RBAV Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo https://doi.org/10.17563/rbav.v41i1.1231

Influência da pressão de cura na compactação de camadas de fibra de carbono/epóxi e seus efeitos na resistência mecânica

Influence of curing pressure on the compaction of carbon fiber/epoxy layers and its effects on the mechanical strength

Iuri Miranda Amaral[1,*], Claudinei Rezende Calado[1]

1. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – Belo Horizonte (MG), Brasil.

Autor correspondente: iuri.miranda.amaral@gmail.com

Section Editor: Alvaro Damião

Recebido: Jun. 08, 2022 **Aceito:** Nov. 11, 2022

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar como a pressão de cura, aplicada após o tempo gel da resina epóxi, influencia a compactação das camadas de fibra de carbono em um material compósito composto por fibra de carbono e resina epóxi. Na medida em que se aumenta a pressão de cura, as camadas de fibra são prensadas umas contra as outras, o que contribui para a redução da fração volumétrica da matriz em relação ao reforço. Quatro diferentes níveis de pressão são investigados neste trabalho: 0; 2; 4 e 6 bar, as quais são aplicadas em moldes de placas planas com o auxílio de uma prensa hidráulica. Como efeito da compactação das camadas de fibras, foram observados o aumento da resistência mecânica, a redução da massa do corpo de prova por meio da redução da fração volumétrica de resina, redução da espessura do corpo de prova e o significativo aumento da resistência específica do material.

PALAVRAS-CHAVE: Fibra de carbono. Epóxi. Pressão de cura. Compactação de fibras de carbono.

ABSTRACT

This work aims to investigate how the curing pressure influences the compaction of carbon fiber layers in a composite material of carbon fiber and epoxy resin applied after the gel time of the epoxy resin. As the curing pressure increases, the fiber layers are pressed against each other, which contributes to reducing the volumetric fraction of the matrix in relation to the reinforcement. Four different pressure levels are investigated in this work, 0; 2; 4; 6 bar, which are applied in flat plate molds with the aid of a hydraulic press. As effects of the fiber layers compaction this work found an increase in mechanical strength, a reduction in the mass of the specimen through the reduction of the volumetric fraction of resin, specimen's thickness reduction and a significant increase in the specific strength of the material were observed.

KEYWORDS: Carbon fiber. Epoxy resin. Curing pressure. Carbon fiber layers compaction.

INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos de fibra de carbono formados de uma matriz polimérica reforçada por uma segunda fase em forma de camadas de fibras são opções interessantes para a manufatura de peças ou componentes que têm como requisito funcional uma alta resistência específica, ou seja, elevada resistência mecânica em relação ao seu peso. Esses compósitos são materiais formados por duas fases distintas principais, sendo que uma delas é um polímero termorrígido (matriz) e, a outra, o reforço em forma de fibras (reforço), que podem ser unidirecionais ou

CC BY

bidirecionais, adicionadas à matriz geralmente em forma de camadas. Um material compósito formado por fibra e matriz apresenta propriedades resultantes da combinação entre o polímero e o reforço[1].

A simples compactação de fibras de reforço, sejam naturais ou sintéticas, aglomeradas com um material ligante na forma de uma resina termorrígida, é capaz de formar materiais leves e estruturalmente rígidos, sendo adequados para uma variedade de aplicações. Vários processos de fabricação foram então implementados, adaptados e incorporados à tecnologia dos materiais compósitos, como os processos de infusão de resina[2].

A necessidade de se obter materiais leves e de alto desempenho trouxe notoriedade para os compósitos de fibra de carbono e fizeram com que se tornassem uma alternativa interessante em relação aos materiais metálicos3. Nessa classe de materiais compósitos, aqueles formados por matriz polimérica reforçados com fibras de carbono possuem excelentes resistência mecânica e alta rigidez nos planos das fibras[1].

A relativa facilidade para moldagem, baixo peso específico e a versatilidade de propriedades físicas tornam esses materiais desejáveis para uma grande variedade de aplicações. No entanto, os compósitos de fibras de carbono tradicionais sofrem de relativa baixa performance fora dos planos das fibras[3].

O valor da resistência específica de um material é calculado pela razão entre o limite de resistência mecânica e o seu peso específico. O desenvolvimento das técnicas de obtenção desses materiais possibilitou atingir resistências específicas excepcionalmente elevadas[1].

