

IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE UMA LÂMINA CARBONO EPÓXI¹

Débora Rodrigues de Mesquita²

Renata Martins Pilat²

Gigliola Salerno³

Resumo

Materiais compósitos se transformaram em uma vantajosa opção devido às altas resistência e rigidez específicas para altas solicitações mecânicas. Como consequência a estes fatores, o objetivo deste trabalho foi identificar as propriedades elásticas das lâminas que o compõem. Para tanto, uma configuração de tecido bidirecional de fibra de carbono (0°/90°) foi produzido. A partir dos tecidos foi realizado o processo de silanização nas fibras de carbono para melhorar aderência fibra-matriz, produzindo um material de maior resistência nesta interface. Subsequentemente, foi adicionada a resina epóxi às fibras tratadas; estas compuseram os corpos-de-prova que foram preparados em uma estufa Fanem modelo 320 para a cura polimérica da resina, cortados a jato d'água, e, finalmente, utilizando uma máquina universal de ensaios MTS 250kN, foram realizados ensaios de tração e em um torquímetro torção para identificar as propriedades elásticas da lâmina do compósito e assim caracterizar seu comportamento mecânico elástico. Os ensaios de tração na direção 0° determinaram o módulo de elasticidade $E_{11} = E_{22}$, coeficiente de Poisson ν_{12} e o módulo de cisalhamento G_{12} ; o ensaio de torção determinou o módulo de cisalhamento $G_{23} = G_{13}$. Sendo assim, possível completar parte da matriz de rigidez da lâmina de material compósito carbono-epóxi.

Palavras-chave: Lâmina; Carbono-epóxi; Propriedades mecânicas.

ELASTIC PROPERTIES IDENTIFICATION OF A CARBON EPOXI LAMINA

Abstract

Composite materials became an advantageous option due their high specific strength and specific stiffness for several mechanical applications. As a consequence, the main purpose of this work was identifying layer elastic properties of a carbon epoxy composite. In that way, a carbon woven yarn (0/90) was produced. On the woven yarn was done silane surface treatment on carbon fibers to improve fiber-resin interface strength. Subsequently, was added epoxy resin, all these elements composed the specimens cured in the Fanem furnace model 320 and cut with water jet. Finally, were run tensile tests on universal machine MTS 250kN and torsion tests on torque wrench for layer elastic properties identification of a composite material in order to characterize its elastic mechanical behaviour. The tensile tests in 0° direction determined elasticity modulus $E_{11} = E_{22}$, Poisson's coefficient ν_{12} and shear modulus G_{12} ; the torsion tests provided shear modulus $G_{23} = G_{13}$. As a result, was possible determine accurately part of elastic stiffness matrix layer of carbon-epoxy composite material.

Keywords: Composite layer; Carbon-epoxy; Mechanical properties.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Estudante de engenharia de produção mecânica. Universidade Nove de Julho. São Paulo, SP, Brasil.

³ Engenheira mecânica. Profa. Dra. da Universidade Nove de Julho. São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos laminados são muito utilizados nas indústrias aeronáutica e aeroespacial. São altamente resistentes e mais leves que as ligas de alumínio usadas atualmente, de modo que permitem a redução da quantidade de material utilizado, do consumo de combustível e da manutenção. A definição de resistência e rigidez específica consiste na relação entre os valores de resistência ou rigidez e a densidade em massa do material; comparando os valores para ligas de alumínio e os compósitos, estes últimos são, em média, cinco vezes mais resistentes (Figura 1), o que caracteriza uma vantagem considerável.⁽¹⁻³⁾ Apresentam uma característica importante, podem ser criados a partir das necessidades de aplicação: os materiais da fibra e da matriz, a orientação das fibras, a espessura de cada lâmina, e a sequência das lâminas (Figura 2) na composição do laminado podem ser escolhidos de modo que a combinação forneça as propriedades mecânicas adequadas. Uma desvantagem é o alto custo dos materiais compósitos, no entanto, as estruturas resistem por um período maior à sollicitação mecânica.⁽⁴⁾

