

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM COMPÓSITO EPÓXI / FIBRA DE VIDRO: EFEITO DA ENERGIA DE IMPACTO BALÍSTICO¹

Ricardo Pondé Weber²
João Carlos Miguez Suarez³

Resumo

Blindagem balística é todo material ou sistema projetado especialmente para proteger pessoas e/ou veículos do impacto de projéteis e a chamada “blindagem rígida” é a formada por camadas de tecido ou de não tecido unidas por um polímero. Tecidos produzidos a partir de fibras de vidro ou de poliamidavêm sendo empregados, desde a 2^a GM, na fabricação de proteções balísticas. Os tecidos mais empregados atualmente, devido terem baixa densidade e alta tenacidade, são os fabricados com fibras de poliaramida e/ou de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE). Todavia, face ao menor custo, boas propriedades e disponibilidade, as fibras de vidro continuam sendo utilizadas embora em uma menor escala. As resinas epoxídicas têm se destacado como um material que encontra aplicação em diversos segmentos tecnológicos, tais como, pinturas, adesivos e em compósitos estruturais nas indústrias de construção, eletrônica, aeroespacial e de armamento. No presente trabalho foi estudado um compósito de matriz polimérica projetado como blindagem Classe II. O compósito foi produzido por empilhamento manual e prensagem à quente de camadas de tecido em tela de fibra de vidro tipo E impregnadas com uma mistura de resinas epóxi. As placas compósitas foram caracterizadas por meio de ensaios mecânicos (dureza, tração e flexão) e submetido a ensaios balísticos com munição 9 mm e .357”. Os danos produzidos pelos impactos balísticos foram avaliados pela ocorrência ou não de penetração e pela área dos danos produzidos no impacto balístico com o auxílio de um programa computacional para a medição de áreas. Os resultados obtidos mostraram que o processo de produção utilizado permitiu a obtenção de um material com propriedades adequadas para ser empregado como blindagem balística Classe II e que ocorre delaminação absorvendo parte da energia de impacto. Verificou-se, ainda, que quanto maior a energia de impacto, maior a área média de danos, reduzindo o desempenho balístico do compósito. Estes resultados são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: Fibra de vidro; Resina epóxi; Blindagem balística; Propriedades mecânicas; Impacto balístico.

PERFORMANCE EVALUATION OF AN EPOXI / FIBERGLASS COMPOSITE: EFFECT OF BALLISTIC IMPACT ENERGY

Abstract

Armor is a material specially designed to protect personal or vehicles from projectile impact. A hard armor is manufactured with woven or non-woven layers impregnated with a polymer. Fabrics of fiberglass and polyamide have been produced, since the 2nd War, as armor. At present days the more used fabrics are produced with polyaramide or ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers. However, fiberglass, due low cost, good properties and disposability, continue being used in specific applications. Epoxy resins are a very important polymeric material and have important applications in several technological branches such as surface coatings, adhesives and structural composites in civil construction, electronic, aerospace and ordnance industries. In the present work a polymer matrix composite designed as Class II armor was studied. The composite was manufactured by hand lay-up and hot pressing of fiberglass type E plain weave fabric layers impregnated with an epoxy mixture. The composite plates were characterized through mechanical test (hardness, tensile and flexure) and ballistic tested with 9 mm and .357” ammunition. The damage produced by the ballistic impact was evaluated by occurrence of penetration or not and by the damage area of ballistic shot using a computational program used in area measurements. The tests results showed that the used production process was adequate to manufacture as Class II armor and that delamination absorb part of ballistic energy. It is observed that as higher is the impact energy, higher is the average damage area, lowering the composite ballistic performance. These results are presented and discussed.

Keywords: Fiberglass; Epoxy; Armor; Mechanical properties; Ballistic impact.

