

COMPORTAMENTO MECÂNICO EM TORÇÃO, FLEXÃO E COMPRESSÃO DE MATERIAL COMPÓSITO *

Rafael Rolli Haddad¹
Gigliola Salerno²

Resumo

Os materiais compósitos estão se tornando indispensáveis no setor automobilístico, aquele constituído de fibra de carbono e resina epóxi apresenta elevada resistência e rigidez, combinadas com baixa densidade. Entretanto, torna-se indispensável a análise do seu comportamento. Este projeto teve como objetivo a análise do comportamento mecânico de um material compósito de fibra de carbono e resina epóxi. Para esse fim, corpos de prova de fibra de carbono na forma de tecido e resina epóxi foram confeccionados na configuração 0°/90°. Para caracterizar as propriedades mecânicas, foi proposta a realização dos ensaios de torção, compressão e flexão de três pontos. Após serem ensaiados, as fraturas foram analisadas em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), identificando e caracterizando danos como delaminação, extração da fibra e deformação por cisalhamento entre a fibra e regiões ricas em resina. A microestrutura mostrou que defeitos no processamento do compósito, como bolhas, facilitaram o processo de iniciação de trincas.

Palavras-chave: Torção; Flexão; Compressão; Compósito.

MECHANICAL BEHAVIOR IN FLEXURE, COMPRESSION AND TORSION LOADING OF COMPOSITE MATERIAL

Abstract

Composite materials are becoming indispensable in the automotive sector. With the aim of better performance, the composite material consisting of carbon fiber and epoxy resin has high specific strength and rigidity. However, it is essential to analyze the mechanical behavior. The aim for this project was analyzing the mechanical behavior for composite material of carbon fiber. For this purpose, the carbon fiber specimens in the form of epoxy fabric and the configuration will be 0°/90°, in order to characterize mechanical properties. This project was proposed to achieve the torsion, compression and bending three-points tests. After the tests, the fractured specimens were analyzed in scanning electron microscopy (SEM), identifying and characterizing the types of fractures. Mechanical behavior depends on fraction of fibre and matrix, consequently depends on each manual manufacturing. Composite damage occurred by delamination, pullout and debonding fiber/resin. The microstructure showed defects as voids, which facilitated fracture initiation.

Keywords: Torsion; Bending; Compression; Composite.

¹ Engenharia mecânica, Graduado, Engenheiro, Engenharia Mecânica, Centro universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo e Brasil.

² Engenharia mecânica, Doutora, Professora, Engenharia de Materiais, Centro universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo e Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Materiais compósitos são a combinação de duas fases, matriz e reforço, com reforços contínuos apresentam altas resistência e rigidez específicas, possuem resistência à corrosão e são leves [1]. Atualmente, os compósitos utilizados na indústria automobilística não têm exigência estrutural, se o fossem teriam que atingir com êxito menor peso e maior desempenho mecânico [2]. Este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento do compósito sob torção, flexão e compressão, visando caracterizar as propriedades mecânicas. A elaboração dos testes consiste em caracterizar o compósito laminado na configuração 0°/90°, constituído de resina epóxi e fibras de carbono, tecidas em malha, segundo as normas ASTM D790 [3] para flexão e ASTM D695 [4] para compressão.

O esforço mecânico de flexão acarreta tensões de compressão e tração [5]. Por meio do diagrama dos esforços solicitantes, na seção crítica, obtém-se:

$$\sigma_{\max} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

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

em que F é a força, L é o comprimento, δ é a flecha, b é a largura do corpo de prova e h é a espessura. Segundo Davies, 2008, na flexão existem três tipos de falhas: delaminação, as lâminas mais próximas da linha neutra se separam na máxima força de cisalhamento interlaminar; flambagem nas fibras na tensão máxima de compressão na seção crítica e fratura das fibras por tração na seção crítica [6]. Segundo Araújo, 2014, os corpos de prova na configuração 0°/90° perderam suas resistências no momento que as fibras tracionadas se romperam [7].