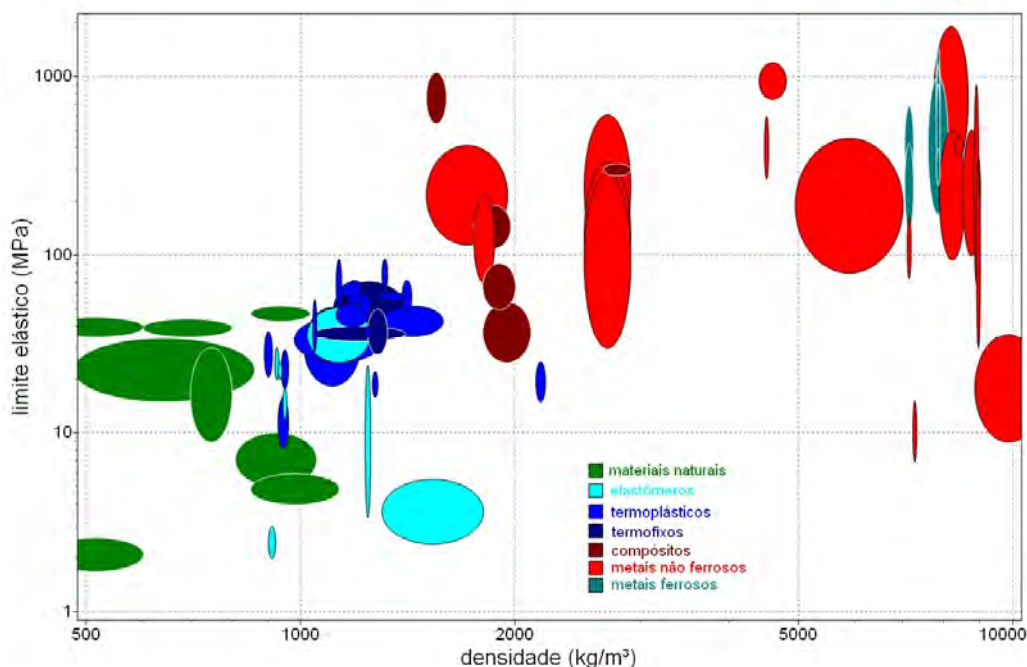


Figura 1: Diagrama resistência-densidade, criado com o software CES EduPack.⁽⁵⁾

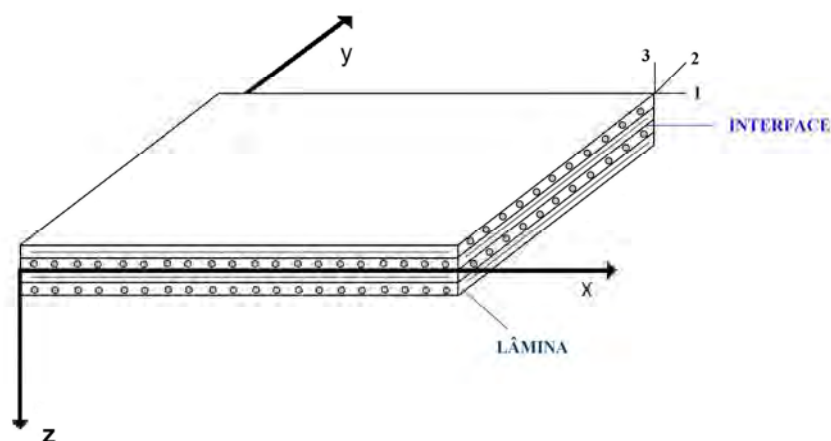


Figura 2: Sistemas de referência: global (x-y-z) e de uma lâmina (1-2-3).

Construídos a partir da combinação de características mecânicas de determinados materiais, os materiais compósitos buscam sempre criar características específicas voltada para a aplicação do produto. Os materiais que podem compor este material podem ser classificados em dois tipos: matriz e reforço.⁽¹⁾ A matriz é o que constitui a estrutura, preenchendo os espaços vazios que ficam entre os materiais reforços e mantendo-os em suas posições relativas. Os materiais reforços são os que melhoram as características do compósito como um todo. Os compósitos classificam-se em tipos de reforço: reforçado com partículas ou reforçado com fibras. Os compósitos reforçados com fibras podem ainda ser divididos em compósitos com fibras contínuas ou descontínuas.^(1,7)

Em geral, a fase particulada é mais dura e mais rígida que a matriz. A matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas que suportam uma fração maior da carga. Por outro lado, um compósito diz-se reforçado com fibras contínuas, quando, por alteração do comprimento da fibra, não se alteram as características elásticas do compósito. Existem fibras contínuas com dimensão semelhante à dimensão global da peça em estudo. Embora existam muitos tipos de compósitos, por razões que se prendem a tradição, custo e desenvolvimento, a exposição centra-se em compósitos reforçados com fibras contínuas ou descontínuas de matrizes orgânicas (resinas).^(1,2,7)

Várias são as vantagens para a aplicação de materiais compósitos, segundo a Abmaco (Associação Brasileira de Materiais Compósitos):⁽⁸⁾ leveza e facilidade, de transporte devido ao baixo peso específico dos compósitos; inércia química, o que permite sua utilização em uma ampla gama de ambientes agressivos quimicamente; resistência às intempéries; moldes com formas complexas são facilmente adaptáveis aos processos em utilização; durabilidade; fácil manutenção; variedade de combinações que podem ser realizadas entre as resinas e os materiais de reforço; apresentam uma excelente resistência mecânica. Consequentemente, compósitos são amplamente utilizados nos setores aeronáutico, naval, automobilístico, entre outros.

Fibras de carbono são matérias-primas que provêm da pirólise de materiais carbonáceos que produzem filamentos de alta resistência mecânica. Apresentam os mais altos valores de resistência específica dentre os materiais de reforço. Em geral, o filamento da fibra de carbono apresenta valores de diâmetro de 4 a 10 μm , vários filamentos compõem o fio da fibra de carbono (Figura 3).