Conforme mencionado, as camadas de fibras de carbono, quando utilizadas na forma de reforço em uma matriz polimérica, podem conferir ao material compósito resultante elevada resistência mecânica, enquanto seu peso específico se mantém muito baixo em relação aos materiais metálicos. A estabilidade química e demais propriedades permitem que o material final seja mais resistente à corrosão e à fadiga quando comparado a outras fibras. Com relação à fibra de vidro, por exemplo, o limite de resistência à fadiga de um compósito reforçado com fibra de carbono pode ser muitas vezes superior, em função das melhores propriedades mecânicas da fibra de carbono[4].

A maneira como as fibras são posicionadas como reforço na matriz, bem como sua distribuição, concentração e orientação, excercem grande influência nas propriedades mecânicas do compósito[5]. Isto faz com que componentes possam ser projetados de forma anisotrópica, priorizando regiões submetidas a tensões mais elevadas.

Peças ou componentes compósitos de elevado desempenho das propriedades mecânicas são preferencialmente manufaturados com fibras de carbono, pois estas apresentam maiores módulos de elasticidade específicos e resistências específicas dentre os reforços normalmente utilizados como reforços de matrizes poliméricas nessa classe de materiais compósitos[1,6].

Processos de laminação por moldagem a vácuo obtêm componentes com propriedades mecânicas superiores quando comparados àqueles obtidos pelo processo de moldagem manual, sem posterior aplicação de pressão[7]. Os compósitos moldados a vácuo apresentam frações volumétricas de fibras maiores (40–50% em volume) que aqueles obtidos pelo processo de moldagem manual (20–40%) e possibilitam, também, a redução de defeitos, na forma de bolhas de ar, vazios e/ou descontinuidades, ocasionalmente presentes em regiões internas do material[8].

Inúmeros processos de laminação de componentes fabricados em fibra de carbono foram desenvolvidos desde seu advento. Com isso, faz-se necessário o entendimento da influência dos parâmetros de processamento, seja qual for o método de laminação utilizado. Dentre esses parâmetros, podem-se destacar a pressão aplicada durante a cura da resina, que contribui para a compactação das camadas de fibras, a redução da fração volumétrica da matriz e consequentemente o aumento da resistência mecânica. Como se trata de um material nobre e dispendioso, é interessante reduzir o volume de resina aplicado, bem como aumentar o desempenho do material sempre que possível.

Em processos de laminação e cura no interior de autoclaves é possível controlar a pressão aplicada no interior do vaso de pressão e os compósitos resultantes apresentam maior fração em volume de fibras se comparados àqueles obtidos por processos de moldagem manual e a vácuo. Uma maior fração volumétrica de fibras confere propriedades mecânicas melhores aos componentes. No entanto o processo de laminação e cura em autoclave é altamente dispendioso e limitado ao tamanho e à geometria do componente[8].

Drakonakis et al.[9] estudaram a fundamentação da aplicação de pressão e temperatura isoladamente durante o processo de consolidação de fibras pré-impregnadas curadas em autoclave. Condições controladas de pressão durante a cura foram projetadas para o estudo. A combinação de calor e pressão aplicadas nas camadas de fibras pré impregnadas são responsáveis por consolidá-las em um material com propriedades mecânicas mais contínuas ao longo do componente, com menos ocorrência de vazios e descontinuidades internas. Para a manufatura

de compósitos de alta performance, a moldagem e cura por autoclave é a técnica mais comum, apesar de se apresentar mais cara em relação à outras técnicas de laminação.

Por outro lado, a utilização das fibras pré-impregnadas apresenta algumas desvantagens como longo tempo de moldagem e de processamento, além do seu armazenamento requerer baixas temperaturas, que fazem com que esse método seja ineficiente, de alto custo e pouco atrativo para produção de componentes em larga escala. Esta é a principal razão pela qual o processo é usado amplamente em aplicações da indústria aeronáutica, onde a relação custo-desempenho é mais facilmente amortizada. As possibilidades de laminação por técnicas mais acessíveis, em termos de custo, porém com qualidade semelhante, são altamente atrativas[9]. Por essa razão, este estudo visa investigar a influência da pressão de cura aplicada em outros métodos de laminação que não necessitem do uso de autoclave ou vaso de pressão, como laminação manual, *vacuum bag*, moldagem por transferência de resina, dentre outros.