¹ *Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Engenheiro e Doutor em Ciências, Professor, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.*

³ *Sócio da ABM, Engenheiro e Doutor em Ciências, Professor Emérito, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.*

1 INTRODUÇÃO

O ser humano, desde os primórdios da história, busca criar e aperfeiçoar mecanismos que o protejam das agressões dos inimigos.⁽¹⁾ Os materiais poliméricos (plásticos e borrachas) têm largo emprego no cotidiano contemporâneo, sobretudo quando conjugados com outros materiais. A possibilidade de se formular o material adequado para cada aplicação foi possível com o advento dos materiais compósitos, os quais têm encontrado emprego em diversos segmentos industriais, tais como aeronáutica, aeroespacial, de transportes, de material bélico, de material esportivo etc.

Blindagem balística é todo material ou sistema projetado especialmente para proteger pessoas e/ou veículos, do impacto de projéteis. O desenvolvimento de materiais para aplicação em proteções balísticas exige uma grande variedade de conhecimentos que procuram relacionar as técnicas de fabricação dos materiais constituintes e os processos de produção das blindagens com o comportamento dinâmico desses materiais no impacto balístico.^(2,3)

As blindagens podem ser fabricadas com materiais metálicos e/ou não metálicos, homogêneos e/ou compósitos, opacos ou transparentes. Materiais poliméricos vêm sendo largamente utilizados na indústria de material bélico e os materiais compósitos de matriz polimérica (PMC's) são considerados excelentes materiais de proteção, sendo utilizados, desde a 2^a Guerra Mundial, em blindagens balísticas, flexíveis ou rígidas. A blindagem rígida ou blindagem têxtil laminada é formada por camadas de tecido ou de não tecido unidas por um polímero, comportando-se, no impacto balístico, como um material compósito, pois deve apresentar resistência à penetração do projétil e tenacidade para absorver a energia resultante do seu impacto.⁽⁴⁻⁶⁾

A tendência atual nos projetos de blindagens está direcionada para uma melhor relação proteção/peso e, os PMC's, por possuírem uma maior resistência específica (relação resistência/peso), constituem, atualmente, uma importante classe dentre os materiais de blindagem e vêm substituindo com sucesso diversos materiais tradicionais. Os tecidos mais empregados atualmente, em face do elevado módulo e da alta tenacidade, são os produzidos com fibras de poliaramida e/ou de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE). As fibras de vidro, face ao menor custo, boas propriedades e disponibilidade, continuam sendo utilizadas em aplicações específicas. As resinas epóxi têm se destacado como um material que encontra emprego em diversos segmentos tecnológicos e são, também, empregadas em blindagens compósitas.⁽⁷⁻⁹⁾

No presente trabalho foi analisado o comportamento balístico de um compósito epóxi / fibra de vidro (GFRE), caracterizado por meio de ensaios mecânicos (dureza, impacto e flexão), projetado para apresentar desempenho de blindagem Classe II,⁽¹⁰⁾ face ao impacto de dois diferentes tipos de munição.

2 EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

O material compósito, na forma de placas quadradas com 300 mm de lado e 12 mm de espessura, foi fabricado por laminação manual (*hand lay-up*) de 15 camadas de tecido de fibra de vidro dispostas cruzadas, uma em relação à outra, na orientação 0°/90°.

A produção do compósito foi realizada por moldagem a quente, na pressão de 8 kg/cm² e na temperatura de 120 °C, impregnando-se cada camada do tecido de fibra de vidro com um sistema epoxídico (mistura de resinas epóxi), obtendo-se, aproximadamente, um conteúdo volumétrico de fibras de 60%.

Foi utilizado um tecido em tela de fibra de vidro tipo E com gramatura de 205 g/m², tendo 18 fios no urdume e 12 na trama (Texiglass, Vinhedo, SP).

O sistema epoxídico foi formado pela mistura de dois tipos de resina de diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), DER 324 e DER 383 (4:1 w/w), com o endurecedor DEH 24 (100:13 w/w) (Dow Química S.A., São Paulo, SP). A cura final da mistura foi realizada em bolsa de vácuo (~700 mm Hg) por 24 horas, na temperatura ambiente sem pressão.

2.2 Ensaio

O compósito foi caracterizado por meio de ensaios mecânicos (dureza, flexão e impacto) e avaliado através ensaios balísticos.

