bobinamento, e suas propriedades. O critério de Hill-Tsai⁽³⁾ compara as tensões atuantes com as propriedades da camada analisada, gerando o número Hill-Tsai, α , tal que:

$$\alpha^2 = \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_{IR}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{tR}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_l \cdot \sigma_t}{\sigma_{IR}^2} \right) + \left(\frac{\tau_{lt}}{\tau_{ltR}} \right)^2 \quad (8)$$

onde, l e t são, respectivamente, a direção longitudinal e transversal do cilindro e

σ_l (= tensão na direção do filamento/longitudinal;

σ_t (= tensão na direção transversal ao filamento/transversal;

τ_{lt} (= tensão cisalhante no plano da camada;

σ_{IR} = Resistência à ruptura na direção longitudinal;

σ_{tR} = Resistência à ruptura na direção transversal e

τ_{ltR} = Resistência à ruptura por cisalhamento no plano da camada.

Na análise de falha da camada de reforço, verifica-se o número Hill-Tsai, α , para cada uma das camadas.

Se $\alpha < 1$: não ocorre ruptura da camada;

Se $\alpha \geq 1$: ocorre ruptura na camada considerada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modelamento Analítico da Camada de Reforço Compósito

A primeira análise feita foi acerca da determinação dos módulos de elasticidade do compósito, nas direções circunferencial e longitudinal do cilindro. O gráfico da Figura 6 mostra o comportamento destas propriedades para ângulos de bobinamento variando entre 0° e 90° .

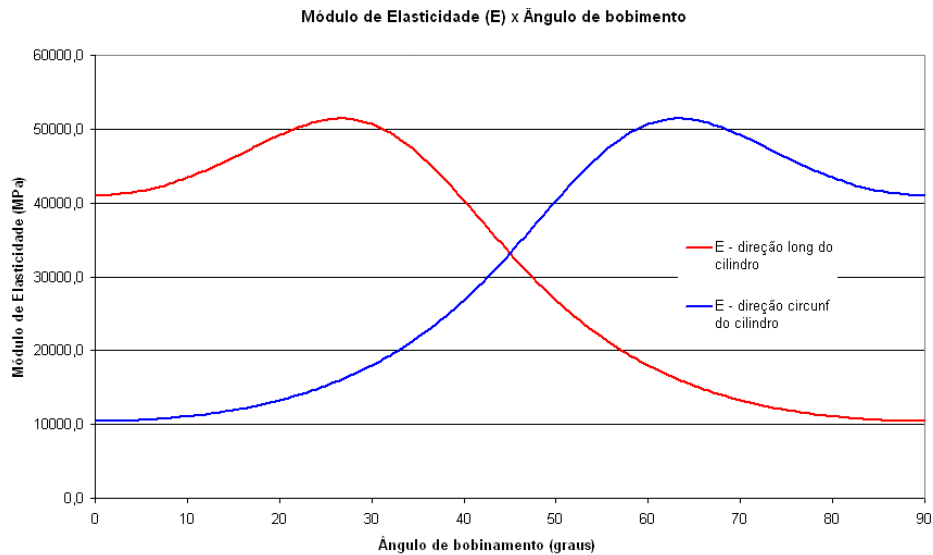


Figura 6. Variação do módulo de elasticidade em função do ângulo de bobinamento.

Nota-se um comportamento diferente daquele esperado caso se considere apenas o efeito das projeções dos módulos de elasticidade (E_{long} e E_{transv}), onde o máximo valor atingido seria de 41000 MPa (E_{long} da fibra). Quando calculados através das equações (1) e (2) os módulos alcançam valores superiores àquele da direção longitudinal da fibra, e isto se deve ao fato de considerar em seu equacionamento, os efeitos de E_{long} , E_{transv} , G_{it} e ν_{it} , conforme já comentado anteriormente.