Sendo assim, para obtenção de laminados de alto desempenho, faz-se necessária a aplicação de pressão por outros métodos, como prensas hidráulicas ou mecânicas, para que ocorra o escoamento do excesso de resina, a compactação das camadas de fibras e consequentemente o aumento da resistência específica do material.

O presente artigo é um recorte da dissertação de mestrado a apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (POSMAT) do Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG).

MÉTODOS

A investigação da compactação/compressibilidade das fibras foi realizada por meio de laminação manual em placas planas (uma para cada pressão de cura) com oito camadas de fibra de carbono de gramatura 200 g/m² que, após impregnação com resina epóxi Araldite 1564, foram submetidas às pressões de cura investigadas (0, 2, 4 e 6 bar, manométricas) e aplicadas com o auxílio de uma prensa hidráulica.

Os moldes foram confecionados na forma de duas placas planas paralelas, com acabamento polido, em madeira revestida com papel *contact*, suficientemente rígidas para que a pressão fosse distribuída de maneira uniforme ao longo de todo laminado (Fig. 1).

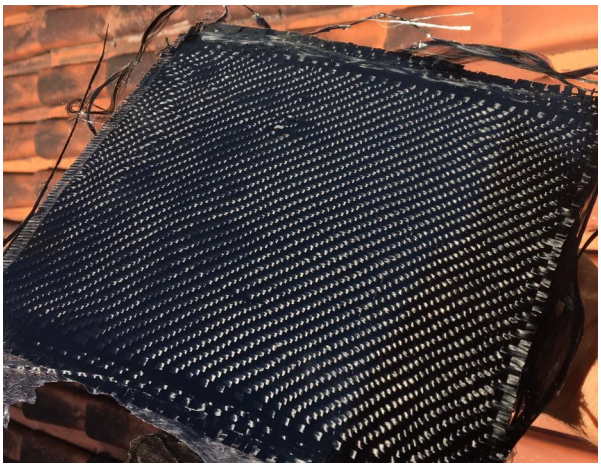

Figura 1: Placa plana da qual os CPs foram retirados.
Fonte: Elaboração própria.

Foram retirados cinco corpos de prova (CPs) das placas laminadas, com medidas 15 × 150 mm. Os CPs foram cortados de cada uma dessas placas, por meio de corte a água (Figs. 2 e 3), como sugerido pela norma ASTM D3039[10], para melhor precisão dimensional, acabamento e assim garantir a integridade dos CPs a serem ensaiados.

Após realizada a laminação e a retirada dos CPs, as amostras foram caracterizadas quanto a sua massa, fração volumétrica de resina, espessura final e tensão limite de ruptura. A caracterização da resistência mecânica foi feita por meio de ensaios de tração realizados com a máquina de ensaios universal Emic DL30000N disponível no laboratório do Departamento de Engenharia de Produção Civil do CEFET-MG.

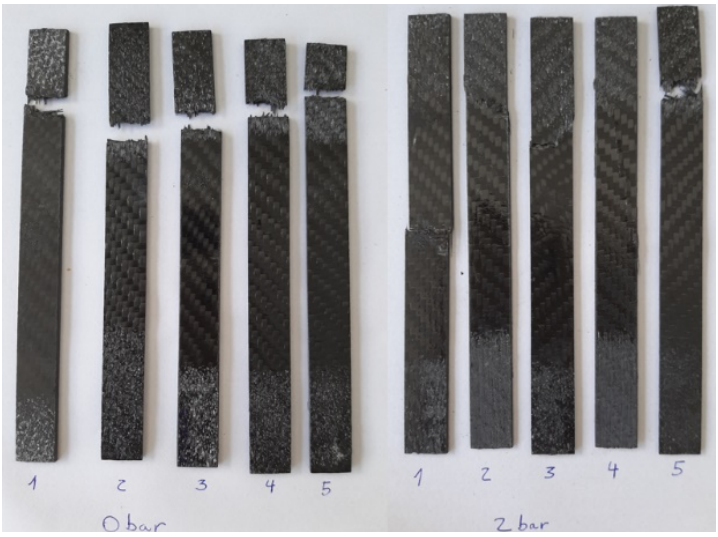

Figura 2: Corpos de prova após ensaios destrutivos: 0 e 2 bar de pressão de cura.
Fonte: Elaboração própria.