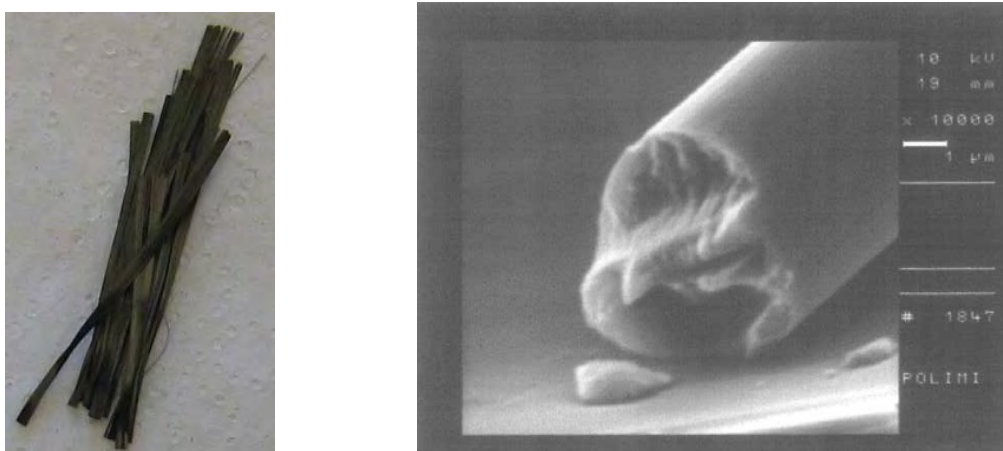


Figura 3: Fibras de carbono. Inúmeros filamentos formam os fios (à esquerda). Único filamento contém por volta de 4 μm de diâmetro (à direita).⁽⁹⁾

A fase polimérica é geralmente composta por uma resina termofixa do tipo poliéster insaturada (ortoftálica, tereftálica, isoftálica ou bisfenólica), dissolvida em solvente reativo como estireno, ou ainda, uma resina epóxi ou poliepóxido que é um polímero termofixo que se endurece quando misturada com um agente catalisador ou endurecedor.^(1,7) Na moldagem das fases matriz e fibra ocorre um processo de cura da resina, que acopla as duas fases proporcionando ao material final propriedades especiais que definem sua moderna e ampla aplicabilidade.

Silano (a base de silício) é utilizado como agente para promover a adesão entre dois componentes, um adesivo e um substrato (orgânico ou inorgânico), criando uma ligação química entre eles. O grupo funcional “OR” (metóxi e etóxi) sofre a hidrólise em água (umidade) para formar o grupo silanol. Neste caso, álcool pode ser liberado no final reação. Uma segunda reação do grupo silanol ocorre pela condensação com a superfície do substrato.⁽¹⁰⁻¹²⁾ Deste modo, o silano melhora e favorece a ligação química e melhora a aderência entre fibra e matriz, o que produz um material com melhor resposta às solicitações mecânicas. Seu papel é fundamental, pois o dano gerado em um componente, muitas vezes, é oriundo da frágil interação fibra-matriz.⁽⁹⁾

Devido a sua configuração, a lâmina de material compósito apresenta diferentes propriedades conforme cada uma das três direções locais apresentadas na Figura 2. Portanto, a caracterização das propriedades elásticas necessita de uma gama maior de ensaios do que um material isotrópico para completar a matriz de rigidez que caracteriza o comportamento elástico. Neste trabalho, a lâmina é feita de um tecido com fibras entrelaçadas nas direções 1 e 2, sendo a direção 3 aquela que representa a espessura do corpo-de-prova. Sendo assim, a lamina é considerada transversalmente isotrópica, e as constantes de engenharia a serem identificadas se reduzem de nove (ortotrópica) na matriz de rigidez ($E_{11} = E_{22}$, E_{33} , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{12} , G_{13} , G_{23}) a cinco ($E_{11}=E_{22}$, E_{33} , $\nu_{23} = \nu_{13}$, G_{12} , $G_{13} = G_{23}$).⁽³⁾ Corpos-de-prova com vários extratos devem ser preparados para obtenção destas propriedades. Em corpos-de-prova de tecidos com fibras orientadas a 0° em relação ao eixo 1 podem ser obtidas as propriedades $E_{11} = E_{22}$ (módulo de elasticidade na direção 1) e ν_{12} (coeficiente de Poisson) através das provas de tração, segundo as indicações da norma ASTM D3039⁽⁵⁾ e G_{23} (módulo de rigidez transversal no plano 23) nas provas de torção com rotação em torno do eixo 1.⁽⁹⁾ No caso de corpos-de-prova nos quais as fibras são orientadas perpendiculares ao eixo 3 é obtido E_{33} (módulo de elasticidade na direção transversal) e ν_{13} (coeficiente de Poisson no plano 13), segundo as indicações da norma ASTM D3039.⁽⁶⁾ Para a obtenção de G_{12} (módulo de rigidez transversal no plano 12) se considera a equação para materiais isotrópicos. Para cada tipo de ensaio, o número mínimo de cinco corpos-de-prova será ensaiado.⁽⁶⁾ Na literatura nota-se grande dispersão de dados e valores extremamente altos para fibras unidirecionais módulo elástico entre 100 e 200 GPa e módulo a cisalhamento entre 3 e 5 GPa.^(1-3,9)

