

EFEITO DE COMPRESSÃO AXIAL E FLEXÃO, EM TUBO DE MATERIAL COMPÓSITO PARA USO EM PRÓTESE, PRODUZIDO POR DOIS PROCESSOS DIFERENTES

Lebrão, G.W.⁽¹⁾; Rossi, J.L.⁽²⁾
(1) EEM CEUN-IMT;(2) IPEN
Instituto Mauá de Tecnologia
Praça Mauá 01, São Caetano do Sul, SP
CEP:
guinet@maua.br

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma comparação entre dois tubos de compósito híbrido epóxi fibra de carbono e vidro para substituição de tubo de alumínio em próteses de membro inferior. Dois processos de fabricação de tubos de compósito foram utilizados para comparação: um, com utilização de *braid* com a fibra à 45° em relação ao seu eixo longitudinal e produzido por transferência de resina assistida a vácuo, e outro, produzido pelo método de bobinagem filamentar em ângulos de 15 e 45°. Os tubos foram avaliados sob tensões axiais e de flexão. Um tubo de alumínio AA 6463 foi usado como referência para comparação. Os tubos feitos por bobinagem apresentaram melhores propriedades mecânicas, mas os fabricados com *braid*, com a vantagem de ser um processo mais simples, apresentaram resultados aceitáveis.

Palavras-chave: fibra de carbono, bobinagem, transferência de resina, ensaios mecânicos.

INTRODUÇÃO

Os ossos são constituídos de um material compósito muito eficiente. Uma proteína resistente, porém flexível, conhecida por colágeno constitui a fase matriz. Já a fase dispersa é constituída de hidróxi-apatita, um mineral rígido. Esse compósito compõe duas estruturas de diferentes atuações: uma estrutura chamada cortical que é compacta e rígida e outra, chamada esponjosa, menos rígida e leve. Os ossos que suportam esforços têm na periferia a estrutura cortical e internamente a esponjosa,

para diminuir o peso. Isso se explica, pois, para um cilindro sofrendo esforço axial, a carga crítica depende do módulo de elasticidade do material, momento de inércia e comprimento. Assim, quanto maior for o raio do tubo maior será o momento de inércia elevando à tensão crítica e conseqüentemente a segurança. Portanto as regiões periféricas em um tubo absorvem a maior parte das tensões. Seguindo esse modelo de osso, o tubo confeccionado para uso na prótese foi composto de CEFC (compósito epóxi-fibra de carbono) na periferia do tubo onde há maiores esforços e na parte interna um CEFV (compósito epóxi-fibra de vidro) material menos resistente, de menor custo e peso específico aproximadamente 40% maior. O aspecto desfavorável do CEFC é seu custo muitas vezes inacessível para a população de baixa renda, a quem se destina o material desenvolvido. Desta forma, optou-se por utilizá-lo somente na periferia e nas quantidades necessárias. Para a parte interna do tubo, como já dito anteriormente, foi utilizado o CEFV. A otimização desse tubo híbrido e combinação desses materiais, reduz tanto o custo quanto o peso final da prótese, trazendo grandes vantagens ao usuário.

Processos que envolvem o uso de fibras pré-impregnadas com resina e curadas em autoclaves, onde são necessárias altas pressões, temperaturas e longos ciclos de produção, com controles rígidos de matéria-prima, produzem compósitos de alto desempenho, mas com alto custo do produto final. A opção para viabilizar a fabricação de componentes com qualidade e a um custo mais competitivo, é utilizar processos que permitam obter produtos com a mínima perda de matéria-prima, fabricação com ciclos curtos de cura da matriz polimérica e baixa incidência de mão-de-obra, garantindo ainda elevado grau de uniformidade e repetibilidade. O processo como a moldagem por transferência de resina assistida à vácuo (*vacuum assist resin transference molding*, VARTM) está viabilizando, em termos de volume de produção e baixo custo, a produção de materiais compósitos como produto de uso de larga escala para aplicações genéricas ou estruturais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Hoje as próteses são fabricadas utilizando basicamente três materiais diferentes: o alumínio, o aço e o material compósito epóxi-fibra de carbono. O material que oferece a melhor resistência com o menor custo ainda é o aço. O material, porém mais utilizado, são as ligas de alumínio da série AA 6000, que oferecem a melhor relação baixa massa e custo acessível. No entanto, como ocorre

na indústria aeroespacial, o material que oferece a melhor resistência com baixa massa, mas não é o de menor custo, é o material compósito epóxi-fibra de carbono.