Para o ensaio de compressão no cálculo da tensão, deve-se dividir a carga máxima realizada pela área transversal, equação (3). A deformação verdadeira é definida pela expressão 4 [4].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (4)$$

De acordo com Mohammad, 2000, a análise de compressão em compósito laminado contendo delaminações, mostrou que houve redução na carga de compressão, quanto maior o número de delaminações maior a queda na leitura da carga [8]. A resistência à compressão é determinada pelas propriedades da matriz e influenciada pela orientação das fibras [1]. A falha em compressão ocorre em três modos: compressão e falha das fibras, separação longitudinal na matriz e cisalhamento. A resistência à compressão decresce com a presença de defeitos de fabricação como porosidade, delaminações e microtrincas internas [2]. Squires et al., 2007 obtiveram resistência à compressão de 1000 MPa com 60% em volume de fibra de carbono [9].

Para os cálculos da tensão de cisalhamento em uma seção transversal retangular uniforme, a máxima ocorre ao longo da linha de centro da face maior da barra, assim como o ângulo de torção [5]:

$$\tau_{\max} = \frac{T}{c_1 ab^3 G} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{TL}{c_2 ab^3 G} \quad (6)$$

Os coeficientes c_1 e c_2 dependem da relação a/b (largura/altura). Segundo Rossini, 2012, módulo de cisalhamento de compósitos na configuração $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$ é superior em 10% em relação ao da configuração $0^\circ/90^\circ$ [10]. De acordo com Salerno, 2013, os compósitos de resina epóxi com fibras de carbono bidirecionais $0^\circ/90^\circ$ apresentam módulo de cisalhamento de 16 GPa [11]. Os danos ocorrem por delaminação, extração da fibra e cisalhamento entre a fibra e a resina. A delaminação tem início com a ruptura da matriz gerando uma trinca, que cresce e atinge a interface das lâminas [12].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O compósito é formado por laminação manual, o tecido de fibra de carbono, gramatura 1,80 g/cm³, foi impregnado com resina epóxi. Foi, então, realizado o vácuo e, subsequentemente, a placa de compósito foi curada durante 1 hora a 120 °C. A fim de garantir grande precisão dimensional, os compósitos curados foram cortados à jato d'água, de acordo com as normas ASTM. A tabela 1 detalha as dimensões dos corpos de prova produzidos. Foram, então, efetuados ensaios de torção, compressão e flexão. Para os ensaios de torção, foi utilizado um torquímetro (Torsion Testing Machine) SM1 TQ, com célula de torque de capacidade 150N.cm, os valores dos torques foram coletados em um intervalo de 10° em 10°. Os ensaios de compressão foram realizados na máquina universal de ensaios MTS 810 Material Test System, com capacidade de 250kN. A velocidade de ensaio foi de 1,3 mm/min, após o limite de escoamento 6 mm/min e finalizou-se com a ruptura [4]. Para o ensaio de flexão foi utilizada a mesma máquina MTS 810. A velocidade de ensaio no ponto de aplicação de carga foi determinada em 6 mm/min [3]. A figura 1 ilustra os ensaios. Adicionalmente, foi determinada a densidade e a quantidade de fibra e resina no compósito através do corte e da quantificação de 1 cm² antes e depois da queima da resina por 30 minutos a 500°C sob vácuo.

Tabela 1. Parâmetros dos corpos de prova para cada ensaio

Ensaio	Torção	Flexão	Compressão
Dimensões (mm)	200x25x1,35	240x50x15	155x25x15

Fonte: Autor.

