

15º Congresso Brasileiro de Polímeros
27 a 31 de outubro de 2019

PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS ESPESSOS ARAMIDA/EPÓXI POR INFUSÃO A VÁCUO E DESEMPENHO SOB IMPACTO

Stephanie, G. Nunes¹, Andrea Manes² and Sandro C. Amico^{1*}

1 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS
stephaniegnunes@hotmail.com, *amico@ufrgs.br

2 - Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering, Milan, Itália
andrea.manes@polimi.it

Resumo: Compósitos poliméricos reforçados por fibras se destacam em aplicações que requerem resistência ao impacto, originando sistemas de proteção potencialmente mais leves e de elevado desempenho. Um dos reforços mais utilizados nesses casos é a fibra de aramida, que oferece uma excelente absorção de energia e uma elevada relação resistência/peso e módulo. O processamento de compósitos para aplicações de impacto, principalmente a alta velocidade, normalmente ocorre a partir de pré-impregnados moldados por compressão ou em autoclaves, que permitem elevadas pressões (20-200 bar) e resultam em estruturas de alto desempenho, que não são em geral possíveis de se obter por outros processos, devido ao elevado teor de fibra. No entanto, tais combinações de matéria-prima e técnica de processamento acarretam em elevado custo. Neste contexto, a infusão a vácuo torna-se uma opção atrativa, pois permite a obtenção de peças grandes e complexas, dimensionalmente acuradas e integradas, a partir de matérias-primas de menor custo, que podem ser armazenadas à temperatura ambiente por um maior período de tempo, comparadas aos pré-impregnados. De fato, encontra-se na literatura que a infusão a vácuo já foi empregada para processar compósitos de aramida, no entanto, esses compósitos são geralmente de espessura e teor de fibra limitados devido à baixa pressão (máxima de 1 bar) e à permeabilidade muito baixa dos tecidos normalmente utilizados, favorecendo o aumento do teor de vazios. Neste contexto, esta apresentação abordará a infusão a vácuo de compósitos espessos de aramida/epóxi e seu desempenho em aplicações que requeiram solicitações de impacto. Compósitos com até 28 camadas de tecido e fração volumétrica de fibra de 60% foram obtidos e caracterizados utilizando análise por ultrassom C-scan, inspeção por Raios-X, ensaio *short-beam* e de impacto de alta velocidade (9 mm Luger FMJ e 0.357 Magnum FMJ). Sua performance é comparada a de compósitos produzidos por compressão ou em autoclave, investigando a viabilidade da produção de compósitos espessos aramida/epóxi por infusão.

Palavras-chave: laminados espessos, tecidos de aramida, proteção balística, infusão a vácuo.

PROCESSING OF THICK ARAMID/EPOXY COMPOSITES BY VACUUM INFUSION AND PERFORMANCE UNDER IMPACT

Abstract: Fiber-reinforced polymer composites excel in applications requiring impact resistance, resulting in potentially lighter, high performance protection systems. One of the most commonly used reinforcements in these cases is aramid fiber, which offers excellent energy absorption and high strength- and modulus-to-weight ratio. Composite processing for impact applications, especially at high speeds, is typically based on prepregs compression molded or autoclaved, which allow for high pressures (20-200 bar) and result in high-performance structures which are not generally feasible by other processes due to the high fiber content. However, such combinations of raw-material and processing technique entail high cost. In this context, vacuum infusion becomes an attractive option since it allows the production of large and complex parts, dimensionally accurate and integrated, from lower cost raw-materials that can be stored at room temperature for a longer period compared to prepregs. Indeed, in the literature, vacuum infusion has already been employed to process aramid composites, however, these composites are generally of limited thickness and fiber content due to the low pressure (maximum 1 bar) and the very low permeability of commonly used fabrics, yielding high void content. In this context, this presentation will address the vacuum infusion of thick aramid/epoxy

composites and their performance in applications based on impact loading. Composites with up to 28 fabric layers and 60% fiber volume fraction were obtained and characterized using C-scan ultrasound analysis, X-ray inspection, and short-beam and high-speed impact testing (9 mm Luger FMJ and 0.357 Magnum FMJ). Their performance is compared to that of composites produced by compression or autoclave molding, investigating the viability of producing thick aramid/epoxy composites by vacuum infusion.

Keywords: Thick laminates, aramid fabrics, ballistic protection, vacuum infusion.

