

Tema: Iniciação científico-tecnológica

## CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA RIGIDEZ À FLEXÃO DE MATERIAL COMPÓSITO CARBONO-EPÓXI\*

Gabriel Prosofsky de Araujo<sup>1</sup>  
Gigliola Salerno<sup>2</sup>

### Resumo

O compósito carbono-epóxi é um material altamente resistente à tração. Porém, as fibras comprimidas durante a flexão não resistem à flambagem. Dessa forma, faz-se necessário um estudo mais detalhado. Este trabalho consiste em verificar quais propriedades mecânicas dependem exclusivamente da orientação das malhas das fibras. Corpos de prova de orientação 0°/90° e 0°/90°/±45° foram processados e ensaiados em flexão de três pontos, de acordo com as normas ASTM E855 e D790, em uma máquina universal de ensaio MTS – *Material Test System* com capacidade de 250 kN. Inicialmente, os tecidos sofreram o tratamento superficial da silanização, promovendo a futura adesão das fibras na resina. Após a silanização, as lâminas foram montadas e impregnadas com a resina epóxi. A cura da resina do compósito foi obtida em uma estufa Fanem modelo 320°C a 120°C por uma hora, subsequentemente os corpos de prova foram obtidos utilizando-se o corte à jato d'água. Concluiu-se que as falhas de todos os corpos de prova foram devido à tração. Corpos de prova com volumes de vazios internos apresentaram menores valores de rigidez e aqueles com mecanismos de fratura como flambagem e delaminação apresentaram valores de resistência menores.

**Palavras-chave:** Compósito; Flexão; Fibras de carbono; Orientação.

### EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF FLEXURAL RIGIDITY OF CARBON-EPOXY COMPOSITE MATERIAL

#### Abstract

The carbon-epoxy composite has high specific resistance and strength. However, its behavior under compressive stress could be decreased because of buckling, needing more detailed studies. The objective of the present work is to verify which mechanical properties are affected exclusively by the fibre's orientation. Specimens oriented in 0°/90° and 0°/90°/45 were fabricated and taken to bending tests, accordingly to the norms ASTM E855 and D790, in a universal testing machine MTS – *Material Test System*, with full capacity of 250 kN. Primarily the carbon fiber fabrics suffered a superficial physical treatment called silanization, developing a better adhesion of the fibers in the resin. After the superficial treatment, the layers were embedded with epoxy resin. Within 1 hour at 120°C, the composite resin's cure were obtained in a Fanem heater, model 320, subsequently the specimens were obtained using the water jet cut. It was concluded that all specimens failed by tension. Specimens with internal void volumes presented lower flexural modulus and those with the presence of fracture mechanisms like buckling and delamination showed lower strength values.

**Keywords:** Laminated; Carbon-epoxy; Carbon fibers; Orientation.

<sup>1</sup> Engenharia Mecânica, estudante, Departamento de Engenharia Mecânica, FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Mecânica, Doutora, Orientadora, Departamento de Engenharia de Materiais, FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Compósitos de polímeros reforçados com fibras são muito utilizados nas indústrias de artigos esportivos, automobilística e aeronáutica por apresentarem altos valores de resistência e rigidez específicos, logo, as indústrias que tratam de engenharia complexa tendem a substituir aços e ligas de alumínio, dentre outros materiais de maior densidade, pelos compósitos. Em nível de comparação, a resistência específica do material compósito carbono-epóxi é cerca de 5 vezes maior que a de uma liga de aço [1]. Porém, o uso de compósitos de polímeros reforçados com fibras não é aplicado em uma diversidade maior dos setores da indústria devido seu alto custo de fabricação [2].

Devido às inúmeras aplicações, as diferentes combinações de orientação de fibras, unidirecionais ou bidirecionais, sendo neste segundo caso, chamadas de *woven composites* [3] (Figura 1), dimensões como espessura, comprimento, dispostos ou não em lâminas e número de lâminas, devem ser estudadas.

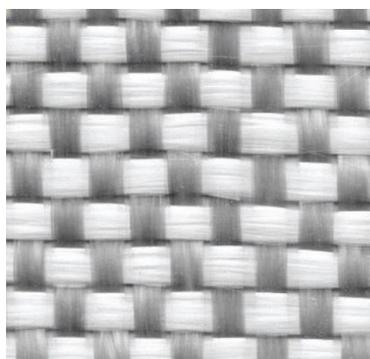


Figura 1. *Woven composite*, fibras bidirecionais (0°/90°) tecidas em malha [3].