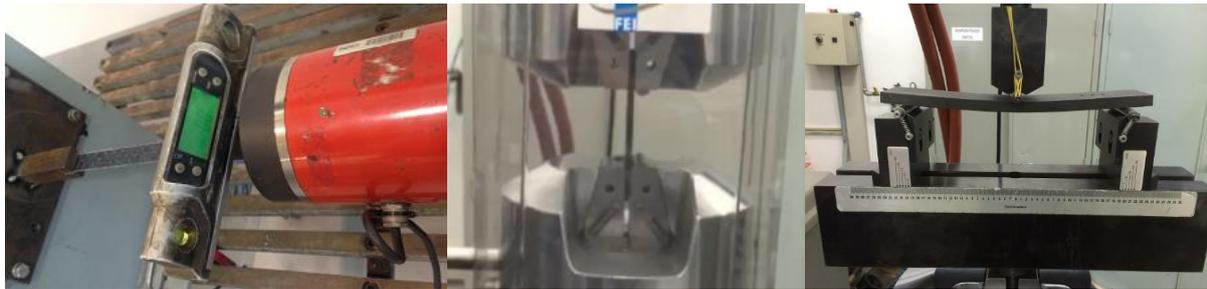


Figura 1. Ensaio de torção, compressão e flexão. Fonte: Autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A porcentagem em massa de fibra e resina resultaram na flexão, respectivamente, 56,15% e 43,85% e a densidade foi de 1,78 g/cm³. Estes valores são próximos de Davies (2008) [6]. Para os corpos de prova de compressão, a densidade foi igual a 1,63g/cm³ e porcentagem em massa de fibra e resina, 52,14% e 47,86%, respectivamente. Os corpos de prova para o ensaio de torção apresentaram densidade igual a 1,24g/cm³ e porcentagem em massa de fibra e resina 57,35% e 42,65% respectivamente. Os valores de porcentagem em massa e densidade apresentam uma variação significativa entre os corpos de prova produzidos para os diferentes ensaios, pode-se atribuir tais divergências à produção manual.

Foram realizados ensaios de torção cujos corpos de prova apresentaram a mesma tendência de curva, não ocorrendo grande divergências nos resultados de tensão em função do momento de inércia polar, figura 2. Além disso, observa-se pequena tendência de deformação plástica. Fazendo a análise dos valores de módulo de cisalhamento obtidos no ensaio de torção, foi determinado o valor médio de 2,65±0,04GPa. Segundo Salerno 2013, foram apresentados valores em torno de 3,3 GPa, para as fibras unidirecionais, os valores para fibras bidirecionais nos ensaios de Rossini (2012), uma média de 3,67 GPa para 87% de fibra em massa. No entanto, o compósito deste trabalho apresenta 57,35% de fibras em massa, o que reduz a resposta mecânica.

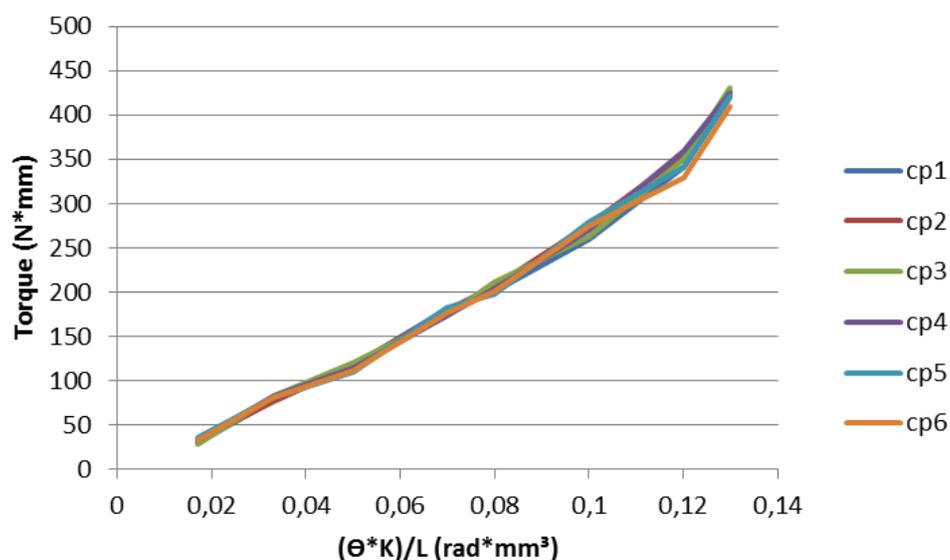


Figura 2. Gráfico obtido no ensaio de torção. Fonte: Autor.