Introdução

Na era moderna, a rápida resposta militar é um fator cada vez mais importante, e mobilidade e velocidade de um veículo blindado são componentes essenciais para a sobrevivência em uma situação de combate [1]. Portanto, novos materiais, estruturas e conceitos de design são necessários para alcançar esse desafio. De acordo com Hogg [2], a solução para obter um veículo blindado com essas características é o uso de uma blindagem que inclua materiais compósitos, a qual reduzirá significativamente o peso do veículo, resistirá à penetração do impacto balístico e absorverá a energia de impacto resultante do choque do projétil no alvo.

Os compósitos poliméricos consistem em uma matriz polimérica comumente reforçada por fibras. Existe uma grande variedade de matrizes de polímeros, reforços e técnicas de fabricação disponíveis, dependendo da aplicação requerida. A fibra de aramida é a mais frequentemente utilizadas para aplicações balísticas, pois é cinco vezes mais forte que o aço em uma proporção peso-peso, oferecendo proteção superior contra a fragmentação e ameaças balísticas na blindagem. Além disso, a fibra de aramida absorve grande quantidade de energia cinética e é inerentemente resistente a chamas, oferecendo boa proteção térmica [3].

O custo das matérias-primas e do processo de fabricação devem ser levados em consideração para a fabricação de compósitos. Esses fatores influenciarão o design, o processo e o produto final. Os métodos de processamento de compósitos poliméricos reforçados com fibra de aramida para aplicações de impacto de maior utilização são a moldagem por compressão ou *autoclave*. Tais processos permitem a obtenção de peças espessas através do uso de altas pressões (20-200 bar) e pré-impregnados como matéria-prima, resultando em estruturas de alto desempenho [4-6]. No entanto, esses processos exigem ferramentas e equipamentos robustos (com alto investimento de capital) e em geral inviabilizam a fabricação de peças grandes, complexas e integradas. Além disso, as matérias-primas (pré-impregnados) são dispendiosas e de armazenamento difícil, com uma vida útil limitada.

Uma técnica de processamento alternativa é a infusão a vácuo (IV), a qual emprega moldes leves e de baixo custo e permite a fabricação de peças grandes, complexas, dimensionalmente acuradas e integradas, com bom acabamento superficial e praticamente sem emissão de voláteis. De acordo com Miracle e Donaldson [7], a IV também atraiu a atenção dos fabricantes de veículos blindados compósitos devido ao seu baixo custo de processamento quando comparado à moldagem por compressão e em autoclave, as quais usam pré-impregnados como matéria-prima, mas produzem laminados com melhor qualidade em comparação à laminação manual. Na literatura, quando se utiliza a IV para processar compósitos reforçados com fibras de aramida, estes são geralmente de espessura e teor de fibra limitado [8-10] devido à baixa pressão aplicada (max. -1 bar) e à permeabilidade muito baixa dos tecidos normalmente utilizados para aplicações de impacto, favorecendo o aumento dos teores de vazios. Desse modo, produzir compósitos com fibras de aramida de alta qualidade, elevada espessura e desempenho por IV é ainda um desafio.

Neste contexto, este estudo explora a utilização da infusão a vácuo para obter compósitos aramida/epóxi com variadas espessuras (2,5 a 14,5 mm) e sua caracterização por inspeção acústica (ultrassom C-scan), ensaios *short-beam* e por impacto balístico com projéteis 9 mm Luger FMJ e 0.357 Magnum FMJ.

Experimental

Para a fabricação dos compósitos, a resina epóxi utilizada foi o AR260 e o endurecedor AH260, do fabricante Barracuda. Essa resina fornece um sistema de cura rápida e sua baixa viscosidade é mais adequada para uso em infusão a vácuo. O tecido de aramida foi do tipo *plain-weave* de 440 g/m², com Kevlar® 29.

Para a realização das moldagens dos compósitos aramida/epóxi de 5 a 28 camadas, os tecidos foram inicialmente secos em estufa a 105 °C por 2 h. Após a secagem, as fibras foram pesadas e depois empilhadas no molde com área previamente demarcada e com desmoldante aplicado, seguido do posicionamento do *peel ply* sobre toda superficial do tecido fibroso e da malha de fluxo em uma pequena área. Após, os tubos espiralados e as mangueiras de entrada e saída foram posicionados, o molde foi fechado com um saco de vácuo e, em seguida, a resina epóxi formulada foi injetada linearmente com uma pressão de vácuo constante de -1 bar. O tempo médio de infusão foi de ≈18 min para todas as placas e, após ≈18 h, as placas foram desmoldadas. Por fim os compósitos foram submetidos a uma pós-cura a 60 °C por 12 h, conforme recomendação do fabricante.

