

CARACTERIZAÇÃO POR COMPRESSÃO DINÂMICA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS HÍBRIDOS DE LAMINADO DE PEUAPM, TECIDO DE ARAMIDA E FILME DE EVA, MOLDADOS EM AUTOCLAVE

Leandro F. da Silva^{1,4*}, Rafael R. Dias², Camila de P. Raimundo³, Iaci M. Pereira², Sandro C. Amico⁵, Ademir J. Zattera¹

1 – Universidade de Caxias do Sul – UCS, Caxias do Sul – RS - ademirjzattera@gmail.com

2 – Laboratório de Materiais do Centro Tecnológico do Exército – LM/CTEx

3 – Compostos de Segurança – COMTEC

4 – Agrale S/A - lsilva@agrle.com.br

5 – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Resumo: O estudo busca caracterizar em taxa de deformação acima de 10^3 s^{-1} , comportamento dinâmico mecânico em compressão, de compósitos poliméricos híbridos usando barra Hopkinson de compressão bipartida. Foram produzidos compósitos com diferentes proporções do laminado bidirecional de polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM), com empilhamento $0^\circ/180^\circ$, e tecido poliamida aromática (Aramida). Como adesivo para camadas do tecido de aramida, filmes termocolantes de etil-vinil-acetato (EVA) foram usados de forma intercalada. Placas de 500mm x 500mm, com densidade por área $5,30 \pm 0,50 \text{ kg/m}^2$, foram moldadas em autoclave fixando parâmetros de temperatura, pressão e tempo. Para taxa de deformação estudada, os ensaios dinâmicos mostraram que valores de tensão máxima e tenacidade se relacionam com porcentagem de laminado PEUAPM. Os valores de deformação máxima e deformação na tensão máxima, com exceção do compósito 100% tecido de Aramida, são independentes da configuração do material estudado.

Palavras-chave: Barra Hopkinson de compressão bipartida, autoclave, compósitos poliméricos híbridos, polietileno de ultra alto peso molecular, tecido de poliamida aromática.

CHARACTERIZATION BY DYNAMIC COMPRESSION OF HYBRID POLYMER COMPOSITES OF PEUAPM LAMINATE, ARAMIDE FABRIC AND EVA FILM, MOLDED IN AUTOCLAVE

Abstract: The study seeks to characterize the mechanical dynamic compression behavior of hybrid polymer composites by Split Hopkinson Pressure Bar Compression Test at a strain rate above 10^3 s^{-1} . The composites have different proportions of bidirectional ultra-high molecular weight polyethylene laminate (PEUAPM), with $0^\circ/180^\circ$ stacking, and aromatic polyamide fabric (Aramid). As the adhesive for aramid fabric layers, ethyl-vinyl acetate (EVA) heat-shrink films were used intercalated. Panels of 500 mm x 500 mm, with density per area of $5.30 \pm 0.50 \text{ kg/m}^2$, were autoclaved, setting parameters of temperature, pressure and time. For the strain rate studied, the dynamic tests showed that values of maximum stress and modulus of toughness are related to percentage of laminate (PEUAPM). However, values of maximum strain and strain at maximum stress, except for the 100% aramid fabric composite, are independent of the configuration of the studied material.

Keywords: Split Hopkinson Pressure Bar Compression Test, autoclave, hybrid polymer composites, ultra-high molecular weight polyethylene, aromatic polyamide fabric.

Introdução

Ao longo da história da humanidade, a descoberta de novos materiais sempre impulsionou o desenvolvimento tecnológico e cultural da sociedade [1]. No cenário atual, caracterizado pelo crescimento da violência nos grandes centros urbanos, as propostas para a proteção dos agentes de segurança, devem garantir a sua sobrevivência sem comprometer a sua mobilidade [2]. Dessa forma, os materiais empregados em blindagens balísticas devem ser leves e resistentes ao impacto. Porém, além de impedir a penetração dos projéteis, esses materiais devem ser capazes de fragmentar,

absorver e dissipar a sua energia cinética [3]. Os elementos que compõem as soluções balísticas atuais, são compostos pela combinação de materiais com propriedades distintas, pois o uso de um único material, limita a proteção contra os impactos balísticos e a penetração de projéteis. [4]. Por isso, uma das alternativas em estudo, e que atende aos requisitos técnicos necessários para essa classe de produtos de defesa, são os compósitos estruturais leves. Quando comparados a metais e cerâmicas, os compósitos estruturais leves são capazes de ampliar as opções de uso, aliando alta resistência mecânica ao baixo peso estrutural [5]. Os principais materiais usados na confecção de compósitos para proteção balística são os tecidos e não tecidos de fibras de: Aramida e PEUAPM, devido as suas características de baixa densidade e alta tenacidade [6].