O presente estudo trata de compósitos laminados, de fibras bidirecionais, sendo sua matriz de resina epóxi e as fibras de carbono. Os tecidos de fibra de carbono, resina epóxi, catalisador e aparato para cura da resina, foram comprados na empresa Barracuda®. Os diferentes corpos de prova das respectivas orientações de lâminas (0°/90° e 0°/90°/±45°) foram submetidos aos ensaios de flexão de três pontos em uma máquina universal de ensaios MTS - *Material Test System* com capacidade de 250 kN até atingirem suas fraturas de acordo com as normas ASTM E855 e D790 [4,5]. Os dados obtidos pelos ensaios, como módulo de elasticidade  $E$  (Equação 1), resistência  $\sigma$  (Equação 2) e deformação  $\varepsilon$  (Equação 3) serão analisados e comparados, em que  $F$  indica a força aplicada no centro do corpo de prova de comprimento  $L$ . As dimensões  $b$  e  $h$  indicam a largura e a espessura do corpo de prova, respectivamente;  $\delta$  indica a flecha em relação à horizontal que o corpo de prova deforma.

$$E = \frac{FL^3}{4\delta bh^3} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{3 FL}{2 bh^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{6h\delta}{L^2} \quad (3)$$

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Segundo Davies [6], compósitos de matriz epóxi reforçados por fibras unidirecionais de carbono, de dimensões 135 x 12,7 x 1 mm, apresentam módulo de elasticidade de valores próximos à 50 GPa. Espera-se, portanto, que os corpos de prova do presente trabalho tenham módulo de elasticidade de mesma ordem de grandeza, porém ligeiramente inferiores considerando que são fibras bidirecionais.

Os materiais compósitos são classificados quanto ao tipo de reforço, chamado de *fase dispersa*. Na indústria civil, é empregado o uso de compósitos reforçados por *partículas*, como por exemplo o concreto, cuja fase dispersa é composta de areia e brita e a fase matriz de cimento. Pode-se, ainda, introduzir no concreto, enquanto o mesmo ainda está fresco, arames ou barras de aço, tornando o material um compósito reforçado por fibras, logo, suas fases dispersas são as vigas, enquanto sua matriz é o concreto. O critério de adição de particulados ou de fibras em matrizes é proveniente da aplicação do material, seja para baratear o custo, seja para promover as propriedades mecânicas a fim de tornar o material mais resistente e/ou rígido frente às tensões sofridas pelo compósito [7]. No presente estudo, o compósito se classifica como polímero reforçado por fibras, em que a fase dispersa é a fibra de carbono e a fase matriz o polímero resina epóxi.

Matrizes reforçadas com partículas são materiais isotrópicos, a resposta mecânica referente ao mesmo carregamento sob diferentes direções é o mesmo, o que não acontece com os compósitos reforçados por fibras, em que estas, normalmente mais resistentes que a matriz, tornam o material mais resistente quando sob tensão no sentido longitudinal ao reforço e menos resistente em qualquer outro sentido, caracterizando o comportamento anisotrópico [7].

As matrizes dos compósitos podem ser metálicas, cerâmicas ou poliméricas. O material de matrizes poliméricas reforçadas por fibras deve ser, preferencialmente, um polímero termorrígido, como a resina epóxi, pois é indesejável que exista elevada ductilidade desta fase. É interessante que a matriz seja pouco dúctil, uma vez que esta propriedade mecânica previne a propagação de trincas [8]. As resinas termofixas, também chamadas de termorrígidas, podem ser alteradas de acordo com a aplicação desejada, adicionando a elas modificadores de processamento e/ou propriedades. A adição de modificadores de propriedades, como, por exemplo, negro de fumo e microesferas de vidro aumentam a rigidez e a resistência do compósito, enquanto que, a adição de elastômeros, aumenta a tenacidade do mesmo [9].