Os laminados foram caracterizados por inspeção ultrasônica por C-scan usando o NDT Systems, modelo Raptor com transdutor de 2,25 MHz (0,5"). Água com sabão líquido foi utilizado para manter o transdutor acoplado na peça durante o movimento. O software RapWin apresenta os resultados como imagens através da atribuição de cores para as perdas de sinal (dB). Radiografias obtidas em equipamento de microtomografia de raios-X 3D de CT-Scan, modelo X25 NSI na Politecnico de Milano/Itália também foram utilizadas para analisar os modos de falha e os danos internos das placas impactadas pelos projéteis.

O ensaio de *short-beam* foi realizado em uma máquina universal de ensaios Instron, modelo 3382, com base na norma ASTM D2344. A relação span:espessura (s:t) utilizada foi de 4:1 e foram ensaiadas uma média de 6 amostras para cada espessura.

Os ensaios balísticos foram realizados no Banco Nazionale di Prova, Itália. Os compósitos de 8 a 23 camadas foram impactados com o projétil 9 mm *Luger* jaquetada (*full metal jacket* - FMJ) de ponta hemisférica com núcleo de chumbo e jaqueta de cobre, massa nominal de 8 g e velocidade nominal de 400 ± 10 m/s, de acordo com a classe FB2 da norma europeia EN 1522, com uma distância de tiro de 5 m. O outro projétil utilizado para impactar os compósitos de 8 a 28 camadas foi o .357 *Magnum* FMJ, com núcleo de chumbo e jaqueta de cobre, massa nominal de 10,2 g e velocidade de 430 ± 10 m/s, de acordo com a classe FB3 da norma europeia EN 1522, com uma distância de tiro de 5 m. As velocidades iniciais e residuais dos projéteis foram medidas por sensores óticos conectados a um sistema de aquisição de dados.

Resultados e Discussão

A Fig. 1 apresenta as imagens C-scan representativas das placas de menor (5C) e maior (28C) espessura. A variação aceitável de atenuação da amplitude da onda ultrasônica ao longo de cada placa indica distribuição em geral homogênea da resina. Mesmo assim, algumas regiões das placas ainda mostram uma atenuação de sinal relativamente grande. Segundo Kas e Kaynak [11], há uma perda de energia (perda de dB) através da espessura das placas, e a magnitude da perda de dB é alterada quando há um defeito, como regiões ricas em resina. As variações nas proporções de matriz/fibra e teor de vazios são comuns quando o processo de IV é usado, especialmente quando o tecido não permite uma fácil permeação, levando a variações locais no teor de fibra.

Ensaio *short-beam* foram realizados nos compósitos, pois essa propriedade é diretamente influenciada pela homogeneidade na distribuição da resina e pelos vazios no laminado. Os valores de resistência *short-beam* para os compósitos 5C a 28C estão apresentados na Tabela 1 e estes são similares até uma espessura referente a 18-23 camadas, mas o compósito 28C apresentou uma redução significativa de resistência *short-beam*, um indicativo de que apresenta um maior teor de vazios [12,13].

A Tabela 1 também apresenta os resultados dos ensaios balísticos, com velocidade residual (V_r) e energia absorvida (E_a) para os compósitos 8C a 28C. Para os compósitos impactados com o

projétil 9 mm Luger, pode-se observar que as placas 18C e 23C não foram perfuradas. Porém, para o impacto balístico com o projétil .357 Magnum FMJ, apenas a placa com 28 camadas de aramida resistiu à perfuração.