Apesar disso, a escolha dos materiais não é única variável importante no design e confecção dos sistemas de proteção balística. O processo de moldagem também tem importante papel na definição das propriedades do produto, minimizando a presença de vazios nas regiões internas do moldado. Por isso, a moldagem em autoclave surge como alternativa capaz de garantir as propriedades desejadas. As autoclaves são vasos de pressão que permitem a aplicação combinada de pressão e temperatura, por determinado período de tempo, reduzindo a formação de vazios no interior dos compósitos moldados e promovendo densificação. Os estudos recentes [7,8], afirmam que compósitos moldados em equipamento de autoclave, apresentam frações de 40 – 50% maiores em volume de fibras do que pelo processo de moldagem manual, que é de 20 – 40%.

Neste contexto, o objetivo é desenvolver compósitos poliméricos híbridos com a densidade por área de $5,30 \pm 0,50 \text{ kg/m}^2$, para estudo das suas propriedades dinâmico-mecânicas quando submetidos a taxa de deformação que simula impacto balístico Nível 3A com munição 9mm FMJ. Dessa forma, para simular o impacto balístico, utilizou-se uma barra Hopkinson de compressão bipartida, em inglês “Split Hopkinson Pressure Bar” (SHPB) [9-10-11]

Experimental

Materiais

No desenvolvimento do presente estudo, foram usados os seguintes materiais: O laminado bidirecional de PEUAPM (DuPont™ Tensylon® 30A) cedido pela DUPONT®, constituído por fitas formadas de fios unidirecionais com cadeias poliméricas alinhadas na configuração cruzada de $0^\circ/90^\circ$ e densidade de 111 g/m^2 . O tecido de Aramida (DuPont™ Kevlar® 3000d K29) cedido pelo DUPONT®, foi confeccionado com fio de Kevlar® 29, no estilo S745GR, com tecelagem plana, espessura de 0,58mm, sem tratamento nas fibras e densidade de 439 g/m^2 . O filme termocolante de etil-vinil-acetato (Elastomelt® 55), composto por blenda de adesivo a quente e resina de EVA foi adquirido no Grupo Elasto. Este filme opaco é indicado para colagem de diversos tecidos e não tecidos, com espessura de 70 microns e densidade de 75 g/m^2 . Antes da moldagem dos compósitos híbridos, os tecidos de Aramida tiveram sua umidade removida em estufa a 105°C por 4 horas, aumentando a resistência interlaminar entre suas camadas.

Confecção das placas

Na montagem dos compósitos puros e híbridos, os laminados de PEUAPM seguiram a configuração de empilhamento $0^\circ/180^\circ$, para não sobrepor as fitas na configuração cruzada de $0^\circ/90^\circ$. Os tecidos de Aramida, com umidade removida, foram empilhados na área central dos compósitos híbridos, sempre na mesma posição. Os filmes de etil-vinil-acetato (EVA), foram empilhados de forma intercalada entre as camadas do tecido de aramida, com objetivo de envolver as fibras de aramida. Para reduzir os vazios e promover a densificação das placas, foi usado chapa de aço plana como molde. As placas de $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ com $6 \text{ mm} + 0,50 \text{ mm}$ de espessura foram moldadas em autoclave na COMTEC. Os parâmetros de moldagem em autoclave dos compósitos poliméricos puros e híbridos foram padronizados para possibilitar comparação. Os mesmos influenciam na propriedade de cisalhamento interlaminar dos compósitos moldados. A Fig. 1 apresenta as etapas e os parâmetros padronizados do processo de moldagem em autoclave usadas neste estudo.

