

# ABSORÇÃO DE ENERGIA EM ENSAIO BALÍSTICO DE COMPÓSITOS ALUMINA-PEUAPM\*

André Ben-Hur da Silva Figueiredo<sup>1</sup>  
Igor Sena Melo<sup>2</sup>  
Yan Augusto Lopes de Aguiar<sup>3</sup>  
Leticia dos Santos Aguilera<sup>4</sup>  
Ronaldo Sérgio de Biasi<sup>5</sup>

## Resumo

A absorção de energia em ensaio balístico de compósitos de polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) com diferentes concentrações de alumina foi investigada. Os testes balísticos foram realizados em velocidade subsônica utilizando um sistema de ar comprimido. Os resultados mostraram que a energia absorvida por um disco de compósito aumentou monotonicamente com o aumento da concentração de alumina, mas compostos com concentrações moderadas de alumina são mais leves e podem ser úteis para certas aplicações. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de compósitos com 90% e 95% de alumina apresentaram vazios e fraturas transgranulares, intergranulares e dúcteis.

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

## ENERGY ABSORPTION IN BALLISTIC TEST OF ALUMINA-UHMWPE COMPOSITES

### Abstract

The energy absorption in ballistic test of alumina-ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composites with different concentrations of alumina was investigated. The ballistic tests were carried out at subsonic speed using a compressed air system. The results showed that energy absorbed by a disk of composite increased monotonically with increasing concentration of alumina, but composites with moderate concentrations of alumina are lighter and may be useful for certain applications. Scanning electron microscopy (SEM) images of composites with 90% and 95% alumina showed voids and 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 Ciências dos Materiais, Professor Associado, Curso Básico e Seção de Engenharia de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Graduando em Engenharia Mecânica, Curso Básico, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>3</sup> *Graduando em Engenharia Mecânica, Curso Básico, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>4</sup> *Bacharel em Engenharia de Petróleo, Mestra em Ciência dos Materiais, Doutora em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia 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, Seção de Engenharia de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

No início do século XXI, apesar da ausência de conflitos internacionais na escala das duas Guerras Mundiais, conflitos locais e regionais envolvendo diferentes tribos, grupos étnicos, milícias, gangues e traficantes fortemente armados são uma séria ameaça em várias partes do mundo.

Coletes personalizados de proteção pessoal à prova de balas usam tecido de aramida como camada única de blindagem. Essa proteção, no entanto, está limitada a um impacto relativamente baixo, até 9 mm de munição. A proteção contra altas velocidades de impacto requer um sistema de blindagem multicamadas (SBM) [1]. O SBM convencional tem, ao lado do tecido de aramida, uma camada frontal de cerâmica, que absorve a maior parte da energia de impacto, erodindo a ponta do projétil. Este mecanismo fragmenta e dissipa a energia do projétil junto com a fragmentação frágil da cerâmica. No entanto, essa proteção aumenta o custo e compromete a mobilidade do soldado, devido ao aumento do peso do equipamento. Além disso, esta primeira camada pode ser comprometida por um único impacto, não protegendo contra outro tiro na mesma região.

Os principais materiais cerâmicos utilizados para proteção balística são: alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), carbeto de silício ( $\text{SiC}$ ) e carbeto de boro ( $\text{B}_4\text{C}$ ). A alumina, embora relativamente densa, cerca de  $3,95 \text{ g/cm}^2$ , tem sido amplamente utilizada na proteção balística devido às suas boas propriedades físicas. Sua dureza, resistência à abrasão e inércia química fornecendo um material ideal para uso em ambientes agressivos, desde indústrias de mineração até ambientes biomédicos. No entanto, sua baixa resistência à flexão e baixa tenacidade à fratura significa que o uso de alumina pura para proteção balística pode levar a uma falha catastrófica. Além disso, sua alta densidade limita seu uso em aplicações onde o peso é crucial, como coletes balísticos [2,3].

