

## RESPOSTA AO IMPACTO BALÍSTICO DE COMPÓSITOS DE ALUMINA-ARAMIDA-PEUAPM\*

André Ben-Hur da Silva Figueiredo<sup>1</sup>  
Danúbia Bordim de Carvalho<sup>2</sup>  
Letícia dos Santos Aguilera<sup>3</sup>  
Gabriel Burlandy Mota de Melo<sup>4</sup>  
Ronaldo Sergio de Biasi<sup>5</sup>

### Resumo

A resposta ao impacto balístico de compósitos de alumina e aramida com polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) foi investigada para três diferentes concentrações em massa de alumina, 85%, 90% e 95%. Os ensaios de impacto foram realizados em velocidade subsônica utilizando um sistema de ar comprimido. Cada corpo de prova foi submetido a dois disparos. Os resultados mostraram que a profundidade de penetração (PP) em uma placa de madeira MDF protegida por um disco do compósito diminuiu com o aumento da concentração de alumina. Nenhuma das amostras se fragmentou após os dois disparos. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos compósitos mostraram fratura transgranular, intergranular e dúctil.

**Palavras-chave:** Blindagem balística; Impacto balístico; Compósito alumina-aramida-PEUAPM.

### RESPONSE TO BALLISTIC IMPACT OF ALUMINA-ARAMID- UHMWPE COMPOSITES

#### Abstract

The response to ballistic impact of alumina-aramid-ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composites with three different mass concentrations of alumina, 85%, 90% e 95%, was investigated. The impact tests were carried out at subsonic speed using a compressed air system. Each specimen was submitted to two shots. The results showed that the depth of penetration (DOP) in a Medium Density Fiberboard (MDF) bulkhead protected by a disk of the composite decreased with increasing concentration of alumina. None of the samples fragmented after the second shot. Scanning electron microscopy (SEM) images of the composites showed transgranular, intergranular and ductile fracture.

**Keywords:** Ballistic shielding; Ballistic impact; Alumina-UHMWPE composite.

<sup>1</sup> *Bacharel em Física, Mestre em Engenharia Nuclear, Doutor em Ciência dos Materiais, Professor, Curso Básico e Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Bacharel em Engenharia Química, Mestra em Ciência dos Materiais, Doutoranda em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>3</sup> *Bacharel em Engenharia de Petróleo, Mestra em Ciência dos Materiais, Doutoranda em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>4</sup> *Licenciado em Física e Mestre em Ciências dos Materiais, Doutor em Ciência dos Materiais, Colaborador, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>5</sup> *Bacharel em Engenharia Elétrica, Mestre em Engenharia Elétrica, Ph.D. em Engenharia Elétrica, Professor Emérito da Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A alumina é um material de engenharia amplamente utilizado. Sua dureza, resistência à abrasão e inércia química o tornam um material ideal para uso em ambientes agressivos, da indústria de mineração a ambientes biomédicos. No entanto, a baixa resistência à flexão e baixa tenacidade à fratura significam que o uso de alumina pura para proteção balística pode levar a falhas catastróficas. Além disso, a alta densidade limita seu uso em aplicações em que o peso é crucial, como coletes à prova de balas [1-3].

Kovalevskaya et al [4] mostraram que a introdução de partículas de alumina em polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) aumenta o módulo de Young do polímero.

Hofsté et al [5] mostraram que a introdução de fibras de aramida curtas em PEUAPM aumenta a resistência à tração e o módulo de Young do polímero.

A Tabela 1 mostra a densidade relativa, resistência à tração e módulo de Young de PEUAPM, aramida e alumina [6,7].