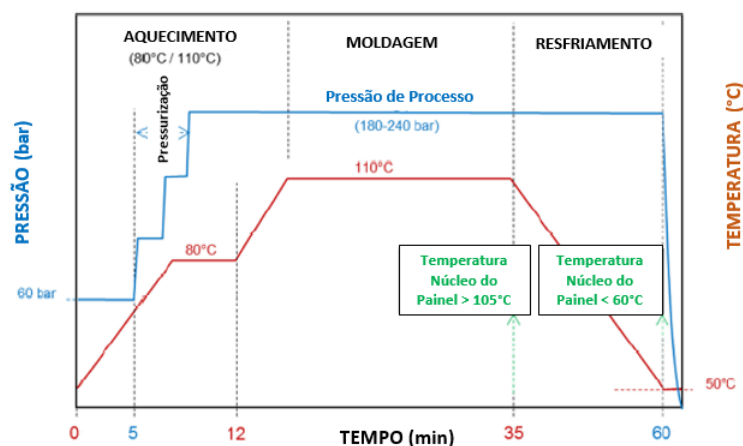


Figura 1 – Ciclo de moldagem por autoclave usado para confecção dos compósitos puros e híbridos.

Foram produzidas placas poliméricas puras e híbridas com 100%, 75%, 50%, 25% e 0% de percentual em peso do laminado de PEUAPM em relação ao peso total das placas puras. Após a moldagem das placas poliméricas em autoclave, as mesmas foram nomeadas, respectivamente, como: PEUAPM, PEUAPM-75, PEUAPM-50, PEUAPM-25 e ARAMIDA. Os corpos de prova com diâmetro de 12 mm utilizados para realizar o ensaio de compressão dinâmico mecânica em barra Hopkinson bipartida, foram confeccionados em processo de corte por jato d'água, pois atendia aos requisitos de precisão dimensional e integridade dos corpos.

Ensaio compressivo dinâmico na SHPB

Os ensaios compressivos dinâmicos das amostras de compósitos balísticos foram realizados em um SHPB fabricado pela empresa Rel Inc®, equipado com o osciloscópio, PicoScope 5000 Series®, da Pico Technology™, e um sistema de amplificação de sinal 2300 System®, da Vishay Micro-Measurements™. Nessa técnica, por meio da amplitude do pulso incidente (ϵ_I), transmitido (ϵ_T) e refletido (ϵ_R) é possível obter a tensão (σ), a deformação (ϵ) e a taxa de deformação ($d\epsilon/dt$) da amostra através das Eq. 1, 2 e 3, respectivamente [9-10-11]:

$$\sigma = \frac{E_b A_b}{A_a} (\epsilon_T) \quad (1)$$

$$\epsilon = -\frac{2C_b}{L_a} \int_0^t (\epsilon_R) \quad (2)$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{2C_b}{L_a} (\epsilon_R) \quad (3)$$

Onde C_b é a velocidade de propagação de ondas mecânicas na barra, A_b e A_a são as áreas das seções transversais da barra e da amostra, E_b é o módulo de Young do material da barra.

No presente estudo, objetiva-se submeter todos os compósitos balísticos a uma mesma taxa de deformação para comparar as propriedades dinâmicas de cada compósito, avaliando o efeito da inserção de tecido de Aramida nas propriedades finais dos compósitos híbridos. Para manter similar a impedância mecânica da amostra e das barras, utilizou-se, para os ensaios, impactador e barras cilíndricas de liga de alumínio 7075-T6. Para esse estudo, o impactador possuiu comprimento de 203,2 mm, as barras incidente e de transmissão possuíam 2 m de comprimento. O impactador, a barra incidente e a barra de transmissão possuíam 19,05 mm de diâmetro. Nesse setup, a velocidade média do impactador foi $13,9 \pm 0,70$ m/s conferindo uma taxa de deformação de $2053 \pm 66,2$ s⁻¹.

Resultados e Discussão

Os corpos de prova (cps) dos compósitos puros e híbridos confeccionados pelo processo de corte por jato d'água são apresentados na Fig. 2. Foram obtidos cps com precisão dimensional de $\pm 0,3$ mm e visível integridade estrutural, exibindo excelente densificação das camadas de empilhamento. A Fig. 2 apresenta a vista superior e o perfil dos corpos de prova para SHPB.

