ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM REFORÇOS NATURAIS E SINTÉTICOS

Cauã S. de Andrade, Kelvin M. K. Iwasaki, Felipe R. Fuga, Ricardo De Medeiros

INTRODUÇÃO

O uso de materiais compósitos reforçados com fibras tem aumentado em aplicações estruturais devido à elevada relação entre propriedades mecânicas e massa específica (Mallick, 2007). Nesse contexto, os compósitos reforçados com fibras de carbono são amplamente utilizados em setores como o aeronáutico, automotivo e de energia devido à sua elevada rigidez e resistência mecânica. Entretanto, a incorporação de fibras naturais em estruturas compósitas tem sido investigada como alternativa para reduzir o consumo de materiais sintéticos e ampliar a utilização de matérias-primas de origem renovável. Entre essas fibras, o linho apresenta baixa densidade e propriedades mecânicas que permitem sua aplicação em laminados estruturais (Gomez-Campos *et al.*, 2021). Contudo, quando utilizado como único reforço, seu desempenho sob impacto é inferior ao observado em compósitos de fibra de carbono (Sarasini *et al.*, 2016; Wang, Wang, Xian, 2020; Del Bianco *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2025).

Uma estratégia para combinar as características desses materiais consiste na fabricação de compósitos híbridos, nos quais fibras naturais e sintéticas são dispostas em uma mesma arquitetura laminada. A presença simultânea desses reforços pode influenciar a dissipação de energia e os mecanismos de dano desenvolvidos durante eventos de impacto. Em estruturas compósitas, impactos de baixa velocidade podem gerar danos internos capazes de afetar o desempenho mecânico do material, tornando necessária a avaliação da resposta dos laminados sob esse tipo de carregamento. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de compósitos híbridos epóxi de linho-carbono (*Flax-Carbon Epoxy Composites* - FCEC) submetidos a impactos de baixa velocidade, investigando a influência das camadas internas de linho na dissipação de energia e na resposta dos laminados para energias de impacto de 10 J e 20 J.

DESENVOLVIMENTO

Os laminados de fibra de carbono, fibra de linho e híbridos linho-carbono (*Flax-Carbon Epoxy Composites* - FCEC) foram fabricados utilizando resina epóxi AR720 e endurecedor AH723 por meio do processo de moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* - VARTM). Foi adotada uma fração volumétrica média de fibras de 45% e uma proporção de 31% de endurecedor em relação à massa da resina. As configurações avaliadas consistiram em: um laminado de fibra de carbono com empilhamento [0°/90°] e 14 camadas; um laminado de fibra de linho com a mesma sequência e 14 camadas; um laminado híbrido com 16 camadas contendo interfases de linho posicionadas entre a 6ª-7ª e 8ª-9ª camadas de carbono; e um laminado híbrido com 18 camadas contendo interfases de linho entre a 4ª-5ª, 6ª-7ª, 8ª-9ª e 10ª-11ª camadas de carbono. Após a fabricação, os laminados foram cortados em corpos de prova com dimensões de 100 × 150 mm para a realização dos ensaios mecânicos.

Os ensaios de impacto de baixa velocidade foram conduzidos de acordo com a norma ASTM D7136/D7136M-20 utilizando uma torre de impacto INSTRON CEAST 9440 equipada com um impactador hemisférico de aço com diâmetro de 16 mm. Para cada configuração foram testados cinco corpos de prova sob energias de impacto de 10 J e 20 J, obtidas por meio do ajuste da altura de queda. Durante os ensaios foram registradas as curvas de força, deslocamento e energia, possibilitando a determinação da energia dissipada durante o evento de impacto. Com o objetivo de comparar laminados com diferentes espessuras, os valores obtidos foram normalizados pela espessura dos

corpos de prova, resultando na razão entre energia dissipada e espessura. A análise dos resultados permitiu avaliar a influência da presença e da distribuição das camadas internas de linho na resposta ao impacto, na capacidade de absorção de energia e nos mecanismos de dano desenvolvidos nos laminados híbridos em comparação aos laminados monolíticos de fibra de carbono e fibra de linho.

