

ANÁLISE NUMÉRICA DE TUBOS DE CARBONO/EPÓXI FABRICADOS POR FILAMENT WINDING SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA

José Humberto S. Almeida Júnior*, Felipe F. Luz, Jéferson A. Ferri, Carlos A. Ferreira, Sandro C. Amico

LAPOL/PPGE3M - UFRGS – RS (jhsajunior@globomail.com)

Resumo – No presente trabalho foram produzidos tubos em material compósito por *filament winding* pelo método *dry-winding* (enrolamento seco) com orientação simétrica e não-simétrica das fibras $[\theta/-\theta]_s$, onde os ângulos intermediários foram de $\pm 55^\circ$ e os externos de $89,7^\circ$. O efeito do número de camadas (10, 14 e 18) na pressão interna máxima foi investigada utilizando análise por elementos finitos (FEA) pelo software AbaqusTM. Como o software não considera ângulos simétricos e antissimétricos, para cada camada intermediária ($\pm 55^\circ$) foram consideradas duas camadas no software ($+55^\circ$ e -55°), ou seja, para cada camada no tubo fabricado, são consideradas duas na análise numérica. Os critérios de falha considerados na análise foram máxima tensão e máxima deformação e Tsai-Wu. A máxima pressão interna suportada pelos tubos aumentou com a incorporação do número de camadas. Pelo critério de falha de Tsai-Wu, os tubos falharam em 9,5, 13 e 16 MPa, respectivamente para os tubos de 10, 14 e 18 camadas.

Palavras-chave: *Filament Winding, Análise Numérica, Towpreg, Tubos, Pressão Interna.*

Introdução

Dentre os sistemas para processamento de materiais compósitos, o *filament winding* destaca-se por fatores como alta precisão no posicionamento das fibras, alta fração volumétrica de fibras, baixo teor de vazios e processamento automatizado. Existem duas vertentes de processamento no *filament winding*: no *wet winding*, ou “enrolamento molhado”, a fibra passa em um banho de resina (já com o agente de cura) e o conjunto é enrolado em um mandril giratório; no *dry winding* ou “enrolamento seco”, os filamentos (*rovings*) estão pré-impregnados em uma resina (conhecido como *towpreg*) e são enrolados no mandril giratório. Após este processo, o material é curado e depois o compósito é retirado do mandril (exceto quando o mandril é um *liner* fixo).

A velocidade transversal de transporte das fibras é sincronizada com a velocidade giratória do mandril, produzindo um determinado ângulo de orientação das fibras, pré-determinado na etapa de programação de enrolamento. Além destes, a largura do *roving* (*bandwidth*) e o posicionamento correto dos filamentos nas roldanas do alimentador são essenciais para uma alta precisão no ângulo de enrolamento.

Há alguns padrões de enrolamento (*winding pattern*), que variam de acordo com a geometria do mandril e o ângulo desejado. O enrolamento helicoidal permite a deposição dos *rovings* de maneira que haja um balanço entre a resistência circunferencial e longitudinal da peça. Neste processo, as fibras não ficam adjacentes, sendo necessárias várias “passadas” para o total recobrimento da peça. No enrolamento circunferencial, as fibras são depositadas na posição normal em relação ao eixo de rotação do mandril, produzindo ângulos próximos a 90° . No enrolamento polar, utilizado quando se deseja alta resistência na direção axial, o mandril gira em baixa rotação, enquanto que o alimentador rotaciona em um ângulo pré-estabelecido. Já o enrolamento não-geodésico é ideal para vasos de pressão, pois gera ângulos entre 0° e 90° com baixo coeficiente de atrito e produz o máximo de tensão constante ao longo do enrolamento.

Um importante parâmetro estrutural de tubos de alto desempenho e de vasos de pressão é a sua resistência à pressão interna. Tanques de combustíveis, tanques de oxidante, cárteres de motores, tubos e vasos de pressão são alguns exemplos de materiais que atuam sob pressão interna [1]. Hocine et al. [2] estudou a influência do número de camadas em vasos de pressão de carbono/epóxi com *liner* metálico na resistência à pressão interna e Onder et al [3] mediu a resistência de vasos de pressão de vidro/epóxi. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi estimar a máxima pressão interna suportada por tubos de carbono/epóxi, produzidos por *filament winding*, utilizando análise por elementos finitos através do software AbaqusTM.