O ensaio de dureza Rockwell foi realizado em um durômetro marca Pantec modelo RBS, segundo a norma ASTM D785,⁽¹¹⁾ utilizando-se a escala M (100 kg e esfera de aço de 12,7mm) M (carga de 100 kg e esfera de 12,50 mm). Foram realizadas cinco impressões em cada placa, determinando-se a mediana dos valores obtidos.

O ensaio de tração foi realizado segundo a norma ASTM D3039M,⁽¹²⁾ em uma máquina universal de ensaios marca Emic modelo DL10000, na velocidade de ensaio de 2,0 mm/min, na temperatura ambiente. Foram testados 5 (cinco) corpos de prova (CP's), fabricados por usinagem mecânica do laminado nas dimensões de 200mm x 25mm x 12mm. Foi determinada, para cada CP, a tensão máxima em tração, determinando-se a mediana.

O ensaio de flexão em 3 pontos foi realizado segundo a norma ASTM D790m,⁽¹³⁾ na temperatura ambiente, em uma máquina universal de ensaios marca Emic modelo DL10000, na velocidade de ensaio de 1,50 mm/min. Foram testados seis corpos de prova (CP's), fabricados por usinagem mecânica do laminado nas dimensões de 110mm x 10mm x 12mm. Foi determinada, para cada CP, a tensão máxima para 5% de deformação e calculou-se a mediana.

O ensaio balístico foi realizado de acordo com a norma NIJ Standard 0108.01,⁽⁸⁾ tendo sido testadas três placas (alvo) com munição de 9 mm FMJ, projétil de 8,0g de massa, nas velocidades de, respectivamente, 355±10 m/s, 379±10 m/s e 436±10 m/s e uma placa com projétil .357" Magnum com massa de 10.2g na velocidade de 430±10 m/s. Cada alvo, apoiado em um bloco de argila especial (plastilina), foi submetido a 4 (quatro) impactos, .9mm ou .44", com incidência de 0° a uma distância de 5m.

O desempenho balístico da blindagem foi analisado considerando-se:

- a falha da blindagem, isto é, se ocorreu ou não perfuração do alvo pelo projétil;
- os danos produzidos no alvo pelo impacto balístico; e
- os mecanismos de perfuração atuantes no impacto balístico.

As áreas de danos produzidas por cada impacto, tendo em vista que as placas compósitas epóxi / fibra de vidro estudadas eram translúcidas, foram quantificadas usando-se uma técnica fotográfica não destrutiva.⁽¹⁴⁾ Foi adotado o seguinte procedimento: (A) a face frontal da placa é iluminada; (B) fotografa-se a sua face distal; (C) executa-se um tratamento da imagem; (D) determina-se, na cópia fotográfica da imagem tratada, a área de danos produzida por cada impacto; e (E) calcula-se, por placa e por condição do ensaio balístico, uma área de danos média.

Após os ensaios balísticos, as faces da blindagem compósita, frontal e distal, foram fotografadas e os danos produzidos pelo impacto foram visualmente avaliados e os mecanismos de deformação e fratura foram determinados e analisados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a mediana das propriedades determinadas nos ensaios mecânicos do compósito epóxi / fibra de vidro, onde se pode verificar que estes valores estão compatíveis com os dados encontrados na literatura.^(15,16)

Tabela 1 - Propriedades mecânicas (mediana) do compósito epóxi / fibra de vidro

Dureza Rockwell M	Resistência à tração (MPa)	Resistência à flexão (MPa)
120	202,3	345,7

O desempenho balístico de um material de blindagem, para um específico projétil em certa faixa de velocidades de impacto, pode ser avaliado considerando: (i) a falha da blindagem e (ii) os danos produzidos pelo impacto do projétil.