**Tabela 1.** Algumas características da aramida, PEUAPM e alumina

<b>Material</b>	<b>Densidade Relativa</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>
alumina	3,95	1,38	379
aramida	1,44	3,6-4,1	131
PEUAPM	0,97	2,60	117

O objetivo deste trabalho foi investigar as propriedades de compósitos alumina-aramida-PEUAPM nos quais aramida e PEUAPM foram usados para diminuir a densidade e aumentar a resistência à flexão e a tenacidade à fratura da alumina, tornando-a mais adequada para proteção pessoal e evitando fratura após o primeiro tiro. Há também um fator econômico envolvido, uma vez que o compósito é preparado a uma temperatura relativamente baixa, 230 °C, enquanto a alumina pura deve ser preparada por sinterização a altas temperaturas, da ordem de 1400 °C, um procedimento de custo mais elevado.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais

Os materiais utilizados foram: alumina em pó de 60 mesh (Fisher Scientific); fio de aramida com 10  $\mu\text{m}$  de espessura e 10 mm de comprimento [HY Networks (Shanghai)]; PEUAPM Mipelon PM-200 (Mitsui Chemicals) e placa MDF com espessura de 1" (Arauco do Brasil).

### 2.2 Preparação da Amostra

Misturas com diferentes razões de alumina-aramida-PEUAPM foram preparadas por agitação mecânica durante 10 min e rotuladas A85, A90 e A95, em que 85, 90 e 95 é a concentração percentual em massa de alumina. A massa das fibras de aramida foi a mesma em todas as amostras, 0,30 g. As amostras foram produzidas na forma de discos com 5 mm de espessura e 51 mm de diâmetro. Os discos foram prensados a 230 °C por 10 min sob uma força de 90 kN. A amostra A00 é uma amostra de PEUAPM puro.

## 2.3 Caracterização

Para os ensaios balísticos, foi usado um rifle de ar comprimido da marca Gunpower modelo SSS com um supressor de ruído Padrão Armas. Foram usados projéteis calibre 22 de chumbo com uma massa estimada de 3,3 g. Para determinar a velocidade de boca e a energia em cada disparo, foi usado um cronógrafo balístico da marca Air Chrony modelo MK3, com precisão de 0,15 m/s. Após os ensaios balísticos, as imagens dos compósitos de 85%, 90% e 95% de alumina foram obtidas em um Microscópio Eletrônico de Varredura FEI Quanta FEG 250.

## 2.4 Testes Balísticos

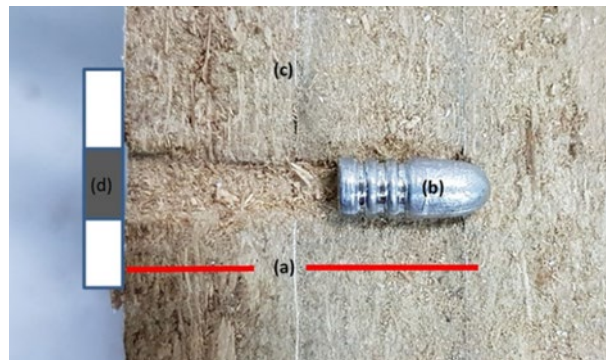
Nos testes balísticos, o rifle foi posicionado a 5 m de distância do alvo, um disco preso com fita adesiva em uma placa de MDF e alinhado perpendicularmente ao rifle.

Um supressor de ruído foi usado para aumentar a estabilidade do projétil na saída do rifle, reduzindo o turbilhonamento causado pelo escape.

Placas de MDF foram usadas como anteparos porque o MDF é um material homogêneo, plano e denso, sem os nós de madeira maciça.

O cronógrafo balístico foi colocado a 10 cm da saída do supressor de ruído.

A Figura 1 mostra o resultado de um disparo típico.



**Figura 1.** Resultado de um disparo típico. (a) Profundidade de penetração, definida como a distância entre a superfície do anteparo e a ponta do projétil; (b) projétil; (c) anteparo de MDF; (d) disco de compósito.

Quando a distância entre a boca do rifle e o alvo é pequena, como no presente caso, a velocidade de impacto é equivalente a velocidade da boca.

Considerando que o peso é um fator importante para uma proteção pessoal, será definido o fator de mérito pela seguinte equação:

$$FM = 100 / (PP \times M_c) \quad (1)$$

em que  $M_c$  é a massa do compósito.

