

FABRICAÇÃO E ENSAIOS DE VIBRAÇÕES EM VIGAS SANDUÍCHE COM NÚCLEO INTELIGENTECaroline Vasconcelos Junqueira¹ (IC), Felipe de Souza Eloy (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá.**Palavras-chave:** Elastômero magneto reológico. Estruturas compósitas. Núcleo *honeycomb*. Vigas sanduíche**Introdução**

Nos últimos anos, materiais capazes de alterar suas propriedades em resposta a estímulos externos têm se destacado em aplicações estruturais avançadas. Entre eles estão os elastômeros magnetorreológicos (MREs), obtidos pela incorporação de partículas ferromagnéticas em matrizes poliméricas, geralmente de silicone. Sob a ação de um campo magnético, essas partículas se organizam em cadeias, modificando significativamente a rigidez e a capacidade de dissipação de energia do compósito (BASTOLA e HOSSAIN, 2020).

Pesquisas iniciais buscaram compreender os mecanismos responsáveis por essa resposta adaptativa, estabelecendo bases para sua aplicação em engenharia. Modelos pioneiros descreveram o comportamento reológico dos MREs sob campo magnético, relacionando a formação de cadeias de partículas à variação de rigidez (JOLLY et al., 1996). Estudos posteriores confirmaram que parâmetros como a fração volumétrica de partículas, o tipo de matriz e a intensidade do campo aplicado influenciam diretamente as propriedades mecânicas resultantes (TIAN et al., 2013).

Um exemplo de aplicação dos MREs está em sistemas antivibração para modelos em túneis de vento, onde pequenas oscilações podem comprometer medições. Nesse contexto, foram desenvolvidos amortecedores magnetorreológicos anulares capazes de ajustar instantaneamente suas propriedades reológicas quando excitados por corrente elétrica. Os resultados mostraram redução significativa nas amplitudes de vibração e possibilidade de ajuste dinâmico do coeficiente de amortecimento, evidenciando a flexibilidade e confiabilidade desses compósitos em ensaios aerodinâmicos e em potenciais aplicações aeroespaciais (LI et al., 2023).

O interesse pelos elastômeros magnetorreológicos se intensifica quando aplicados em estruturas sanduíche com núcleo colmeia, uma configuração amplamente utilizada em setores como o aeroespacial e o automotivo devido à elevada relação entre rigidez e massa. Quando

preenchidas com MRE, essas estruturas passam a apresentar comportamento adaptativo controlado por campo magnético. Ensaios experimentais demonstram que vigas sanduíche com núcleo colmeia preenchido por MRE apresentam sensibilidade à intensidade do campo aplicado, refletindo em alterações significativas nas frequências naturais e nos coeficientes de amortecimento (ELOY et al., 2018). Esses resultados reforçam o potencial desse tipo de configuração para aplicações em controle de vibrações, além de evidenciarem a importância de compreender seu comportamento dinâmico em diferentes condições operacionais.

Diante desse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo fabricar vigas sanduíche inteligentes com núcleo colmeia preenchido por elastômeros magnetorreológicos, investigando como diferentes matrizes poliméricas e condições de operação influenciam seu comportamento dinâmico. Ademais, também visa estudar diferentes composições de elastômeros magnetorreológicos, analisar a melhor forma de preenchimento do núcleo, seja pelo preenchimento direto ou pela mistura vertida no *honeycomb*, avaliar a distribuição das partículas ferromagnéticas na matriz e sua influência nas propriedades adaptativas do compósito, além de verificar os efeitos da temperatura e do campo magnético sobre a resposta dinâmica das vigas.

A relevância do estudo justifica-se não apenas pela busca de uniformidade na dispersão do pó ferromagnético em diferentes matrizes, mas também pelo potencial de redução de massa e pela melhoria da estabilidade estrutural em comparação a trabalhos anteriores. Em investigações já realizadas, observou-se que a inserção do pó ferromagnético em silicone proporcionava respostas dinâmicas satisfatórias a partir de concentrações de 60% em massa, embora ainda apresentasse limitações quanto à homogeneidade e ao peso do compósito (ELOY et al., 2018). Essa investigação, no entanto, utilizava vigas com núcleos reticulados quadrados fabricados em impressão 3D, como pode-se observar à esquerda da Figura 1.1, em materiais como ABS e PLA, enquanto o presente estudo tem como foco o comportamento de vigas com núcleo

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

honeycomb Nomex® comercial, apresentado ao lado direito da mesma figura, à base de aramida.