Diante deste fato, optou-se por fabricar o componente estrutural da prótese em um compósito híbrido epóxi-fibra de carbono e epóxi-fibra de vidro. Considerando-se a disponibilidade do processamento industrial de compósitos no mercado e junto à AACD, optou-se pelo uso de dois processos de fabricação: um por bobinagem filamentar e outro por transferência de resina à vácuo sobre uma luva tubular tramada, também conhecida comercialmente como *braid*.

Para bobinagem filamentar utilizaram-se as fibras especificadas na Tab. I e a resina, GY260/HY907/DY062, que têm suas propriedades apresentadas na primeira coluna da Tab. II. Para a transferência de resina à vácuo, foram utilizados as *braids* de fibras, cujas propriedades estão apresentados nas Tab. III e a resina LY 1564/ XB 3485 utilizada têm suas propriedades apresentada na Tab. II. Neste trabalho, o molde de VARTM não é um molde rígido bipartido, mas é rígido apenas internamente. Este molde é fabricado com uma barra de alumínio cônica, para facilitar sua extração ao final do processo, sobre a qual as camadas de fibras são sobrepostas, em seguida é colocado um tubo de filme de poliamida ou poli-acetato de vinila e aplica-se o vácuo simultaneamente à injeção da resina. A resina pode fluir livremente pelo comprimento do tubo a partir de uma extremidade preenchendo os vazios, enquanto na outra extremidade aplica-se vácuo de 10 psi (aproximadamente 0,7 atm) para extração do ar e compactação das fibras.

A resina do sistema VARTM foi preparada com as seguintes frações de mistura, com porcentagem de massa, na proporção de 100 partes de resina para 37 partes de endurecedor. A cura se deu a temperatura ambiente por 24 horas e o ciclo de pós cura é de 15 horas à 50 °C, segundo especificação técnica Huntsman LY 1564/ XB 3485. Para o sistema de bobinagem filamentar a proporção da resina em massa foi de 100 partes de resina, 100 partes para o endurecedor e uma parte de acelerador, com uma cura em estufa realizada em 18 horas começando por um patamar de 80 °C, em seguida 100 °C e finalmente 120 °C.

No processo de bobinagem filamentar os fios foram bobinados sobre um mandril horizontal de alumínio passando, inicialmente, por um sistema de impregnação de resina. Os fios foram depositados sobre o mandril com o auxílio de um cabeçote que aplica as fibras segundo os eixos desejados em relação ao eixo axial do mandril. Neste trabalho utilizaram-se dois tubos de diferentes configurações

quanto a orientação da fibra: um tubo com configuração de ângulos +15° e – 15° e outro tubo com configuração de ângulos +45° e – 45°.

Tabela I - Propriedades da fibra de carbono Hexcel AS 4 - 6K, e da fibra de vidro tipo E- Vetrotex Saint-Gobain E.

Propriedades	AS4 – 6K	Vidro E
Módulo de elasticidade (GPa)	228	72
Limite de resistência à tração (MPa)	4278	2800
Alongamento até à ruptura (%)	1,5	2,3
Diâmetro do filamento (µm)	7,1	17,0
Massa específica (g/cm ³)	1,77	2,6

Tabela II - Propriedades da resinas epóxi – Huntsman Araldite.