## 2.5 Testes Balísticos

Todos os disparos atravessaram o disco. Dois tiros foram feitos em cada experimento e cinco experimentos foram realizados para cada composição. A Fig. 2

mostra uma fotografia das amostras A00, A85 e A90 após dois disparos e a A95 apresentando ruptura após o terceiro disparo.



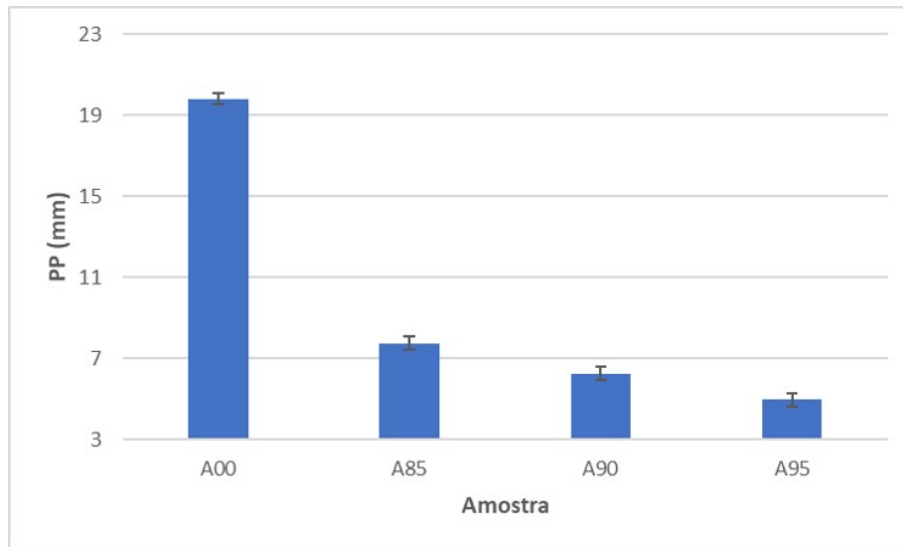
**Figura 2.** Amostras A00, A85, A90 e A95 (da esquerda para a direita e de cima para baixo, respectivamente) após os testes balísticos.

A Tabela 1 mostra a massa do compósito, velocidade média de impacto, profundidade de penetração e o fator de mérito para cada composição. A variação da velocidade de impacto teve muito pouca influência na profundidade de penetração [8].

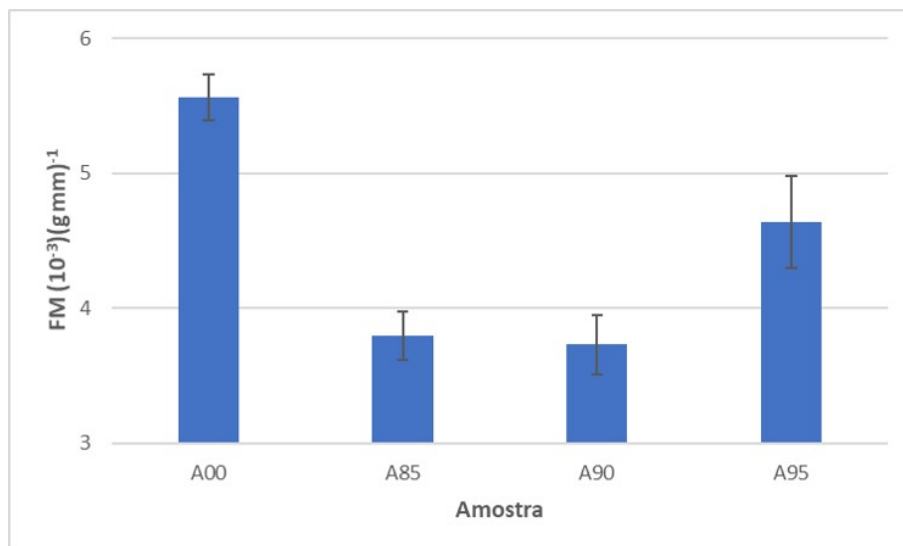
**Tabela 1.** Resultados médios dos testes balísticos