Para o ensaio de compressão, as curvas tensão-deformação estão na figura 3. Na tabela 2 pode-se observar os valores da σ_{LR} , tensão limite de resistência, σ_R , tensão de ruptura e ϵ_R , deformação no momento da ruptura do corpo de prova. De acordo com a literatura o valor médio obtido é de 644 MPa, no entanto, o compósito deste trabalho apresenta 52,14% de fibras [9], o que reduz a resposta mecânica em termos de compressão. Os resultados dos ensaios de compressão mostram que a fratura do compósito ocorreu nas fibras e não apenas por delaminação das lâminas, o que valida os resultados. Na figura 4 foi utilizada uma ferramenta de edição digital de imagem para evidenciar as falhas nos corpos de prova.

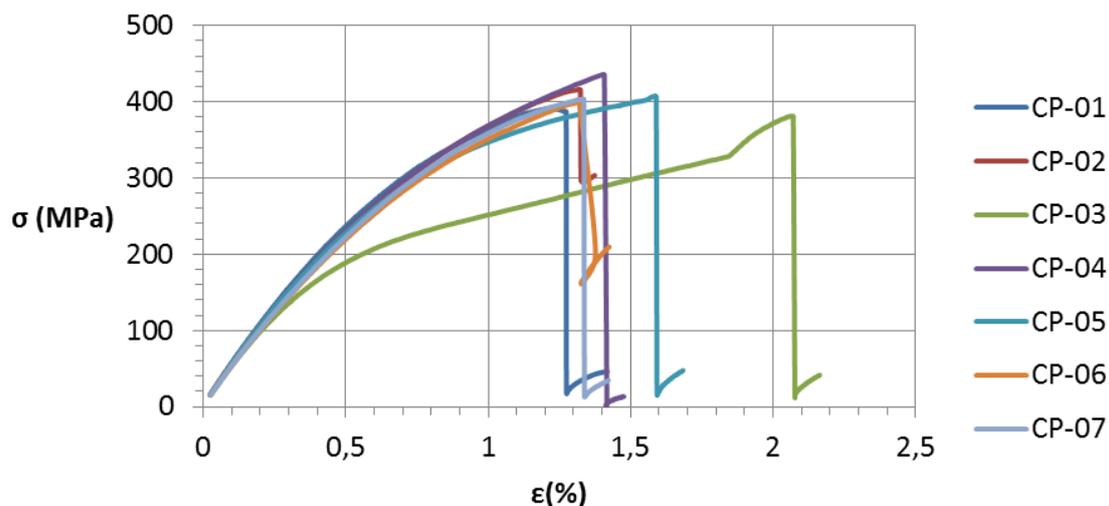


Figura 3. Gráfico obtido no ensaio de compressão. Fonte: Autor.

Tabela 2. Dados obtidos nos ensaios de compressão

Ensaio	E[GPa]	σ_{LR} [MPa]	σ_R [MPa]	ϵ_R [%]
Média	36	307	406	2,00
Desvio Padrão	6	23	17	0,35

Fonte: Autor.