Este trabalho tem como objetivo produzir um material compósito laminado simétrico e balanceado composto de lâminas, as quais são formadas por fibras longas de carbono e matriz de epóxi, na forma de um tecido. O tecido utilizado foi produzido pelo laboratório de Engenharia Têxtil do Centro Universitário da FEI. A caracterização das propriedades elásticas da lâmina, de acordo com a norma ASTM D3039,⁽⁶⁾ será obtida através de ensaios de tração e torção de modo a definir uma lâmina transversalmente isotrópica, realizada pelas alunas da Universidade Nove de Julho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material em questão foi adquirido na forma de fios de carbono produzido pela Texiglass® composta por 2000 filamentos com densidade de $1,80 \text{ g/cm}^3$. Este foi tecido em teares mecânicos na trama Tela nos laboratórios de Engenharia Têxtil do Centro Universitário da FEI. Observa-se que a espessura de cada lâmina de tecido depende da trama em questão, neste caso $0,35 \text{ mm}$ (Figura 4).

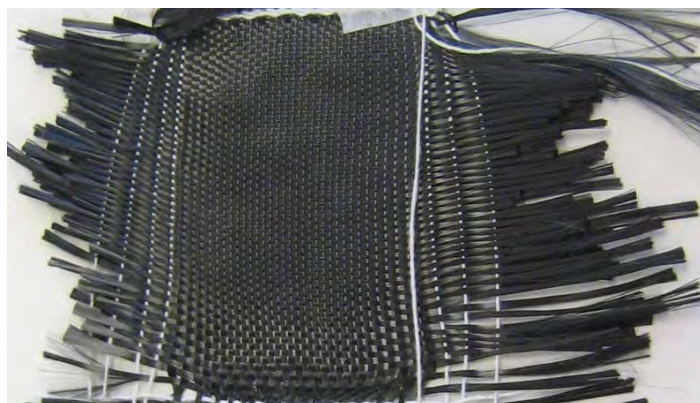


Figura 4: Propriedades das tramas Tela. (Centro Universitário da FEI)

Dynasylan® Glymo (3- Glycidloxypropyltrimethoxysilane) é um silano que possui uma reação orgânica epóxi e hidrolisa grupos metóxio (methoxysilyl). A natureza da sua reatividade permite unir quimicamente materiais inorgânicos (vidro, metal, fibras, etc.) e polímeros orgânicos (termofixos, termoplásticos e elastômeros). Deste modo, este silano se apresenta como o mais apropriado para compósitos formados por fibras de carbono e resina epóxi a base de solvente. O processo de silanização Dynasylan® Glymo realizado nos tecidos feitos de fibras de carbono para cada 1 cm^2 , seguindo as proporções:

- adição de 25 ml de silano e 25 ml de água por 10 minutos;
- retirada parcial da água e adição de 25 ml de acetona por 10 minutos;
- adição do tecido, em imersão por 30 minutos.

Após o processo de silanização devem-se encontrar vestígios de silício na superfície das fibras de carbono, indicando que o processo foi eficiente.

No microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Figura 5) foi possível produzir imagens de alta ampliação e resolução das fibras do tecido. A partir da emissão e interação de feixes de elétrons sobre uma amostra, a técnica EDS (*Energy Dispersive X-ray Detector*) foi possível identificar silício na amostra após o processo de silanização. O espectro de EDS é construído ao compor as curvas de valores de intensidade de raio-x versus energia. Os picos correspondem aos diferentes elementos presentes na amostra.



Figura 5: Microscópio Eletrônico de Varredura. (Laboratório de Materiais – Centro Universitário da FEI).

As propriedades da lâmina do compósito laminado são necessárias para estudos que consideram a lâmina como um material transversalmente isotrópico definido por cinco propriedades no sistema de referência local (Figura 2). As propriedades identificadas neste estudo foram $E_{11}=E_{22}$ (módulo de elasticidade na direção 1), ν_{12} (coeficiente de Poisson), G_{12} (módulo de rigidez transversal no plano 12), segundo as indicações da norma ASTM D3039⁽⁶⁾ e $G_{23} = G_{13}$ (módulo de rigidez transversal no plano 23).⁽⁹⁾ As provas de tração foram realizadas em uma máquina universal de ensaios MTS servo controlada de 250 kN, modelo 810, de capacidade máxima (Figura 6). Através de extensômetros elétricos as deformações longitudinais e transversais foram obtidas de modo a compor as curvas $\sigma - \epsilon$. Estes foram colados na superfície dos corpos de prova para obtenção dos valores de deformação longitudinal e transversal, pelo programa Spider 80, para cálculo do coeficiente de Poisson. Os ensaios de torção foram realizados em um torquímetro.



Figura 6: Máquina universal de ensaios MTS utilizada na realização dos ensaios de tração, com capacidade de carga de 250kN (Esquerda). Torquímetro (Direita) (Laboratório de Materiais – Centro Universitário da FEI).

