

## FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE VIGAS SANDUÍCHE COM NÚCLEO MAGNETO REOLÓGICO E SEUS CONSTITUINTES

Danilo C. Rodrigues<sup>1</sup> (IC), Felipe d.S. Eloy (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá.

**Palavras-chave:** Estruturas sanduíche. Resistência à tração. Elastômero magneto reológico. Fibra de carbono. VARTM.

### Introdução

Uma concepção de peso mínimo que atende à rigidez desejada em uma aplicação estrutural (como aeronáutica, aeroespacial, automobilística e outras) pode resultar em um ganho significativo de desempenho e, portanto, tem recebido atenção.

Painéis sanduíche são estruturas compostas por normalmente dois diferentes materiais, sendo um compondo as faces e outro compondo o núcleo. Enquanto a face deve ser resistente às tensões normais devido à flexão, o núcleo é responsável por resistir às tensões cisalhantes transversais e é fabricado com materiais de baixa densidade (Berthelot, 1998).

Estruturas sanduíche com núcleo tipo colmeia e faces em material compósito são amplamente adotados como consequência desse objetivo, devido às suas elevadas relações resistência-peso (Berthelot, 1998). O emprego de materiais inteligentes como elastômeros magneto reológicos em conjunto com painéis sanduíche traz ainda mais vantagens, como o controle do comportamento dinâmico da estrutura, possibilitando ainda mais redução de peso (Eloy et al., 2018). A Fig. 1 mostra um painel sanduíche com núcleo colmeia hexagonal.

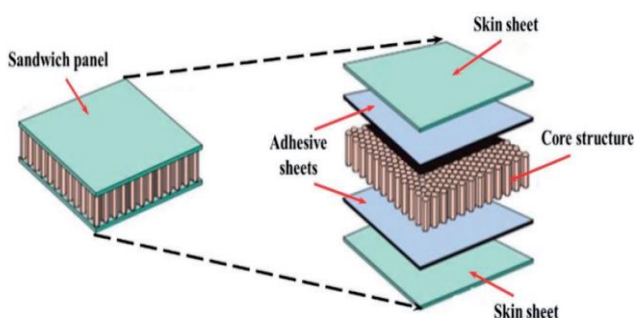


Figura 1 – Composição de uma estrutura sanduíche (MA et al., 2021).

O objetivo do presente estudo foi fabricar painéis sanduíche com núcleo colmeia preenchido com elastômero magneto reológico e faces em compósito de tecido bidirecional de fibra de carbono via Moldagem por

Transferência de Resina Assistida à Vácuo (VARTM), caracterizar as faces mecanicamente com ensaios de tração e caracterizar dinamicamente a viga preenchida com silicone puro (sem pó ferromagnético).

### Metodologia

Para a fabricação dos corpos de prova (C.D.P.), primeiramente foi feito o levantamento de todos os materiais que compõem a viga sanduíche, sendo eles: tecido bidirecional de fibra de carbono, resina epóxi, catalisador, “peel-ply”, silicone comercial, endurecedor, pó ferromagnético e o papel aramida em forma de colmeia hexagonal.

O primeiro passo foi o corte do papel aramida no formato de uma viga. Foi utilizada uma serra fita e obteve-se então amostras com dimensões 280mmx30mm. Após isso, foi feita a preparação do elastômero magneto-reológico. Com o auxílio de uma balança, foi estimada a quantidade de silicone para preencher o núcleo de cada uma das amostras. Com essa quantidade depositada em um recipiente, foi adicionado 1% de endurecedor e a fração mássica de pó ferromagnético. Para a fração de pó ferromagnético, ainda que seu efeito não seja alvo do presente estudo, foram fabricadas três vigas, em uma foi feito o preenchimento somente com silicone (0% de pó), em outra com 30% de fração mássica de pó ferromagnético e outra com 60%. Misturado por aproximadamente 10 minutos, o elastômero era então depositado no núcleo colmeia. O tempo de cura esperado foi de 24h, e chegou-se nos núcleos preenchidos da Fig. 2.



Figura 2 – Núcleos das vigas sanduíche preenchidos (Autores, 2023).

Dessa forma, os núcleos estavam finalizados. O próximo passo então foi a manufatura das faces utilizando a resina epóxi e reforço em tecido de fibra de carbono. Para a laminação, foi utilizado o processo VARTM. Para já obter as vigas finalizadas após a infusão, o VARTM foi feito depositando o tecido diretamente sobre os núcleos.