Parte Experimental

Materiais e processamento

Foram utilizados os seguintes materiais: *towpreg* de carbono/epóxi, com fibra de carbono tipo T700SC-12K e resina epóxi UF3369, produzida pela TCR Composites; mandril de alumínio (Fig. 1) com comprimento de 381 mm e diâmetro de 136 mm. Os compósitos foram manufaturados em uma máquina de *filament winding* de 7-eixos, da MFTech (Fig. 2(a)). Foi utilizado o software CadWind 2007 para desenho e programação de enrolamento.

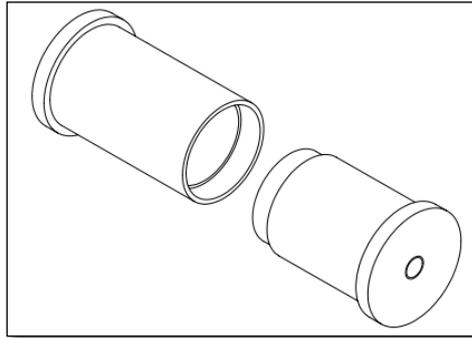


Figura 1 - Projeto do mandril utilizado.

Foram analisados 3 tipos de tubos: com 6, 8 e 10 camadas (Fig. 2(b)). As camadas externas foram enroladas com ângulo de $89,7^\circ$, utilizando enrolamento polar, e as camadas intermediárias com ângulo de $\pm 55^\circ$ e enrolamento não-geodésico. Os ângulos externos ($89,7^\circ$) foram utilizados para melhor aderência das camadas intermediárias (primeira camada interna) e compactação das camadas (última camada externa). Já os ângulos intermediários (55°) foram escolhidos por ser considerado um ângulo “ótimo” para tubos e vasos de pressão, pois neste ângulo a tensão radial é duas vezes a tensão axial [4]. Como o enrolamento é simétrico e antissimétrico ($[\theta/-\theta]_s$), cada ciclo só se completa quando o alimentador retorna a sua posição inicial de enrolamento. Porém, há uma divergência na quantidade de camadas no tubo real e no simulado. Isto porque para cada camada de $\pm 55^\circ$, foram consideradas duas camadas na simulação, de $+55^\circ$ e -55° , devido ao fato de o software analisar cada camada individualmente, considerando primeiramente o enrolamento positivo e posteriormente, o negativo. O mesmo não acontece para as camadas de $89,7^\circ$, pois durante o enrolamento polar considerou-se apenas meio ciclo, ou seja, uma camada na simulação. Sendo assim, para os tubos estudados com 6, 8 e 10 camadas, foi adotada a nomenclatura utilizada nas simulações, ou seja, com 10, 14 e 18 camadas, conforme detalha a Tabela 1.



Figura 2 - Produção do tubo por *filament winding* (a) e tubos produzidos neste trabalho.

Tabela 1 – Detalhamento da construção dos três tubos estudados.

Nº de camadas	Sequência de empilhamento	Espessura total do tubo (mm)
10	$[89,7, (-54,7, 54,7)]_2s$	6,30
14	$[89,7, (-54,7, 54,7)]_3s$	8,82
18	$[89,7, (-54,7, 54,7)]_4s$	11,34

Modelagem Computacional

De acordo com datasheet dos *prepregs* comerciais, considerou-se que os materiais constituintes de cada camada foram fibra de carbono de alta resistência, resina epóxi, teor volumétrico de fibras de 73% e espessura de cada camada equivalente a 0,63 mm. Os ângulos e a espessura total dos tubos para cada caso podem ser observados na Tabela 1.