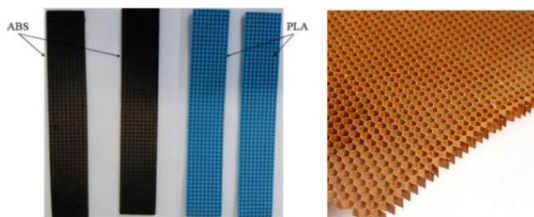


Figura 1.1 – Núcleos reticulados quadrados de ABS e PLA (esquerda) x Núcleo honeycomb Nomex® comercial (direita)

Pesquisas subsequentes realizadas por outro aluno de iniciação científica, juntamente com o professor orientador, testaram aditivos como sílica, mica muscovita, pó kynar e tixosil-333, que contribuíram para melhorar a dispersão do pó na matriz. No entanto, mesmo com esses avanços, o silicone utilizado como base do elastômero mostrou-se um material intrinsecamente pesado, o que limitou sua aplicação e motivou a busca por novas alternativas poliméricas. Nesse sentido, a presente pesquisa adota uma nova abordagem, explorando diferentes misturas poliméricas associadas ao pó ferromagnético, com o objetivo de reduzir a densidade do conjunto, evitar a decantação das partículas e ampliar as possibilidades de aplicação em estruturas adaptativas.

Adicionalmente, busca-se compreender de que forma a variação de temperatura pode afetar tanto a viscosidade da matriz quanto a mobilidade das partículas, influenciando a formação de cadeias sob campo magnético aplicado e impactando diretamente nas frequências naturais e nos coeficientes de amortecimento da viga sanduíche. Por fim, análises estáticas e reológicas complementares serão conduzidas, permitindo avaliar a rigidez e a resistência estrutural, ao mesmo tempo em que se compreende a resposta adaptativa dependente do campo magnético e da frequência de excitação. Dessa forma, o estudo integrado desses aspectos fornecerá subsídios para o desenvolvimento de soluções estruturais inteligentes e mais eficientes.

Metodologia

O primeiro procedimento experimental consistiu no preenchimento completo do núcleo honeycomb com uma mistura à base de silicone (proporção 100:3), acrescida de 3% em massa de mica. Na mesma foi incorporado pó ferromagnético (PFM), de modo a atingir 60% da massa total do compósito, valor definido com base em estudos anteriores (ELOY et al., 2018), que indicaram maior relevância da resposta dinâmica em vibração a partir

dessa fração.

A inclusão do aditivo teve como finalidade aumentar a massa específica da matriz, buscando reduzir a deposição heterogênea do pó ferromagnético durante o processo de cura. Após o preparo, a amostra foi inicialmente mantida em bancada, à temperatura ambiente, e posteriormente submetida à estufa para acelerar a cura. O produto do primeiro procedimento pode ser visto na parte superior Figura 2.1.

Contudo, verificou-se que o corpo de prova apresentou massa elevada, inviabilizando sua utilização na sequência da pesquisa. Em função disso, adotou-se uma nova metodologia: a mistura de silicone, pó ferromagnético e aditivo passou a ser vertida no interior do honeycomb apenas para recobrir as paredes da estrutura, sem preenchimento completo das células, a fim de reduzir a densidade do compósito. Este novo núcleo está representado na parte inferior da Figura 2.1.



Figura 2.1 – Honeycomb totalmente preenchido com silicone e pó ferromagnético (acima) X Honeycomb parcialmente preenchido com silicone e pó ferromagnético (abaixo)

Adicionalmente, foram preparados novos corpos de prova empregando diferentes fluidos poliméricos como matriz (látex e cola branca) como pode-se ver na Figura 2.2, com o intuito de analisar a influência da variação do material nas propriedades da viga. Nesses casos, tendo em vista a densidade dos dois materiais, o procedimento consistiu em verter o fluido no honeycomb e, em seguida, adicionar o pó ferromagnético de forma dispersa, mantendo-se a proporção de 60% em massa. Os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente até a cura completa.