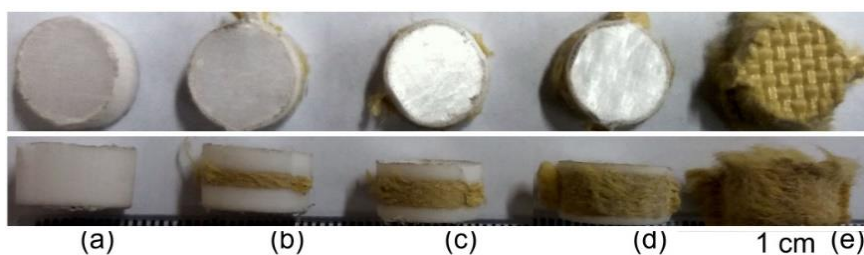


Figura 2 – Corpos de prova (CP's) para SHPB nas diferentes composições descritas de estudo: (a) PEUAPM, (b) PEUAPM-75, (c) PEUAPM-50, (d) PEUAPM-25 e (e) ARAMIDA.

A Fig. 3(a) apresenta gráficos tensão-deformação dos materiais estudados por compressão dinâmica mecânica. A Fig. 3(b) faz zoom na região linear onde $\epsilon < 0.002$. A Tabela 1 resume resultados médios e desvios das propriedades dinâmicas de amostras das 5 variações de estudo: tensão máxima (σ_{max}), tenacidade (U_t), deformação total (ϵ) e deformação na tensão máxima (ϵ_{max}).

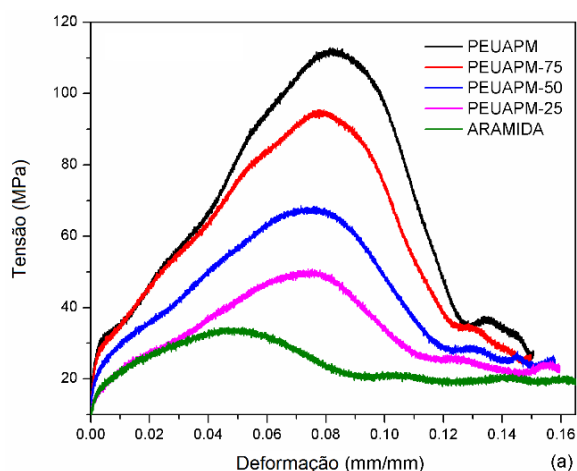


Figura 3 (a) – Gráfico tensão x deformação (SHPB)

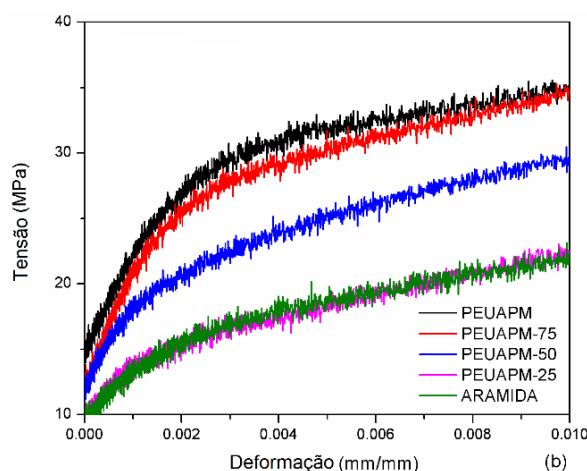


Figura 3(b) – Gráfico tensão x deformação (SHPB) – Zoom na região linear ($\epsilon < 0.002$)

Tabela 1 – Propriedades dinâmico mecânicas obtidas por compressão dos materiais puros e híbridos.

CPs	σ_{max} (MPa)	U_t (J/m ³)	ϵ (mm/mm)	ϵ_{max} (mm/mm)
Aramida	33,97 ± 4,12	3,94 ± 0,46	0,05 ± 0,0001	0,15 ± 0,00
PEUAPM-25%	50,28 ± 6,60	5,22 ± 0,82	0,07 ± 0,0001	0,15 ± 0,01
PEUAPM-50%	68,22 ± 8,35	6,84 ± 1,04	0,07 ± 0,0001	0,16 ± 0,01
PEUAPM-75%	93,33 ± 11,40	8,68 ± 1,04	0,07 ± 0,0001	0,16 ± 0,01
PEUAPM	112,7 ± 7,31	10,22 ± 0,78	0,08 ± 0,010	0,17 ± 0,01