O alvo experimenta, no impacto balístico, vários fenômenos, tais como, propagação, no seu interior, de ondas elásticas, plásticas e/ou hidrodinâmicas, grandes deformações localizadas no entorno do ponto de impacto e aumento da temperatura produzido pelo atrito do projétil com o alvo. Estes fenômenos podem levar a falha e fratura do material do alvo, o que é caracterizado pela ocorrência de uma perfuração parcial (PP), também designada como penetração, ou perfuração completa (PC) ou simplesmente perfuração. A definição da ocorrência de PP ou PC depende do critério de avaliação empregado, sendo que, neste trabalho, foi empregado o Critério da Marinha que considera que ocorre uma perfuração completa quando todo o projétil ou a sua maior parte passa através o alvo.⁽¹⁷⁻¹⁹⁾

A avaliação dos danos produzidos pelo impacto do projétil compreende a determinação dos mecanismos de falha e a quantificação dos danos produzidos no alvo. Um compósito de matriz polimérica reforçado por fibras submetido a um impacto pode apresentar deformação e falha por, basicamente, três mecanismos: (i) fratura da fibra com trincamento da matriz; (ii) separação fibra-matriz; (iii) delaminação. Estes mecanismos podem ocorrer separadamente ou combinados, havendo, normalmente, uma interação entre os mesmos.^(20,21)

Os resultados dos ensaios balísticos estão apresentados na Tabela 2. Verifica-se, de acordo com o critério empregado, que a blindagem ensaiada com a munição 9 mm não foi completamente perfurada, enquanto que a ensaiada com o projétil .357" foi totalmente perfurada.

Tabela 2-Resultados dos ensaios balísticos do compósito epóxi / fibra de vidro

Placa	Munição	Tiro n°	Velocidade (m/s)	Desempenho	Área de danos (cm ²)	
					Por tiro	Média
1	9 mm	1	362,45	PP	61,60	62,75
		2	357,76	PP	59,99	
		3	347,26	PP	67,09	
		4	351,43	PP	62,33	
2	9 mm	1	385,27	PP	62,28	74,01
		2	382,44	PP	94,01	
		3	371,33	PP	58,77	
		4	375,98	PP	81,00	
3	9 mm	1	442,37	PP	92,66	85,33
		2	438,36	PC	83,21	
		3	427,85	PP	87,90	
		4	434,65	PP	77,37	
4	.357"	1	437,66	PC	86,86	90,32
		2	432,87	PC	92,51	
		3	424,78	PC	90,79	
		4	427,25	PC	89,13	

A Figura 1 apresenta fotografias de uma placa ensaiada com munição 9 mm com iluminação da face distal.

