

DESEMPENHO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRAS DE PIAÇAVA COMO BLINDAGEM INDIVIDUAL CONTRA MUNIÇÕES DE ALTA ENERGIA*

*Fabio Da Costa Garcia Filho¹
Luana Cristyne Da Cruz Demosthenes²
Michelle Souza Oliveira³
Artur Camposo Pereira⁴
Fernanda Santos Da Luz⁵
Fábio Oliveira Braga⁶
Sergio Neves Monteiro⁷*

Resumo

Sistemas de Blindagens Multicamadas (SBMs) são utilizados para proteção pessoal contra munição de alta energia de impacto. Além de promover uma proteção leve e efetiva, funcionam não apenas absorvendo a energia do projétil, mas também impedindo a penetração de fragmentos provenientes do impacto balístico. SBMs são híbridos que fazem uso de diferentes classes de materiais para produzir a proteção balística mais eficiente. Como segunda camada é utilizada, normalmente, materiais de fibras sintéticas, tais como; Kevlar™ e Dyneema™. Contudo, compósitos reforçados com fibras naturais vêm sendo consideradas como alternativa para utilização em SBMs, por apresentarem características únicas como: baixo custo, biodegradabilidade e propriedades mecânicas comparáveis a fibras sintéticas utilizadas como reforço. Assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho de compósitos de matriz epóxi reforçado com fibras de piaçava contra munições de alta energia. Compósitos reforçados com 10, 20, 30, 40 e 50%vol de fibras de piaçava foram produzidos e testados para avaliar a energia absorvida. Análise de variância (Anova) e diferença mínima significativa foram utilizados para avaliar os resultados obtidos. Verificou-se que os compósitos reforçados com 50%vol foram aqueles que apresentaram o melhor desempenho, sendo comparável aos resultados obtidos para o Kevlar™ testados na mesma condição.

Palavras-chave: Compósitos; Fibras Naturais; Fibra de Piaçava; Ensaios Balísticos.

PERFORMANCE OF EPOXY MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH PIASSAVA FIBERS AS A STAND-ALONE BALLISTIC ARMOR AGAINST HIGH ENERGY AMMUNITION

Abstract

Multilayered Armor Systems (MAS) are intended to personal protection against high-impact energy ammunition. Such system promote light and effective protection, but also works absorbing the projectile's energy as well as preventing the penetration of fragments from ballistic impact. MAS are hybrids that make use of different classes of materials to produce the most effective ballistic protection. Synthetic fiber materials, such as: Kevlar™ and Dyneema are commonly used as second layer of the MAS. However, composites reinforced with natural fibers have been considered as an alternative for use in MAS because they have unique characteristics such as low cost, biodegradability and mechanical properties comparable to synthetic fibers used as reinforcement. Thus, the objective of the present work was to evaluate the performance of epoxy matrix composites reinforced with piassava fibers against high

energy ammunition. Reinforced composites with 10, 20, 30, 40 and 50 vol% of piassava fibers were produced and tested to evaluate absorbed energy. Analysis of variance (ANOVA) as well as honest significant difference test were used to evaluate the results obtained. It was verified that the 50 vol% reinforced composites were those that presented the best performance, comparable to the results obtained for Kevlar™ tested in the same condition.

Keywords: Composites; Natural Fibers; Piassava Fiber; Ballistic Test.

- ¹ *Engenheiro de Materiais, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ² *Engenheira Civil, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ³ *Engenheira Civil, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Metalúrgico, Mestre em Ciência dos Materiais, Doutorando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro de Materiais, D.Sc em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁶ *Engenheiro Metalúrgico, D.Sc em Ciência dos Materiais, SENAI, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁷ *Engenheiro Metalúrgico, Ph.D em Materials Science and Engineering, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*

1. INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento de tecnologias de armamentos e munição faz com que paralelamente haja um grande interesse no desenvolvimento de novos materiais que sejam capazes de resistir a impactos balísticos com cada vez mais energia destrutiva. Materiais de alta resistência são necessários, mas em busca do melhor desempenho balístico possível, outras características como leveza, resistência à penetração e alta absorção de energia devem ser consideradas a fim de se obter o sistema de blindagem ideal [1, 2]. Atualmente, tecidos de fibra sintética como aramida, KevlarTM e TwaronTM, bem como o polietileno de ultra-alto peso molecular, DyneemaTM e SpectraTM, são vistos como os principais materiais a serem utilizados em sistemas de proteção pessoal fornecendo blindagem defensiva contra munições de alta energia, tais como 7.62 e 5.56 mm [3, 4]. No entanto, visando melhorar o desempenho, considerando questões econômicas e ambientais, vários outros materiais leves vêm sendo testados [5-9]. Neste contexto, compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais demonstraram um comportamento balístico surpreendentemente positivo quando utilizados como camada intermediária em sistemas de blindagem multicamadas (SBM) [10-12].

A fibra da piaçava (*Attalea funifera*) é uma fibra rígida extraída de uma palmeira que ocorre naturalmente na floresta tropical atlântica brasileira, ilustrada na Fig.1, é um candidato promissor para reforçar matrizes poliméricas para obter compósitos mais resistentes e rígidos. As fibras da piaçava têm densidade na faixa de 1,10 a 1,45 g/cm³. Sua composição de celulose é de aproximadamente 31,6% e a de lignina, 48,4%. Esta composição está associada à rigidez inerente e à resistência à água dessa fibra, comparável apenas à fibra de coco, mas superior a várias outras fibras vegetais [13]. Propriedades mecânicas como resistência à tração de 108,5 - 147,3 MPa, módulo de Young de 5,5 - 6,3 GPa e resistência de elasticidade de 69,8 - 81,7 MPa foram relatadas para fibras de piaçava com diâmetros no intervalo de 0,25 a 0,70 mm [14-17].

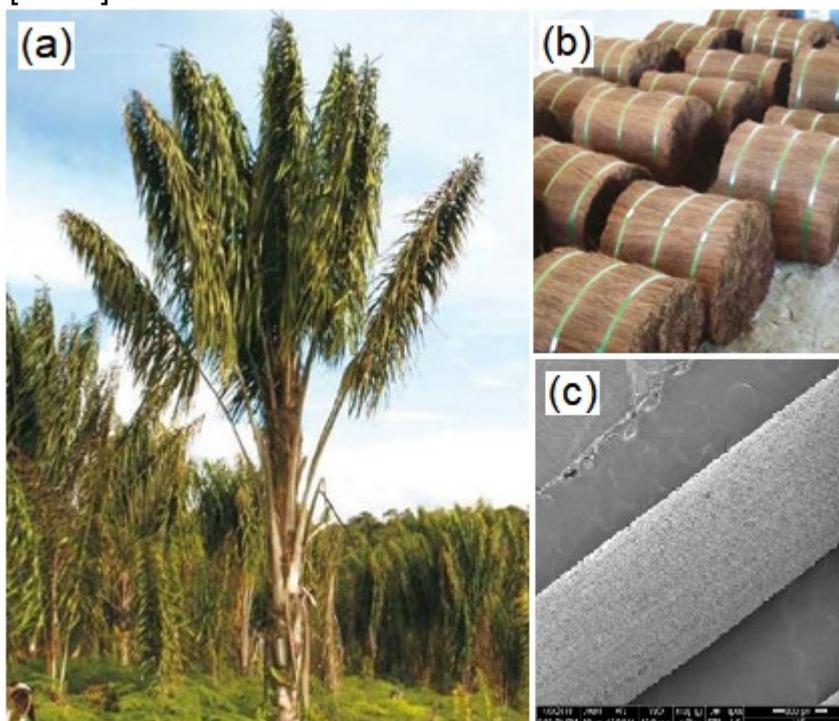


Figura1 – Piaçava (a) palmeira, (b) fardo de fibras coletadas e (c) única fibra vista no microscópio eletrônico.