Observa-se que comportamento dinâmico-mecânico do tecido de aramida é distinto, pois reduz valores de σ_{max} e U_t nos compósitos híbridos. Além disso, sua porção linear da curva Tensão vs. Deformação, Fig. 2 (b), é influenciada pela configuração do compósito, onde os módulos de elasticidade são controlados pela concentração do laminado de PEUAPM. Os resultados dos ensaios compressivos dinâmicos na Barra Hopkinson não calculam o módulo de elasticidade dinâmico de maneira precisa, uma vez que, na região linear, a amostra ainda não atingiu o equilíbrio de tensões [10]. A Fig. 4 esclarece correlação entre valores da σ_{max} , U_t e concentração do laminado de PEUAPM.

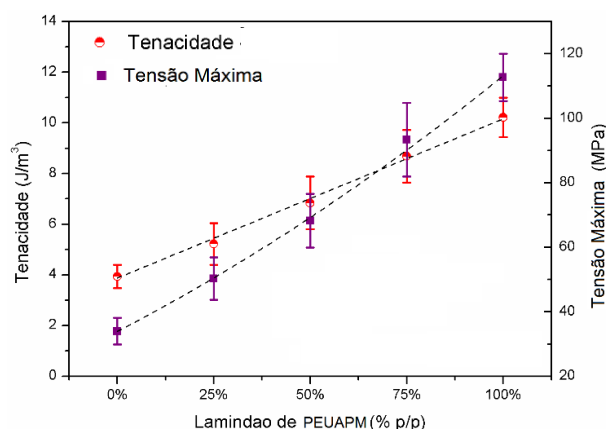


Figura 4 – Correlação entre o teor do laminado de PEUAPM nos compósitos híbridos e a Tensão Máxima ou a Tenacidade obtida nos ensaios de compressão em barra de Hopkinson bipartida.

Podemos perceber, que para taxa de deformação usada, a σ_{max} e U_t são controladas pelo teor do laminado PEUAPM. Entretanto, a ϵ e ϵ_{max} não dependem da configuração do compósito.

Conclusões

Com os resultados obtidos no ensaio de compressão dinâmico mecânica dos compósitos poliméricos em barra Hopkinson bipartida, é possível concluir que valores de tensão máxima e tenacidade são melhores quando o percentual em peso do laminado PEUAPM incorporado ao compósito híbrido é maior. Apoiando hipótese que o tecido de aramida dos compósitos híbridos reduz valores de deformação total e tensão máxima. Portanto, a curva de Tensão x Deformação dos ensaios de compressão em barra de Hopkinson é influenciada pelo teor do laminado PEUAPM nos compósitos híbridos, onde módulo de elasticidade aumenta com o percentual em peso do laminado PEUAPM incorporado.

Agradecimentos

A DUPONT pela doação dos materiais, a COMTEC pela conformação das placas, a AGRALE S/A pelo incentivo a capacitação e a CAPES/UFRGS/UCS pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

1. N. T. Boukouvalas in Anais do 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis, 2001.
2. J. E. D. Ferreira, Dissertação de Mestrado, Instituto Engenharia e Ciências Militares Lisboa, 2015.
3. L. C. da Silva, Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, 2014.
4. A. L. S. Alves; L. F. C. Nascimento; J. C. M. Suarez, Instituto Militar Engenharia. 2004, 105-111.
5. T. Y. Kadobayashi in Anais do 14º Encontro de Pós-Graduação ITA, São José dos Campos, 2008.
6. V. Vivas, Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2015.
7. G. M. Cândido, S. F. M. Almeida, M. C. Rezende, Instituto Tecnológico Aeronáutico. 2000, 31-41.
8. L. C. Pardini, A. Golçalves, *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2009, 231-241.
9. W. Chen; B. Song, *Split Hopkinson Bar: Design Testing and Application*, First ed. New York, 2011.
10. B. A. Gama; S. L. Lopatnikov; J. W. Gillespie Jr, *Hopkinson Bar Experimental Technique: A Critical Review*, *Appl Mech Rev* vol 57. 2004, 221-250.
11. M. Pagnoncelli, V. Piroli, D. Romanzini, I. M. Pereira, R. R. Dias, S. C. Amico, A. J. Zattera, *Journal of Composites Materials*. 2017, 1-40.