

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE OS PARÂMETROS MODAIS DE VIGAS SANDUÍCHE COM NÚCLEO REOLÓGICO

Pedro Yanaze¹ (IC), Felipe de Souza Eloy (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Elastômero ferromagnético. Microscopia. Núcleo *honeycomb*. Reologia

Introdução

Materiais inteligentes, também conhecidos como materiais responsivos ou sensíveis a estímulos, estão sendo amplamente utilizados em diversas áreas da engenharia nos dias de hoje, por oferecerem oportunidades ilimitadas para o desenvolvimento de diversas pesquisas e novos materiais devido ao aumento do desempenho de características e parâmetros de materiais tradicionais já existentes, tornando-os versáteis e multifuncionais (YILDRIM e CANDAN, 2023).

Neste estudo, o foco está nos materiais magneto reológicos, que vem recebendo uma atenção significativa da indústria, devido a sua capacidade de mudar suas propriedades reológicas em resposta a um campo magnético externo (JOLLY, 1996). Assim, é comum encontrar tais materiais na composição de amortecedores mecânicos de vibração, absorvedores de impacto e trem de pouso de aeronaves, além de serem materiais de preenchimento de vigas sanduíche, uma vez que eles precisam de uma resposta rápida em relação ao tempo, rigidez ajustável e controle de amortecimento, visando um maior conforto do cliente ou visando o cumprimento de um requisito de um projeto, por exemplo. Além disso, esses amortecedores já se provaram ser uma grande evolução quando comparado aos amortecedores passivos tradicionais, devido a sua grande eficiência, alcançando performances de controle de vibrações maiores, produzindo forças de controle desejáveis para a mitigação de vibração indesejada, e alta confiabilidade (LI et al., 2023). Fluidos magneto reológicos têm sido empregados em dispositivos para controle semiativo e têm as propriedades que podem ser controladas para reduzir de forma otimizada a resposta de sistemas em grande escala, como pontes e construções (CHOI, 2009; RIBAKOV e GLUCK, 2002).

No entanto, há desvantagens significativas no uso dos fluidos magneto reológicos, como a sedimentação de suas partículas (devido à alta diferença de massa específica entre seus componentes) e o fato de que os dispositivos utilizados devem ser vedados. Assim, a solução para a sedimentação foi o uso de elastômeros como matriz, onde as partículas magnéticas são misturadas a ele,

permanecendo presas no interior da estrutura reticulada do elastômero curado (ELOY, 2018). Os elastômeros, por sua vez, podem ser compostos por borrachas naturais ou sintéticas e têm partículas polarizáveis dispersas nestas matrizes, tornando-se possível as mudanças em suas propriedades quando submetidos a variações do campo magnético. Sob a influência de um campo magnético, as partículas tendem a se alinhar paralelamente a este campo, o que irá gerar uma tensão sobre a estrutura formada, parecida com cadeia microestrutural, no interior da matriz polimérica (TIAN et al., 2013), além de produzir uma mudança nas dimensões do elastômero (NAMBUDIRY, 2015).

Assim, este estudo consiste na observação do efeito da temperatura e do campo magnético sobre o comportamento dinâmico de vigas sanduíche com núcleo colmeia preenchida por elastômero magneto reológico, e ele faz um comparativo com os resultados obtidos durante a tese de doutorado do professor Felipe Eloy. Modificações na estrutura do núcleo e mudanças na composição do elastômero, que passou a ter um composto aditivo junto ao silicone e pó ferromagnético, são os grandes diferenciais dos dois estudos e, portanto, justifica-se a pesquisa aprofundado do tema.

Já foi observado em estudos anteriores, como o da tese de doutorado do professor orientador da pesquisa, que a inserção do pó ferromagnético no silicone mostrou-se eficiente na resposta do comportamento dinâmico da viga sanduíche a partir de 60% de constituição em massa. A tese, no entanto, estudava a viga com núcleos reticulados quadrados fabricado em impressão 3D, com ABS e PLA, enquanto esta pesquisa objetiva o estudo do comportamento da viga com um núcleo honeycomb Nomex® comercial (de aramida).

Para tanto, estudou-se a influência de quatro (04) compostos aditivos, que foram adicionados separadamente junto ao silicone e pó ferromagnético, a fim de aumentar a massa específica e a viscosidade do composto, para tentar homogeneizar a distribuição das partículas ferríticas em função da espessura do núcleo. A saber, foram utilizados: sílica, mica muscovita em pó, pó kynar e tixosil-333, compostos sugeridos pela professora Regina Celia Reis Nunes (UFRJ).