O objetivo deste trabalho foi investigar as propriedades de compósitos alumina-PEUAPM nos quais o PEUAPM é utilizado para diminuir a densidade e aumentar a resistência à flexão, tornando a blindagem mais adequada para proteção pessoal e evitando fraturas após o primeiro disparo [4,5]. Há também um fator econômico envolvido, uma vez que o compósito é preparado a uma temperatura relativamente baixa,  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ , enquanto a alumina pura deve ser preparada em pó de alumina sinterizada a altas temperaturas, da ordem de  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ , um procedimento de alto custo [6-9].

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais

Os materiais usados foram: Alundum em pó de 60 Mesh com 9,25 Mohs de dureza (Fisher Scientific) e PEUAPM em pó com  $10 \text{ } \mu\text{m}$  a  $30 \text{ } \mu\text{m}$  de diâmetro Mipelon PM-200 (Mitsui Chemicals).

### 2.2 Preparação da amostra

Compósitos com diferentes concentrações em massa de alumina-PEUAPM foram preparados com mistura mecânica por 10 min e rotulados como A00, A20, A40, A60, A80, A85, A90 e A95, onde 20, 40, etc. é a concentração percentual em massa de

alumina, sendo que A00 é a amostra pura de PEUAPM usada para comparação. As amostras foram produzidas na forma de disco com 5 mm de espessura 51 mm de diâmetro. Os discos foram prensados a 230 °C por 10 minutos sob uma força de 90kN e mantido em forma de alumínio.

### 2.3 Caracterização

Para o teste balístico, foi usado um rifle de ar comprimido da marca Gunpower modelo SSS com supressor de ruído Padrão Armas. A munição foi de chumbo no calibre 22, com massa estimada de 3,3 g. Um cronógrafo balístico da marca Air Chrony modelo MK3, com precisão de 0,15 m/s, foi usado para medir a velocidade de impacto, e um cronógrafo balístico da marca ProChrono modelo Pal, com precisão de 0,31 m/s, foi usado para medir a velocidade residual.

Após teste balístico, imagens dos compósitos com 90% e 95% de alumina foram obtidas usando um microscópio eletrônico de varredura da marca FEI Quanta FEG 250 SEM.

### 2.4 Teste balístico

Para o teste balístico, o rifle de ar comprimido foi posicionado a 5 m do alvo, consistindo no disco de compósito preso a uma moldura de alumínio, fixado por uma morsa e alinhado perpendicularmente ao rifle. O primeiro cronógrafo foi posicionado a 10 cm a frente do supressor de ruído e o segundo foi colocado a 10 cm atrás do alvo.

A energia absorvida pelo alvo foi determinada usando a equação

$$E_{abs} = \frac{1}{2} m_p (v_i^2 - v_r^2) \quad (1)$$

em que  $m_p$  é a massa do projétil,  $v_i$  é a velocidade de impacto e  $v_r$  é a velocidade residual [9].