A tensão sofrida pelo compósito é aplicada primeiramente na matriz, cuja função é de proteger a fibra de agentes externos, como abrasão mecânica e de reações químicas, e transferir a tensão às fibras, sendo necessário o tratamento superficial físico e/ou químico dos tecidos para promover a adesão das fibras na matriz. Os processos de tratamentos superficiais químicos mais usuais são a oxidação anódica e a oxidação eletroquímica, as quais promovem a formação de grupos superficiais ativos, que se ligam quimicamente à matriz polimérica [10]. A boa adesão fibra-matriz provocada por tratamento superficial físico é obtida pelo processo de silanização. Este método consiste na interdifusão entre a fase dispersa (fibras) e a matriz, como a resina epóxi, do compósito, garantindo a melhor adesão entre as mesmas. O Silano é um polímero compatibilizador, em que existem na sua cadeia polimérica moléculas com facilidade de ligação com a fibra e outras moléculas com facilidade de ligação com a matriz, logo, promove a difusão entre as duas fases [9-11].

Ao usar resinas termorrígidas, como a resina epóxi, é necessário, para o processamento do compósito, curar a resina. A cura a quente de polímeros

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

termorrígidos é um processo em que uma rede interconectada tridimensional molecular com ligações cruzadas é desenvolvida no polímero quando submetido à altas temperaturas, aumentando seu peso molecular médio. A cura a frio de matrizes poliméricas ocorre quando submetido à temperatura ambiente. A densidade de ligações cruzadas define as propriedades mecânicas do polímero, ou seja, quanto maior a densidade, mais rígido é o material [9,11].

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova processados são de dimensões e configuração detalhadamente descritos na tabela 1. Os corpos de prova de configuração  $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$  foram fabricados intercalando-se as lâminas de  $0^\circ/90^\circ$  com as de  $45^\circ/-45^\circ$ . O primeiro tipo de corpo de prova (CP-1 a CP-6) ao serem fabricados, verificou-se a existência de defeitos como volumes de vazios internos, tornando-os inutilizáveis para a verificação da influência das malhas de um compósito sob carregamento flexão. Seus valores de resistência, rigidez e deformação foram, então, analisados a fim de verificar a influência de tais defeitos. Contornando a existência de tais defeitos, os dados obtidos a partir do ensaio dos outros dois tipos de corpos de prova (CP-7 a CP-20) serão comparados e analisados, a fim de estudar a influência da configuração das malhas do compósito.

**Tabela 1.** Dimensões e configuração de cada tipo de corpo de prova

Corpos de prova	Dimensões [mm]	Configuração
1 a 6	210 x 60 x 12	$0^\circ/90^\circ$
7 a 13	240 x 50 x 10	$0^\circ/90^\circ$
14 a 20	240 x 50 x 10	$0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$

O processo utilizado para o tratamento superficial das fibras foi o da silanização, cujo objetivo é de promover a adesão entre as fibras e matriz polimérica. O processo de silanização foi a etapa inicial do processamento do compósito. O tecido foi cortado nas dimensões desejadas e deixado submerso na solução composta por silano, água e acetona por uma hora, e, então, deixados secar por no mínimo oito horas. A função da acetona na solução é a de remover bolhas de ar formadas a partir da reação química entre a água e o silano, a fim de garantir que as mesmas não se prendem à superfície das fibras de carbono.

Após a silanização do tecido, iniciou-se a montagem das lâminas, onde as mesmas foram impregnadas com resina epóxi AR-260 juntamente com um catalisador endurecedor AH-260, e, então, montadas uma sobre as outras de acordo com a orientação de malhas desejada ( $0^\circ/90^\circ$  ou  $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$ ). Após a montagem, o compósito (fibras mais resina), foi levado para uma estufa FANEM modelo 320 a  $120^\circ\text{C}$  por uma hora, para a realização da cura a quente da resina epóxi.

O compósito curado foi levado para a máquina de corte à jato d'água Flow Mach2 para confecção dos corpos de prova. Nota-se que este é o tipo de corte mais apropriado para tal processo, uma vez que não resulta nos corpos de prova fibras soltas, independentemente da espessura dos mesmos.

Um pequeno bloco de compósito curado, retirado de cada placa em que se obtiveram os corpos de prova, foram aquecidos no forno Jung®, dentro de um recipiente cerâmico, à  $500^\circ\text{C}$  por um período de 1 hora. Temperatura esta em que a

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

resina evapora do compósito, restando somente as fibras. Este procedimento é utilizado a fim de se verificar qual a porcentagem de massa de fibra e resina do material compósito. É medida a massa do recipiente cerâmico juntamente com o bloco antes e depois do aquecimento.

