

Estudo das Propriedades Mecânicas de Compósitos Híbridos Carbono/Kevlar® para Aplicações em Equipamentos de Proteção Individual

Luiz F. P. G. Guidugli, Ariandy Botezini & Erika P. Gonçalves

O desenvolvimento de materiais para a utilização na produção de equipamentos de proteção individual cresce a cada ano, porém muitos estudos deixam lacunas. É sabido que as fibras de carbono têm boas propriedades, porém possuem elevado custo, e que as fibras de kevlar® são utilizadas na blindagem veicular. A obtenção de um compósito híbrido kevlar®/carbono é o objeto deste trabalho, onde será avaliado por microscopia eletrônica de varredura a qualidade das peças e as propriedades mecânicas finais dos compósitos híbridos. Observou-se que a adição das fibras de carbono aumenta significativamente a rigidez do material sem influenciar tão significativamente na resistência mecânica final.

Palavras-chave: *híbrido; laminação; kevlar®; carbono.*

The development of materials for use in the production of personal protective equipment grows every year, but many studies still need to fill the gap. It is known that carbon fibers have good properties but are expensive and that Kevlar® fibers are used in vehicle armor. Obtaining a Kevlar®/carbon hybrid compound is the object of this work, where the quality of the parts and the final mechanical properties of the hybrid compounds will be evaluated using scanning electron microscopy. Note that the addition of carbon fibers significantly increases the stiffness of the material without significantly affecting the final mechanical strength.

Keywords: *hybrid; lamination; kevlar®; carbon.*

Introdução

Com o crescimento dos investimentos recentes na área militar em âmbito mundial, os equipamentos e acessórios atrelados a esse setor ganham grande destaque, no caso dos capacetes de proteção com movimentações superiores aos 10 bilhões de reais por ano no mercado mundial. Durante o voo, o piloto e os passageiros em zonas de risco estão continuamente expostos a diversos perigos, desde estilhaços até impactos diretos de diversos tipos de munições. Deste modo, o Ministério da Defesa, desde 2018, determinou a obrigatoriedade do uso de capacetes balísticos com nível de proteção IIIA ou superior para todos os setores militares brasileiros. Com isso a busca por materiais com propriedades superiores às de materiais convencionais, como aço, poliéster, poliamida e polietileno se torna crucial para o atendimento das normativas. Mazarim e Salerno,¹ demonstraram a possibilidade de substituição do aço por materiais compósitos de fibra de carbono e resina, o que abriu caminho para o desenvolvimento de equipamentos de proteção individual mais leves e eficientes.

Entende-se por material compósito quando as propriedades finais são obtidas a partir da combinação de duas ou mais fases macroestruturais imiscíveis, sendo a de maior resistência mecânica, chamada de reforço e garante a propagação, orientação e a resistência às cargas impostas à estrutura. Os reforços podem ser encontrados nas formas de fibras longas e tecidos, granulados e fibras curtas.² A outra fase é chamada de matriz e tem a função de suporte, dando resistência ao cisalhamento do conjunto, além de aglutinar e manter a posição geométrica dos reforços. Pode ser composta de materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos, porém, compósitos leves são mais comumente encontrados com matrizes poliméricas tanto termofixas quanto termoplásticas. Essas matrizes são atrativas devido ao seu baixo módulo de elasticidade e resistência mecânica adequada.³

Os reforços fibrosos produzidos a partir de aramida, comumente são designados por seu nome comercial, Kevlar®, registrado por sua fabricante DuPont. A descoberta científica, data de 1965 em um dos laboratórios

da DuPont por Stephanie Louise Kwolek, bacharel em química.⁴ De acordo com a Organização Internacional para Padronização (ISO), o termo aramida é uma fibra sintética feita de poliamidas de cadeia longa na qual pelo menos 85% de suas ligações amida estão diretamente ligadas a dois anéis aromáticos, cujo grupo imida é uma amida e podem ser substituídas por até um máximo de 50% do grupo.⁵ Trata-se de uma fibra polimérica que combina a alta tenacidade, alta resistência e baixo peso, tendo seu módulo específico até cinco vezes maior do que do aço. O filamento pode ser usado como matéria-prima para cabos e tecidos flexíveis e confortáveis. Sendo um material versátil, pode ainda ser adicionado a outros materiais para aumentar sua durabilidade. Kevlar® está contido em produtos capazes de resistir à mais ampla gama de ataques, desde estilhaços e facadas até ferimentos a bala. Também capaz de suportar temperaturas e pressões extremas, este material é utilizado em todos os ambientes.⁴