Compósito	Massa do Compósito	Velocidade de Impacto (m/s)	PP(mm)	Fator de Mérito ( $10^{-3}$ ) ( $\text{g mm}^{-1}$ )
A00	$9,07 \pm 0,16$	$245,56 \pm 2,14$	$19,83 \pm 0,94$	$5,56 \pm 0,17$
A85	$33,95 \pm 0,12$	$260,78 \pm 1,18$	$7,75 \pm 1,19$	$3,80 \pm 0,18$
A90	$42,90 \pm 0,21$	$257,37 \pm 2,40$	$6,25 \pm 1,18$	$3,73 \pm 0,22$
A95	$43,53 \pm 0,13$	$264,80 \pm 0,75$	$4,95 \pm 1,22$	$4,64 \pm 0,34$

As Figuras 3 e 4, apresentam a variação da profundidade de penetração e do fator de mérito com a concentração de alumina. A amostra A95 tem o melhor desempenho entre as amostras compósitas. Figueiredo *et al* [9] apresenta semelhante desempenho para amostra A95 sem adição de aramida, no entanto com massa 29% maior. Isto se deve a menor densidade da aramida e a maior concentração de poros com a adição das fibras [5].



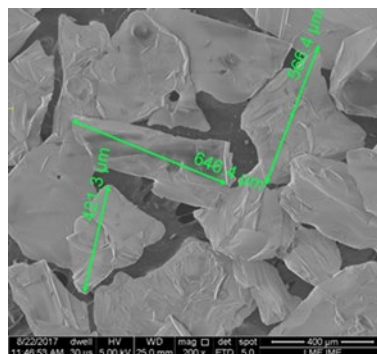
**Figura 3.** Variação de PP com a concentração de alumina.



**Figura 4.** Variação de FM com a concentração de alumina.

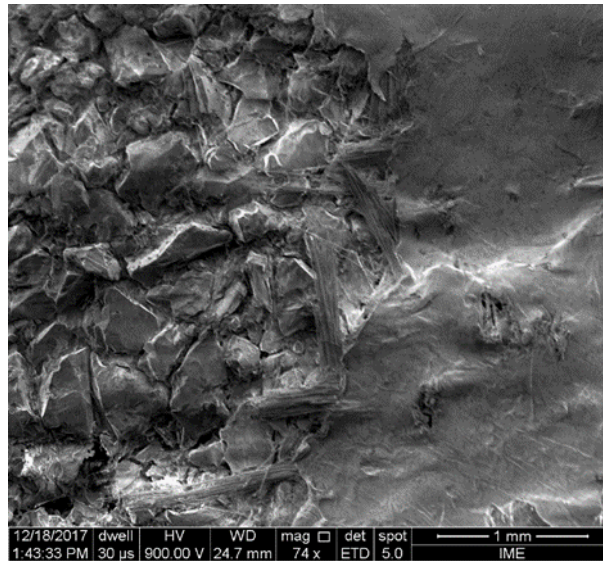
## 2.5 Imagens de Pó de Alumina e das Amostras A85, A90 e A95

A Figura 5 é uma imagem de MEV do pó de alumina, mostrando a forma irregular dos grãos, que aumenta a rigidez dos compósitos.