De acordo com as normas ASTM E855 e D790 [4,5], os corpos de prova obtidos de dimensões 240 x 50 x 10 mm serão levados à máquina universal de ensaios MTS – Material Test System (figura 2), com capacidade máxima de 250 kN, para os ensaios de flexão de três pontos, com velocidade de ensaio 6,5 mm/min. Os corpos de prova de dimensões 210 x 60 x 12 mm serão ensaiados com velocidade de ensaio 5 mm/min.

A fim de observar e identificar os mecanismos de dano desenvolvidos em micro e meso-escala durante a flexão, os corpos de prova fraturados serão analisados pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).



**Figura 2.** Máquina MTS – *Material Test System*, onde serão realizados os ensaios de flexão de três pontos. (Laboratório de Materiais. FEI)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um pequeno bloco de compósito curado de volume 1,584 cm<sup>3</sup> e peso 39,81 g, foi retirado da placa a qual se obtiveram os corpos de prova de 0°/90° (CP-1 a CP-6). A porcentagem em massa de fibras e resina resultou, respectivamente, 52,16% e 47,84%. A densidade destes corpos de prova apresentou o valor 1,61 g/cm<sup>3</sup>. Estes valores médios de porcentagem em massa de fibras e resina estão dentro do esperado de acordo com Davies [6], em que seus compósitos de resina epóxi reforçados por fibras de carbono também apresentaram valores médios de massa de fibras e resina. Por hora, não foi realizado a medição de porcentagem em massa de fibras e resina, assim como a densidade, dos restantes dos corpos de prova (CP-7 a CP-20).

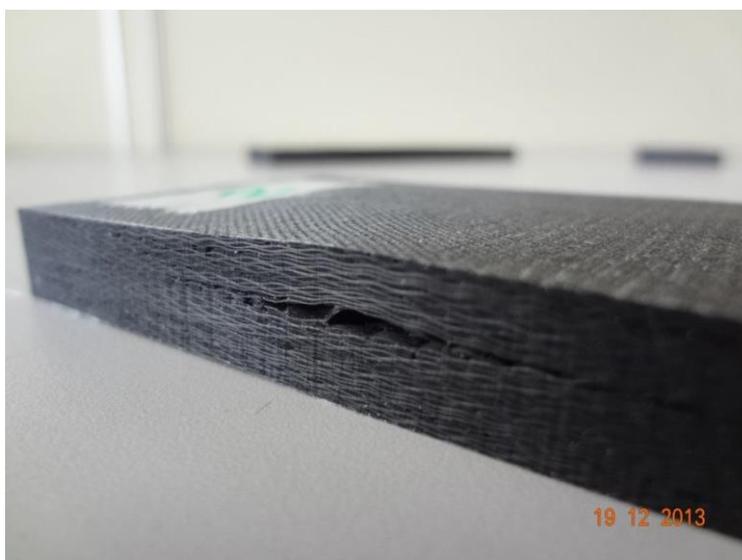
\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*

O corte à jato d'água promoveu ótimo acabamento para os corpos de prova 0°/90°, com precisão dimensional adequada e não apresentou fibras soltas no compósito ou defeitos nas laterais (Figura 3).



**Figura 3.** Corpos de prova 1 a 6 de orientação 0°/90°. Nota-se que o corte à jato d'água apresentou ótimo acabamento.

A montagem do compósito se mostrou deficiente por apresentar volumes de vazios internos, também chamados de delaminações (concentradores de tensão) no interior dos corpos de prova 1, 2 e 3 (Figura 4), sendo os defeitos dos corpos 1 e 3 de menores dimensões e mais próximos à superfície da região sujeita à compressão.