No presente trabalho, a dissipação de energia individual dos compósitos de piaçava é medida, tal análise é importante para verificar a contribuição de cada material na absorção de energia em um sistema de blindagem multicamadas. Isto foi conduzido usando o valor de energia cinética absorvida pelo alvo. Compósitos de epóxi reforçados com diferentes frações volumétricas de fibra de piaçava (10, 20, 30, 40 e 50%) foram testados e tiveram seus resultados comparados com o resultado dessa análise para o tecido de aramida laminado, obtido em outro lugar [18]. Assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho individual desses materiais quando sujeito a impacto balístico com munição de 7.62 mm. A razão para os testes balísticos independentes é determinar como cada material investigado se comportaria sem a frente cerâmica. Isso pode permitir uma compreensão mais completa os mecanismos de dissipação de energia que foram estudados pela primeira vez para Kevlar™ [4].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta os materiais testados no presente trabalho e suas designações.

Tabela1 – Nomenclatura e condições analisadas.

Nomenclatura	Material
ERP10	Compósito de epóxi reforçado com 10% vol de fibras de piaçava
ERP20	Compósito de epóxi reforçado com 20% vol de fibras de piaçava
ERP30	Compósito de epóxi reforçado com 30% vol de fibras de piaçava
ERP40	Compósito de epóxi reforçado com 40% vol de fibras de piaçava
ERP50	Compósito de epóxi reforçado com 50% vol de fibras de piaçava

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas fibras de Piaçava que foram cedidas pela fábrica de Vassouras Rossi Ltda., localizada na cidade de Petrópolis/RJ - Brasil. A resina epóxi utilizada foi comercial do tipo éter diglicidílico do bisfenol A, também conhecido como DGEBA, que fora endurecido com trietilenotetramina (TETA), fornecidos pela empresa EpoxyFiber. Para o preparo do compósito, as fibras de piaçava foram cortadas com comprimento de 120 mm e colocados em uma estufa para secagem a 60°C por 24 horas. As fibras foram cuidadosamente posicionadas, dentro de um molde de aço, mantendo a fibra alinhada ao longo do comprimento do molde e então a resina epóxi é adicionada. Uma pressão de 3 MPa foi aplicado e a placa compósita foi curada à temperatura ambiente por 24 horas. As placas compósitas produzidas apresentaram dimensões finais de 120×150×10 mm³.

Os materiais foram submetidos ao ensaio balístico no Centro de Avaliação do Exército (CAEx), Rio de Janeiro/RJ - Brasil. O dispositivo de tiro foi um modelo B290 HPI (High Pressure Instrumentation), que consiste em um provete equipado com mira laser (Fig. 2 (a)). Para as medições de velocidade foi utilizado um radar Doppler, modelo SL-520P Weibel, e o software Windopp foi utilizado para processar os dados brutos do radar. A munição comercial de 7,62 mm M1 com peso de 9,7 g foi empregada para esse ensaio. O alvo (Fig. 2 (b)) foi posicionado a 15 m do provete e o tiro foi realizado com a munição percorrendo uma trajetória perpendicular ao alvo, conforme esquema mostrado Fig. 2 (c).