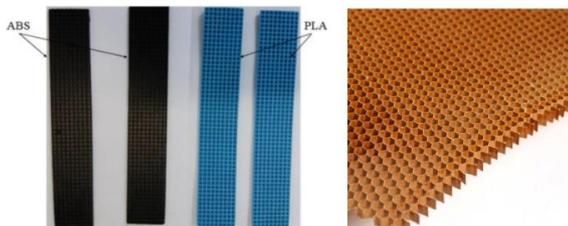


Figura 1 – Núcleos reticulados quadrados de ABS e PLA (esquerda) x Núcleo honeycomb Nomex® comercial (direita)

Além disso, o estudo do efeito da temperatura também se mostra bastante importante na pesquisa, pois demonstra a variação do comportamento dinâmico da viga sob diversas faixas de temperatura, o que é interessante se formos analisar um componente aeronáutico que é constituído por uma viga sanduíche, uma vez que uma aeronave está submetida à diversas temperaturas externas à fuselagem de acordo com a etapa de voo.

Outrossim, é necessário ressaltar a importância da análise microscópica no estudo como um todo. Durante a tese de doutorado do professor, percebeu-se um acúmulo visual bastante significativo de partículas de ferro em um dos lados do núcleo, devido a, sobretudo, dois fatores. O primeiro diz respeito à massa específica, uma vez que a do ferro é muito maior do que o silicone ($7,86\text{g/cm}^3$ e $1,44\text{g/cm}^3$, respectivamente). O segundo diz respeito ao processo de fabricação do elastômero: misturou-se silicone e endurecedor (nas proporções recomendadas pelo fabricante - Redelease®), e inseriu-se o correspondente a 60% em massa de pó ferromagnético. Ao colocar o elastômero a ser curado no núcleo, este manteve-se imóvel sob uma bancada, à temperatura ambiente, favorecendo a deposição do ferro devido à ação da gravidade.

Por fim, é importante citar a relevância da análise estatística no estudo, uma vez que os histogramas irão demonstrar a eficácia da adição dos aditivos nos compostos e irão indicar qual aditivo faz com que o pó ferromagnético fica mais bem distribuído ao longo da espessura da amostra. A análise desse resultado, junto com a análise reológica das amostras são de suma importância para a escolha do melhor aditivo para o composto, objetivo principal desta pesquisa.

Metodologia

O primeiro passo do estudo é análise reológica das amostras cilíndricas (diâmetro 20mm e espessura 1,6mm), produzidas no Laboratório de Processamentos II do NTC – Núcleo de Tecnologia em Compósitos – da Universidade Federal de Itajubá. Elas foram feitas à base de silicone (100:3) e, em cima do compósito feito, foram adicionados mais 3% em massa de compostos “aditivos”

– foram utilizadas Mica, Sílica, Pó Kynar e Tixosil-333. O pó ferromagnético (PFM) foi adicionado a fim de corresponder a 60% em massa do composto final, para que os resultados obtidos sejam significativos na análise dinâmica em vibrações, conforme sugestão obtida por experiências anteriores do professor orientador, Felipe de Souza Eloy. A ideia de se adicionarem os aditivos junto ao silicone é de aumentar a massa específica do composto (conforme Tabela 1), dificultando a deposição heterogênea do pó ferromagnético no fundo do molde. Assim, as amostras foram deixadas em cima da bancada do laboratório, à temperatura ambiente para que o processo de cura fosse realizado da forma mais natural e aleatória possível (elastômero isotrópico), a fim de que não houvesse interferência no direcionamento e deposição do PFM em relação ao corpo de prova produzido.



Figura 2 – Processo de fabricação das amostras

Depois de curadas, as amostras foram submetidas a uma análise em um reômetro ANTON PAAR PHYSICA MCR-301 equipado com uma cela magnética MRD-180/1T (Physica Anton Paar, Alemanha), capaz de aplicar um campo magnético em seu interior, permitindo a variação de 0 a 5A de corrente, que correspondeu a uma variação no campo magnético de 0,05 a 600 kA/m. O princípio do ensaio é gerar um esforço cisalhante na superfície superior do corpo de prova para a obtenção das propriedades desejadas (e por isso a importância de a amostra estar com uma distribuição homogênea do pó ferromagnético). Vale ressaltar que todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente de 25°C.