Para a modelagem computacional do tubo com 136 mm de diâmetro interno e 381 mm de comprimento, criou-se um modelo tridimensional de casca com o software comercial AbaqusTM. As propriedades do material foram calculadas utilizando o software Helius:CompositePro, utilizando o modelo de micromecânica Solução Exata para fibras longas e orientadas unidirecionalmente. Neste modelo assume-se um empacotamento hexagonal uniforme e unidirecional utilizando elementos finitos. Assim, foram inseridas no AbaqusTM as constantes elásticas ($E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, G_{12}, G_{13}$ e G_{23}) e as resistências ($+\sigma_1, -\sigma_1, +\sigma_2, -\sigma_2$, e τ_{12}) do material.

Uma malha, apresentada na Fig. 3(a), foi criada utilizando elementos quadráticos do tipo S8R (malha para elemento de casca) com um total de 19780 nós e 6536 elementos, configurações estas consideradas adequadas ao presente estudo. Para cada caso aplicou-se uma pressão hidrostática (Fig. 3(b)) na parede interna do cilindro do tubo. A pressão aplicada foi variada objetivando avaliar a máxima pressão de explosão de cada tubo. Uma das terminações laterais do tubo foi engastada, restringindo todos seus graus de liberdade. Por exemplo, supondo que se aplicou uma pressão de 20 MPa (200 bar) na lateral oposta, essa pressão corresponde a uma força de 290,5 kN, aplicada no centro da seção. Assim, todo o interior do tubo foi submetido ao mesmo carregamento.

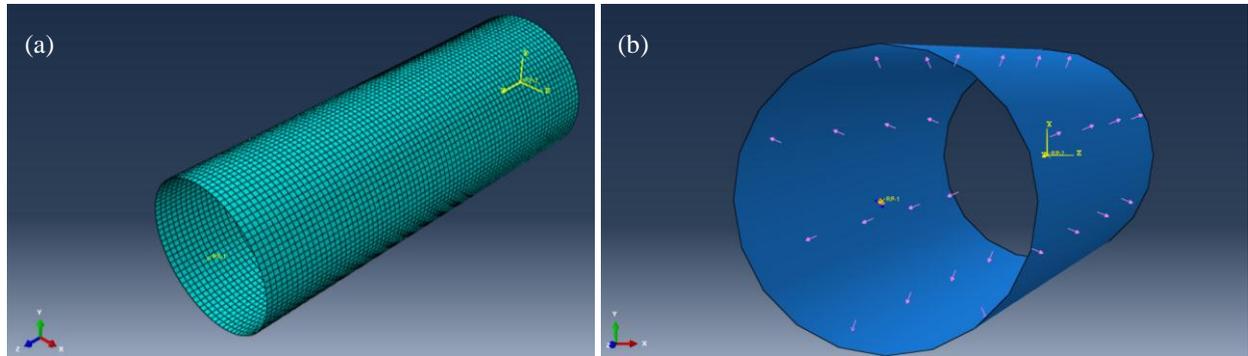


Figura 3 – Malha utilizada para a análise dos tubos (a) e aplicação de pressão hidrostática na parede interna do tubo (b).

Resultados e Discussão

As propriedades calculadas para cada lâmina podem ser observadas na Tabela 2, obtidas através do *datasheet* do software Heliuss: CompositePRO. Os resultados de máxima deformação no plano e máxima tensão obtidos nas simulações podem ser observados na Fig. 4, onde foi apresentado o resultado de deformações para todas as camadas (envelope) para o tubo de 10, 14 e 18 camadas (Figs. 4(a)-(c)) quando submetidos a uma pressão interna de 50 MPa. Nas Figs. 4(d)-(f), observa-se o resultado para a tensão do tubo com 10, 14 e 18 camadas. Para melhor visualizar os resultados, as imagens da Fig. 4 estão com um fator de escala aumentado (10×). Observa-se que no caso de 10 camadas ocorre a maior deformação do tubo, e no caso de 18 camadas, a menor. Observa-se também que há concentração de tensões nas regiões de borda do tubo, porém, com pouca influência nos resultados obtidos.

Tabela 2 – Propriedades calculadas para cada lâmina unidirecional.