**Figura 4.** Volume de vazio no interior de corpo de prova 2.

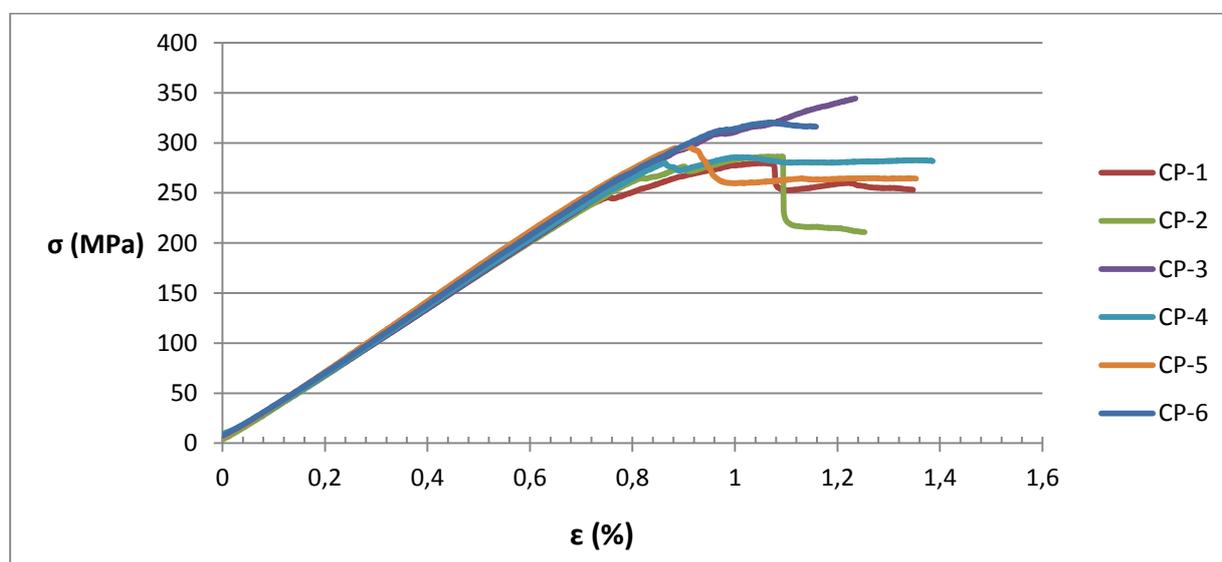
Os corpos de prova 1 a 13 foram ensaiados no teste de flexão de três pontos (figura 5). Os comportamentos de deformação em função da tensão sofrida, dos corpos de prova de 1 a 6, estão descritos no gráfico da figura 6. Seus valores de módulo de elasticidade, tensão e deformação (Tabela 2), de acordo com as

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Equações 1 a 3, foram obtidos para análise. Os valores de força aplicada no corpo de prova no instante da tensão limite de resistência ( $F_{LR}$ ) também estão representados na Tabela 2, em que  $\sigma_{LE}$  é a tensão limite ao escoamento,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $\varepsilon_{LE}$  é a deformação referente à tensão limite de escoamento,  $\varepsilon_{LR}$  é a deformação referente à tensão limite de resistência,  $\sigma_{LR}$  é a tensão limite de resistência,  $\sigma_R$  é a tensão de ruptura e  $\varepsilon_R$  é a deformação no momento da ruptura do corpo de prova.



**Figura 5.** Corpo de prova submetido ao ensaio de flexão de três pontos. O ponto central é o ponto de aplicação de força e os demais pontos são apoios.



**Figura 6.** Comportamento da deformação dos corpos de prova 1 a 6 em função da tensão sofrida pelos mesmos.

**Tabela 2.** Dados obtidos a partir dos ensaios de flexão de três pontos dos corpos de prova 1 a 6

Corpos de prova	Regime Elástico			Regime Plástico				
	$\sigma_{LE}$ [MPa]	E [GPa]	$\epsilon_{LE}$ [%]	$\sigma_{LR}$ [MPa]	$\epsilon_{LR}$ [%]	$\sigma_R$ [MPa]	$\epsilon_R$ [%]	$F_{LR}$ [N]
CP-1*	248	33,0	0,7858	280	1,0495	253	1,3474	8399
CP-2*	260	33,1	0,7957	286	1,0673	211	1,2528	8600
CP-3*	275	33,0	0,8281	413	1,2350	413	1,2350	10330
CP-4	250	33,4	0,7461	286	1,0148	282	1,3858	8570
CP-5	260	34,8	0,7510	297	0,9073	264	1,3532	8898
CP-6	265	34,0	0,7774	321	1,0687	316	1,1582	9617
Média	223	28,8	0,6692	269	0,9061	248	1,1046	7773
Desvio Padrão	± 10	± 0,7	± 0,0303	± 51	± 0,1060	± 69	± 0,0874	± 753