O material em estudo foi produzido por um tecido de fibras de carbono (impregnadas por silano, de modo a facilitar a adesão fibra/matriz) e uma resina epóxi. Para a

preparação dos corpos-de-prova, estes foram levados a uma estufa Fanem (modelo 320) a aproximadamente 120°C por 30 minutos, para que no vácuo, ocorra a cura da resina.

Os corpos de prova tiveram as mesmas dimensões para ambos os testes (Figura 7), segundo orientações da norma ASTM D3039.⁽⁶⁾ Para assegurar que os corpos de prova não fraturassem nos pontos de fixação na máquina de ensaios e invalidassem os ensaios, apoios de alumínio foram colados com resina adesiva epóxi nas extremidades, de modo que estes entraram em contato com as garras de fixação.

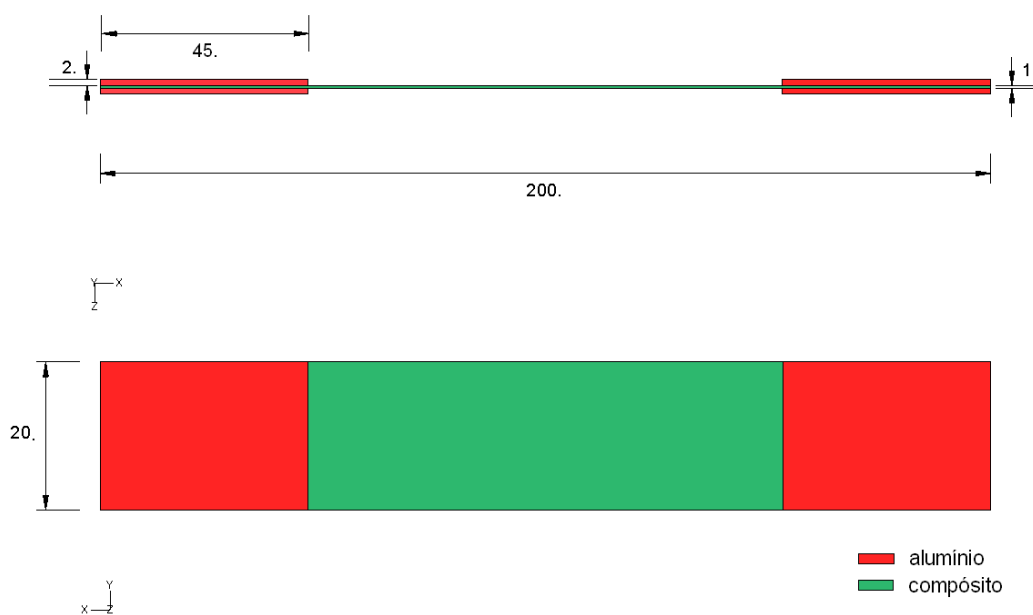


Figura 7: Dimensões dos corpos de prova.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A partir das amostras dos tecidos desenvolvidas pelo departamento de Engenharia Têxtil do Centro Universitário da FEI, foi possível iniciar a preparação do tecido, com seus respectivos procedimentos, para compor o material compósito.

Amostras preliminares dos tecidos estudados foram desenvolvidas com o intuito de fazer testes iniciais quanto à silanização. O processo de silanização foi realizado no tecido Tela.

Seguindo o procedimento descrito nos materiais e métodos, após a realização de análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Laboratório de Materiais do Centro Universitário da FEI, pode-se observar amostras sem (Figura 8) e com a adição de silano (Figura 9). A modificação superficial, devido à deposição de silano na superfície das fibras de carbono, é evidente. Adicionalmente, foram realizados ensaios de EDS (*Energy Dispersive X-ray Detector*), nos quais surgem picos de silício nas fibras do tecido após silanização (Figura 10), diferentemente dos resultados para as fibras sem silanização.

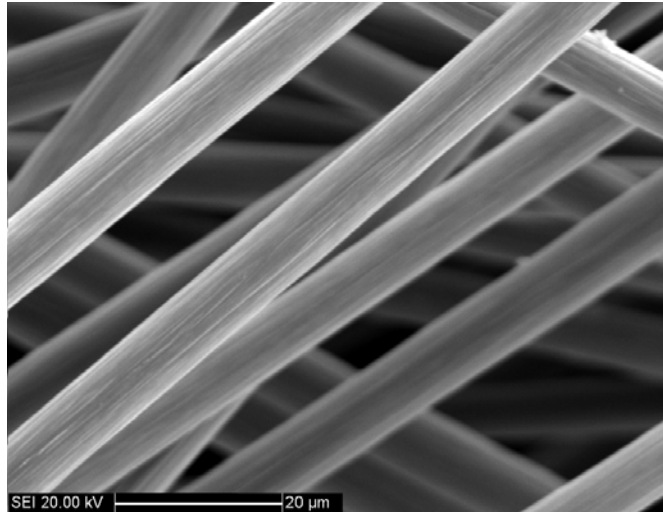


Figura 8: Fibras de carbono sem adição de silano. (Laboratório de Materiais – Centro Universitário da FEI).