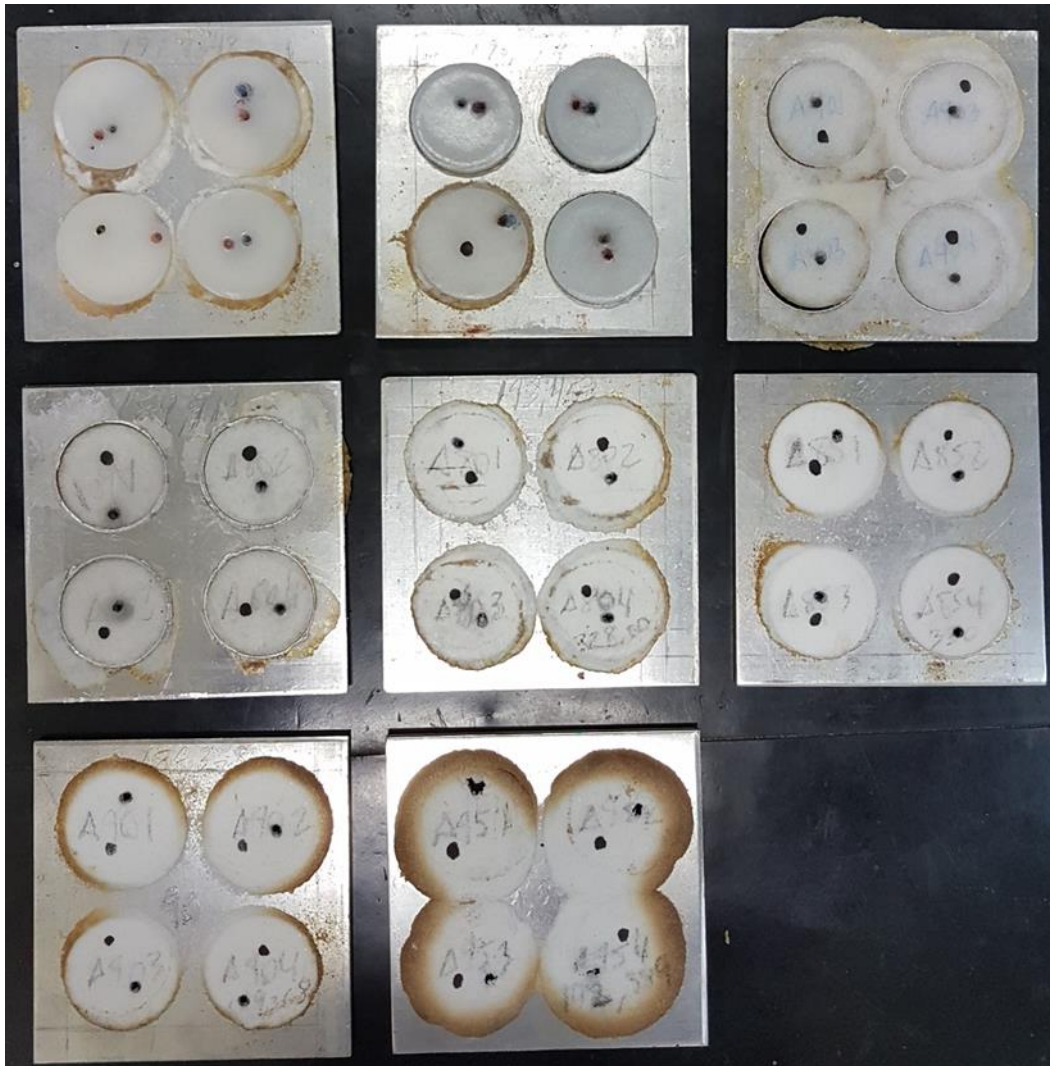
### 2.5 Resultado e Discussão

#### 2.5.1 Teste balístico

Todos os disparos penetraram completamente no disco. Dois tiros foram feitos em cada experimento e oito experimentos foram realizados para cada composição. Amostras representativas são mostradas na Fig. 1 após os dois disparos.

Nenhuma variação significativa na energia de absorção foi observada entre o primeiro e segundo disparo.

Como o teste foi realizado com as amostras presas nos suportes de alumínio, o movimento lateral foi suprimido, reduzindo os danos ao compósito [10].