Para o preparo da resina epóxi, ela foi misturada com o catalisador na fração mássica recomendada pelo fabricante e depositada em um funil. A fração volumétrica de reforço esperada para o compósito que forma as faces foi de 50%. Dessa forma, o volume de resina epóxi total usada na infusão foi igual a 50% do volume total do compósito, calculados pela razão da massa (pesada em uma balança) pela massa específica de cada material (fibra e resina).

Assim, as mangueiras foram ligadas à mesa contendo as amostras e um saco de vácuo foi usado para revestir toda a bancada, com a devida vedação nas partes laterais, inibindo a fuga de pressão. Feito isso, a bomba de vácuo foi acionada, com a pressão sendo acompanhada pelo manômetro para realizar o procedimento adequadamente de forma a não obter bolhas. A Fig. 3 mostra a bancada após o término da infusão.

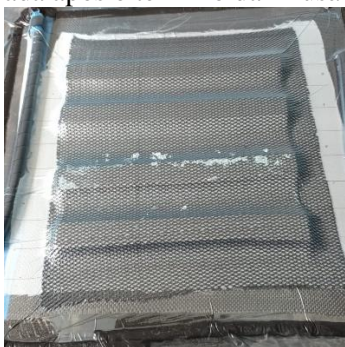


Figura 3 – Infusão via VARTM finalizada (Autores, 2023).

Passadas 24h da cura da resina, o laminado foi então desmoldado para a realização dos cortes nas dimensões adequadas. A Fig. 3 mostra as vigas acabadas.

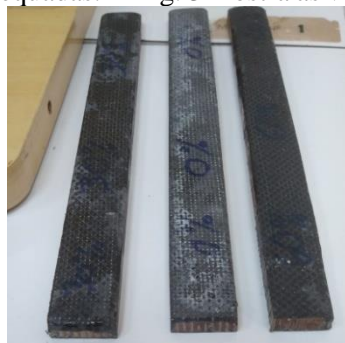


Figura 3 – Vigas finalizadas (Autores, 2023).

A caracterização mecânica das faces teve como objetivo a obtenção do módulo de elasticidade  $E$ , o limite de resistência à tração  $\sigma_{ult}$  e o limite de resistência ao

cisalhamento  $\tau_{ult}$  do compósito de fibra de carbono e matriz epóxi. Para isso, foi feita mais uma laminação via VARTM, com o mesmo procedimento da realizada para as vigas sanduíche.

O segundo passo foi cortar os laminados obtidos via VARTM nas dimensões especificadas pela norma ASTM D3039. Foram fabricadas cinco laminados com o tecido orientado a  $[0/90]_8$  e cinco amostras com o tecido orientado a  $[\pm 45]_8$ .

Para a realização dos testes de tração, foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaio. As amostras foram submetidas à um tracionamento de 2mm/min até atingirem a falha. Os dados foram então aquisitados. A Fig. 4 mostra uma amostra em tração na máquina e após a ruptura.

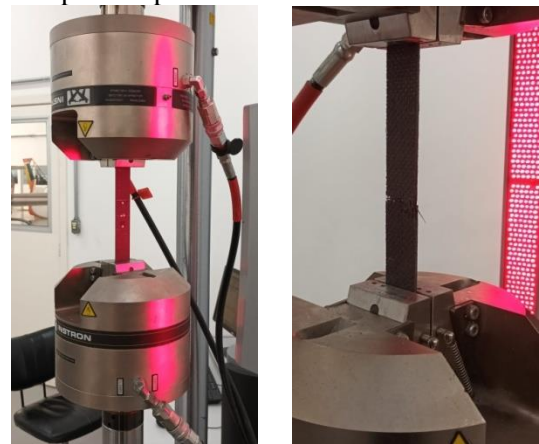


Figura 4 – C.D.P. durante o ensaio(esquerda) e após a ruptura(direita) (Autores, 2023).

Feita a caracterização mecânica das faces, foi então feita a caracterização dinâmica da viga com núcleo preenchido com silicone puro(sem pó ferromagnético), visando obter as três primeiras frequências naturais de vibração " $\omega_n$ ".

O procedimento experimental se dá quando a viga recebe uma excitação por meio de um material piezoelétrico (conectado ao próprio acelerômetro), que converte sinal elétrico em força aplicada em um domínio de tempo pequeno, caracterizando um impulso. O sinal então é aquisitado pelo acelerômetro, localizado na superfície da viga. O amplificador de sinais recebe o sinal aquisitado e faz o devido tratamento, amplificando o sinal elétrico, visto que a impedância de saída do acelerômetro não é adequada para leitura direta. Por fim, o analisador de sinais faz o processamento dos sinais de tensão recebidos, obtendo a aceleração e deslocamento no tempo, resposta em frequência, diagrama de fases e coerência.