Propriedades	GY260/HY907/DY062	LY 1564/ XB 3485
Processos	bobinagem	RTM
Módulo de elasticidade (GPa)	3,3	3,3
Limite de resistência à tração (MPa)	85	78
Alongamento até à ruptura (%)	4,8	6,0
Massa específica (g/cm ³)	1,22	1,14

Tabela III - Propriedades das *braids* em fibra de carbono Siltex AS 4 - 6K, e fibra de vidro tipo E- SILTEX Flecht- und Isoliertechnologie Holzmüller GmbH & Co.KG.

Propriedades	Vidro 035.14430303682G	Carbono 035.14440421C
Módulo de elasticidade (GPa)	73	230
Limite de resistência à tração (MPa)	2400	3530
Alongamento até à ruptura (%)	4,5	1,5
Diâmetro da luva a 45°(mm)	35	35
Massa específica material (g/cm ³)	2,6	1,73
Massa (kg / 100 m)	6,77	1,96
Espessura da parede tramada (mm)	0,50	0,30

As camadas helicoidais foram depositadas sobrepostas da seguinte forma: as seis primeiras camadas de fibra de vidro e as três últimas, externas, de fibra de carbono. As camadas de fibra de vidro possuíam espessura média de 0,30 mm e as camadas de fibra de carbono espessura média de 0,15 mm. Ao final da bobinagem o molde foi retirado do equipamento e colocado sobre mancais rotativos em uma estufa de cura.

No processo de transferência de resina auxiliado à vácuo utilizou-se uma bomba de vácuo com capacidade de 0,7 atm e um invólucro de PVA (poli-acetato de vinila) para a confecção do saco de vácuo. Na modelagem utilizou-se um molde cilíndrico com 24 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento em alumínio polido, com ângulo de saída de 0,5 mm de diferença entre o raio inicial e final do molde.

As camadas de carbono e vidro foram aplicadas com *braids* de diâmetro 35 mm, com espessura da trama de 0,15 mm para a fibra de carbono e 0,30 mm para a fibra de vidro e para cada camada de *braid* tem-se + θ / $-\theta$ de fios tramados. Nesta preparação, para ambas as fibras, utilizou-se um ângulo inicial do tecido de 45° para o fio em relação ao eixo longitudinal do tubo.

Os ensaios de compressão e flexão foram realizados segundo as normas ASTM D3410 e D 790 , respectivamente. Os ensaios de compressão foram realizados segundo as normas ASTM D 3410/D 3410M – 95 e ISO 10328-4-96.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tab. IV, são apresentados a média e desvio padrão dos valores de carga máxima suportada pelo tubo em Newton [N], da tensão média em MPa e o coeficiente de segurança, em função da carga padrão da norma (5000 N) equivalente a carga que um indivíduo com 100 kg exerce na prótese ao correr, para tubos de alumínio existentes no mercado.

Tabela IV – Tabela de avaliação tubos de alumínio AA 6082 T6, sob flexão, utilizado na fabricação de próteses.

Alumínio AA 6082 T6	Carga máxima N	Tensão média MPa
Média	15027	82
Desvio Padrão	453	2

Nas Tab. V e VI estão apresentados respectivamente os dados dos resultados do ensaio de compressão e flexão dos protótipos fabricados por bobinagem com ângulo de 15° e 45°, respectivamente. Nas Tab. VII e VIII os resultados do processo VARTM para os mesmos ensaios. Na última coluna das tabelas dos ensaios de compressão aparece o coeficiente de segurança, que representa o número de vezes que a carga máxima excede a carga limite de 5000 N especificada na norma. Este coeficiente não existe para o ensaio de flexão.

Observa-se que a tensão limite de resistência à compressão axial é maior para os protótipos bobinados do que os produzidos por VARTM. Esta diferença é de 60 a 180% para 45° e 15°, respectivamente. Os protótipos fabricados por bobinagem apresentam um limite 7% maior de resistência à flexão. Isto se deve em primeiro lugar, pela precisão da bobinagem para o posicionamento das fibras durante o processo produtivo, a tensão aplicada à fibra e da maior fração volumétrica obtida neste processo.