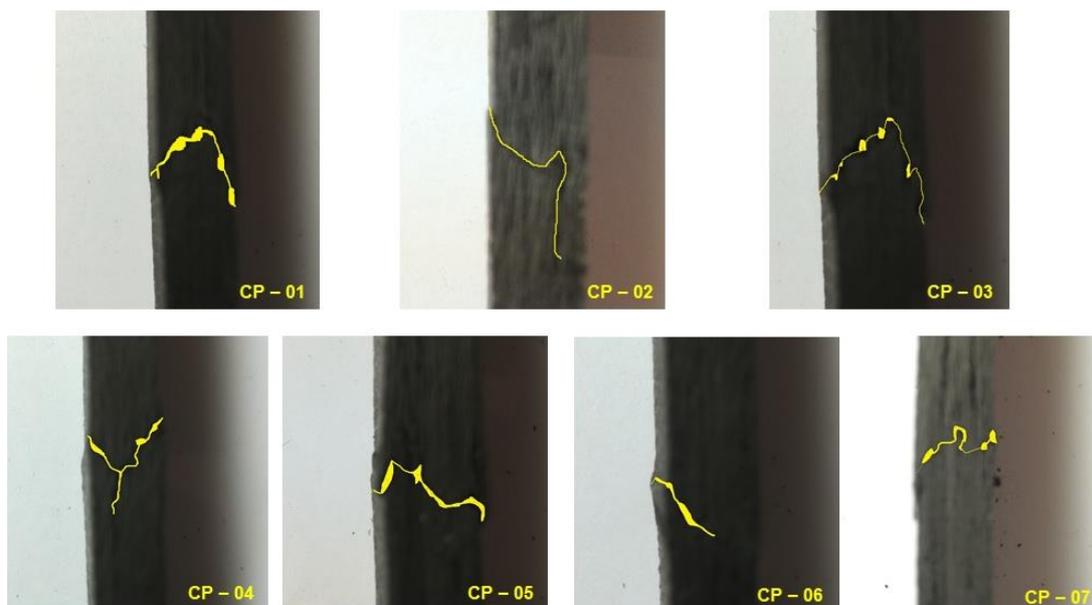


Figura 4. Fraturas dos corpos de prova dos ensaios de compressão. Fonte: Autor.

Foram feitos os ensaios de flexão de três pontos dos corpos de prova, o comportamento de deformação em função da tensão sofrida nos sete corpos de prova, está descrito no gráfico da figura 5. Os valores de módulo de elasticidade, tensão e deformação, de acordo com as equações 1 e 2 foram obtidos para análise. Os resultados estão representados na tabela 3, em que σ_{LE} é a tensão limite ao escoamento, E é o módulo de elasticidade, ϵ_{LE} é a deformação referente à tensão limite de escoamento, ϵ_{LR} é a deformação referente à tensão limite de resistência, σ_{LR} é a tensão limite de resistência, σ_R é a tensão de ruptura e ϵ_R é a deformação no momento da ruptura do corpo de prova. Na figura 6 foi utilizada uma ferramenta de edição digital de imagem para evidenciar as falhas nos corpos de prova. Pode-se observar que os valores de módulo de elasticidade obtidos estiveram dentro do esperado, de mesma ordem de grandeza comparados aos valores dos compósitos trabalhados por Davies (2008), Salerno (2013) e Araújo (2014), apresentados na introdução com porcentagem de fibras entre 52,16% e 59,46%. O compósito deste trabalho apresenta 56,15% de fibras, o que produz a resposta mecânica semelhante em termos de flexão. As disparidades da curva tensão deformação encontradas após o trecho linear elástico advém dos defeitos que são encontrados no processamento manual.