A homogeneidade da distribuição das partículas ferromagnéticas no compósito foi avaliada por meio de análise visual. Essa abordagem permitiu verificar, de maneira preliminar, a uniformidade da dispersão das partículas na matriz polimérica, fornecendo subsídios para o aprimoramento das etapas subsequentes de processamento. Para assegurar a densidade adequada e garantir que o pó ferromagnético representasse uma porcentagem satisfatória da massa total da viga, o procedimento envolveu três etapas de pesagem: inicialmente do núcleo honeycomb vazio, depois da viga

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

apenas umedecida com o líquido, e, por fim, já com a adição do pó. Esse controle permitiu monitorar o ganho de massa e assegurar a proporção correta na composição final.



Figura 2.2 – Honeycomb parcialmente preenchido com latex e pó ferromagnético (acima) x Honeycomb parcialmente preenchido com cola branca e pó ferromagnético (abaixo)

Após a finalização dos núcleos, estes foram revestidos com camadas de prepreg de fibra de carbono, formando as skins da viga sanduíche. A etapa seguinte consistiu na moldagem a vácuo adaptada pelo método VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding), em que o conjunto prepreg-núcleo foi disposto sobre uma superfície metálica previamente preparada com desmoldante. Em seguida, aplicaram-se camadas funcionais, incluindo peel ply, para garantir bom acabamento superficial, e tubulações em espiral, responsáveis pela saída de ar e controle do vácuo. Toda a montagem foi vedada por meio de um filme plástico selado com fita própria, formando a bolsa de vácuo, como exemplificado na Figura 2.3.

Com a bolsa devidamente fechada e a estanqueidade verificada, acionou-se a bomba de vácuo, promovendo a compactação das camadas e a eliminação de vazios, sem necessidade de infusão adicional de resina, uma vez que o prepreg já contém a matriz epóxi. O conjunto permaneceu sob vácuo durante a cura térmica de 24 horas à temperatura ambiente, garantindo a consolidação completa do material. Esse procedimento permitiu a união eficiente entre as skins e o núcleo, resultando na fabricação de vigas sanduíche com qualidade estrutural e bom acabamento superficial.

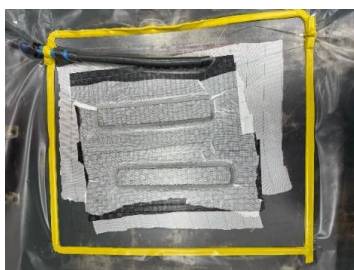


Figura 2.3 – Processo de moldagem a vácuo das amostras

Resultados e discussão

A modificação na metodologia de aplicação da mistura de silicone e pó ferromagnético resultou em uma redução significativa da massa da amostra, embora a homogeneidade na distribuição das partículas de ferro não tenha sido completamente assegurada. Após o revestimento com o prepreg, observou-se que, devido à natureza do silicone, o mesmo não apresentou boa aderência ao núcleo, impossibilitando a finalização da viga.

Já nos corpos de prova subsequentes, constatou-se que a amostra preparada com cola branca apresentou certa decantação do pó ferromagnético, enquanto a amostra de látex revelou melhor homogeneidade ao longo do núcleo. Em ambas as estruturas, a aplicação de prepreg por meio do processo a vácuo apresentou resultados satisfatórios, garantindo adequada aderência à superfície como exibido na Figura 3.1. Além disso, verificou-se que o uso desses fluidos em substituição ao silicone proporcionou não apenas melhor compatibilidade com o prepreg, mas também a vantagem de uma massa significativamente menor.



Figura 3.1 – Finalização das vigas com núcleo de cola branca (abaixo) e látex (acima)

Em comparação com os resultados do estudo anterior sobre a adição de aditivos em matrizes de silicone, observou-se que a massa específica do compósito tende a aumentar conforme a inserção de cargas, como mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Massas específicas das amostras produzidas no estudo anterior

Amostra Produzida	Densidade [g/cm ³]
Silicone + PFM	2,6248
Silicone + Sílica + PFM	2,8907
Silicone + Mica + PFM	2,7799
Silicone + Pó Kynar + PFM	2,8183

A amostra de silicone puro com pó ferromagnético apresentou densidade de 2,6248 g/cm³, enquanto formulações com aditivos como sílica, mica e P6 Kynar atingiram valores próximos a 2,8–2,9 g/cm³. Esse aumento da massa específica está diretamente

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

relacionado à melhor distribuição do pó ferromagnético ao longo da espessura do corpo de prova.