RESULTADOS

Os ensaios de impacto de baixa velocidade mostraram que os laminados híbridos FCEC apresentaram comportamento distinto em função da energia aplicada. Para a condição de 10 J, ambas as configurações híbridas exibiram menor energia dissipada por espessura quando comparadas aos laminados monolíticos de fibra de linho e fibra de carbono. Os valores obtidos foram aproximadamente 0,87 J/mm para o $FCEC_2$ e 0,85 J/mm para o $FCEC_4$, enquanto os laminados de carbono e linho apresentaram cerca de 0,98 J/mm e 0,99 J/mm, respectivamente (Figura 1). Além disso, as curvas de impacto indicaram que os laminados híbridos mantiveram resistência à deformação semelhante à observada nos laminados de carbono, sugerindo que a incorporação das camadas internas de linho não comprometeu a rigidez global da estrutura para esse nível de carregamento.

Para a condição de maior energia de impacto, os resultados mostraram um aumento da energia dissipada em todas as configurações avaliadas. O laminado de linho apresentou o maior valor de energia dissipada por espessura, aproximadamente 2,16 J/mm, seguido pelo laminado de carbono com cerca de 1,91 J/mm (Figura 2). As configurações híbridas FCEC_2 e FCEC_4 apresentaram valores próximos entre si, de aproximadamente 1,79 J/mm e 1,77 J/mm, respectivamente. Apesar de permanecerem inferiores ao laminado de linho, os compósitos híbridos apresentaram comportamento semelhante ao do laminado de carbono, indicando que a presença das camadas de linho alterou a forma de dissipação de energia sem modificar a resposta estrutural observada durante o impacto. Os resultados também evidenciam que a distribuição e a quantidade de camadas de linho produziram diferenças reduzidas entre as duas arquiteturas híbridas avaliadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos mostraram que a hibridização entre fibras de carbono e linho influenciou o comportamento dos laminados sob impacto de baixa velocidade. Para a energia de 10 J, os compósitos híbridos apresentaram menor dissipação de energia por espessura em comparação aos laminados monolíticos de linho e carbono, indicando uma resposta com maior recuperação elástica. Para a condição de maior energia de impacto, os laminados híbridos apresentaram valores de energia dissipada próximos aos observados para o laminado de carbono, mantendo comportamento semelhante em termos de resistência à deformação. Além disso, a introdução de camadas internas de linho alterou o processo de dissipação de energia sem provocar reduções na capacidade de absorção de impacto do laminado. Dessa forma, os resultados indicam que os compósitos híbridos linho-carbono constituem uma alternativa para aplicações estruturais em que se busca reduzir a utilização de fibras sintéticas, mantendo desempenho mecânico compatível com os requisitos de carregamentos por impacto de baixa velocidade.

Palavras-chave: compósitos híbridos; fibra de linho; fibra de carbono; impacto de baixa velocidade; energia dissipada.