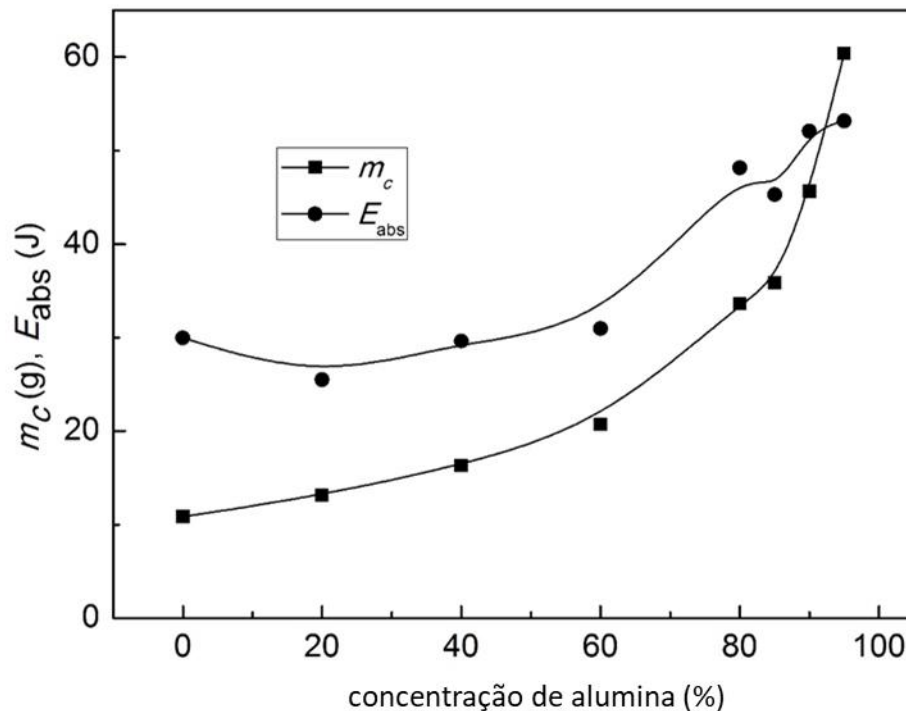
**Figura 1.** Amostras: A00, A20, A40, A60, A80, A85, A90 e A95 dispostas em linhas de cima para baixo, após teste balístico.

A Tabela 1 mostra os valores médios da massa do compósito ( $m_c$ ), massa do projétil ( $m_p$ ), velocidade média de impacto ( $v_i$ ), velocidade média residual ( $v_r$ ) e energia de absorção ( $E_{abs}$ ) para cada composição. Como esperado,  $m_c$  e  $E_{abs}$  aumentam com o aumento da concentração de alumina no compósito.

**Tabela 1:** Resultados médios do teste balístico.

COMPÓSITO	$m_c$ (g)	$m_p$ (g)	$V_i$ (m/s)	$V_r$ (m/s)	$E_{abs}$ (J)
A00	10,85 ± 0,10	3,24 ± 0,13	267,04 ± 1,40	225,92 ± 2,04	28,98 ± 1,45
A20	13,16 ± 0,09	3,20 ± 0,16	267,66 ± 1,73	230,89 ± 1,51	25,50 ± 1,33
A40	16,33 ± 0,12	3,23 ± 0,10	266,53 ± 0,85	223,97 ± 2,48	29,63 ± 1,95
A60	20,73 ± 0,08	3,24 ± 0,15	263,28 ± 1,65	218,72 ± 1,50	30,98 ± 1,28
A80	33,64 ± 0,11	3,19 ± 0,11	269,76 ± 1,65	200,28 ± 1,92	48,16 ± 1,26
A85	35,85 ± 0,13	3,23 ± 0,09	263,29 ± 1,64	197,21 ± 1,99	45,30 ± 1,41
A90	45,66 ± 0,08	3,24 ± 0,11	260,34 ± 1,98	183,28 ± 2,84	52,06 ± 1,81
A95	60,40 ± 0,11	3,19 ± 0,21	262,72 ± 2,03	182,27 ± 2,00	53,17 ± 1,54

A Figura 2 mostra a massa e a energia de absorção do compósito como funções da concentração de alumina.