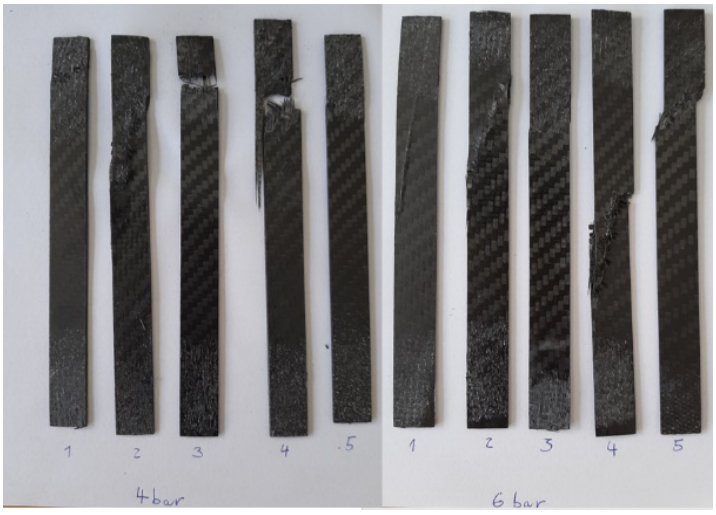

Figura 3: Corpos de prova após ensaios destrutivos: 4 e 6 bar de pressão de cura.
Fonte: Elaboração própria

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A investigação da influência da pressão de cura na compactação das fibras, na redução da fração volumétrica de resina e no aumento de desempenho mecânico foi feita utilizando laminados em forma de placas planas, pressionadas por meio de uma prensa hidráulica. Os resultados descritos a seguir retomam os objetivos iniciais desta pesquisa e corroboram a hipótese inicial de que os CPs obtidos das placas planas manufaturadas, via laminação manual, aumentam sua resistência específica na medida em que há compactação das camadas de fibras. As medições foram tomadas ao longo de todo comprimento do CP para avaliar se não houve uma variação dimensional significativa em uma mesma amostra. Para os CPs curados à pressão ambiente, a espessura média foi de 2,66 ± 0,10 mm enquanto os CPs curados a 6 bar, a espessura média encontrada foi de 1,36 ± 0,03 mm (Fig. 4), o que demonstra o quanto o laminado é sensível ao aumento da pressão de cura. Essa diminuição expressiva na espessura diminui consideravelmente a área sob tensão mecânica na secção transversal do CP e causa grande influência na tensão limite de resistência obtida.

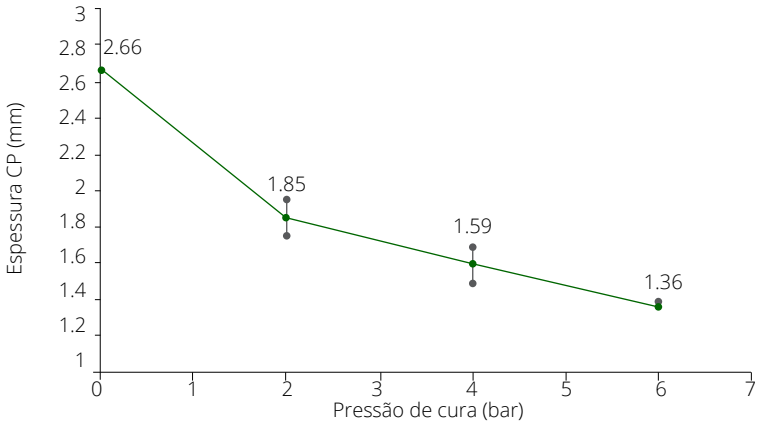

Figura 4: Diminuição da espessura dos CPs com o aumento da pressão de cura.
Fonte: Elaboração própria.

Compactação

A partir das medições realizadas é possível afirmar que há melhora no desempenho do material com o aumento da pressão de cura aplicada após o tempo de gel da resina, o que também reafirma a tendência encontrada em estudos similares, como o realizado por Drakonakis et al.[9].