\* Corpos de prova com defeito

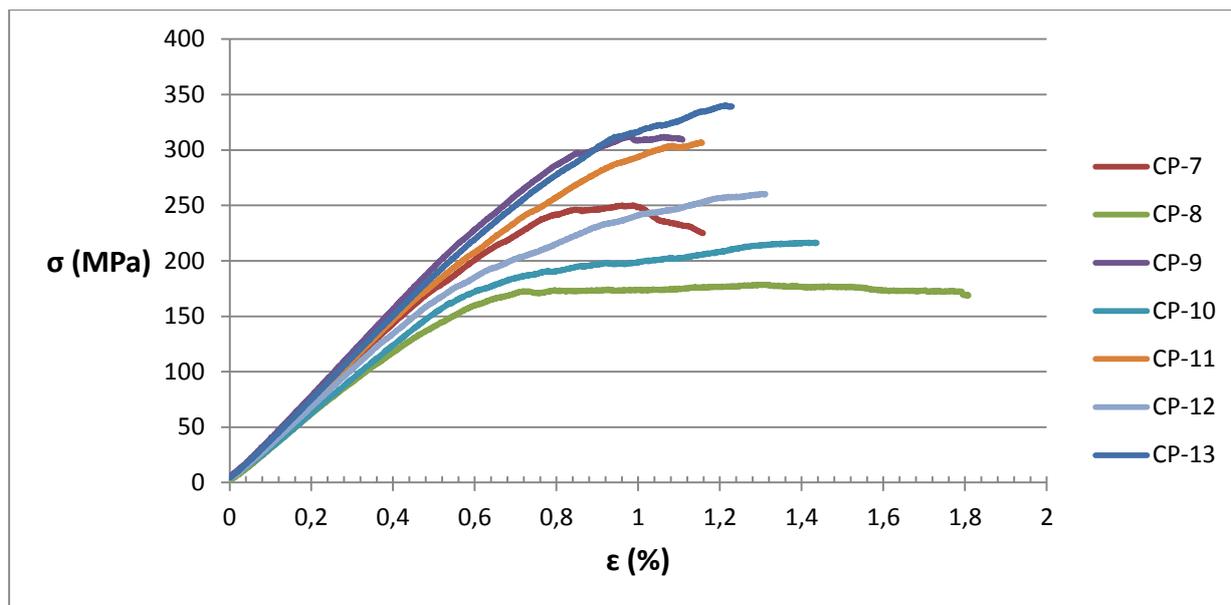
Observa-se que os valores de módulo de elasticidade obtidos estiveram dentro do esperado, de mesma ordem de grandeza, de acordo com a literatura [6]. Nota-se que no regime elástico, os corpos de prova defeituosos apresentaram menor rigidez e, portanto, maior deformação. No regime plástico, houve pouca disparidade entre os valores de resistência limite à flexão dos corpos de prova defeituosos e não defeituosos. Ainda no regime plástico, é possível concluir que os corpos de prova CP-1, CP-2, CP-4 e CP-5 apresentaram suas respectivas deformações relativas às tensões de resistência limite  $\sigma_{LR}$  muito diferentes das deformações relativas às tensões de ruptura  $\sigma_R$ . Isso é explicado pelo rompimento de apenas algumas fibras do corpo de prova, onde o mesmo ainda é capaz de resistir à tensão aplicada. Outro motivo é a delaminação do corpo de prova, que, devido à tensão aplicada, a força cisalhante interlaminar desprende uma lâmina de outra, inutilizando algumas camadas do compósito, diminuindo sua rigidez e resistência. Note que o CP-3 apresentou mesmas tensões  $\sigma_{LR}$  e  $\sigma_R$ , logo, suas respectivas deformações foram as mesmas.

Novos corpos de prova com a mesma orientação (0°/90°) foram elaborados com mudança no processo de montagem, pressionando cada lâmina com um rolo metálico. Estes novos corpos de prova, que não apresentaram volumes de vazios internos, foram ensaiados (Figura 7) e seus comportamentos de deformação em função da tensão sofrida estão descritos no gráfico da Figura 8. Volumes de vazios internos normalmente são decorrentes do processo da montagem de corpos de prova de elevada espessura, como é o caso em questão (espessura de 1 cm). Elevadas espessuras também podem trazer dificuldades quanto ao corte (caso o mesmo não seja adequado) da placa para retirada dos corpos de prova.