Tabela V – Tabela comparativa da solicitação de compressão em protótipos fabricados por bobinagem filamentar para ângulos de 15° e 45° de posicionamento da fibra nos protótipos.

CEFCV	Carga máxima N	Tensão média MPa	Relação de resistência
15° Media	76277	305	15,0
Desvio Padrão	1052	41	2,0
45° Media	36685	147	7,3
Desvio Padrão	2630	11	0,5

Tabela VI - Tabela comparativa da solicitação de flexão em protótipos fabricados por bobinagem filamentar para ângulos de 15° e 45° de posicionamento da fibra nos protótipos.

CEFCV	Carga máxima N	Tensão média MPa
15° Media	7889	32
Desvio Padrão	208	1
45° Media	6762	27
Desvio Padrão	139	1

Tabela VII - Tabela comparativa da solicitação de compressão em protótipos fabricados por VARTM e *braid*.

CEFCV	Carga máxima N	Tensão média MPa	Relação de resistência
RTM Media	26787	99	5,5
Desvio Padrão	1575	8	0,3

Tabela VIII - Tabela comparativa da solicitação de flexão em protótipos fabricados por VARTM e *braid*.

CEFCV	Carga máxima N	Tensão média MPa
RTM Media	5537	18
Desvio Padrão	404	1

A Fig. 1 mostra os dois protótipos a 45° e 15° após o ensaio de compressão onde se vê claramente as fraturas acompanhando o ângulo de laminação das fibras. A fratura no protótipos de 45° atravessa a peça de um lado ao outro, acompanhando o ângulo de 45°, percorrendo aproximadamente 45 mm de material e no de 15° para atravessar a peça sob um ângulo de 15° a fratura percorre aproximadamente 110 mm, Fig. 1a. Este mecanismo por si só já justifica uma resistência melhor nos compósitos solicitados por compressão, onde o ângulo é mais baixo, Fig. 1b.

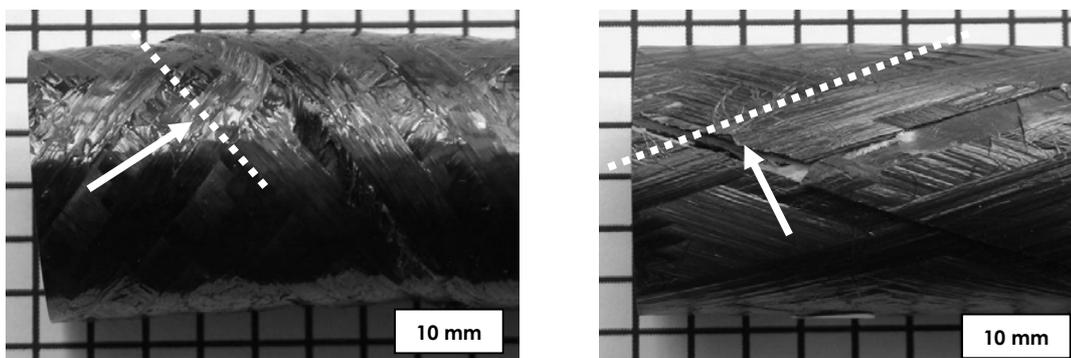


Figura 1. a) Cilindro produzido por bobinagem 45° com fratura na região indicada. b) Cilindro produzido por bobinagem 15° com fratura na região indicada.

Nas Fig. 2 e 3 é visível a diferença de compactação obtida com o processo de bobinagem, tanto na região de fibra de vidro, onde esta tem um diâmetro maior, quanto na região de fibra de carbono, que tem uma espessura de quase à metade da camada de fibra de vidro. Como este processo permite aplicar uma tensão aos filamentos e molhá-los com a resina antes de depositar a fibra no molde, reduz-se a quantidade de vazios e bolsas de resinas. Estas regiões mais ricas em resina que fibras são os pontos fracos dos materiais compósitos. Na Fig. 4 observa-se uma fratura na região de fibra de carbono do compósito que se propaga pela região de resina, a mais frágil.