No mesmo estudo, avaliou-se ainda o comportamento reológico das amostras, confirmando que todas permaneceram no regime elástico do material, com pequenas variações dos módulos G' e G'' em diferentes campos magnéticos. Esses resultados reforçam a estabilidade mecânica do compósito e a importância dos aditivos para promover maior uniformidade na dispersão das partículas.

Dessa forma, ao relacionar os dois conjuntos de ensaios, verifica-se que a substituição do silicone por outros fluidos, como cola branca e látex, além de reduzir a massa e melhorar a aderência ao prepreg, também avança em aspectos já observados no estudo anterior com a matriz de silicone aditivada, onde a homogeneidade da distribuição das partículas e a estabilidade reológica se mostraram fatores determinantes para o desempenho final do compósito.

Conclusões

Os resultados obtidos indicam que a matriz polimérica utilizada exerce influência direta tanto na homogeneidade da distribuição das partículas ferromagnéticas quanto na massa final dos corpos de prova.

A amostra composta por silicone puro com pó ferromagnético apresentou densidade de $2,6248 \text{ g/cm}^3$, enquanto as formulações com aditivos alcançaram valores entre $2,7799$ e $2,8907 \text{ g/cm}^3$, confirmando que a inserção de elementos aumenta a massa específica do compósito, refletindo melhor distribuição das partículas ao longo da espessura do corpo de prova. Por conseguinte, o silicone, embora já empregado em estudos anteriores, apresentou limitações significativas relacionadas ao peso elevado e à baixa aderência ao prepreg, fatores que restringem sua aplicabilidade prática. Em contrapartida, as matrizes alternativas testadas demonstraram desempenho superior no processo de moldagem a vácuo, resultando em estruturas mais leves e com melhor acabamento.

Durante esta fase do trabalho, diversas tentativas de fabricação foram conduzidas, uma vez que atingir uma configuração estrutural estável, sem delaminações entre o núcleo e os skins, mostrou-se um desafio considerável. Visto que a produção da viga foi realizada pelo método VARTM, foram necessários análises e ajustes sucessivos com diferentes materiais até se obter uma estrutura coesa e adequada para os ensaios. Essa etapa consumiu tempo significativo de desenvolvimento, motivo pelo qual os ensaios de vibração ainda não puderam ser realizados,

mas forneceu uma base experimental sólida para a continuidade da pesquisa.

Entre os materiais avaliados, o látex apresentou maior uniformidade na dispersão do pó ferromagnético, fator essencial para assegurar a estabilidade do compósito e ampliar sua eficiência em condições de estímulo externo. A cola branca, apesar de viabilizar a conformação da amostra, apresentou indícios de decantação, o que pode comprometer sua utilização em aplicações que demandem elevada regularidade microestrutural. Esses resultados reforçam a importância de investigar diferentes fluidos poliméricos na busca por soluções mais eficientes e de menor massa.

Embora a metodologia adotada não tenha garantido completa homogeneidade, os avanços obtidos comprovam a viabilidade das abordagens propostas e indicam potencial de aperfeiçoamento metodológico e aplicação prática. Nesse contexto, novos ensaios serão conduzidos para avaliar a resposta das vigas produzidas às variações de temperatura e à aplicação de campo magnético, de modo a validar a utilização desses materiais em soluções estruturais inteligentes.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Itajubá, pelo suporte, formação sólida e ambiente inspirador, que permitiram meu desenvolvimento acadêmico e pessoal e tornaram possível a realização desta pesquisa.

Referências

BASTOLA, A.; HOSSAIN, M. **A review on magneto-mechanical characterizations of magnetorheological elastomers.** Composites Part B: Engineering.

ELOY, F. S. **Estudo do Comportamento Dinâmico de Vigas Sanduíche com Núcleo Honeycomb preenchido com Elastômero Magneto Reológico.** Itajubá, 2018. Tese de Doutorado em Projeto, Materiais e Processos. Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

JOLLY, M. R. *et al.* **A model of the behavior of magnetorheological materials.** *Smart Mater. Struct.* 5, 1996.

LI, Wang *et al.* **Development of an anti-vibration aircraft model support system with magnetorheological annular squeeze dampers for wind tunnel.** China, 2023.

TIAN, T. F.; ZHANG, X. Z.; LI, W. H.; ALICI, G.; DING, J. **Study of PDMS based magnetorheological elastomers.** *Journal of Physics, Conference series* 412, 012038, p. 1-8, 2013.