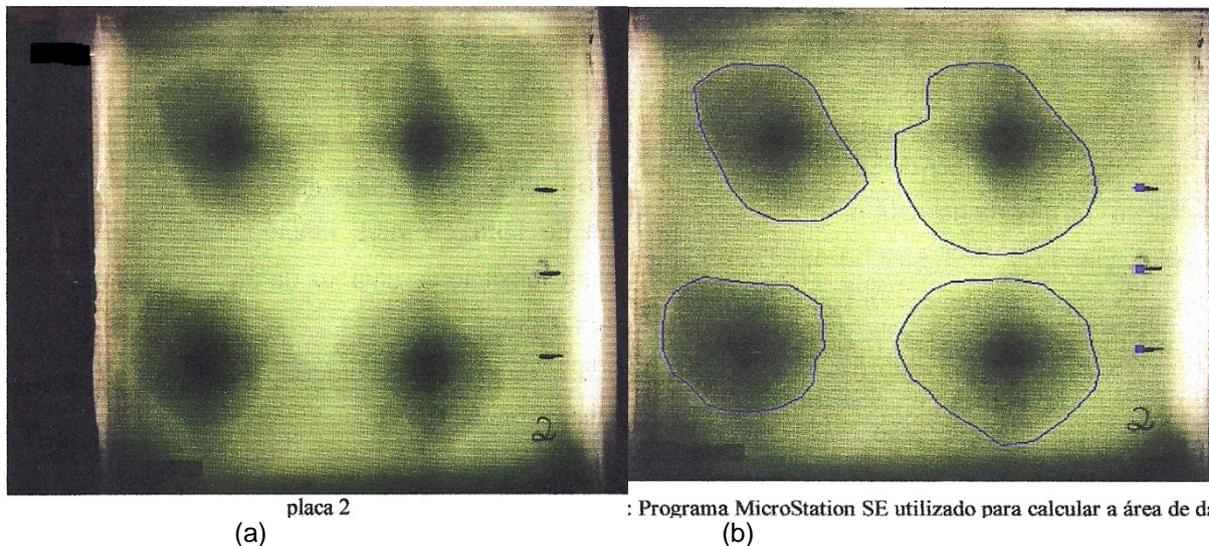


Figura 1 - Fotografias da face distal de uma placa compósita ensaiada balisticamente com munição 9 mm tendo a face frontal iluminada: (a) após ensaio balístico; (b) preparada para o cálculo da área de danos.

A área escura, aproximadamente circular, que em face da translucidez da placa é claramente visível no entorno de cada ponto de impacto (Figura 1a), pode ser relacionada com a área de danos produzida pelo tiro. Cada área de danos, após a sua definição e delimitação (Figura 1b), foi medida com o auxílio do programa MicroStation SE.⁽¹⁴⁾ Os valores determinados estão mostrados na Tabela 2 que, também, apresenta o valor médio por placa.

As faces frontal e distal das placas compósitas ensaiadas balisticamente foram fotografadas e examinadas visualmente. A Figura 2 apresenta, em função do tipo de munição empregada no ensaio balístico, fotografias de aspectos representativos (típicos) observados na entrada (face frontal) e na saída (face distal) do projétil. Estes aspectos definem os mecanismos de deformação resultantes do impacto balístico.

Observa-se que os mecanismos de perfuração e os danos produzidos pelo impacto balístico variaram com a munição empregada; quanto maior é a energia do impacto balístico, maior é a quantidade de danos na blindagem. Verifica-se que o tiro com munição 9 mm produziu no ponto de impacto uma cratera fechada (Figura 2a), isto é, sem saída do projétil na face distal (Figura 2b). O impacto com o projétil .357" perfurou completamente a placa compósita, observando-se o orifício de entrada do projétil na face frontal (Figura 2c) e o de saída na face distal (Figura 2d). Em consequência, pode-se afirmar, em relação à ocorrência ou não de perfuração do alvo, que a placa ensaiada com munição .9 mm apresentou perfuração parcial, enquanto que a placa ensaiada com munição .357" teve perfuração completa. Observa-se, ainda, que a face distal do material ensaiado com a munição 9 mm apresenta-se deformada e separada na região no entorno do ponto de impacto, enquanto que no material ensaiado com munição .357" verifica-se que ocorre perda de material no entorno do furo de saída do projétil. na face distal. Estes aspectos mostram, independentemente da munição empregada, que ocorreu algum tipo de delaminação nas camadas do compósito.