Foi possível verificar uma diminuição de 50% na espessura do laminado quando comparado os CPs com cura a 0 bar com aqueles curados a 6 bar, ambos com um desvio-padrão mínimo entre as cinco amostras. Já os CPs curados a pressões inferiores apresentam um desvio-padrão ligeiramente maior e demonstram um comportamento de compactação próximo ao linear entre 2 e 6 bar.

Massa

Antes da realização dos ensaios destrutivos, as massas dos CPs foram medidas individualmente com uma balança de precisão para que a fração volumétrica de resina/fibra pudesse ser determinada. A Fig. 5 apresenta os valores médios de massa entre os CPs retirados de um mesmo laminado, bem como o desvio-padrão entre eles. De 7,50 ± 0,10 g, nos laminados a 0 bar para 4,59 ± 0,05 g nos laminados a 6 bar houve uma redução de 2,91 g na massa de resina em cada CP, reduzindo sensivelmente a fração volumétrica da resina diante da fibra.

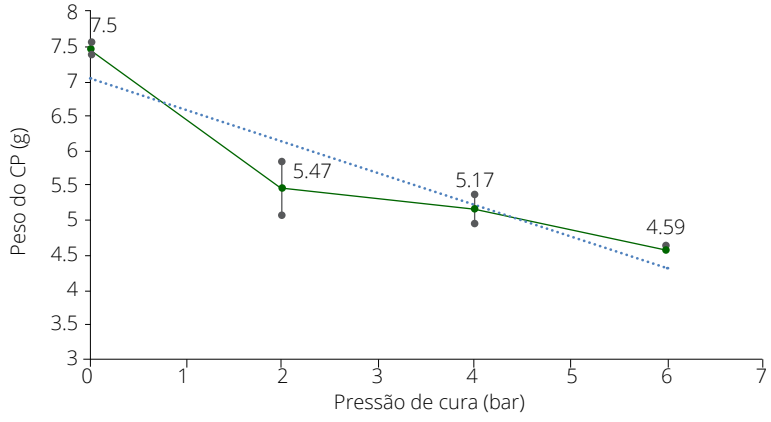

Figura 5: Diminuição da massa dos CPs com o aumento da pressão de cura.
Fonte: Elaboração própria.

A diminuição da espessura e da fração volumétrica de resina na medida que a pressão de cura aumenta contribuem com o resultado do aumento de performance da resistência mecânica. Porém, além disso, tem-se outros dois efeitos benéficos que devem ser discutidos.

O primeiro deles é a drástica redução do volume de resina necessário para laminação. Em processos de escala industrial, a economia de resina é buscada para redução de custos, gasto de insumos e impacto nos recursos naturais. Nesses casos, a redução da fração volumétrica de resina observada na Fig. 5 traria grande impacto econômico.

O segundo efeito da redução da massa do laminado é a melhora significativa na resistência específica do material (resistência mecânica / massa específica). Quando comparado o laminado a 0 bar ao laminado a 6 bar, a redução de 40% na massa do CP faz com que a resistência específica aumente consideravelmente, mesmo que não houvesse ganho de performance na tensão limite de ruptura do material. Essa característica é extremamente importante, especialmente para aplicações de alto desempenho que buscam aplicar materiais leves e de alta resistência, como peças de aeronaves, equipamentos esportivos etc.

Resistência mecânica

Após a verificação dimensional e de fração de resina, os CPs mostrados nas Figs. 3 e 4 foram submetidos a ensaios destrutivos de tração realizados em uma máquina de ensaios universal, disponível no Departamento de Engenharia de Produção Civil do CEFET-MG.

Conforme esperado, com a compactação das fibras e, consequentemente, a redução da área sob tensão, foi possível evidenciar que, à medida que as fibras se compactam com o aumento da pressão de cura, a tensão limite de ruptura dos CPs aumenta consideravelmente, saindo de valores próximos de 400 MPa, para cura à pressão ambiente, e atingindo valores próximos de 600 MPa para pressão de cura a 6 bar. Quando submetidos ao ensaio de tração, representa uma melhoria de 50% no desempenho de tensão limite de ruptura (Fig. 6).