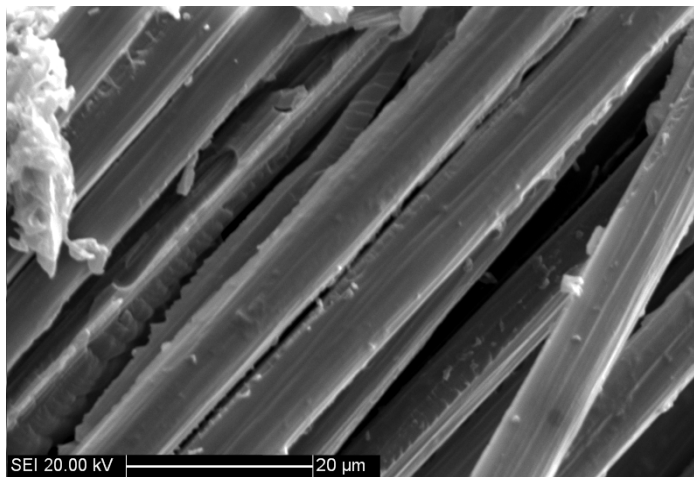


Figura 9: Fibras de carbono após o processo de silanização. (Laboratório de Materiais – Centro Universitário da FEI).

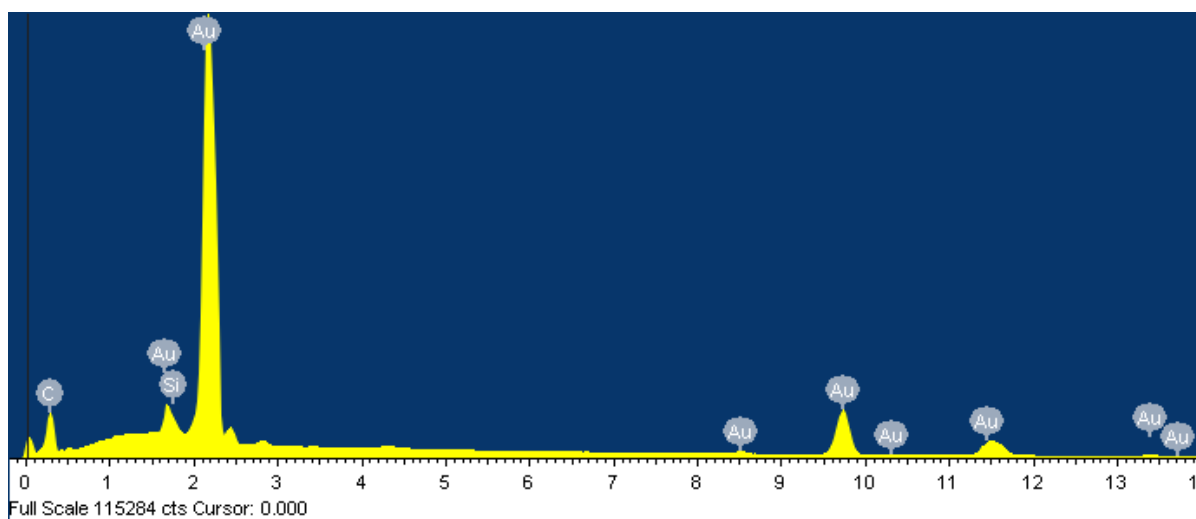


Figura 10: Espectro dos elementos pertencentes as fibras de carbono após o processo de silanização - Carbono (C), ouro (Au) e silício (Si). (Laboratório de Materiais – Centro Universitário da FEI).

Através dos ensaios de tração na lamina (direção 1), foram encontradas as curvas tensão x deformação, representadas na Figura 11. Os valores de deformação foram obtidos pela leitura do extensômetro elétrico longitudinal. Os valores de módulo de elasticidade, resistência à tração obtidos no ensaio de tração foram próximos e estão listados na Tabela 11. O módulo de Poisson foi calculado em função da relação entre deformação transversal e deformação longitudinal (Figura 12). Através do ensaio de tração é possível determinar o valor do coeficiente de cisalhamento no plano 12 de acordo com equação de isotropia, dada em função do módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson (Tabela 1). Ambas as Figuras 11 e 12 apresentam curvas com considerável dispersão de dados. No entanto, os valores obtidos estão de acordo com a literatura.^(1-3,9) Na Figura 12 pode-se salientar que dispersão resultante pode ter sido gerada pela colagem imperfeita dos extensômetros elétricos. O comportamento da lâmina é essencialmente frágil, não permitindo identificar o limite de escoamento, somente a tensão de resistência que coincide com o limite à fratura. Sendo assim, observa-se que prevalece o comportamento da fibra ao da resina. Comparando com fibras unidirecionais, os módulos elásticos são maiores que para bidirecionais, devido a interação das fibras 0°/90°.