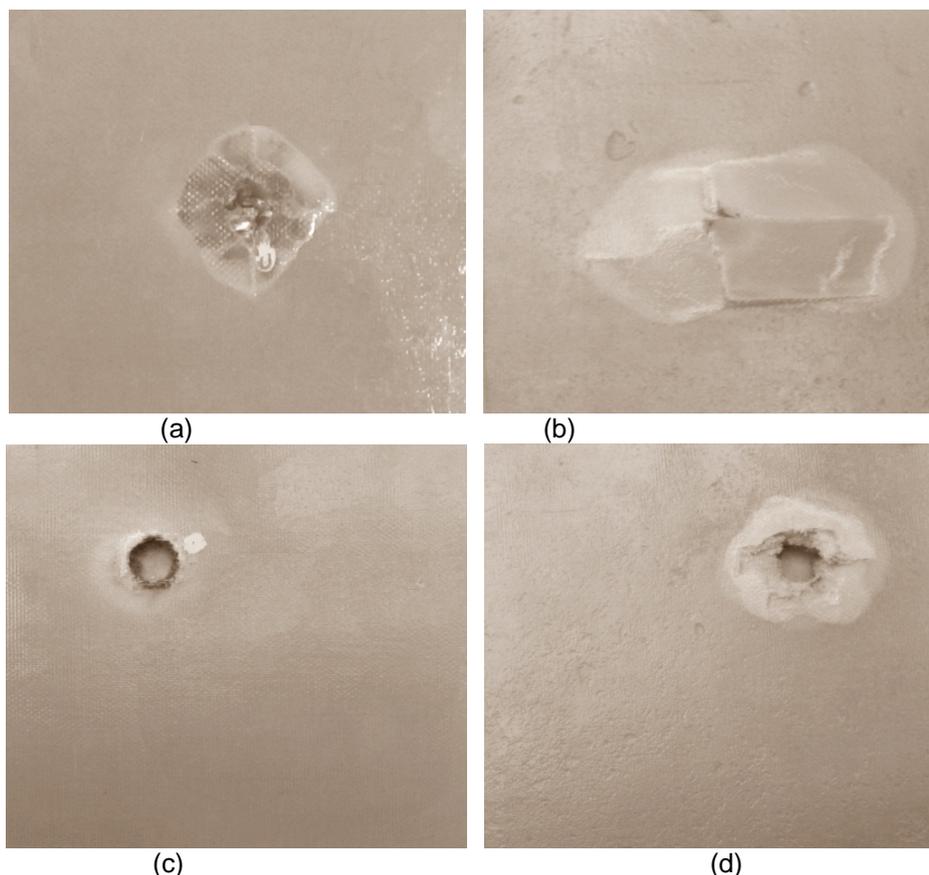


Figura 2 - Fotografias de danos produzidos nos pontos de impacto na placa compósita após os ensaios balísticos: (a) munição 9 mm e face frontal; (b) idem e face distal; (c) munição .357” e face frontal; (d) idem e face distal.

Estes aspectos indicam, também, que as tensões resultantes do impacto do projétil .357” foram suficientemente altas e atingiram valores superiores as resistências do compósito e da fibra de vidro, provocando o seu rompimento (“corte”). O compósito, em consequência, faliu por um mecanismo de deformação balística denominado “batoque” (*plugging*) apresentando, também, estilhaçamento da matriz epóxi. Pode-se afirmar, ainda, que o compósito ensaiado com a munição .357” faliu, provavelmente, em três etapas: (i) a alta energia de impacto da munição produziu o corte das fibras de vidro superficiais; (ii) a energia de impacto permaneceu suficientemente alta e o projétil continuou com o seu movimento para frente até a perfuração completa do alvo e (iii) as ondas de tensões produzidas no impacto refletiram na face distal e sob a forma de ondas trativas produziram o estilhaçamento do material.

Pode-se considerar, tendo em vista a menor energia de impacto do projétil de 9 mm, que neste caso a deformação do alvo ocorreu em duas fases: (i) o impacto, não tendo energia suficiente para cortar as fibras, produziu apenas a deformação do compósito na face frontal e (ii) as ondas de tensão foram refletidas na superfície livre da face distal e as tensões trativas geradas produziram, ao encontrarem a interface matriz/reforço, a separação das camadas e, conseqüentemente, a delaminação do compósito mas sem uma separação completa, isto é, sem estilhaçamento.

4 CONCLUSÕES

Os resultados do trabalho mostraram que a metodologia utilizada é adequada para avaliar o comportamento balístico de blindagens fabricadas com compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras, especificamente do compósito epóxi / fibra de vidro.

Tendo em vista a análise realizada pode-se, ainda, apresentar as seguintes conclusões:

1. O compósito epóxi / fibra de vidro fabricado com 15 camadas de tecido de fibra de vidro E resiste a munição 9 mm FMJ, projétil de 8,0g de massa, na velocidade de 379 ± 10 m/s, sendo adequado para emprego como blindagem Tipo II segundo a norma NIJ Std 0108.01.
2. O compósito epóxi / fibra de vidro não resiste a munição .357" Magnum, projétil de 10,2g de massa, na velocidade na velocidade de 430 ± 10 m/s não sendo adequado para emprego como blindagem Tipo III segundo a norma NIJ Std 0108.01.
3. O aumento da energia de impacto balístico modifica o modo de deformação (falha) do compósito epóxi / fibra de vidro; quanto maior a energia de impacto, maior a quantidade de danos.
4. A energia de impacto balístico, no compósito epóxi / fibra de vidro, é absorvida parcialmente pela delaminação das camadas, independentemente do tipo de munição utilizada.
5. Os mecanismos de deformação do compósito são modificados com o aumento da energia de impacto, passando de separação fibra-matriz para batoque, conforme determinados no exame visual.