Figura 3 – Reômetro utilizado no ensaio: sem (esquerda) e com (direita) a presença da cela magnética acoplada

Para se analisar a influência da deposição heterogênea do pó de ferro magnético sobre os parâmetros obtidos, foi-se necessária a visualização microscópica das amostras utilizando o estereoscópio Olympus SZ61, com ampliação de 45x e, posteriormente, foi feita uma análise estatística com o auxílio do software ImageJ e OriginPro, para verificar a influência de cada aditivo à deposição do PFM ao longo da espessura da amostra. Foi possível calcular a distância do centro da esfera de pó ferromagnético em relação ao topo do corpo de prova, para analisar a sua distribuição ao longo da espessura da amostra (1,6mm ou 1600µm). Em cada amostra, com a ampliação de 45x do estereoscópio, foi possível obter dados de 20 a 30 partículas de PFM para cada aditivo.

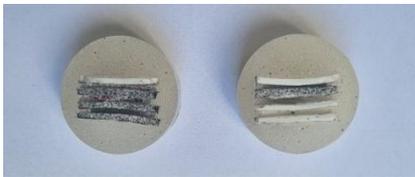


Figura 4 – Amostras depois do embutimento a frio

Para tanto, o corpo de prova foi cortado ao meio com o auxílio de uma régua e um estilete, a fim de tornar o corte o mais perpendicular possível à base da amostra, para que ele estivesse preparado para as próximas fases do processo: o embutimento a frio e preparação metalográfica, procedimentos fundamentais que precedem a análise microscópica em si. O embutimento a frio foi realizado com uma Resina Acrílica e Catalisador (100:62,5) e, após algumas tentativas e melhoramento de procedimentos, a amostra foi preparada com 04 (quatro) corpos de prova de materiais diferentes, devidamente identificados e preparados, estando prontos para a análise no estereoscópio.

Resultados e discussão

Um dos principais resultados obtidos na adição de compostos aditivos na composição final do elastômero foi o aumento da massa específica da borracha, conforme Tabela 1 e, conseqüentemente, melhor distribuição do pó ferromagnético ao decorrer da espessura do corpo de prova, conforme histogramas abaixo.

Tabela 1 – Massas específicas das amostras produzidas

Amostra Produzida	Densidade [g/cm³]
Silicone + PFM	2,6248
Silicone + Sílica + PFM	2,8907
Silicone + Mica + PFM	2,7799
Silicone + Pó Kynar + PFM	2,8183

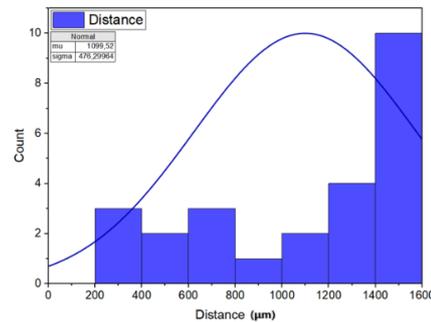


Figura 5 – Histograma da distribuição de PFM ao longo da espessura da amostra sem aditivos

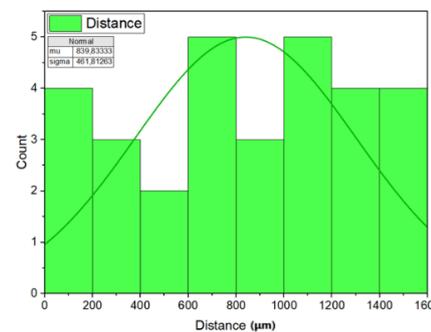


Figura 6 – Histograma da distribuição de PFM ao longo da espessura da amostra com sílica

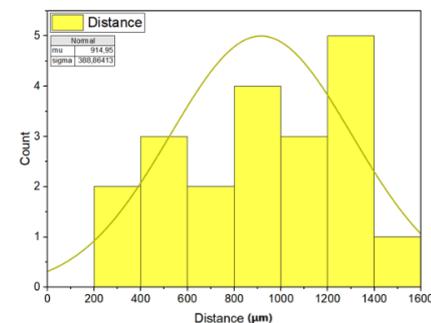


Figura 7 – Histograma da distribuição de PFM ao longo da espessura da amostra com mica

Além disso, estudou-se o comportamento reológico das amostras, onde foram estudados 04 (quatro) pontos de interesse (γ : 0,01% - 0,10% - 0,39% - 1,00%), todos eles dentro do regime elástico do material, cujo comportamento é relativamente previsível. Assim, valores médios de G' e G'' foram calculados para todos os parâmetros encontrados no regime elástico para 134, 269, 399, 514 e 600 kA/m, e foram comparados com os valores encontrados para 0,05 kA/m (referência). A diferença com relação à referência, em porcentagem, foi comparada entre todos os materiais e, aquele que mais apresentou variação, é aquele mais recomendado para a utilização, sob as condições impostas pelo ensaio.