ANEXOS

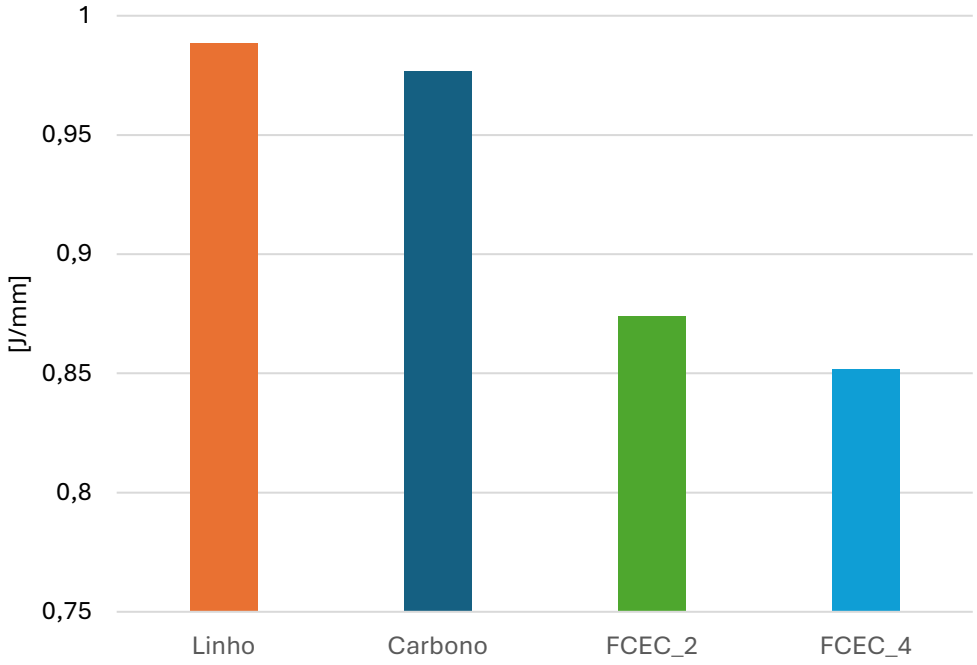


Figura 1. *Energia dissipada por espessura no ensaio de 10 J*

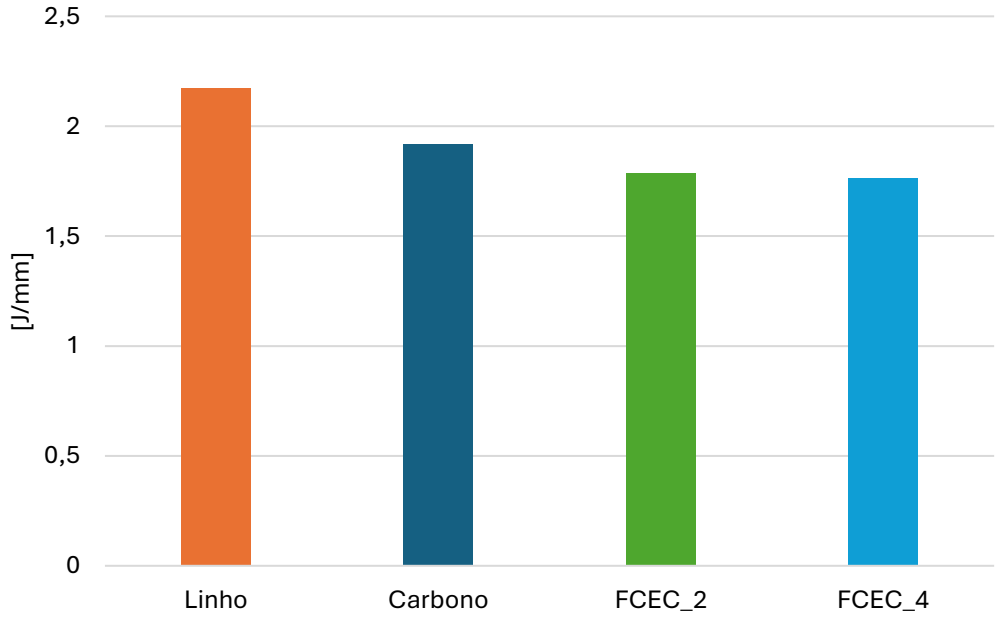


Figura 2. *Energia dissipada por espessura no ensaio de 20 J*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D7136/D7136M-15*: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

DEL BIANCO, G.; GIAMMARIA, V.; CAPRETTI, M.; BORIA, S.; LENCI, S.; CIARDIELLO, R.; CASTORANI, V. Low-velocity impact of carbon, flax, and hybrid composites: performance comparison and numerical modeling. *Composite Structures*, v. 344, p. 118318, 2024.

GOMEZ-CAMPOS, A.; VIALLE, C.; ROUILLY, A.; SABLAYROLLES, C.; HAMELIN, L. Flax fiber for technical textile: a life cycle inventory. *Journal of Cleaner Production*, v. 281, p. 125177, 2021.

LI, Z.; MA, Z.; WANG, C.; GU, Y.; CONG, S.; WANG, J.; WANG, B. Impact resistance and damage mechanisms of CFRP with elastomeric interlayers under low-velocity impacts. *Polymer Composites*, v. 46, n. 12, p. 11572-11584, 2025.

MALLICK, P. K. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. Boca Raton: CRC Press, 2007.

SARASINI, F.; TIRILLÒ, J.; D'ALTILIA, S.; VALENTE, T.; SANTULLI, C.; TOUCHARD, F.; CHOCINSKI-ARNAULT, L.; MELLIER, D.; LAMPANI, L.; GAUDENZI, P. Damage tolerance of carbon/flax hybrid composites subjected to low velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, v. 91, p. 144-153, 2016.

WANG, A.; WANG, X.; XIAN, G. Mechanical, low-velocity impact, and hydrothermal aging properties of flax/carbon hybrid composite plates. *Polymer Testing*, v. 90, p. 106759, 2020.