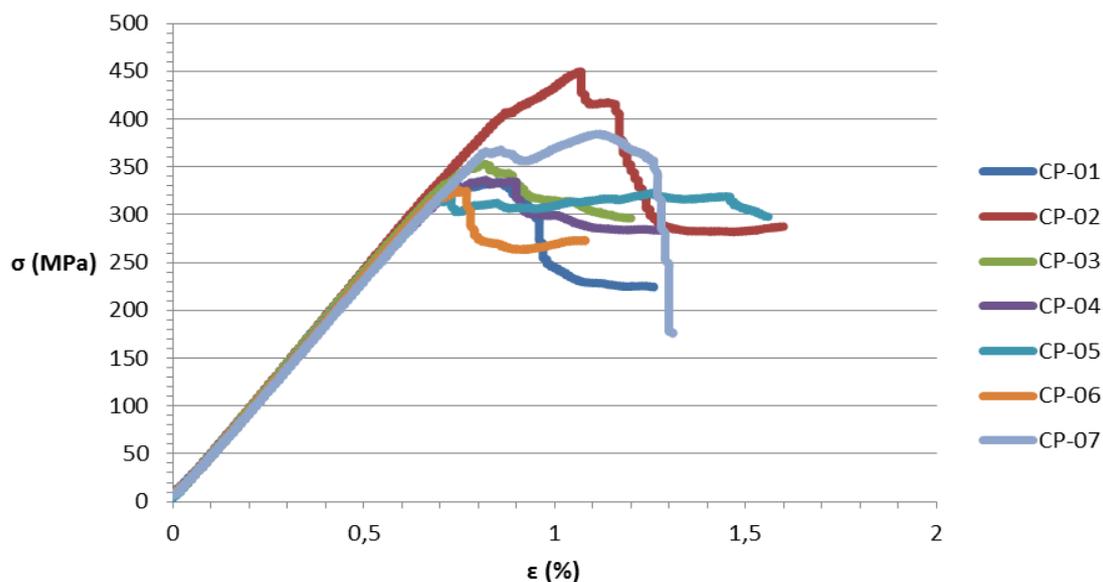


Figura 5. Comportamento da curva tensão- deformação no ensaio de flexão. Fonte: Autor.

Tabela 2. Dados obtidos nos ensaios de flexão

Ensaio	E[GPa]	σ_{LE} [MPa]	ϵ_{LE} [%]	σ_{LR} [MPa]	ϵ_{LR} [%]	σ_R [MPa]	ϵ_R [%]
Média	34	260	0,7	307	1,3	358	1,3
Desvio Padrão	3	8	0,1	21	0,2	42	0,2

Fonte: Autor.

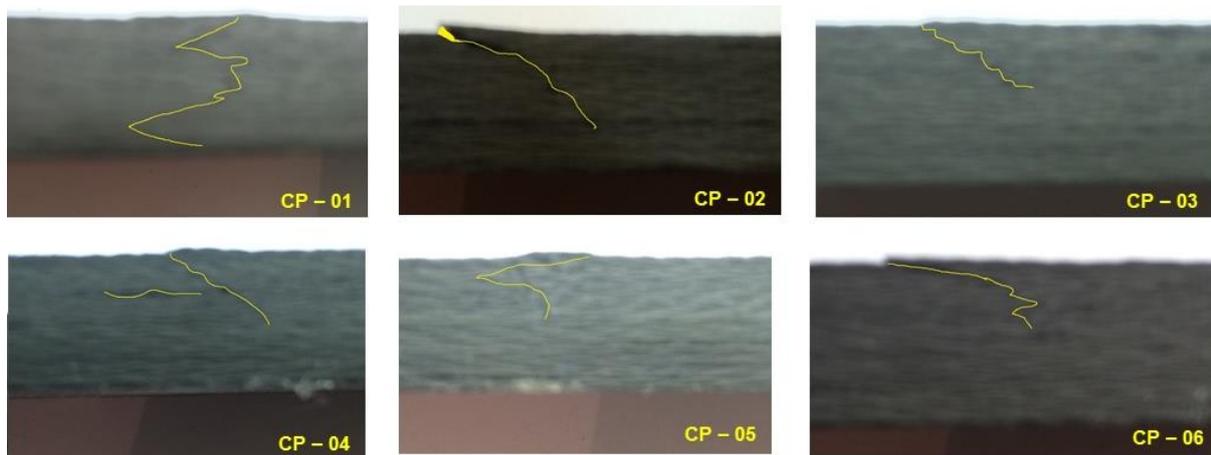


Figura 6. Fraturas nas fibras mais externas, sujeitas à tração nos ensaios de flexão. Fonte: Autor.