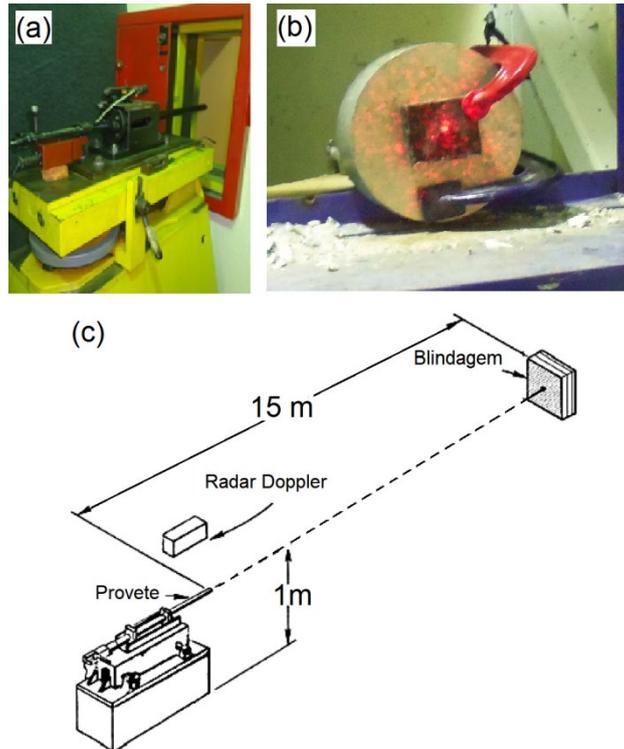


Figura2 – Equipamentos utilizado no ensaio balístico (a) dispositivo de disparo, (b) corpo de prova posicionado e (c) ilustração esquemática do ensaio.

A velocidade do projétil foi medida imediatamente antes (V_0) e depois (V_R) do impacto. A variação da energia cinética do projétil pode ser relacionada com a energia absorvida pelo alvo (E_A) e usado para comparação entre os materiais. Podendo ser calculado pela Equação 1 [19]:

$$E_A = \frac{m}{2} (V_0^2 - V_R^2) \text{Eq.1}$$

Onde m = massa do projétil utilizado.

Quatro testes foram feitos para cada condição testada. Os valores foram então estatisticamente tratados utilizando a análise de variância (ANOVA). Os valores médios foram então comparados pelo teste de Tukey, também chamado diferença mínima significativa (d.m.s.), e calculado pela Equação 2 [20]:

$$d. m. s. = q \sqrt{\frac{QMR}{r}} \text{Eq.2}$$

Onde q é a constante de d.m.s. considerada para significância de 5%; QMR é o quadrado médio do resíduo da ANOVA; r é o número de repetições de cada um dos tratamentos, neste caso 4.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de V_0 e V_R são medidos em todos os testes e permitem o cálculo da energia absorvida por meio da Equação 1. A Tabela 2 mostra a energia absorvida pelos alvos de diferentes condições. Considerando apenas a média e o desvio padrão, pode ser observada a influência da porcentagem de fibra na absorção de

energia. Mas para confirmação de tal resultado a análise estatística deve ainda ser aplicada.

Tabela2 – Resultado de energia absorvida, média e desvio padrão para as condições estudadas.

Condição					
	ERP10	ERP20	ERP30	ERP40	ERP50
Energia Absorvida (J)	282	196	190	184	198
	243	210	216	210	209
	282	170	184	194	207
	280	208	209	181	201
Média e Desvio Padrão (J)	272 ± 19	196 ± 18	200 ± 15	192 ± 13	204 ± 5

A Tabela 3 mostra a análise de variância dos dados. Nesta tabela são apresentados parâmetros como graus de liberdade (GL), soma dos quadrados (SQ), quadrados médios (QM), a distribuição de Fisher F e Fc, calculado e crítico. Comparando o valor F com o tabelado (Fc = 3,06), a hipótese de que os valores médios são os mesmos pode ser rejeitada com 95% de confiança, uma vez que F > Fc. Ou seja, foi estatisticamente provado que o material do alvo, de fato, influenciou a energia absorvida do projétil.

Tabela Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.3 – Parâmetros da análise estatística ANOVA

	GL	SQ	QM	F	Fc
Tratamento	4	17731	4432,7	19,8	3,06
Resíduo	15	3357	223,8		
Total	19	21088			

Após a ANOVA, é possível comparar os valores médios usando o teste de Tukey. O valor de q para 5 tratamentos e 15 graus de liberdade do resíduo é de 4,37. Assim, a *d.m.s.* foi calculada pela Eq. (2) como 32,7 J. A Tabela 4 mostra a comparação entre os valores médios utilizando o teste *d.m.s.* Em negrito são destacadas as diferenças entre valores médios maiores que os *d.m.s.*

Tabela 4 – Comparação entre as médias após o cálculo de *d.m.s.*

Material	ERP10	ERP20	ERP30	ERP40	ERP50
ERP10	0	76	72	80	68
ERP20	76	0	4	4	8
ERP30	72	4	0	8	4
ERP40	80	4	8	0	12
ERP50	68	8	4	12	0