A fibra de carbono possui propriedades únicas e é um objeto de estudo que combina arte, ciência e tecnologia. A pesquisa para melhorar a adesão entre as superfícies, pois é onde ocorre a maioria das falhas estruturais, entre o reforço e a matriz, é um passo importante para a área de materiais compósitos.⁶

As principais vantagens em se utilizar fibras de carbono em materiais compósitos como: alta resistência mecânica específica e alta rigidez específica, elevada resistência a diversos tipos de agentes químicos o que torna promissora para a aplicação em ambientes corrosivos, leve, com peso específico da ordem de 1,6g.cm⁻³ a 1,9g.cm⁻³, cerca de 5 vezes menor do que o do aço.^{7,8,9} A proteção balística passou a incorporar diferentes tipos de materiais, cada um com funções específicas dentro do conjunto. Os tipos mais recentes de equipamentos de proteção são feitos de materiais compósitos, devido à sua alta resistência, rigidez em relação ao peso e resistência a danos.^{10,11,12}

Os capacetes compósitos são modelados em diferentes sequências usando tecidos bidirecionais de Kevlar®, fibras de carbono e fibras de vidro como reforços e uma matriz epóxi.¹³

Compósitos baseados nestes três materiais, todos os anos são realizados estudos balísticos para tentar encontrar materiais compósitos com propriedades mais eficientes para diferentes usos neste setor. Entretanto, o alto custo dos materiais, diferentes tipos de munição, dificuldade de aquisição tornam esse tipo de pesquisa de alta complexidade, os diversos estudos acabam por deixarem grandes lacunas em seus resultados. Neste contexto o presente trabalho apresenta o comportamento mecânico em tração de diferentes composições de compósitos híbridos de carbono/Kevlar®.

Materiais e Métodos

Os laminados foram confeccionados utilizando-se tecido de carbono 3k, tecido de Kevlar® K29, ambos com trama twill, resina Epóxi 2001 e endurecedor 3154 (Redelease). As laminações das diferentes composições, Tabela 01, dos compósitos foram realizadas manualmente o auxílio de um pincel e rolo sobre um aparato metálico recoberto com desmoldantes. A orientação dos tecidos de fibras foi mantida 0°/45°. Os conjuntos foram levados para a cura em bolsa de vácuo por 24 horas sob pressão negativa.

Tabela 1. Composições dos compósitos estudados.

Amostra	Composição
K	100 % kevlar®
KC7	10 camadas kevlar + 7camadas carbono
KC10	10 camadas kevlar + 10 camadas carbono

Após a cura da resina, os corpos de prova foram cortados obedecendo a orientação de laminação, de acordo com a norma ASTM-D5035-11, com dimensões de 2,5 cm de largura por 15 cm de comprimento. Cada lote foi submetido a ensaios mecânicos realizados em máquina universal de ensaios Instron modelo 5900-5594 seguindo o protocolo previsto na norma ASTM-D5035-11.

Resultados e Discussão

A obtenção dos corpos de prova foi pela laminação manual e cura em bolsa de vácuo mostrou-se satisfatória, visto que as peças se apresentaram sem delaminações macroestruturais visíveis. Porém, após os ensaios mecânicos, foram observadas delaminações entre as camadas de Kevlar® e na região interfacial Kevlar®/carbono em praticamente todas as amostras, enquanto as camadas de carbono não apresentaram quaisquer sinais de delaminação. Essa delaminação pode indicar possíveis falhas no processo de laminação das camadas de Kevlar® ou baixa compatibilidade da resina escolhida com a superfície dos tecidos de Kevlar®. Investigação realizada por análise microscópica das interfaces do compósito híbrido, mostra detalhadamente regiões com falha na impregnação de resina nas microfibras, o que indica falha no processo de fabricação. A Figura 01 mostra indicado pelas setas amarelas as interfaces das fibras com ausência de resina. Imagem (a) observa-se a interface entre as fibras de carbono e fibras de Kevlar®, já a imagem (b) mostra a baixa adesão entre as camadas de Kevlar®.

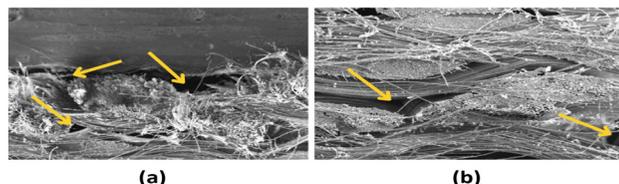


Figura 1. Detalhe das regiões que indicam falha na impregnação dos laminados.

Ao analisar individualmente os grupos amostrais, fica clara a distinção entre os materiais carbono e Kevlar®, mesmo em ampliações menores. Na Figura 02, é possível observar as regiões compostas por carbono e kevlar, onde nota-se a maior densificação da região carbonosa.