3.1 Fractografia

As fraturas dos corpos de prova, dos ensaios de flexão e dos ensaios de compressão, ambos foram analisados por microscopia eletrônica de varredura – MEV, a fim de observar os danos e mecanismos de fratura. Nos ensaios de torção não ocorreram fraturas. O corpo de prova CP-2, do ensaio de flexão em três pontos e o corpo de prova CP-5 do ensaio de compressão analisados no local em que ocorreu a fratura, ou seja, a imagem da superfície fraturada. Na figura 7, está a amostra da região lateral de fratura do CP-5. Esta imagem detalha o poder de concentração de tensão de uma bolha de ar (volume de vazio interno) indicada na elipse em verde, pois a partir da bolha, uma trinca nasce (seta amarela), percorre o sentido transversal do compósito, e, ao se encontrar com a fibra, percorre o sentido da mesma provocando delaminação. Os defeitos encontrados no processamento manual afetam a resposta mecânica, quanto maior a quantidade de defeitos, menor a resistência mecânica, o que justifica os diferentes comportamentos após o trecho linear elástico. Ainda na amostra, figura 7 à direita, a elipse em verde indica a propagação de trinca no sentido transversal do corpo de prova, seta em vermelho, arrancamento das fibras como também foi relatado por Araújo (2014) e Deng (1998), enquanto que as setas em azul indicam a fratura das fibras.

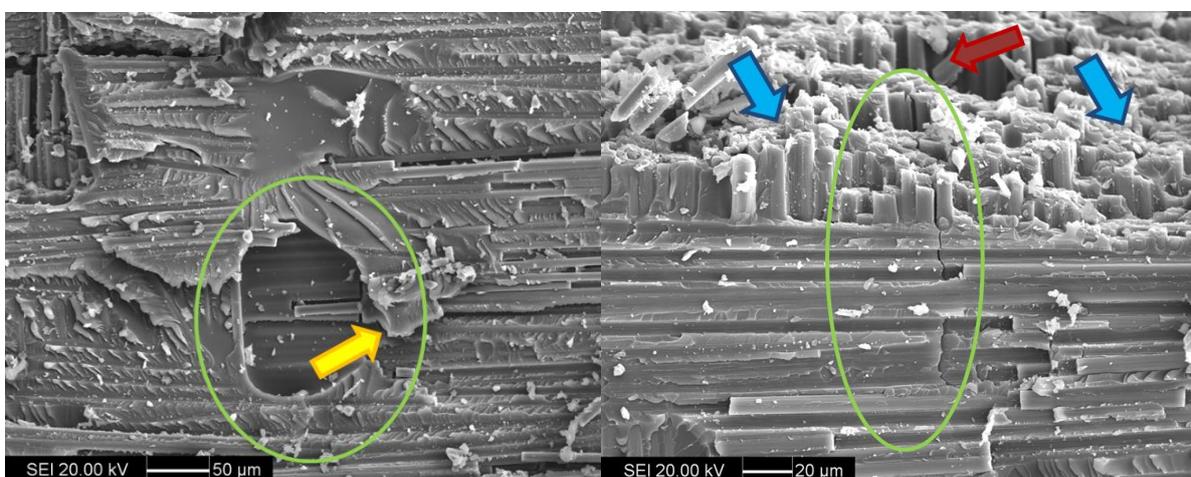


Figura 7. Análise por MEV, ruptura por flexão. Fonte: Autor.

Na amostra do ensaio de compressão do corpo de prova CP-5, pode-se observar na figura 8, a região da superfície a qual foi sujeita à fratura. As setas em azul exprimem a região fraturada por tração. Na elipse em verde e na seta em vermelho, pode-se observar um volume vazio interno. O desprendimento da fibra na resina epóxi é causado por uma propagação de trinca que, ao surgir na matriz, se encontra com as fibras e, devido à baixa resistência fibra-matriz, segue na direção das fibras, delaminando o compósito e fraturando fibras, setas azuis.