Analisando os resultados obtidos, pode-se verificar que a condição ERP10 foi o que apresentou a maior absorção de energia. Tal comportamento pode estar diretamente relacionado à característica frágil da matriz de epóxi, que tende a dissipar energia pela criação de superfícies de fratura [18], ou seja, o reforço da fibra não foi feito em uma quantidade efetiva. Por outro lado, o teste *d.m.s.* confirmou que os compósitos ERP20, ERP30, ERP40 e ERP50 acabaram por apresentarem

o valor absoluto de absorção de energia inferior àquele exibido para a condição ERPV10. Isto pode ser associado à mudança dos mecanismos de fratura, a partir de um material com características mais frágeis, sem um reforço efetivo, transformando-se mais resistente com o aumento da porcentagem de fibras empregadas no reforço, com características de fratura mais complexas, envolvendo fratura de matriz e fibras, efeitos de “pull-out”, “fiberbridging”, delaminação, entre outros mecanismos.

A Figura 3 (a) até (e) apresenta o aspecto geral das amostras após os ensaios balísticos. A condição ERPV10, Fig. 3 (a), foi praticamente completamente fragmentada. Apesar de sua maior energia absorção, a fragmentação é um problema prático quando a o material está sujeito a múltiplos impactos. Comparado com a quantidade de energia absorvida pelo laminado de KevlarTM, 220 ± 17 J [18], podemos ver que os valores são estatisticamente os mesmos para os encontrados para as condições ERPV20, ERPV30, ERPV40 e ERPV50, mas quando consideramos o aspecto final da placa compósita, ou seja, a integridade física dos compósitos, a condição que mais se destaca é a ERPV50. Embora o tal condição tenha absorvido menos energia que ERPV10, o fato de manter sua integridade física após o impacto é de grande importância para integrar um sistema de blindagem multicamadas contra munições de alta energia, especialmente como camada intermediária [6, 10, 11]. Em comparação com as outras condições ERPV20, ERPV30 e ERPV40, a quantidade de energia absorvida não foi significativamente maior, e todos os casos não houve a total fragmentação do compósito. No entanto, quanto maior a quantidade de fibras de piaçava, mais barato se torna o compósito. Portanto, o ERPV50 é mais vantajoso para ser aplicado como a camada intermediária em um SBM.