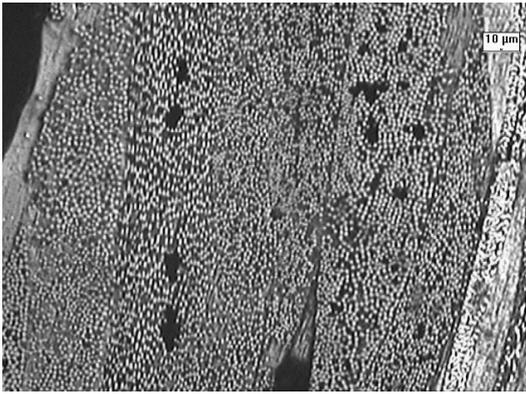


Figura 2. Micrografia óptica mostrando a camada de fibra de vidro feita no processo de bobinagem.

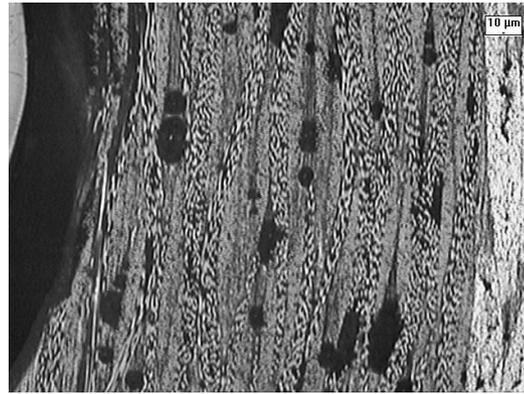


Figura 3. Micrografia óptica mostrando camada de fibra de vidro *braid* VARTM e a presença de vazios.

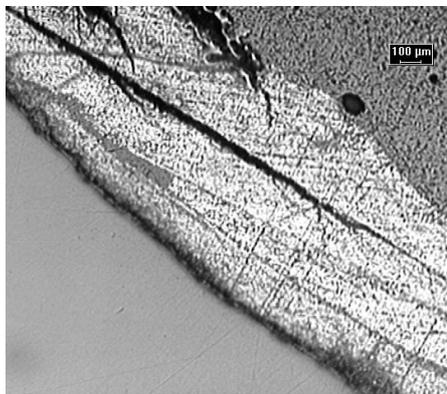


Figura 4 Camada de carbono com detalhe de uma fratura entre as camadas a 15° originada na região de resina.

O material compósito mostrou-se ser uma solução melhor para aplicação em próteses do que os tubos de alumínio, pois: são mais flexíveis, absorvendo melhor as tensões impostas ao componente, como no caso de flexão; tem melhor comportamento quando sob flexão deformando elasticamente, porém com tensão menor; tem um custo menor e podem ser produzidos por processos diferentes que conferem a estes propriedades também diferentes; a tensão máxima de compressão tende a aumentar quando a orientação das camadas se alinha à direção de aplicação do carregamento, conferindo ao mesmo material propriedades diferentes dependendo do arranjo das fibras e do processo.

As perdas das propriedades no processamento por VARTM estão relacionadas aos vazios que permanecem nas camadas mais internas durante o processamento. Este problema está relacionado ao processo atual usado pela AACD de VARTM que

apesar de atender suas necessidades não consegue obter uma qualidade que a fabricação deste tubo necessita. Pois simulações numéricas com modelos de tubo, produzidos tanto por bobinagem quanto por VARTM, indicam propriedades semelhantes aos dois processos [... sua dissertação].

CONCLUSÕES

Apesar das perdas de propriedades, a simplificação do processo produtivo com o uso de pré-formados e VARTM justifica e viabiliza este processo para produção de componentes de prótese.

O uso de pré-formados *braid*, além de melhorar o rendimento no processamento, produziu tubos com melhor acabamento externo.