O passo seguinte é o cálculo da espessura do compósito, utilizando-se o critério expresso na equação (3). O uso do módulo de elasticidade circunferencial do compósito ($E_{y_{comp}}$) nesta equação se deve ao fato de as tensões de membrana serem maiores na referida direção, sendo esta então a direção considerada crítica. O gráfico da Figura 7 mostra a evolução da espessura da camada de reforço em função do ângulo de bobinamento.

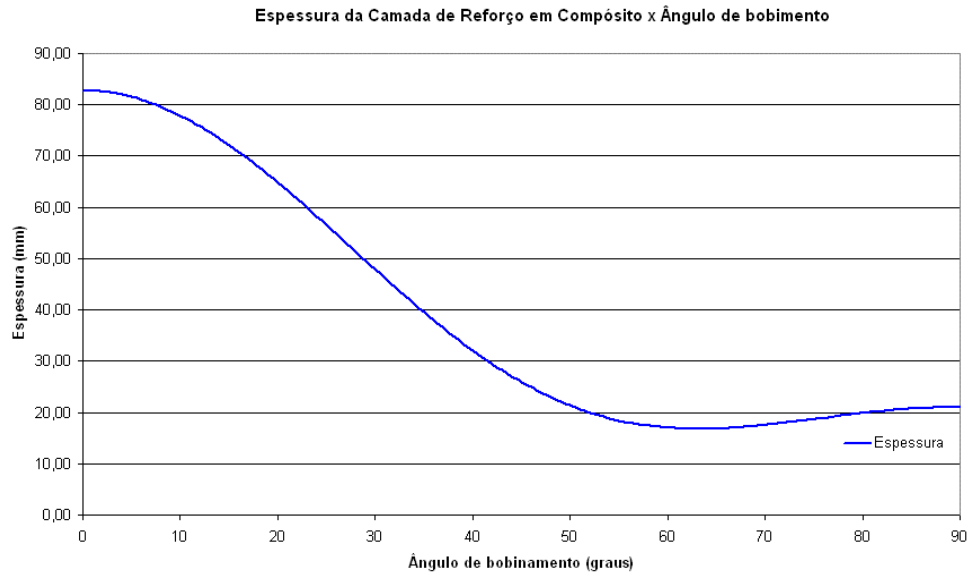


Figura 7. Variação da espessura do reforço de compósito em função do ângulo de bobinamento.

Nota-se que a obtenção de uma espessura mínima, com o ângulo de bobinamento para o qual o módulo de elasticidade é máximo.

As tensões de membrana circunferenciais (y) e longitudinais (z) expressas pelas equações 4 a 7, dependem das características do reforço de material compósito (módulos de elasticidade e espessura da camada). As Figuras 8 e 9 apresentam os valores destas tensões para o selante metálico e para o compósito respectivamente, calculados para a pressão interna de teste (30 MPa).⁽¹⁾

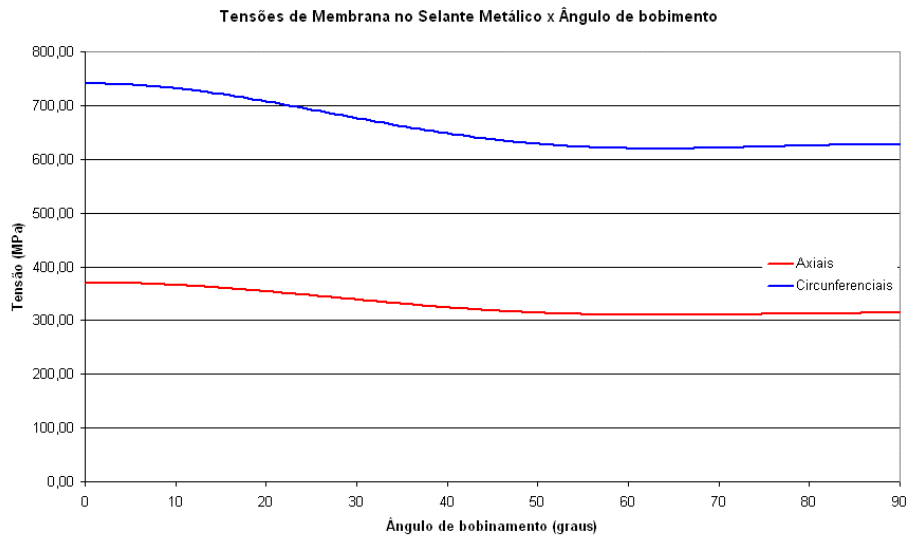


Figura 8. Variação das tensões de membrana no selante metálico em função do ângulo de bobinamento.