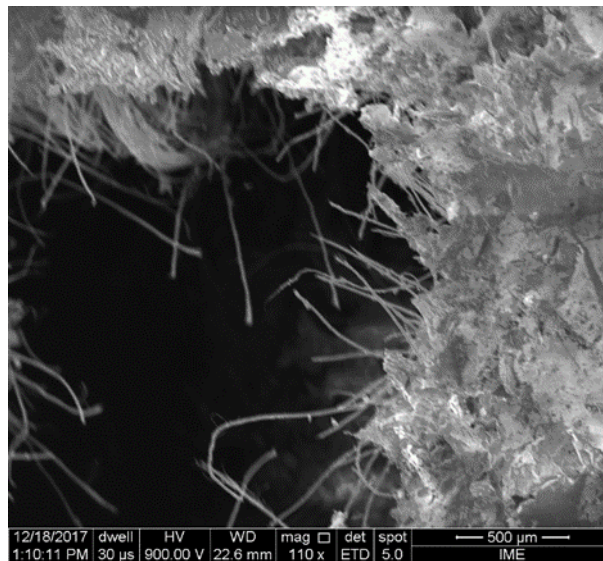
**Figura 5.** Imagem de MEV do pó de alumina.

A Figura 6 é uma imagem de MEV de uma amostra A85 mostrando uma fratura transgranular frágil.



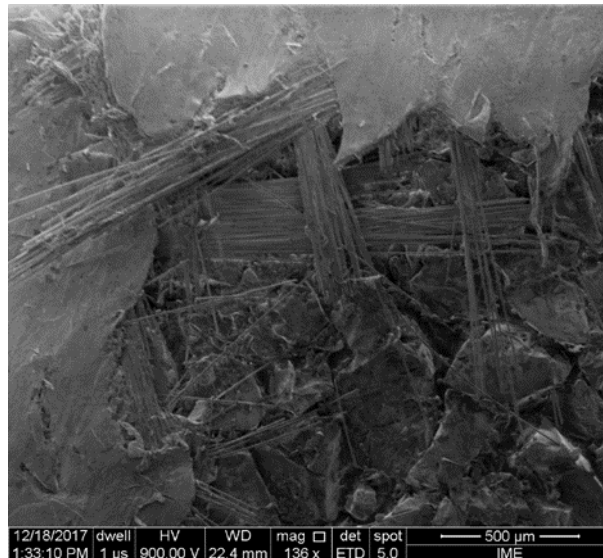
**Figura 6.** Imagens de MEV da amostra A85 com fratura transgranular frágil.

A Figura 7 é uma imagem da mesma amostra mostrando um arrancamento de fibras de aramida, que contribui para aumentar a resistência à tração e a tenacidade [5, 6].



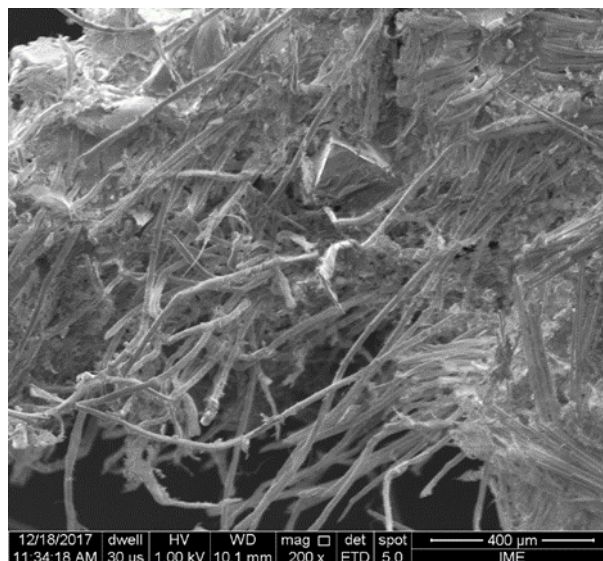
**Figura 7.** Imagem de MEV da amostra A85 com arrancamento de fibras de aramida.

A Figura 8 é uma imagem de MEV de uma amostra A90, mostrando arrancamento de fibras de aramida, poros e uma fissura intergranular.



**Figura 8.** Imagem SEM da amostra A90, mostrando arrancamento de fibras de aramida, poros e uma trinca intergranular.

A Figura 9 é a imagem de uma amostra A95, mostrando o arrancamento de fibras de aramida.



**Figura 9.** Imagens MEV de amostras A95, mostrando o arrancamento de fibras de aramida.

A Figura 10 mostra uma trinca em outra região na amostra A95, atribuída a todos os mecanismos [10,11].