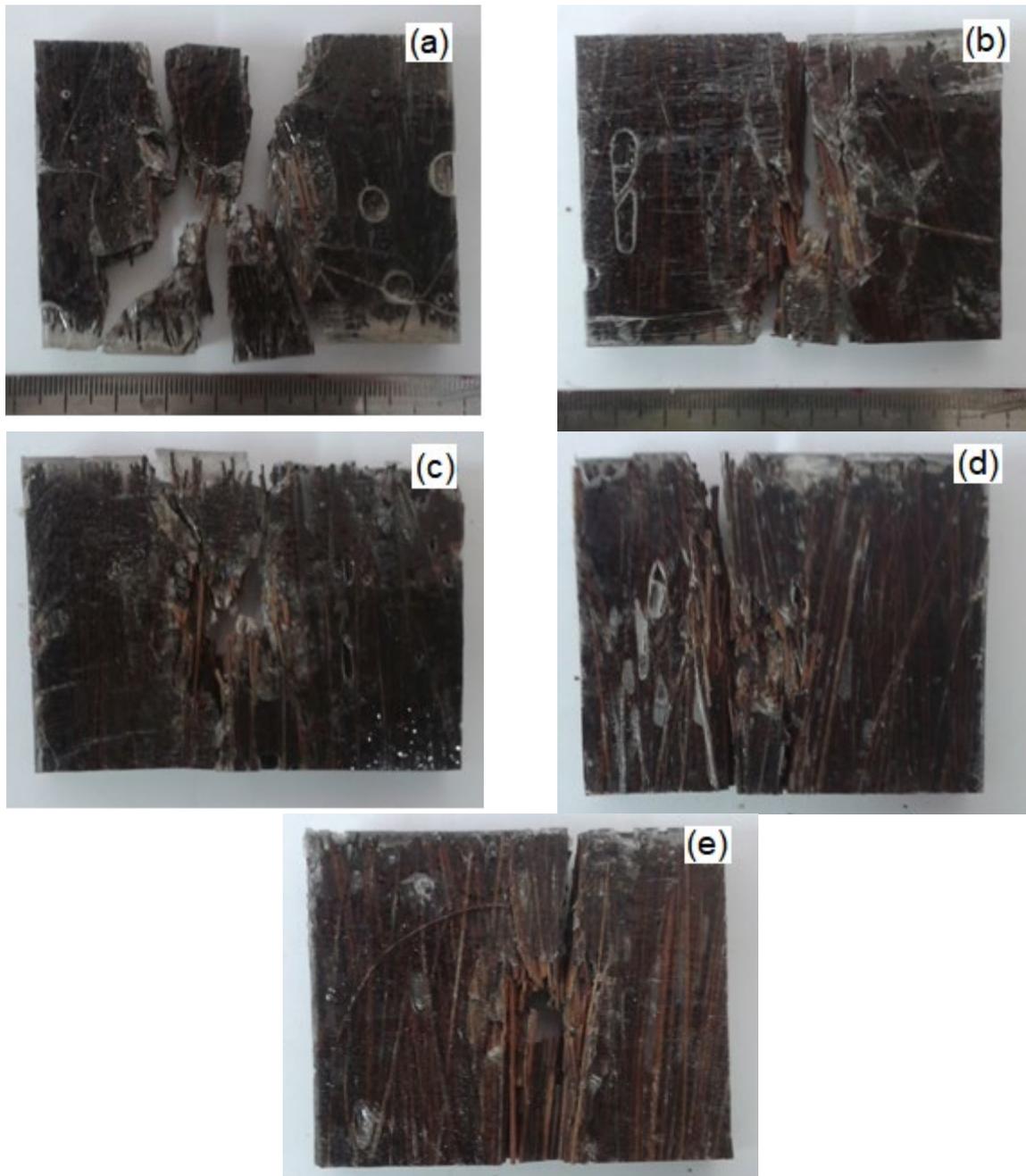


Figura 3 – Aspecto geral dos corpos de prova após o ensaio balístico (a)ERPV10, (b)ERPV20, (c)ERPV30, (d)ERPV40 e (e)ERPV50.

4. CONCLUSÃO

- Compósitos de epóxi reforçados com diferentes frações volumétricas de fibras de piaçava (10, 20, 30, 40 e 50% vol) foram avaliados individualmente contra munições 7.62 mm de alta energia de impacto.
- O compósito ERPV10 apresentou a maior quantidade de energia absorvida entre todas as condições testadas. No entanto, a absorção de energia se deu através do mecanismo de fragmentação do compósito, característico da matriz polimérica frágil. Desta forma, essa condição se torna inadequada quando consideramos um sistema que seja capaz de receber múltiplos disparos.