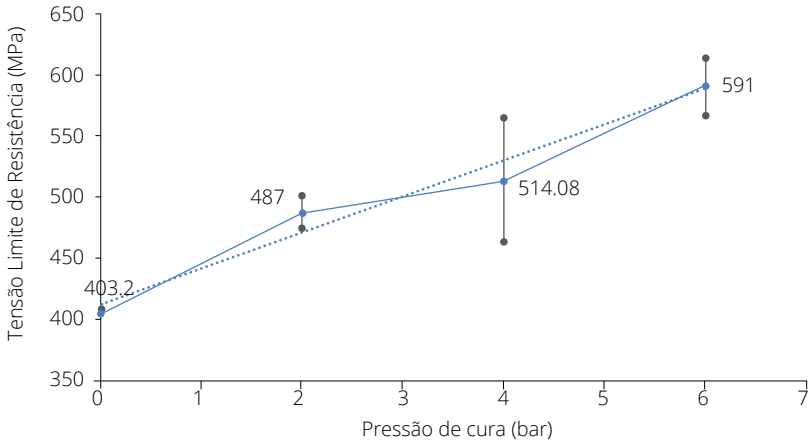

Figura 6: Aumento da tensão limite de resistência com o aumento da pressão.
Fonte: Elaboração própria.

Após a realização dos ensaios destrutivos, foi calculada a média entre as tensões limite de resistência dos CPs retirados de um mesmo laminado para as quatro pressões de cura investigadas, bem como o desvio-padrão entre as amostras com a mesma característica (Tabela 1).

Tabela 1: Valores de tensão limite de resistência e desvio padrão entre amostras.

Pressão de cura (bar)	0	2	4	6
Tensão ruptura média (MPa)	403.2	487.0	514.1	591.0
Desvio-padrão	3.5	13.1	51.5	23.9

Para os CPs curados a 4 bar foi encontrado um valor de desvio-padrão mais alto que para os demais. Isso se deve pela maior variação nas espessuras dos mesmos e aos diferentes modos de falhas observados nos CPs ensaiados

(Fig. 4); uma vez que dois dos cinco CPs falharam com uma trinca diagonal, enquanto os três restantes falharam por trincas transversais.

Todos os CPs de baixas pressões (0 e 2 bar) falharam com o mesmo modo de falha que se apresentou como trincas transversais. Já os CPs curados a 6 bar apresentaram o modo de falha com a trinca na diagonal, devido à melhor compactação das fibras e, consequentemente, a melhor distribuição da carga entre as camadas do laminado.

É interessante observar que a linha de tendência na melhora da performance dos CPs à tração não evidencia comportamento assintótico em 6 bar, sugerindo que pudesse haver ainda uma margem para ganho de resistência mecânica para pressões de cura mais elevadas.

Drakonakis e colaboradores[9] não encontraram melhorias quando se elevou a pressão de cura acima de 5 bar durante sua investigação em fibras pré-impregnadas, também não encontraram diferença significativa na compactação das fibras quando comparados laminados de 10 camadas com laminados de 20 camadas.

O processo de cura a 6 bar foi suficiente para compactar as fibras em até 1,25 mm, em comparação ao laminado curado a 0 bar; já o laminado curado a 4 bar compactou as fibras em 1,05 mm (Figs. 4 e 7). Como a fração de resina nos CPs já é mínima para aqueles curados a 6 bar, não se espera que a compactação continue aumentando consideravelmente para pressões de cura acima desse valor, ao passo que não se pode afirmar o mesmo para o aumento de resistência mecânica.

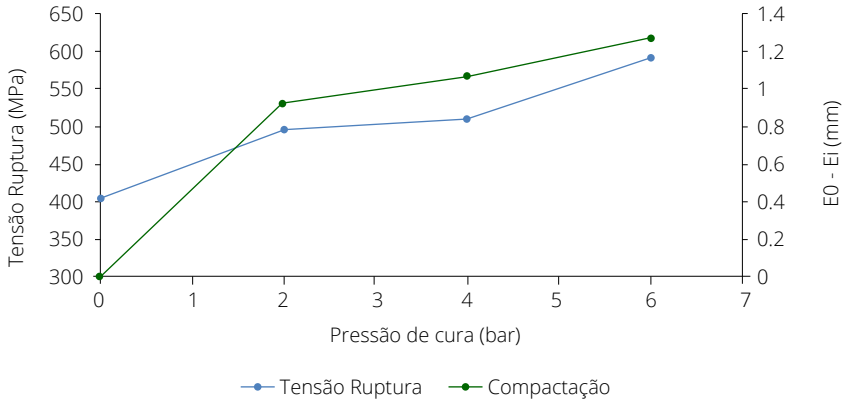

Figura 7: Compactação das fibras dos CPs e aumento de resistência a tração.
Fonte: Próprio Autor.