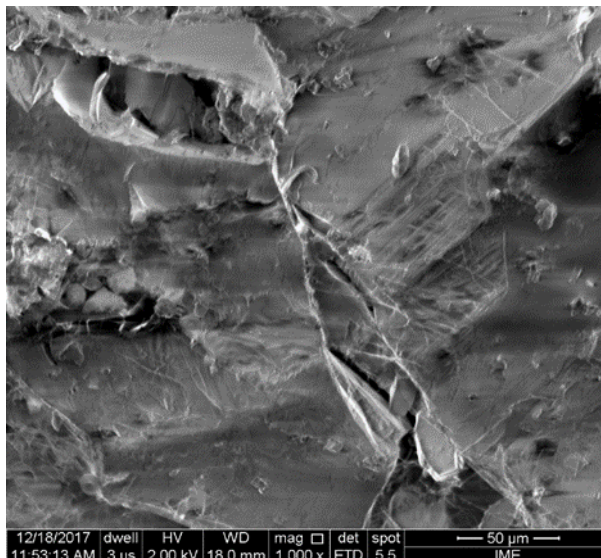


Figura 10. Imagens SEM de amostras A95, mostrando uma fratura transgranular e uma trinca.

### 3 CONCLUSÃO

O compósito A95 foi o que produziu a menor profundidade de penetração, principalmente devido ao aumento da rigidez, e resistiu ao segundo tiro sem fragmentar. No entanto, compósitos com menores concentrações de alumina são mais leves e podem ser úteis para certas aplicações. Imagens de MEV das amostras A85, A90 e A95 mostraram vários modos de absorção da energia do projétil.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

### REFERÊNCIAS

- 1 P.V. Cavallaro, "Soft body armor: an overview of materials, manufacturing, testing, and ballistic impact dynamics," 1 August 2011, NUWC-NPT Technical Report 12,057
- 2 G. Azevedo, J.C.T. Aragão, "Apontamentos sobre balística," Rio de Janeiro, 2010.
- 3 D.E. Carlucci and S.S. Jacobson, "Ballistics: theory and design of guns and ammunition." Boca Raton [Florida]: CRC, 2008. 496p. ISBN 1420066180.
- 4 O.V. Kovalevskaya, Y.I. Gordeev, A.K. Abkaryan, "Polymer composite materials based on ultra high molecular weight polyethylene matrix filled by aluminum oxide powders," ECCM15 – 15th European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 2012.
- 5 J.M. Hofsté, K.J.R. Bergmans, J. de Boer, R. Wevers, A.J. Pennings, "Short aramid-fiber reinforced ultra-high molecular weight polyethylene, Polymer Bulletins , v.36, p. 213-220, 1996.
- 6 M.J. Folkes, "Short fibre reinforced thermoplastics," John Wiley & Sons, New York, 1982.
- 7 L.B. Gomes, J. Hatzfeld, M. Heck, A. Polorny, C. P. Bergmann, "Sinterização em duas etapas de alumina aditivada com nióbia," 21o CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, MT, Brasil, 2014
- 8 C.E. ANDERSON JR, "Analytical models for penetration mechanics: A review", Int. J. Impact Eng., v. 108, p. 3-26, 2017.
- 9 A.B.S. Figueiredo, E.P. Lima Jr, A. V. Gomes, G.B.M Melo, S. N. Monteiro, R. S de Biasi, "Response to ballistic impact of alumina-UHMWPE", Mat. Res., in press, 2018.



- 10 F.M.B. Coutinho, I.L. Mello, L.C. Santa Maria, “Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações,” *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 13, p. 1-13, 2003.
- 11 F.S. Senatov, M.V. Gorshenkov, V.V. Tcherdyntsev, S.D. Kaloshkin, V.A. Sudarchikov, “Fractographic analysis of composites based on ultra high molecular weight polyethylene,” *Composites: Part B*, v. 56, p. 869-875, 2014.