É fundamental destacar que a matriz do compósito desempenha um papel tão crucial quanto os reforços. A resina epóxi presente no compósito tem a função de transmitir a carga adequadamente. Portanto, observou-se que regiões com baixa adesão de resina ou ausência dela estão associadas a resultados menos satisfatórios

nos testes de tração. A Figura 03 ilustra essas regiões, mostrando uma área em que a resina apresentou bom preenchimento e adesão mesmo após os ensaios mecânicos, contrastando com outra região que exibe resíduos de resina nos filamentos e, ainda assim, uma lacuna na mesma área.

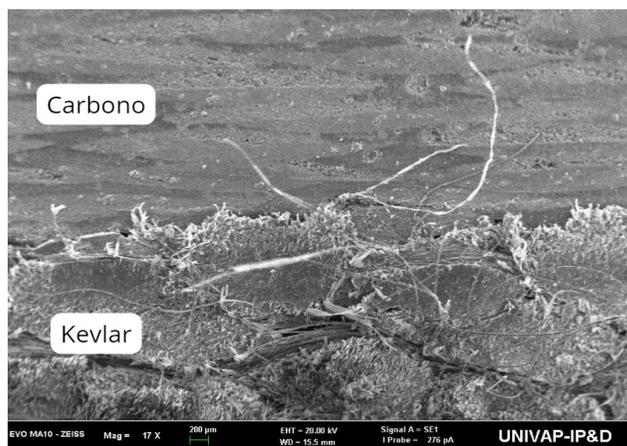


Figura 2. Micrografia de corte transversal do compósito com 10 camadas de carbono após tração.

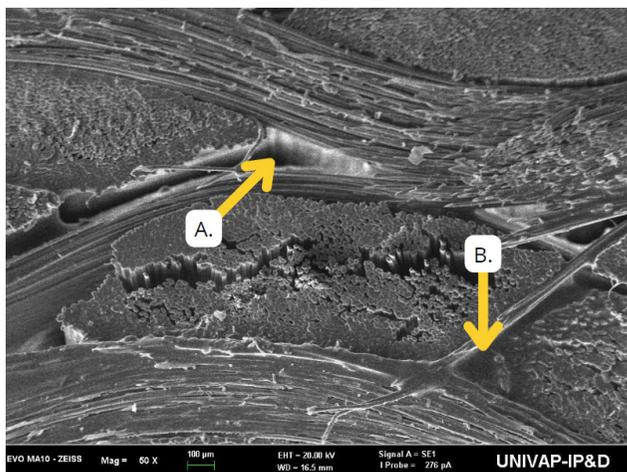


Figura 3. A. Região de arrancamento de resina. B. Região de alta adesão da resina.

Todavia, os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, mostram-se satisfatórios, uma vez que se observa uma tendência no aumento da rigidez do compósito à medida

que camadas de carbono são adicionadas ao híbrido fabricado. Devido ao comportamento não-linear e ortogonal na curva de elasticidade do material estudado não foi possível verificar relação clara de proporcionalidade entre a elasticidade e a tensão analisada nas amostras.¹⁴

A Figura 04 mostra as médias dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos realizados. Observa-se que o compósito de dez camadas de carbono apresentou uma média de tensão das amostras numericamente similar à das amostras de sete camadas, porém ambos apresentam acréscimo de aproximadamente 44 % quando comparado aos corpos de prova de controle fabricados somente com tecidos de kevlar®.

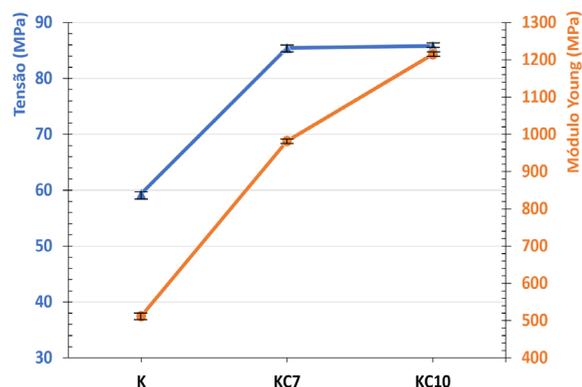


Figura 4. Resultados obtidos por ensaios de Tração nos compósitos K, KC7 e KC10.