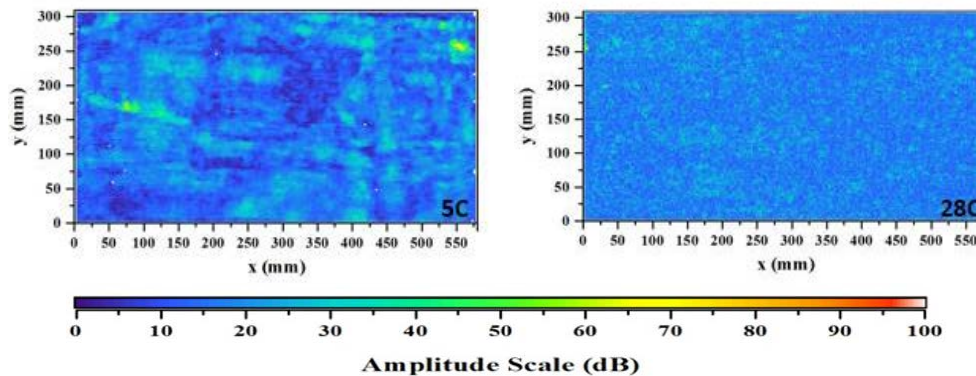


Figura 1. Imagens C-Scan representativas dos compósitos aramida/epóxi (5C e 28C).

Tabela 1. Propriedades dos compósitos aramida/epóxi com 5 a 28 camadas.

Amostras	Espessura (mm)	Resistência short-beam (MPa)	9 mm V _r (m/s)	9 mm E _a (J)	.357 FMJ V _r (m/s)	.357 FMJ E _a (J)
5C	2,7	22,9 ± 2,8	--	--	--	--
8C	4,3	22,2 ± 2,5	370,48	86,96	414,78	101,94
13C	6,9	22,3 ± 1,8	280,17	302,31	373,78	256,54
18C	9,4	23,6 ± 1,4	0	590,39	298,37	510,66
23C	12,0	20,8 ± 1,4	0	600,65	129,99	957,88
28C	14,6	17,3 ± 2,3	--	--	0	889,71

A Fig. 2 apresenta a vista em corte transversal das amostras compósitos e a Fig. 3 a radiografia do dano nos compósitos 23C e 28C após impacto pelos projéteis 9 mm e .357, respectivamente. Na Fig. 2(a)-(b), é possível observar que o projétil não perfurou os compósitos, sendo retido dentro da placa, com absorção/dispersão eficiente das ondas de energia geradas pelo impacto do projétil através da espessura da placa. A delaminação que ocorreu entre as interfaces das camadas alcançou extensão de aproximadamente 115 mm e 160 mm, respectivamente, contribuindo significativamente na absorção da energia de impacto. Também é possível observar que o projétil não penetrou nas camadas finais, indicando que o número de camadas poderia ser um pouco reduzido para a otimização do projeto da proteção. Também foi possível observar outros mecanismos de dano, como quebra de fibras e matriz.

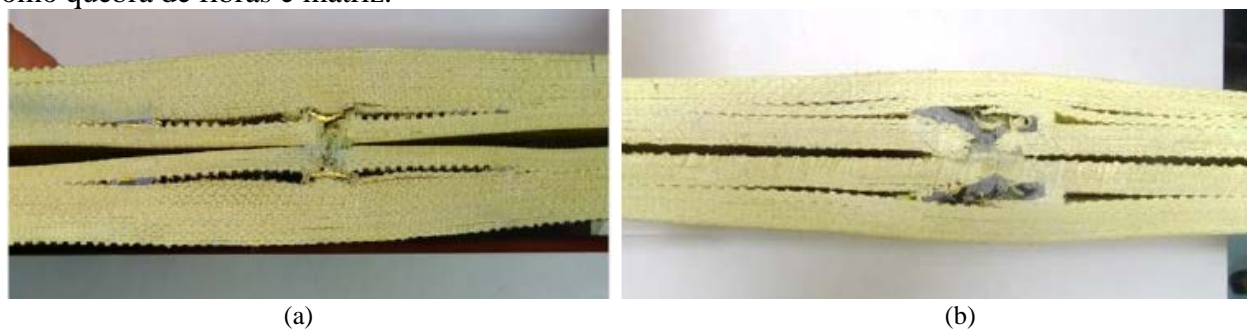


Figura 2. Seção transversal dos compósitos 23C (a) e 28C (b) após impacto pelos projéteis 9 mm e .357, respectivamente.