**Figura 7.** CP-8 pós ensaio.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 8.** Comportamento da deformação dos corpos de prova 7 a 13 em função da tensão sofrida pelos mesmos.

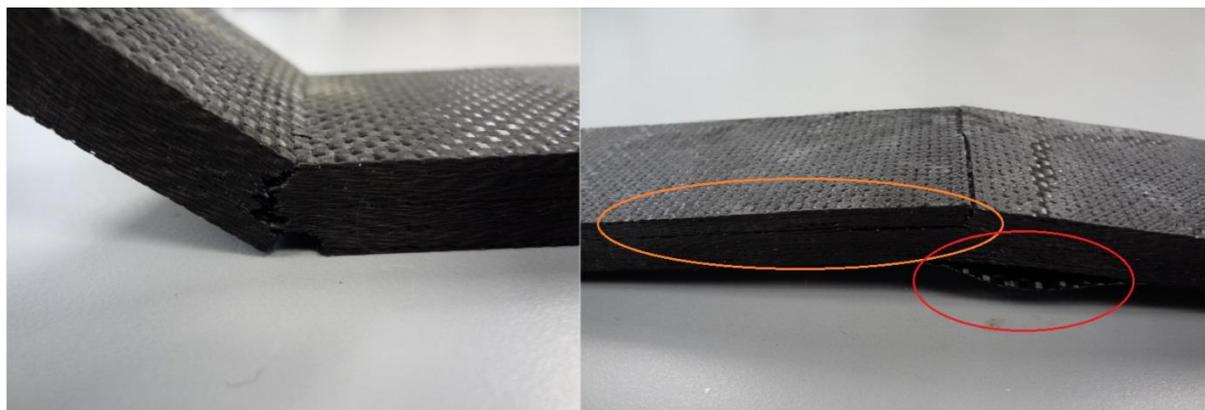
Os dados obtidos dos corpos de prova 7 a 13 estão representados na tabela 3:

**Tabela 3.** Valores obtidos referentes aos ensaios dos corpos de prova 7 a 13.

Corpos de prova	Regime Elástico			Regime Plástico				
	$\sigma_{LE}$ [MPa]	E [GPa]	$\epsilon_{LE}$ [%]	$\sigma_{LR}$ [MPa]	$\epsilon_{LR}$ [%]	$\sigma_R$ [MPa]	$\epsilon_R$ [%]	$F_{LR}$ [N]
CP-7	180	35,0	0,5234	250	0,9851	225	1,1589	4167
CP-8	142	28,6	0,5052	178	1,3129	168	1,8084	2979
CP-9	230	38,4	0,6080	312	0,9786	309	1,1086	5211
CP-10	165	30,5	0,5562	217	1,4323	216	1,4370	3610
CP-11	180	36,4	0,5018	307	1,1548	306	1,1566	5119
CP-12	140	33,5	0,4194	261	1,3033	260	1,3115	4345
CP-13	225	37,1	0,6168	340	1,2166	339	1,2295	5670
Média	180	34,2	0,5330	266	1,1977	260	1,3158	4443
Desvio Padrão	± 36	± 3,6	± 0,0682	± 57	± 0,1707	± 61	± 0,2442	± 955

Observa-se que os valores de módulo de elasticidade obtidos estiveram dentro do esperado, de mesma ordem de grandeza, de acordo com a literatura [6]. Analisando as imagens das fraturas, juntamente com os dados obtidos, conclui-se que os corpos de prova de menor resistência ao escoamento  $\sigma_{LE}$  (CP-8, CP-10 e CP-12) foram os mesmos cujas fraturas apresentaram delaminação proveniente da compressão das lâminas mais externas ao centro do corpo de prova (em sua parte superior). Com exceção dos corpos de prova CP-7 e CP-8, a tensão limite de resistência foi muito próxima à tensão de ruptura. Nestes corpos de prova, CP-9 a CP-13, observou-se que as delaminações foram menores, sendo o mecanismo de dano a fratura das fibras, como mostra o comparativo da Figura 9.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 9.** Comparativo entre os corpos de prova CP-13 (à esquerda) e CP-8 (à direita). A delaminação das lâminas na zona de tração do corpo de prova está indicado pela elipse laranja. A delaminação proveniente da flambagem das fibras sujeitas à compressão está indicada pela elipse vermelha.