Entretanto a média de seu módulo de *Young* sofreu um acréscimo de aproximadamente 90% com a introdução de 7 camadas de carbono no compósito e acréscimo da ordem de 140% quando adicionadas 10 camadas de carbono na estrutura do laminado híbrido. Este aumento na rigidez do compósito era esperado uma vez que a rigidez específica das fibras de carbono é superior quando comparada à rigidez específica das fibras de kevlar®.^{4,7}

Conclusão

O estudo mostrou que a adição de fibras de carbono na composição de materiais compósitos híbridos aumenta tanto a resistência mecânica quanto a rigidez do material, sendo mais preponderante no aumento da rigidez, uma vez que

o acréscimo de 3 camadas adicionais de carbono (KC10) não acarretaram aumentos significativos na resistência à tração do compósito híbrido enquanto que observou-se aumento aproximado de 25% na rigidez do material. Deste modo, a inserção de fibras de carbono na composição de compósitos híbridos para aplicações em equipamentos de proteção individual são úteis e devem ser norteadas com base na propriedade mecânica de interesse. Sugere-se para aumento na rigidez a adição de maior número de camadas de carbono enquanto se o aumento da resistência mecânica é o foco principal do desenvolvimento, indica-se que a aplicação de menor quantidade de camadas de carbono seja o suficiente. Estas medidas de análise prévia da necessidade para a aplicação trazem melhor controle de custos na produção de equipamentos de proteção individual.

Referências

1. MAZARIM, G. C.; SALERNO, G. Viabilidade econômica da implantação de microcentral hidrelétrica. In: Anais do XIX Congresso Brasileiro de Energia. Florianópolis. Anais eletrônicos. Disponível em: <http://ocs.ifsp.edu.br/index.php/conict/xiconict/paper/viewFile/6866/2176>. **2018**.
2. MORALES, E. Polímeros/Fibra de Carbono: Propriedades Mecânicas, Químicas, Processo de Fabricação e as Dificuldades de Aplicação em Larga Escala. Disponível em: https://www.academia.edu/34578599/Polímeros_Fibra_de_Carbono_Propriedades_mecânicas_químicas_processo_de_fabricação_e_as_dificuldades_de_aplicação_em_larga_escala. **2017**.
3. PERUCHI, S. P. G. Homologação do Capacete EPH (Esra Protective Helmet), São José dos Campos, SP, Brasil. **2019**.
4. SAVIGNANO, V. Da ideia à inovação: Kevlar®, a força de uma descoberta científica. Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais. Recuperado de <https://www.sbpmat.org.br/pt/da-ideia-a-inovacao-kevlar-a-forca-de-uma-descoberta-cientifica/>. **2020**.
5. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 2076:2021 Textiles - Man-made fibres - Generic names. 7th ed. Geneva: ISO, **2021**.
6. BÁRBARA SILVA. Uso de compósitos poliméricos em aplicações estruturais. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12208/1/LD_COEMA_2018_1_01.pdf. **2019**.
7. BATISTA, J. T. M.; SILVA, V. A.; REZENDE, E. C. L.; MONTEIRO, E. C. B. Reforço com compósito de fibras de carbono: alternativa moderna no cotidiano das obras. In: Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas, Recife. Anais eletrônicos... Recife: Associação Brasileira de Patologia das Construções, **2017**. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/download/arquivos/41b07dcbf630505eab13b0ca001ad7ea.pdf>. **2017**.
8. SAITO, Naoto et al. Application of carbon fibers to biomaterials: A new era of nano-level control of carbon fibers after 30-years of development. Chem. Soc. Rev., **2011**.
9. LEVY NETO, Flaminio; Pardini, Luiz Claudio. Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia. São Paulo, SP: Edgard Blücher, **2006**.
10. NAYAK, N.; Banerjee, A.; Sivaraman, P. Ballistic impact response of ceramic-faced aramid laminated composites against 7.62 mm armour piercing projectiles. Defence Science Journal, v. 63, n. 3, p. 259-264, **2013**.
11. ZHANG, D.; Sun, Y.; Chen, L.; Zhang, S.; Pan, N. Influence of fabric structure and thickness on the ballistic impact behavior of Ultrahigh molecular weight polyethylene composite laminate. Materials & Design, v. 54, p. 315-322, **2014**.
12. NAIK, S. Recent advances in aramid fiber-reinforced polymer composites. Materials Today Communications, 25, 101571. doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101571. **2020**.
13. STEPHEN, C., Schoeppner, G. A., & Sanborn, G. Fiber-reinforced polymer composites for civil infrastructure: A review. Materials Today Communications, 33, 101263. doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.101263; **2022**.
14. SINGHA T J, Samanta S. Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review. Research Scholar, Department of Mechanical Engineering, NERIST, Nirjuli-791109, Arunachal Pradesh, India, **2015**.

Luiz F. P. G. Guidugli, Ariandy Botezini & Erika P. Gonçalves*

Laboratório de Tecnologia em Híbridos e Compósitos, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Av. Shishima Hifumi, nº2911, CEP 12244-000, Brasil.

*E-mail: erika@univap.br