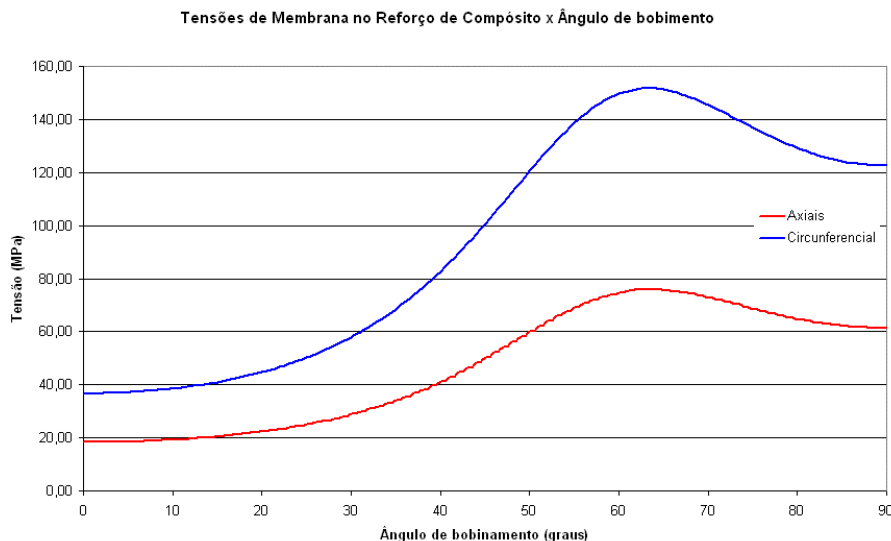


Figura 9. Variação das tensões de membrana no reforço em compósito em função do ângulo de bobinamento.

Avaliando-se de forma comparativa os gráficos das Figuras 8 e 9, percebe-se uma melhor distribuição de tensões entre o selante e o reforço em compósito, à medida que o ângulo de bobinamento aumenta, se aproximando do bobinamento tipo circunferencial (com $\theta = 90^\circ$). O ponto de mínima tensão circunferencial no selante é coincidente com o máximo do módulo de elasticidade circunferencial (ângulo de bobinamento entre 60° e 70°) e também com o mínimo da espessura, porém coincide também com as máximas tensões de membrana no reforço.

Essa coincidência entre máximos e mínimos de tensões e módulos de elasticidade é a chave para a escolha do ângulo ótimo de bobinamento. A região de interesse se localiza entre 55° e 68° , com um ponto de máximo em aproximadamente 62° . A literatura cita um ângulo ótimo de bobinamento de $54,7^\circ$.⁽³⁾ Desta forma optou-se por analisar a falha para um bobinamento a 58° , trabalhando desta forma com um ângulo próximo àquele apresentado pela literatura, e também próximo às condições de máximo em módulo de elasticidade circunferencial do compósito e mínimo em tensões circunferenciais de membrana no selante e espessura do reforço. Para um ângulo de bobinamento de 58° , tem-se um reforço com 17,40mm de espessura, o qual foi dividido para análise numérica em 97 camadas de 0,18mm de espessura cada.

A seguir apresenta-se e discute-se os resultados encontrados para a análise de falha do cilindro, a qual se baseia na análise numérica das tensões principais no cilindro.