Nota-se que o CP-13 não apresentou delaminação das lâminas mais próximas ao centro do corpo de prova, como aconteceu no CP-8. Nota-se também que o CP-8 apresentou delaminação proveniente da flambagem das fibras sujeitas à compressão, indicado pela elipse vermelha (figura 9). A delaminação proveniente da flambagem não ocorreu no CP-13. Tais defeitos influem diretamente na resistência do material compósito, como ficou evidenciado pela tabela 3.

Em corpos de prova de ambos os tipos, CP-1 a CP-6 e CP-7 a CP-13, foi verificado que a principal falha foi ocasionada pela tração nas fibras, ou seja, os corpos de prova perderam totalmente sua resistência no momento em que as fibras tracionadas se romperam.

Ainda não foi possível estudar a influência da orientação das malhas na rigidez dos compósitos, pois os corpos de prova CP-14 a CP-20, de orientação  $0^{\circ}/90^{\circ}/\pm 45^{\circ}$  ainda não foram ensaiados. Após todos os ensaios, a análise por Microscopia eletrônica de varredura será realizada.

#### 4 CONCLUSÃO

Corte à jato d'água apresentou ótimo acabamento superficial apesar da espessura ser considerável. Após o corte, não foram encontradas fibras soltas nas superfícies dos corpos de prova.

O processamento deixou de ser deficiente. A pressão provocada pelo rolo metálico sobre as lâminas durante a montagem do compósito resultou na ausência de volumes de vazios internos nos corpos de prova.

A caracterização experimental da rigidez à flexão foi um sucesso, devido à média porcentagem em massa de fibras, a rigidez determinada dos compósitos foram de valores moderadamente altos, entre 30 e 40 GPa.

As falhas de todos os corpos de prova foram devido à tração e observou-se que os corpos de prova com delaminações das lâminas internas e delaminações das lâminas externas provenientes da flambagem das fibras sujeitas à compressão, tiveram seus valores de resistência, tanto de limite de escoamento como de limite de resistência, reduzidos.

Da influência do defeito de volume de vazio interno conclui-se que a presença do mesmo provoca uma redução no valor de módulo de elasticidade do corpo de prova.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## Agradecimentos

Ao Centro Universitário da FEI, aos técnicos do Laboratório de Materiais (LabMat-FEI).

## REFERÊNCIAS

- 1 Chawla KK. Composite Materials Science and Engineering. 2ª ed. Nova Iorque: Springer Verlag; 1998.
- 2 Bäker M, Rösler J, Harders H. Mechanical behaviour of engineering materials. Berlin: Springer Science; 2007.
- 3 Boisse. Simulations of woven composite reinforcement forming. Woven Fabric Engineering; 2010. p.387-414.
- 4 American Society for Testing and Materials. ASTM E855-08: Standard Test Methods for Bend Testing of Metallic Flat Materials for Spring Applications Involving Static Loading. West Conshohocken; 2008.
- 5 American Society for Testing and Materials. ASTM D790-07: Standard test method Flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. West Conshohocken; 2007.
- 6 Davies SIJ. The effect of processing parameters on the flexural properties of unidirectional carbon-fibre reinforced polymer (CFRP) composites. Materials Science and Engineering A. 2008;498:65-68.
- 7 Callister WD. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. 5ed. Rio de Janeiro: LTC; 2005.
- 8 Deng S, Ye L, Mai YW. Influence of fibre cross-section aspect ratio on mechanical properties of glass fibre epoxy composites. Composites Science and Technology. 1998;59:1331-39.
- 9 Neto FL, Pardini LC. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. 1ª ed. São Paulo: Blücher; 2006.
- 10 Burakowski L, Rezende MC. Modificação da rugosidade de fibras de carbono por método químico para aplicação em compósitos poliméricos. Polímeros: Ciência e Tecnologia. 2001;11(2):51-57.
- 11 Rezende, MC, Costa ML, Botelho EC. Compósitos estruturais: tecnologia e prática. 1ª ed. São Paulo: Artliber; 2011.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.