Constantes elásticas							Resistências				
E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	E ₃ (GPa)	ν ₁₂	G ₁₂ (GPa)	G ₁₃ (GPa)	G ₂₃ (GPa)	+σ ₁ (MPa)	-σ ₁ (MPa)	+σ ₂ (MPa)	-σ ₂ (MPa)	τ ₁₂ (MPa)
169	9,5	9,5	0,24	5,3	5,3	3,8	2550	1576	721	108	99,4

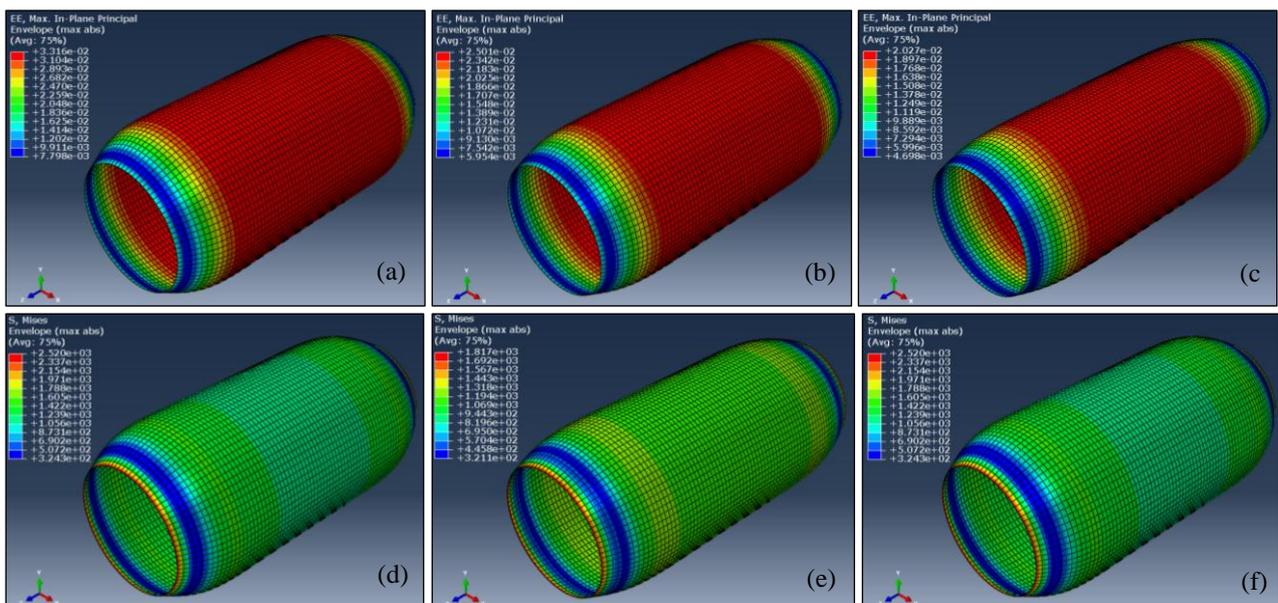


Figura 4 – Deformação máxima no plano para um tubo com (a) 10 camadas, (b) 14 camadas e (c) 18 camadas. Tensão máxima (Von Mises) para um tubo com (d) 10 camadas, (e) 14 camadas e (f) 18 camadas.

A Tabela 3 apresenta os valores de máxima tensão, máxima deformação e Tsai-Wu para cada direção em cada um dos casos simulados. Observa-se que as maiores deformações ocorrem no sentido transversal do tubo e as maiores tensões no sentido longitudinal, devido à particularidade da pressão interna quando aplicada a tubos, onde a tensão radial aplicada é maior que a axial (o dobro neste caso, como explicado anteriormente). Como esperado, as maiores deformações e tensões estão no caso do tubo com 10 lâminas, que é o menos resistente dos três casos estudados. Dentre os critérios de falha estudados, priorizou-se o critério de falha de Tsai-Wu para análise das pressões de ruptura dos tubos estudados. Na Tabela 3, considerando máxima tensão de 2550 MPa e máxima deformação de 1,5%, nenhum dos tubos falhou. Porém, para o critério de Tsai-Wu, os tubos falham em pressões mais modestas, com 9,5, 13 e 16 MPa, para os tubos com 10, 14 e 18 camadas, respectivamente. Chang [5] também relatou discrepâncias entre os critérios de máxima deformação e Tsai-Wu, para vasos de pressão de carbono/epóxi submetidos à pressão interna. Porém, visando uma predição das pressões de ruptura dos tubos pelo critério de máxima deformação, realizou-se uma regressão linear dos resultados do critério de máxima deformação, calculando-se a pressão máxima suportada para caso. A Fig. 5 mostra a variação da pressão com a deformação para os três tubos. Para o tubo com 10 camadas, a pressão máxima suportada foi de 25,1 MPa, para o tubo com 14 camadas, de 30,5 MPa e com 18 camadas, de 35,2 MPa.