A Fig. 7 correlaciona o aumento de desempenho do material, à medida que a pressão de cura é aumentada, com compactação das fibras — evidência que contribui para afirmação da hipótese inicial dessa pesquisa de que as fibras de carbono, quando submetidas a elevadas pressões durante a cura, atingem valores de limite de resistência superiores àquelas laminadas manualmente e curadas à pressão ambiente. Isso se deve ao fato da redução da fração volumétrica de resina, compactação e melhor distribuição da carga entre as fibras, além do sensível aumento da resistência específica do material.

CONCLUSÃO

Todas essas evidências sugerem que o processo de laminação manual, quando submetido a elevadas pressões durante sua cura, tem grande potencial para substituir as fibras pré-impregnadas nos processos de laminação de peças com geometrias que permitam a aplicação de pressão externa.

A compactação das camadas de fibras foi evidenciada pela medida da espessura e da massa dos CPs, enquanto o aumento da resistência mecânica foi verificado pelos ensaios destrutivos de tração. Esses dois efeitos contribuem enormemente para o aumento da resistência específica do produto laminado, mesmo que a tendência de melhora possa se estender para além do limite de 6 bar investigado.

O estudo de compressibilidade das fibras deve ser usado para escolha dos parâmetros de pressão utilizados para processos de laminação, nos quais é possível a aplicação de pressão durante a cura da matriz polimérica.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Amaral IM; **Metodologia:** Amaral IM; **Investigação:** Amaral IM; **Redação – Primeira versão:** Amaral IM; **Redação – Revisão & Edição:** Calado CR; **Aquisição de Financiamento:** Não aplicável. **Recursos:** Amaral IM; **Supervisão:** Amaral IM.

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE PESQUISA

Os dados estarão disponíveis mediante solicitação.

FINANCIAMENTO

Não aplicável.

AGRADECIMENTOS

Não aplicável.

REFERÊNCIAS

1. Callister Jr. WD, Rethwisch DG. Materials science and engineering: An introduction. 7th ed. John Wiley & Sons; 2007.

2. Prado VJS. Moldagem de compósitos pelo processo de infusão de resina: Correlação de propriedades (dissertação de mestrado). São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica; 2019. Disponível em: http://www.bd.bibl.ita.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=874

3. Tehrani M, Boroujeni AY, Hartman TB, Haugh TP, Case SW, Al-Haik MS. Mechanical characterization and impact damage assessment of a woven carbon fiber reinforced carbon nanotube-epoxy composite. Compos Sci Technol. 2013;75:42–8. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.12.005

4. Yamane FO. Fadiga de compósitos de fibra de carbono/epóxi obtidos pelo processo de moldagem por transferência de resina assistida a vácuo. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá; 2016. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/449

5. Rezende MC, Botelho EC. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. Polímeros. 2000;10(2): e4–10. https://doi.org/10.1590/S0104-14282000000200003

6. Mazur RL. Obtenção e caracterização de compósitos de fibras de carbono/PEKK com aplicações aeronáuticas (tese de doutorado). Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/103754/mazur_rl_dr_guara.pdf

7. Lorandi NP. Estudo das propriedades dinâmico-mecânicas e fluência de compósitos epóxi/tecido não-dobrável de carbono produzidos por VARTM e RFI (dissertação de mestrado). Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul; 2016. Disponível em: https://repositorio.ucs.br/handle/11338/1844

8. Pardini LC, Gonçalves A. Processamento de compósitos termoestruturais de carbono reforçado com fibras de carbono. J Aerosp Technol Manag. 2009;1(2):231–41. https://doi.org/10.5028/jatm.2009.0102231241

9. Drakonakis VM, Seferis JC, Doumanidis CC. Curing pressure influence of out-of-autoclave processing on structural composites for commercial aviation. Adv Mater Sci Eng. 2013;2013:356824. https://doi.org/10.1155/2013/356824

10. ASTM D3039/D3039M-17: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM International; 2014. https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17