- As outras condições ERPV20, ERPV30, ERPV40 e ERPV50 apresentaram um comportamento interessante, conciliando absorção de alta energia de impacto com relativa boa integridade física após o ensaio balístico.
- A quantidade de energia absorvida para as condições ERPV20, ERPV30, ERPV40 e ERPV50 é estatisticamente igual ao apresentado para o laminado de KevlarTM para essa mesma condição de ensaio. Conforme relatado em outro trabalho [18].
- Compósitos reforçados com fibras de piaçava são potenciais candidatos para utilização como camada intermediária de sistemas de blindagem multicamadas para proteção individual. Em contraste as fibras sintéticas usualmente empregadas, tais compósitos são leves, apresentam menor custo de produção, além de serem ambientalmente corretos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio das agências brasileiras: CNPq, FAPERJ e CAPES para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Cheeseman BA, Bogetti TA. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. *Composite Structures*, v. 61, 2003, p.161-173.
- 2 Wang L, Kanesalingam S, Nayak R, Padhye R. Recent trends in ballistic protection. *TLIST*, v.3, 2014, p.37–47.
- 3 Medvedovski E. Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure - Part 1. *Ceramics International*, v.36, 2010, p.2103-2115.
- 4 Monteiro SN, Lima EP Jr, Louro LHL, Silva LC, Drelich JW. Unlocking function of aramid fibers in multilayered ballistic armor. *Metall Mater Trans A*, v.46(a), 2014, p.37–40.
- 5 Benzait Z, Trabzon L. A review of recent research on materials used in polymer-matrix composites for body armor application. *J Composite Materials*, v.0(0), 2018, p.1-23. DOI: 10.1177/0021998318764002
- 6 Luz FS, Lima Jr. EP, Louro LHL, Monteiro SN. Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. *Mater Res*, v.18, 2015, p.170–177.
- 7 Lin TZ, Yang Q, Tan C, Liu B, McDonald A. Processing and ballistic performance of lightweight armor based on ultra-fine-grain aluminum composites. *J MaterSci*, v.43, 2008, p.7344–7348.
- 8 Naebe M, Sandlin J, Crouch I, Fox B. Novel polymer-ceramic composites for protection against ballistic fragments. *Polym Compos*, v.34(2), 2013, p.180–186.
- 9 Akubue PC, Igbokwe PK, Nwabanne JT. Production of kenaffibre reinforced polyethylene composite for ballistic protection. *IJSER*, v.6(8), 2015, p.1–7.
- 10 Monteiro SN, Assis FS, Ferreira CL, Simonassi NT, Weber RP, Oliveira MS, Colorado HA, Pereira AC. Fique fabric: A promising reinforcement for polymer composites. *Polymers*, v.10, 2018, p.246-256.
- 11 Garcia Filho FC, Assis FS, Monteiro SN, Pereira AC, Júnior EPL, Ferreira CL. Performance Of Jute Fabric Reinforced Polyester Matrix Composite In

- Multilayered Ballistic (In Portuguese). In: 72nd ABM AnnualCongress, São Paulo, 2017, 3786-3795. DOI 10.5151/1516-392X-31053
- 12 Braga FO, Bolzan LT, Luz FS, et al. High energy ballistic and fracture comparison between multilayered armor systems using non-woven curaua fabric composites and aramid laminates. *J Mater Res Technol*, v.6(4), 2017, p.417-422.
 - 13 Monteiro SN, Lopes FPD, Barbosa AP, Bevitori AB, Silva ILA, Costa LL. Natural lignocellulosic fibers as engineering materials – an overview. *Metall Mater Trans A*, v.42 (a), 2011, p.2963–2974.
 - 14 Monteiro SN. Properties and structure of *Attaleafunifera* (piassava) fibers for composite reinforcement – a critical Discussion. *Natural Fibers*, v.6(2), 2008, p.191–203.
 - 15 Monteiro SN, Lopes FPD, Ferreira AS, Nascimento DCO. Natural fiber polymer matrix composites: cheaper, tougher and environmentally friendly. *JOM*, v.61, 2009, p.17-22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-009-0004-z>.
 - 16 Nascimento DCO, Ferreira AS, Monteiro SN, Aquino RCMP, Satyanarayana GK. Studies on the characterization of piassava fibers and their epoxy composites. *Composites: Part A*, v.43, 2012, p.353-362.
 - 17 D’Almeida JRM, Aquino RCMP, Monteiro SN. Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attaleafunifera*) fibers. *Composites: Part A*, v.37, 2006, p.1473-1479.
 - 18 Braga FO, Bolzan LT, Lima Jr EP, Monteiro SN. Performance of natural curaua fiber-reinforced polyester composites under 7.62 mm bullet impact as a stand-alone ballistic armor. *J Mater Res Technol*, v.6(4), 2017, p.323-328.
 - 19 Morye SS, Hine PJ, Duckett RA, Carr DJ, Ward IM. Modeling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Composites Science and Technology*, v.60, 2000, p.2631-2642.
 - 20 Vieira S. *Análise de Variância (Anova)*. São Paulo: Ed. Atlas; 2006.