Tabela 3 – Valores de tensão máxima, deformação máxima e Tsai-Wu para cada caso simulado.

N° camadas	Pressão (MPa)	Máxima Tensão (MPa)			Máxima Deformação (%)			Tsai-Wu
		Direção 1	Direção 2	Direção 12	Direção 1	Direção 2	Direção 12	
10	9,5	529,3	50,5	2,2	0,31	0,55	0,04	1,00
	10	557,1	53,2	2,3	0,32	0,58	0,04	1,07
	15	835,7	79,8	3,5	0,50	0,87	0,07	1,61
14	10	393,8	38,2	1,2	0,23	0,42	0,02	0,77
	13	511,9	49,7	1,6	0,30	0,55	0,03	1,00
	15	590,7	57,3	1,8	0,35	0,63	0,03	1,16
18	15	451,1	45,0	1,1	0,27	0,50	0,02	0,93
	16	481,1	48,0	1,2	0,28	0,53	0,02	0,99
	30	902,1	90,0	2,5	0,53	1	0,04	1,86

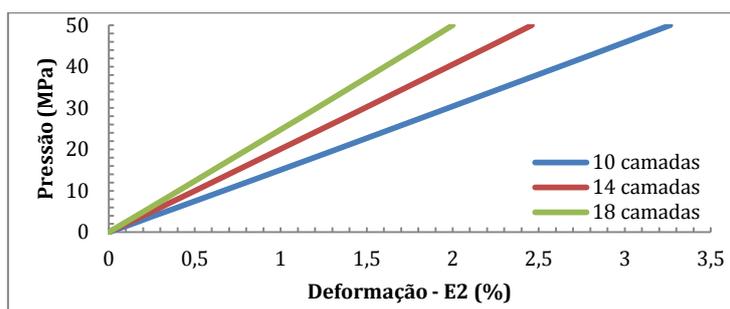


Figura 5 - Variação da deformação com o aumento de pressão nos tubos compostos estudados.

Conclusão

No presente trabalho foi estudada a resistência à pressão interna de tubos compostos de *towpregs* de carbono/epóxi, produzidos por *filament winding*, com ângulos externos de 89,7° e intermediários de 55°, através de análise por elementos finitos, utilizando o software AbaqusTM. Concluiu-se que, dentre os critérios de falha utilizados, neste caso: máxima tensão, máxima deformação e Tsai-Wu, o critério de Tsai-Wu foi priorizado nas pressões aplicadas e o compósito com 18 camadas falhou em 160 bar (16 MPa), enquanto que o mesmo tubo, pela máxima deformação, falhou em 350 bar. Alguns autores também reportaram esse desvio para os critérios de falha estudados, porém o critério de Tsai-Wu oferece uma maior segurança e precisão quando comparados aos resultados experimentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq e ao PRH/ANP pelo suporte financeiro.

Referências

1. C-U. Kim; J-H. Kang; C-S. Hong; C-G Kim. *Compos. Struct.* 2005, 67(4), 443-452.
2. Hocine; D. Chapelle; M.L.Boubakar; A. Benamar; A. Bezazi. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 2009, 86, 649-655.
3. Onder; O. Sayman; T. Dogan; N. Tarakcioglu; *Compos. Struct.* 2009, 89, 159-166.
4. H. Hernández-Moreno; B. Douchin; F. Collombet; D. Choqueuse; P. Davies. *Compos. Sci. Technol.* 2008, 68(3-4), 1015-1024.
5. R.R. Chang. *Compos. Struct.* 2000, 49(2), 237-243.