3.2 Modelamento Numérico

O modelo numérico permitiu a obtenção das máximas e mínimas tensões circunferenciais e longitudinais e também das tensões equivalentes em cada camada da parede do cilindro (aço e compósito bobinado). Os gráficos das Figuras de 10 a 13 apresentam a distribuição das tensões ao longo das camadas (camada mais externa – n° 1, no compósito; camada mais interna, n° 98, selante metálico).

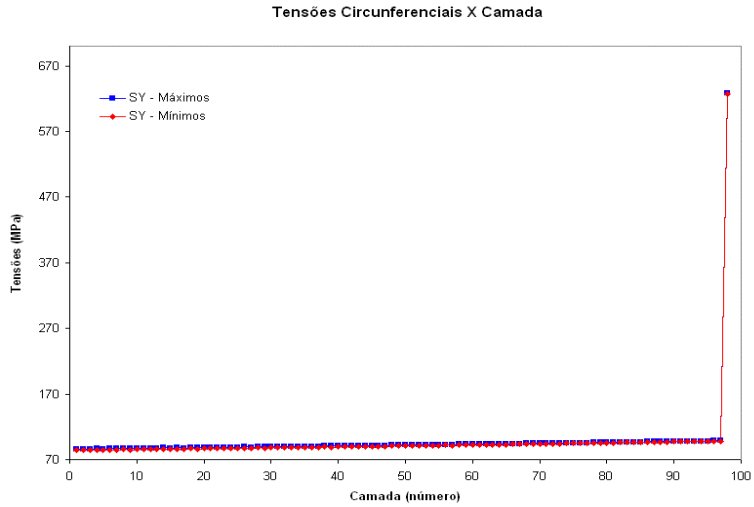


Figura 10. Variação das tensões circunferenciais (y) ao longo das camadas do cilindro.

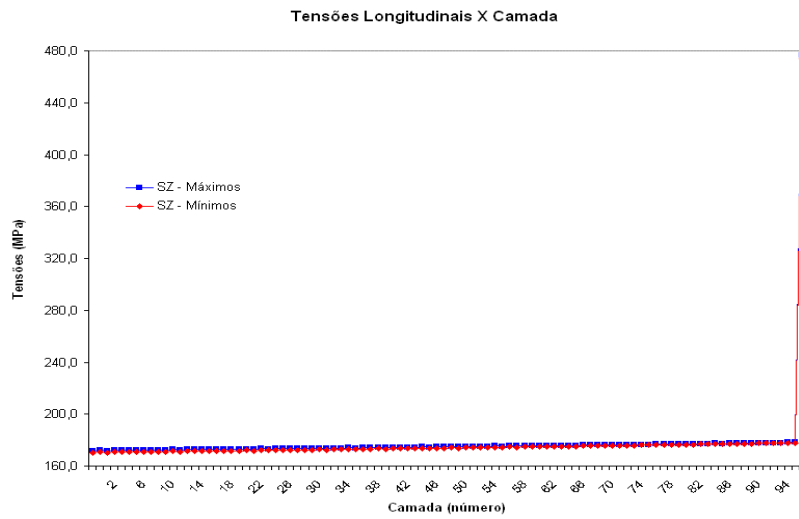


Figura 11. Variação das tensões longitudinais (z) ao longo das camadas do cilindro.