Para a caracterização da viga com silicone puro em temperatura ambiente, o ensaio de vibração livre foi realizado dentro de um forno à temperatura de 20°C. A Fig. 5 mostra a viga engastada no forno com o aparato

experimental descrito. O eletroímã, apesar de constar na figura, não desempenha função visto que a viga ensaiada não contém pó ferromagnético em seu núcleo.

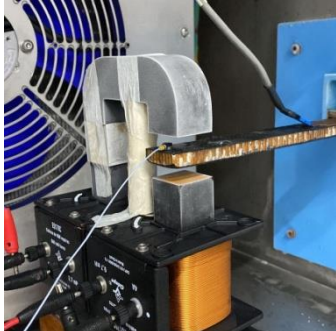


Figura 5- Aparato experimental do ensaio de vibração livre (Autores, 2023).

### Resultados e discussão

Por meio dos ensaios de tração nas amostras, foram obtidos os gráficos de tensão-deformação conforme a Fig. 6 e Fig. 7.

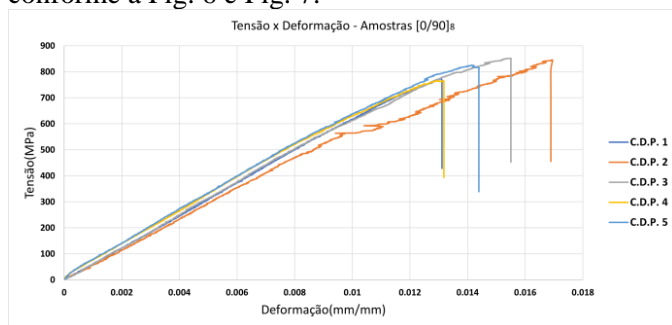


Figura 6 – Resultados do Ensaio de Tração C.D.P. [0/90]<sub>8</sub> (Autores, 2023).

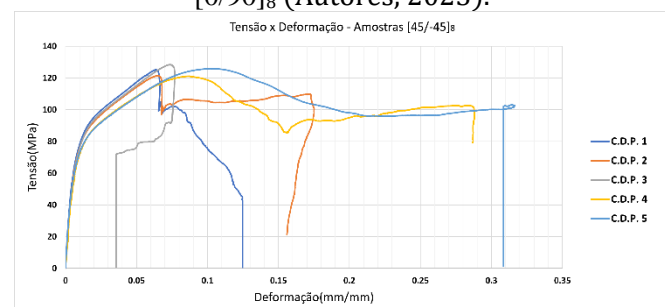


Figura 7 – Resultados do Ensaio de Tração C.D.P. [45/-45]<sub>8</sub> (Autores, 2023).

Da Fig. 6, nota-se que o tecido empregado nas faces, quando com a carga aplicada em direção longitudinal às fibras, apresenta elevada rigidez, observada pela baixa deformação até a ruptura se comparada com a Fig. 7, onde a carga foi aplicada em direção 45° em relação à fibra. A máxima deformação suportada para o primeiro caso foi cerca de 5 vezes menor em comparação com o segundo caso. Contudo, a máxima tensão suportada pelo tecido no primeiro

caso é quase 7 vezes maior, mostrando a elevada resistência a tensões normais.

Pela Teoria dos Laminados, a seguinte relação é verdadeira para uma carga aplicada a 45° em relação à direção da fibra (Cordella e Eloy, 2022):

$$\tau_{12} = 0,5(\sigma_y - \sigma_x) \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:  $\tau_{12}$  é a tensão cisalhante no plano da lâmina,  $\sigma_x$  é a tensão na direção da carga aplicada e  $\sigma_y$  é a tensão na direção transversal à carga aplicada.

Da Eq. 1 é tido que, nesse caso, metade da tensão aplicada é convertida em tensão de cisalhamento, enquanto metade é convertida em tensão normal. Da Fig. 7, em que toda a tensão aplicada é tensão normal, é visto que a falha nos laminados [45/-45]<sub>8</sub> é devido ao cisalhamento, e com valor igual a metade da máxima tensão suportada segundo a Fig. 4 (valor equivalente à parcela de tensão cisalhante).

Com base nas informações explicitadas, é então possível construir a Tab. 1, que contém as propriedades mecânicas usuais para cálculos analíticos e numéricos do material compósito usado nas faces da viga sanduíche.

Tabela 1. Propriedades mecânicas obtidas (direção longitudinal à fibra).