Agradecimentos

Os autores agradecem as agências nacionais CNPq, CAPES e FAPERJ pelo apoio financeiro e à empresa Dow Química S.A. pela doação das resinas epóxi.

REFERÊNCIAS

- 1 ST 17-1-3, *History and Role of Armor*, US Army Armor School, Fort Knox, Kentucky, 1974.
- 2 L.C. LAIBLE, E. BARRON in *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, R.C. Laible, Elsevier Scientific Pub.; Amsterdam, 1980, p. 9-15.
- 3 M.A. MEYERS, *Dynamic Behavior of Materials*. New York. John Wiley & Sons, 1994.
- 4 J. ROBERTS J. The use of fibre reinforced composite materials in land systems equipment. In: Proc. of *Defence Components and Equipment Exhibition*, Session 3 - New Materials, London, 1985. p. 6.1.
- 5 J.C. MIGUEZ SUAREZ. Materiais para uso em blindagens de carros de combate e em proteção individual. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, 3 (4) (1986) 46-55.
- 6 G.M. SAVAGE. Fabric and fibre reinforced laminate armours. *Metals and Materials* May 1989; (5) 285-292.
- 7 A.S.C. CHIN. Army focused research team on functionally graded armor composites. *Mater Sci Engng A250* (1999) 155-164.
- 8 A.L. DOS SANTOS ALVES, L.F.C. NASCIMENTO, J.C. MIGUEZ SUAREZ, Influence of weathering and gamma irradiation on the mechanical and ballistic behavior of UHMWPE composite armor *Polymer Testing*, 24 (2005) 104-113.
- 9 V. VIVAS, M.B.G. DO SOUTO, J.C. MIGUEZ SUAREZ, Effect of thermal and irradiation aging on the ballistic behavior of aramid reinforced epoxy composite, *Sci Engng Compos Mater*, 14 (2007) 1-16.
- 10 NIJ Standard 0108.01 - Ballistic resistant protective materials, National Institute of JUSTICE, U.S. Department of Justice, 1990.
- 11 Norma ASTM D785 - Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials - Standard Test Methods for - American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1998).
- 12 Norma ASTM D3039M – Tensile properties of polymer matrix composites materials - Standard Test Method for - American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (2000).

- 13 Norma ASTM D790M - Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials [Metric] - Standard Test Methods for - American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1993).
- 14 MicroStation SE Program[®], Bentley Systems, Inc., Exton, PA, USA, (1995).
- 15 D.G. METTES. *Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold Co, 1969.
- 16 I.M. DANIEL, O. ISHAI. *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford: Oxford University Press, 2006.
- 17 M.E. BACKMAN, W. GOLDSMITH. The mechanics of penetration of projectiles into targets. *Int J Engng Sci*, 16 (1) (1978) 1-99.
- 18 M.E. WILKINS, Mechanics of penetration and perforation, *Int J Engng Sci*, 16 (11) (1978) 809-827
- 19 G.T. EGGLESTONE, E.P. GELLERT, R.L. WOODWARD. Perforation failure mechanisms in laminated composites. In: *Proc. of Conference on Materials United in the Service of Man*, Perth, Australia, Vol. 1, 1990. p.2.1
- 20 J. A. ZUKAS, T. NICHOLAS, H. F. SWIFT, L.B. GRESZCZUK, D. R. CURRAN, *Impact Dynamics*, New York, John Wiley & Sons, 1982.
- 21 K.K. CHAWLA. *Composite Materials - Science and Engineering*. New York: Springer-Verlag, Inc., 2nd Ed., 1998.