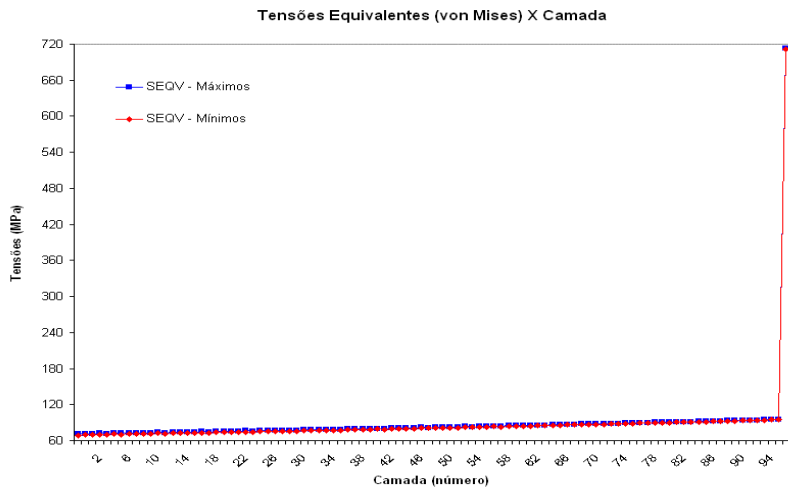


Figura 12. Variação das tensões equivalentes (von Mises) ao longo das camadas do cilindro.

Nos gráficos das tensões circunferenciais e longitudinais (Figuras 10 e 11) pode-se observar uma coincidência entre os máximos e os mínimos destas grandezas em cada camada, caracterizando assim uma distribuição uniforme da tensão em uma mesma camada, sem grandes oscilações entre diferentes pontos desta.

As tensões circunferenciais e longitudinais mostraram o mesmo comportamento, com máximo na camada mais interna, respectiva ao selante. Pode-se notar que, a maior parte dos esforços devidos à pressão aplicada ao modelo é suportada pelo selante metálico, restando uma pequena parcela da carga a ser suportada pelo reforço. Também este resultado apresenta concordância com a teoria, pois, tendo em vista a grande diferença de módulo de elasticidade entre os dois materiais, pode-se prever comportamento mecânico proporcional às propriedades, face ao esforço imposto.

De forma simples a distribuição das tensões no modelamento da região cilíndrica foi compatível e coerente com as teorias mecânicas acerca de cascas, especialmente quando considerada a existência de dois diferentes materiais compondo a estrutura mecânica analisada (cilindro GNV tipo 2).

3.3 Análise de Falha

- Falha no Selante Metálico

O critério de falha aplicado ao selante metálico foi o escoamento através da tensão equivalente pelo critério de von Mises. A Figura 12 mostra graficamente a distribuição das tensões equivalentes obtidas numericamente pelo MEF segundo o critério citado através das camadas que compõe o cilindro. Na camada 98, onde está o selante metálico, observa-se, pelo gráfico da Figura 13, que a tensão equivalente de von Mises, obtida numericamente foi da ordem de 720 MPa. Como o limite de escoamento mínimo requerido para o selante metálico, após a sua fabricação, é da ordem de 815 MPa (Tabela 2), conclui-se que a falha não ocorrerá visto que não haverá escoamento.

- Falha no Reforço de Compósito – Critério de Hill-Tsai

Para avaliar a possibilidade de falha de cada uma das 97 camadas que constituem o reforço em compósito foi necessário o cálculo do número Hill-Tsai para cada camada. Para tanto, fez-se uso das máximas tensões circunferenciais e longitudinais nas diversas camadas, bem como das máximas tensões de cisalhamento. A Figura 13 mostra os resultados encontrados para o número Hill-Tsai, calculados segundo a equação 8, nas diversas camadas.