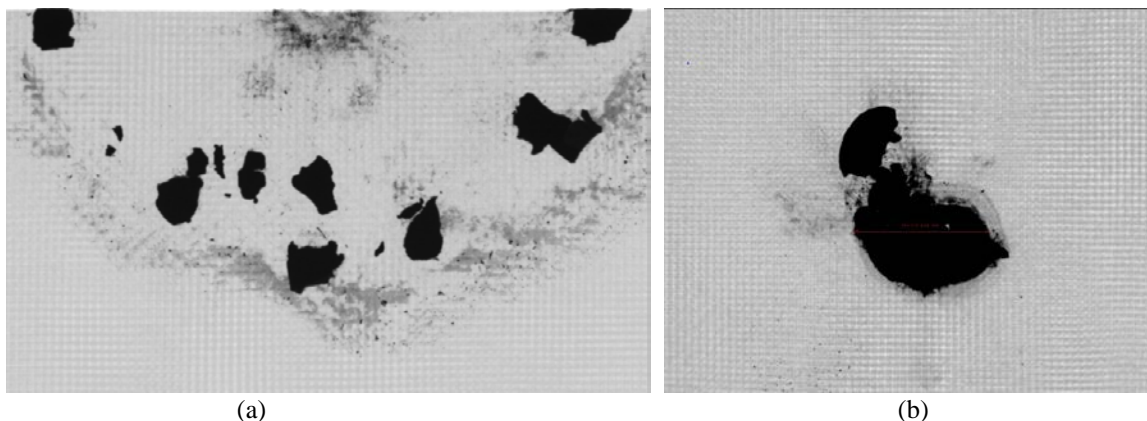


Figura 3. Radiografia dos danos nos compósitos 23C (a) e 28C (b) após impacto pelos projéteis 9 mm e .357, respectivamente (vista superior).

Conclusões

Apesar do processo de infusão a vácuo de compósito polimérico reforçado com fibra de aramida para aplicação balística ser raramente utilizado, uma vez que é comumente moldado por compressão e autoclave a pressões elevadas, através dos parâmetros de processo utilizados nesta pesquisa, tais como uso do promotor de fluxo, pressão de vácuo, resina adequada, temperatura ambiente e pressão de compactação, foi possível obter compósitos espessos (de até 14,5 mm de espessura) com boa homogeneidade na distribuição de resina ao longo do reforço, como atestado por imagens de ultrassom C-scan e pelos bons resultados de resistência *short-beam*.

De acordo com a norma europeia EN 1522, os compósitos impactados com o projétil 9 mm *Luger* FMJ a partir de 18 camadas se classificam como nível FB2 e os compósitos a partir de 28 camadas impactados pelo projétil .357 Magnum FMJ como nível FB3. Portanto, processamento por infusão a vácuo para a produção de compósitos espessos de aramida/epóxi foi considerado não apenas viável, mas também um bom substituto para processamentos de maior custo, como autoclave ou compressão.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à DuPont® pelo fornecimento de fibra, à COMPOENDE pelo apoio na inspeção por ultra-som C-scan e ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro.

Referências

1. E. S. C. Chin, *Mater. Sci. Eng. A*. 1999, 259 (2), 155–161.
2. P. J. Hogg, *Proc. Compos. Process.* 2003, 1–11.
3. E. R. B. Kabir; E. N. Ferdous, *Int. J. Text. Sci.* 2013, 1 (6), 78–83.
4. C. Y. Tham; V. B. C. Tan; H. P. Lee, *Int J Impact Eng*, 2008, 35; 304–318.
5. L. Sorrentino; C. Bellini; A. Corrado; W. Polini; R. Aricò. *Procedia Eng*, 2015 88; 255 – 262.
6. S. Kumar; D. S. Gupta; I. Singh; A. Sharma. *J Reinf Plastics and Comp*, 2010, 29 (13); 2048 - 2064.
7. D.B. Miracle; S.L. Donaldson, *ASM Handbook Vol. 21: Composites*. USA, 2001.
8. S. Min; X. Chen; Y. Chai; T. Lowe. *Comp Part B*, 2016, 90; 30-36.
9. R. Yan; X. Chen. *J Industrial Textiles*, 2016, 45 (5); 765 – 779.
10. B. Berk; R. Karakuzu; B. M. Icten; V. Arıkan; Y. Arman, C. Atas; A. Goren. *J Comp Mat*, 2016, 50(25); 3551–3559.
11. K. Zhang; Y. Gu, M. li; Z. Zhang. *Mater. Des.*, 2014, 54, 624–631.
12. C. Toscano; C. Meola; G. M. Carlomagno. *Therm J Comp*, 2013; 1-8, 2013.
13. S. Laurenzi; M. Marchetti. *Composites and Their Properties*, Chapter 10, 197-226, Ed. INTECH, 2012.