Propriedade mecânica	Valor médio (MPa)
Módulo de Elasticidade E	61430,000
Limite de resistência à tração $\tau_{ult}$	777,925
Limite de resistência ao cisalhamento $\sigma_{ult}$	62,221

Por meio do ensaio de vibração livre, as frequências naturais " $\omega_n$ " são identificadas pela localização de picos no espectro de frequência. Em uma região próxima da frequência de ressonância existe uma mudança significativa de fase, em que o ponto com fase igual a 90 graus é o ponto de frequência natural. Portanto, esse também é um critério a ser adotado para identificação de " $\omega_n$ ". Além disso, em um ponto de ressonância, as altas amplitudes obtidas ofuscam a interferência de ruídos, e assim é esperado que a coerência nas frequências naturais seja próxima à 1 (Rao, 2009). Essas foram as três observações tecidas para a localização das frequências naturais. A Fig. 8 mostra a função resposta em frequência (FRF), diagrama de fases e coerências para o ensaio de vibração livre da viga do presente estudo.



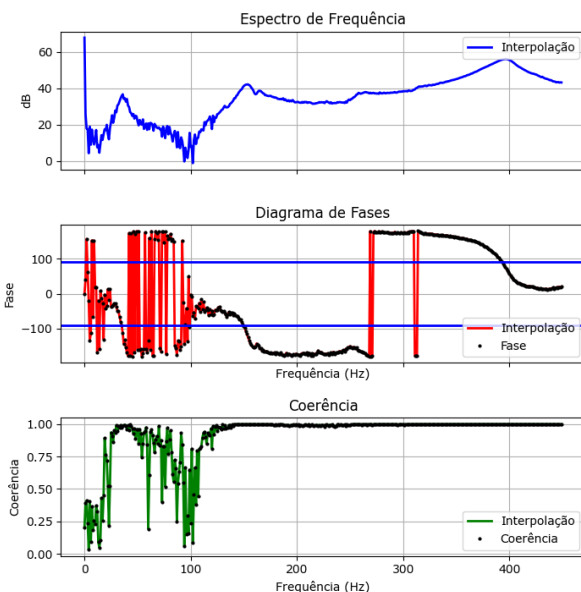


Figura 8 – Resultados do Ensaio de Vibração Livre (Autores, 2023).

Da FRF, nota-se a existência de três picos. Em todos os casos, há mudança significativa de fase e a coerência nesses pontos é próxima de 1. Assim, nota-se que há três modos de vibração que podem ser tirados do experimento. Utilizando um algoritmo em linguagem *Python*, busca-se os três pontos do espectro de frequência em que a fase mais se aproxima de 90° e com coerência maior que 0,95. Encontrados os três pontos, o algoritmo realiza uma interpolação linear que calcula as exatas três frequências naturais (fase igual a 90°). A Tab. 2 mostra as três frequências naturais tiradas do experimento.

Tabela 2. Frequências naturais “ $\omega_n$ ” obtidas.

Frequência natural “ $\omega_n$ ”	Valor interpolado (Hz)
$\omega_{n1}$	34,979
$\omega_{n2}$	149,431
$\omega_{n3}$	393,230

## Conclusões

A partir do estudo realizado, conclui-se que a manufatura das vigas via VARTM é adequada para fabricar estruturas sanduíche, pois nota-se que as amostras foram fabricadas corretamente e com bom acabamento. Por meio dos ensaios mecânicos, conclui-se que o material é adequado para o emprego como faces

dos painéis sanduíches, devido à elevada rigidez e resistência à tensões normais, como é esperado para as faces. Nota-se que o material não apresenta elevada resistência ao cisalhamento, contudo isso não é um fator limitante para o emprego como face de viga sanduíche, pois na prática os esforços serão majoritariamente de tração e compressão devido à flexão. Além disso, com o ensaio de vibração livre nota-se que, em um intervalo de frequência de 500Hz, a estrutura tem três frequências de ressonância, que devem ser evitadas.

## Agradecimentos

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

## Referências

- BERTHELOT, J.M. Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer, 1998.
- CORDELLA, D.R., ELOY, F.S. Comportamento em compressão e cisalhamento do compósito de fibra de algodão e matriz poliéster. XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2022
- ELOY, F. de S., GOMES, G.F., ANCELOTTI, A.C., CUNHA, S.S., BOMBARD, A.J. Experimental dynamic analysis of composite sandwich beams with magnetorheological honeycomb core. Engineering Structures, Elsevier, v. 176, p. 231–242, 2018. 4
- MA, Q., REJAB, M., SIREGAR, J.P., GUAN, Z. A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. Journal of Composite Materials, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 55, n. 18, p. 2513–2555, 2021. 4, 9
- RAO, S. Vibrações mecânicas (4a. ed.). Pearson Educación, 2009. ISBN 9788581435978.