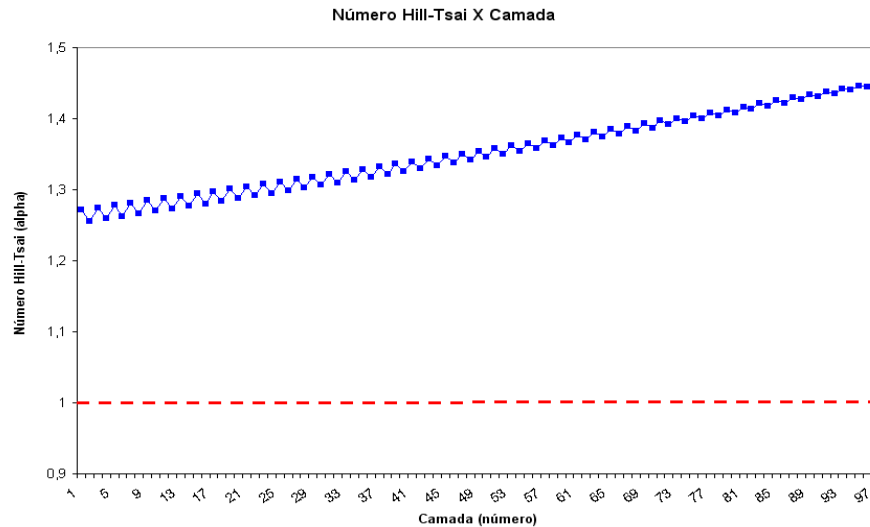


Figura 13. Variação do número Hill-Tsai ao longo das camadas do reforço de compósito.

A curva em azul mostra os valores obtidos pelo cálculo do parâmetro utilizando os valores de tensões obtidos apartir do modelamento numérico, e a reta em vermelho indica o valor máximo que se deve obter, a fim de evitar a falha da camada de compósito. Como se pode notar, no gráfico da Figura 13, em todas as camadas do compósito o valor do número Hill-Tsai excedeu a unidade, caracterizando, desta forma, a probabilidade de ocorrência de falha. Considerando-se que o comportamento mecânico do modelo numérico correspondeu àquele previsto para o tipo de estrutura em análise e que as tensões de membrana e a teoria de casca são compatíveis com a geometria cilíndrica estudada, atribuí-se a falha das camadas à insuficiência da hipótese mecânica adotada (equação 3) para o cálculo da espessura do reforço de compósito (equilíbrio da rigidez entre a região do selante e do reforço) ou, então à não adoção de um fator de segurança. Esta falha do modelamento analítico refletiu em tensões em níveis elevados para aqueles que na prática são suportados pelo material compósito avaliado. Camadas mais espessas de reforço suportariam, de modo uniforme, as tensões e estas não ultrapassariam os valores limites de ruptura, não ocorrendo a falha das camadas.

4 CONCLUSÃO

- O modelamento analítico apresenta coerência, especialmente nos cálculos dos módulos de elasticidade utilizando equações que levam em consideração os módulos nas direções longitudinal e transversal da fibra, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson. Tal modelamento facilita o estudo analítico das tensões de membrana presentes no cilindro;
- O modelamento numérico é bastante flexível, e a possibilidade de extração de resultados em cada camada individualmente se mostrou de extrema importância, pois permitiu a análise de falha do compósito em cada uma de suas camadas. O comportamento mecânico do modelo numérico da porção cilíndrica do cilindro GNV se mostrou em concordância com o previsto pela teoria de cascas.

- O critério adotado para o modelamento analítico da espessura da camada de reforço de compósito se mostrou insuficiente. As tensões à que este reforço foi submetido foram demasiadas para a espessura modelada. Um novo critério deve ser considerado de modo a modelar uma camada mais espessa. Tal critério deve também englobar um coeficiente de segurança, de modo a garantir que não ocorra a falha do componente.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FINEP (No. 01/2004) pelo apoio financeiro a este trabalho; ao CNPq e CAPES pelas bolsas de Iniciação Científica e mestrado respectivamente.

REFERÊNCIAS

- 1 ISO 11439, High Pressure Cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles, ISO/TC 58/SC 3/WG17.
- 2 SHEN, F.C. A filament-wound structure technology overview, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 42, 96-100 p., 1995
- 3 GAY, D., HOA, S. V., TSAI, S.W. *Composite Materials – Design and Applications*, CRC Press, 2003.
- 4 DANIEL, I.M., ISHAI, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*, New York, Oxford University Press, 2006.
- 5 WEBSTER, C. Taking new approaches in standards development for products for new market – The development of ISO 11439 for compressed natural gas vehicle cylinders, *ISO Bulletin*, 71 p., 2001
- 6 AMORIM, G.B.; Análise de tensões em cilindros reforçados para armazenamento de gás natural veicular; Qualificação Teórica para Doutorado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica – UFF-EEIM/VR, 6-10 p., 2005.