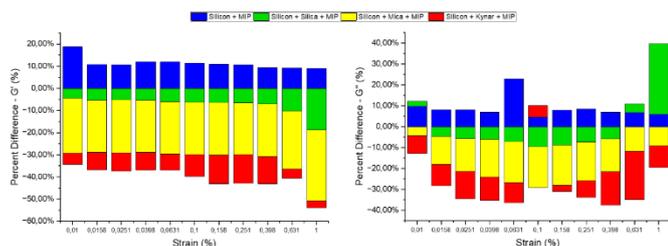


Figura 8 – Diferença Percentual em G' e G'' no regime elástico das amostras em 134 kA/m

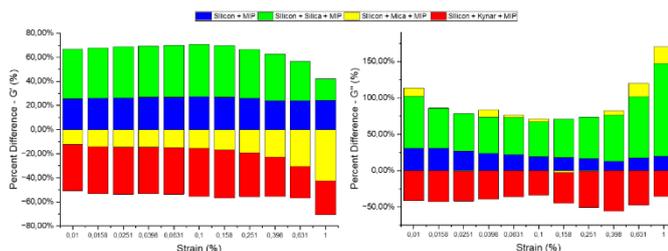


Figura 9 – Diferença Percentual em G' e G'' no regime elástico das amostras em 269 kA/m

Conclusões

A análise microscópica das amostras a partir do estereoscópio, foi um ponto fundamental no estudo, juntamente com a análise estatística de tal. Isso permitiu com que uma visualização gráfica com dados factuais fosse possível, analisando, de fato, a real influência dos aditivos na distribuição das partículas ferromagnéticas. Assim, é notável de se perceber que a amostra sem aditivo, isto é, com composição apenas silicone e pó ferromagnético, apresenta uma distribuição de PFM extremamente desigual e concentrada no fundo da amostra, o que justifica a inserção dos compostos aditivos para tentar se evitar isso. Com a inserção desses, é possível notar que a distribuição se torna mais homogênea e mais bem distribuída, tendo destaque para a amostra com sílica, por apresentar uma distância média mais próxima do centro da espessura (aproximadamente $800\mu\text{m}$), com maior desvio padrão, o que significa uma distribuição mais abrangente ao longo dela.

Visando a aplicação aeronáutica, um composto com menor densidade seria o ideal, afinal, a redução de peso sempre é bem-vinda em qualquer ramo da engenharia. Pensando assim, a amostra com mica seria a preferível, por possuir a menor densidade, conforme Tabela 1 ($\rho = 2,7799 \text{ g/cm}^3$). Essa escolha vai ao encontro da análise reológica realizada, uma vez que o elastômero com mica mais teve suas propriedades alteradas com a aplicação de campo magnético até 134 kA/m, conforme Figura 8 que é o limite do campo possível de ser aplicado nos ensaios dinâmicos no Laboratório de Vibrações da UNIFEI.

No entanto, caso o campo magnético de aplicação fosse superior a esse limite, a escolha do composto com sílica

seria o ideal, uma vez que, reológica e microscopicamente o composto se mostra ideal para os objetivos a serem alcançados, apesar dele, dentre os aditivos analisados e estudados, apresentar a maior densidade ($\rho = 2,8907 \text{ g/cm}^3$), o que pode aumentar ligeiramente a massa do projeto.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Itajubá, essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação e por tudo o que aprendi ao longo dos anos de curso, que me ajudaram a realizar a pesquisa da melhor forma possível, proporcionando uma excelente infraestrutura para que o estudo fosse realizado. Ao CNPq que financiou esse estudo.

Referências

- CHOI, W. J. **Dynamic Analysis of Magnetorheological Elastomer Configured Sandwich Structures**. 212 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – University of Southampton, 2009
- 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 behaviour of magnetorheological materials**. *Smart Mater. Struct.* 5, 1996.
- LI, Wang et al. **Development of an anti-vibration aircraft model support system with magnetorheological anular squeeze dampers for wind tunnel**. China, 2023.
- NAMBUDIRY, M. P. V. **Tailoring Magnetic, Mechanical and Dielectric Properties of Magnetorheological Elastomers Based on Natural Rubber and Iron by Magnetic Field Assisted Curing for Possible Applications**. 180 f. Ph.D. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Physics, Cochin University of Science & Technology, India, 2015.
- 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.
- YILDRIM, Mert; CANDAN, Zeki. **Smart Materials: The next Generation in Science and engineering**. Istanbul, 2023.