Os protótipos produzidos por bobinagem apresentaram propriedades mecânicas e de massa superiores às do alumínio, mas com custo superior. Os protótipos produzidos por VARTM apresentaram propriedades de massa e custo melhores que a do alumínio, mas propriedades mecânicas inferiores sendo estas semelhantes aos materiais compósitos de fibra de carbono utilizados comercialmente para fabricação de prótese.

BIBLIOGRAFIA

Bader, M. G; Smith, W.; Isham, A. B.; Rolston, J. A.; Metzner, A. B. **Processing and Fabrication Technology**. Ed. Technomic Publishing, Vol. 3, 1990.

Barracuda Advanced Composites Aplicação à vacuo **Manual de construção de barcos**, www.barracudatech.com.br/trab_tec.htm# 2006

Black, J.; Hastings G. **Handbook of Biomaterial Properties**, Ed. Chapman & Hall, 1998.

Carvalho, O. **Influência da configuração de bobinagem no comportamento mecânico de cilindros de compósito polimérico**. Tese de Mestrado. Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, IPEN/USP, 2006, São Paulo.

Gonçalves, A.; Almeida, S. F. M; Neto, F.L. Comportamento de cilindros de carbono / epóxi submetidos a cargas compressivas axiais. **Polímeros** vol. 11, n.2 São Carlos abr./jun, 2001.

Hibbeler, R. C. **Resistência dos materiais**, Ed. LTC , 3ª edição, 2000

Hull, D. **An introduction to a composite material**. Cambridge Solid State Science Series, UK, 1987

ISO 10328-3-1996 **Prosthetics – Structural Testing of Lower-limb Prostheses**.

Kelly, A. **Concise Encyclopedia of Composite Materials**. Ed. Pergamon, UK , 1994

Marinucci, G. **Desenvolvimento, Fabricação, Caracterização Mecânica e Microestrutural de Cilindros de Fibra de Carbono Colapsados por Pressão Interna**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, IPEN/USP ,2001 ,São Paulo.

Neto, F. L.; Pardini L. C. **Compósitos Estruturais Ciência e Tecnologia** , Ed. Edigar Blucher , 1ª ed. 2006

Norma ASTM D-3410-87 - **Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading**

Norma ASTM D303976 **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**

Norma ASTM D 790 – 99 **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**

Otto Bock do Brasil <http://www.ottobock.com.br/>, 08.11.2006

Pardini, L.C. Pré-formados para compósitos estruturais. **Polímeros**, vol. 10, n.2, São Carlos, abr./jun. 2000.

Saint-Gobain Vetrotex International,
http://www.vetrotexasiapacific.com/business_info/rap_qstrand.html, 13.01.2007

SILTEX Flecht- und Isoliertechnologie Holzmüller GmbH & Co.KG, www.siltex.de/en
18.07.2006

Swanson,S.R.; Smith L.V. Comparison of biaxial strength properties of braided and laminated carbon fiber composites. **Composites**: Part B 27B(1996) 71-77 Elsevier Science Limited

EFFECT OF THE AXIAL AND FLEXURE COMPRESSION ON COMPOSITE TUBE USED IN PROSTHESES, OBTAINED USING DIFFERENT PROCESSES

ABSTRACT

In this work a comparison is presented between two pipes of hybrid composite epoxy, glass and carbon fiber in substitution of aluminum pipe used for lower limb prosthesis. Two composite manufacture processes of pipes had been used for comparison: one, use of braid with the fiber at 45° in relation to its longitudinal axle and produced by vacuum assisted resin transference molding; and another one, produced by filament winding processes in angles of 15° and 45°. The pipes had been evaluated under axial flexion forces. An aluminum pipe AA 6463 was used as reference for comparison. The pipes made by filament winding had presented better mechanical properties, but the manufactured with braid ones, has the advantage of being a simple process and had presented acceptable resulted.

KEY-WORDS: carbon fiber, resin transference molding, filament winding, mechanical tests