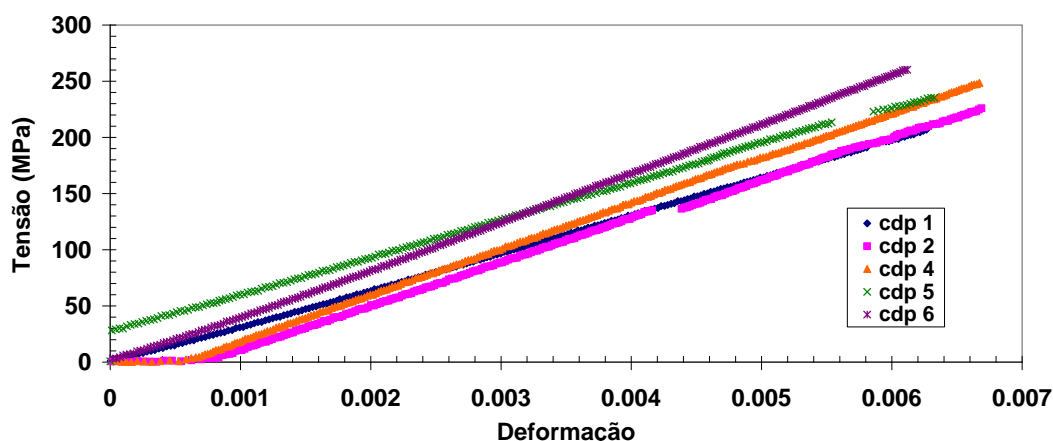


Figura 11. Gráfico tensão x deformação longitudinal do ensaio de tração da lamina.

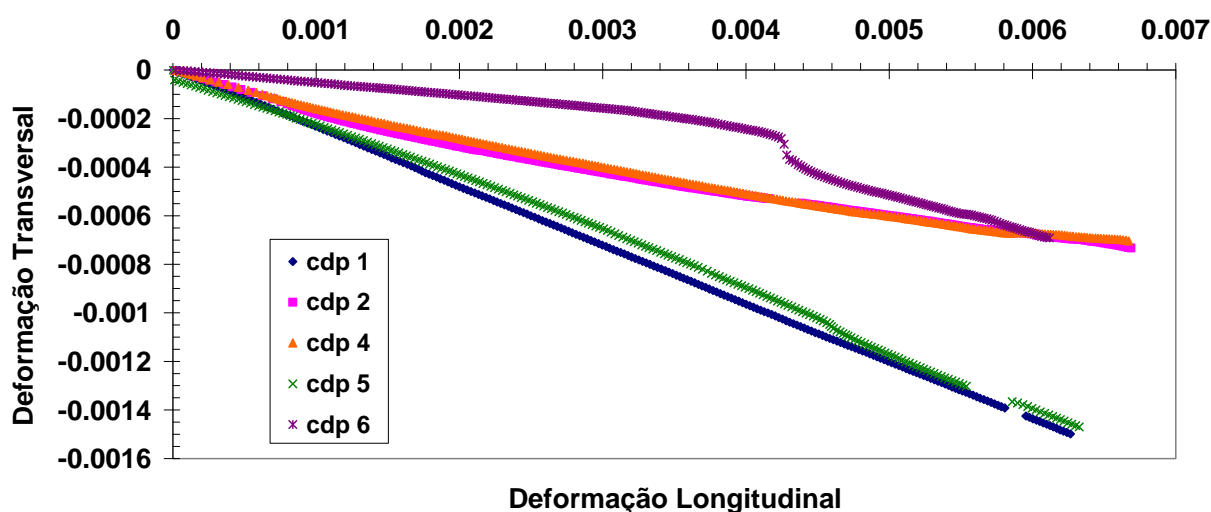


Figura 12. Gráfico deformação transversal x deformação longitudinal do ensaio de tração da lamina.

Tabela 1. Propriedades obtidas no ensaio de tração da lâmina

Amostras	Módulo de elasticidade (GPa) $E_{11} = E_{22}$	Coefficiente de Poisson – ν_{12}	Tensão máxima de resistência (MPa)	Módulo de cisalhamento (GPa) G_{12}
1	33	0.24	207	13
2	38	0.15	226	16
3*	*	*	*	*
4	40	0.12	249	18
5	34	0.23	235	14
6	43	0.16	260	18
Média	37	0.18	235	16
Desvio padrão	4	0.053	21	2

*falha na obtenção dos dados.

Nos ensaios de torção no plano 23, têm-se as curvas para cada corpo de prova (Figura 13), das quais é possível identificar o módulo de cisalhamento G_{23} (Tabela 2). Observa-se que as curvas apresentam características semelhantes e a dispersão dos dados não é acentuada. A combinação de fibras bidirecionais orientadas nas direções 1 e 2 geram módulos maiores do que àqueles encontrados em literatura para fibras unidirecionais,^(1-3,9) o que sugere maior equilíbrio no plano 12.