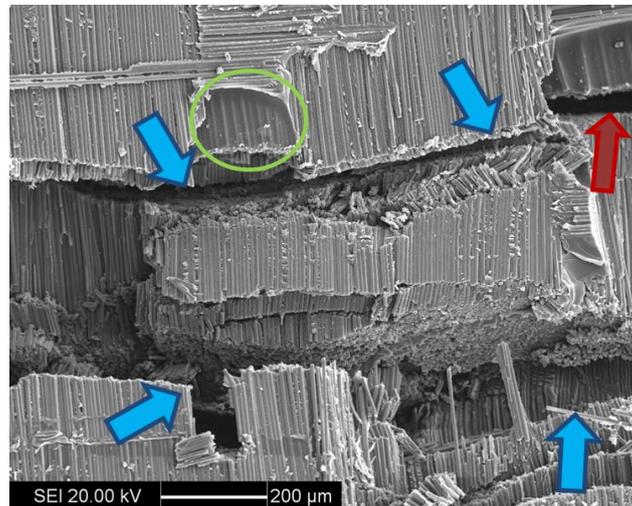


Figura 8. Análise por MEV, ruptura por compressão. Fonte: Autor.

4 CONCLUSÃO

Os valores de porcentagem em massa de fibra e resina influem significativamente nas propriedades mecânicas, de modo que propriedades mecânicas melhores são obtidas para maiores quantidades de fibras.

Os ensaios de torção apresentaram um resultado inferior ao esperado, pois o material ensaiado apresenta grande quantidade de resina (42,65%), deste modo não ofereceu grande resistência a torção. A quantidade de fibras em massa do material em estudo (57,35%) é inferior a do material encontrado na literatura (87%).

Nos ensaios de compressão os valores obtidos foram inferiores aos da literatura, o que pode ser explicado pela reduzida quantidade de fibras (52,14%). O valor médio das deformações dos corpos de prova no ensaio de flexão, apresentaram resistência dentro da faixa indicada pela literatura, porém apresentou microbolhas durante o processamento manual, observadas na microscopia eletrônica de varredura. O material apresentou a porcentagem em massa de fibra maior em relação a matriz, prevalecendo o comportamento da fibra, que é frágil.

O valor médio das tensões e deformações dos corpos de prova nos ensaios de flexão, apresentaram resistência dentro da faixa indicada pela literatura, mas próximos dos valores inferiores, que pode ser explicado pela presença de bolhas geradas durante o processamento manual, observadas na microscopia eletrônica de varredura.

Os danos nos compósitos ocorrem por delaminação, arrancamento das fibras e fraturas nas fibras. Na produção dos corpos de prova o processamento manual apresentou microbolhas. Estes defeitos no processamento, facilitam a iniciação de trincas e justificam não atingir as altas propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

- 1 NETO, F. L.; PARDINI, L. C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. São Paulo. Blücher. 2006.
- 2 REZENDE, Mirabel Cerqueira; COSTA, Michelle Leali; BOTELHO, Edson Cocchieri. Compósitos estruturais: tecnologia e prática. São Paulo, SP: Artliber, 2011.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Standard D, 790-10 edition, 2013.
- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. D 695, 2015.
- 5 BEER, F. B. et al. Mecânica dos Materiais. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH. 2011.
- 6 DAVIES, I. J.: 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 ARAUJO, G.P. Caracterização experimental da rigidez à flexão em material compósito carbono epóxi. Dissertação (Iniciação Científica) – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2014.
- 8 MOHAMMAD A., K., HIDEKI S., Compressive buckling analysis of rectangular composite laminates containing multiple delaminations, JAPÃO 2000.
- 9 SQUIRE, C. A., NETTING, K. H., Chambers, A. R. Understanding the factors affecting the compressive testing of unidirectional carbon fibre composite. Composites: Part B, 2007, 38, 481-487.
- 10 ROSSINI, M. B. Caracterização das propriedades elásticas de um material compósito laminado. 2012. f. 73. Dissertação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2012.
- 11 SALERNO, G.; MESQUITA, D. R.; PILAT, R. M. Identificação de propriedades elásticas de uma lâmina carbono epóxi. 68º Congresso Internacional da ABM. 2013.
- 12 GILCHRIST, M. D.; SVENSSON, N. A fractographic analysis of delamination within multidirectional carbon/epoxy laminates. Composites Science and Technology, 1995, vol. 55, p. 195-207.