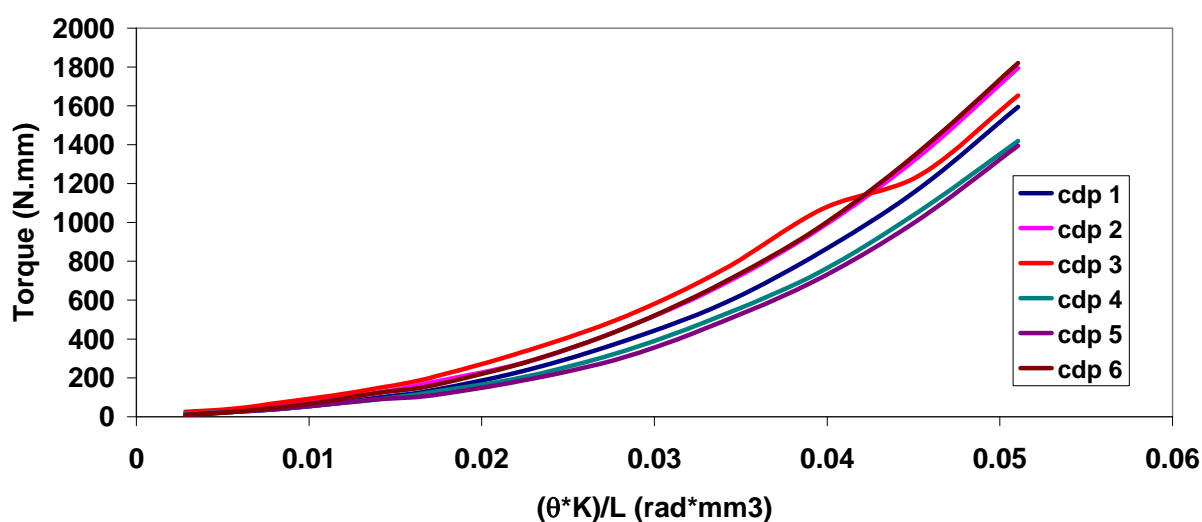


Figura 13. Gráfico obtido no ensaio de torção para o cálculo do módulo de cisalhamento.

Tabela 2. Valores do módulo de cisalhamento obtidos no ensaio de torção.

Amostras	Módulo de cisalhamento $G_{23} = G_{13}$ (GPa)
1	13
2	15
3	17
4	11
5	10
6	15
Média	13
Desvio padrão	3

4 CONCLUSÕES

O processo de silanização foi bem sucedido, de modo que, com a presença do silício, se obteve uma maior aderência entre a fibra de carbono e a resina epóxi na produção do material compósito. Garantindo assim, um material de alta qualidade na interação fibra-matriz para aplicação estrutural.

As propriedades mecânicas elásticas dos ensaios de tração apresentam valores de módulo de elasticidade $E_{11}=E_{22}$ de acordo com o esperado, mostrando que o lamina em questão é extremamente rígida, sem limite de escoamento aparente, com tensão máxima de resistência coincidente com o limite a fratura. Destes ensaios também foram obtidos os valores de Poisson ν_{12} e G_{12} devido à condição de isotropia no plano 12. Conclui-se que prevalece o comportamento da fibra ao da resina para a lamina.

Quanto aos ensaios de torção, foram considerados satisfatórios, pois foram capazes de identificar $G_{23}=G_{13}$ com baixa dispersão de dados, indicando que fibras nas direções 1 e 2 melhoram a resposta da lamina em comparação com fibras unidirecionais.

As propriedades que faltam para completar a matriz de rigidez farão parte da continuação deste estudo, considerando o desenvolvimento de técnicas e realização de ensaios subseqüentes.

REFERÊNCIAS

- 1 W. D. Callister Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. 5ed., LTC, 2005.
- 2 C.T. Herakovich. Mechanics of fibrous composites. First edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1998.
- 3 P. Pedersen. Elasticity, anisotropy, laminates with matrix formulation, finite elements and an index to matrices. Technical University of Denmark, Denmark, 1998.
- 4 M. Bäker J. Rösler, H. Harders. Mechanical behaviour of engineering materials. Springer Science, Berlin, 2007.
- 5 CES EduPack. <http://www.grantadesign.com/education/index.htm>, 2009.
- 6 American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Standard D, 3039/3039M edition, 2000.
- 7 E. Roizman. Comportamento mecânico in vitro de uma matriz de cerômero reforçada por fibras híbridas de vidro e aramida em dois diferentes arranjos. Tese de mestrado. COPPE/URFJ, 2005.
- 8 Abmaco - Associação Brasileira de Materiais Compósitos (2013). Disponível em <http://www.abmaco.org.br/compositos.cfm>. Acesso em 15 fev.
- 9 G. Salerno. Damage analysis of composite laminates subject to low-velocity impacts. PhD thesis, Politecnico di Milano, Milano, April 2009.
- 10 Dynasylan® GLYMO (2013). Disponível em: <http://www.evonik.com.br/region/brazil/pt/products/productfinder/Pages/product-details.aspx?pid=43404&pfsearch=D&pfcmd=letter>. Acesso 15 fev.
- 11 Dynasylan® GLYMO (2013). Disponível em: <http://www.dynasylan.com/lpa-productfinder/page/productsbytext/detail.html?pid=208&lang=en>. Acesso em 15 fev.
- 12 Langston, Tye A. The effects of nitric acid and silane treatments on carbon fibers and carbon/vinyl ester composites before and after seawater exposure. Ph.D. Thesis, 2008.