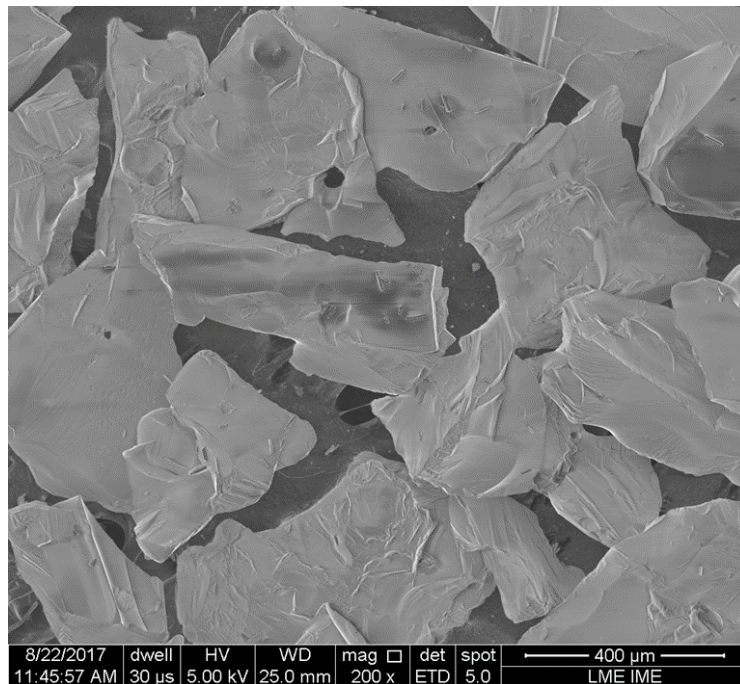
**Figura 2.** Massa do compósito  $m_c$  e energia de absorção  $E_{abs}$  para vários valores de concentração de alumina. As linhas são apenas guias para os olhos.

Como, para concentrações de alumina acima de 80%, há um grande aumento na massa e um aumento relativamente pequeno na energia de absorção, uma concentração de 80% parece oferecer o melhor compromisso de baixo peso e proteção adequada para blindagem pessoal.

### 2.5.2 Imagens do pó de alumina e amostras A90 e A95

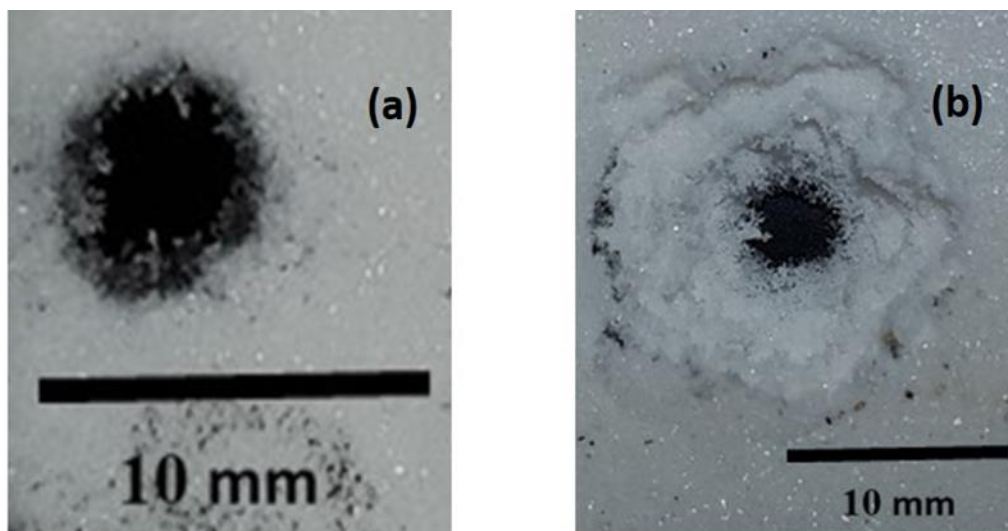
A Figura 3 é uma imagem de MEV do pó de alumina, mostrando a forma irregular dos grãos, o que melhora a rigidez dos compósitos.



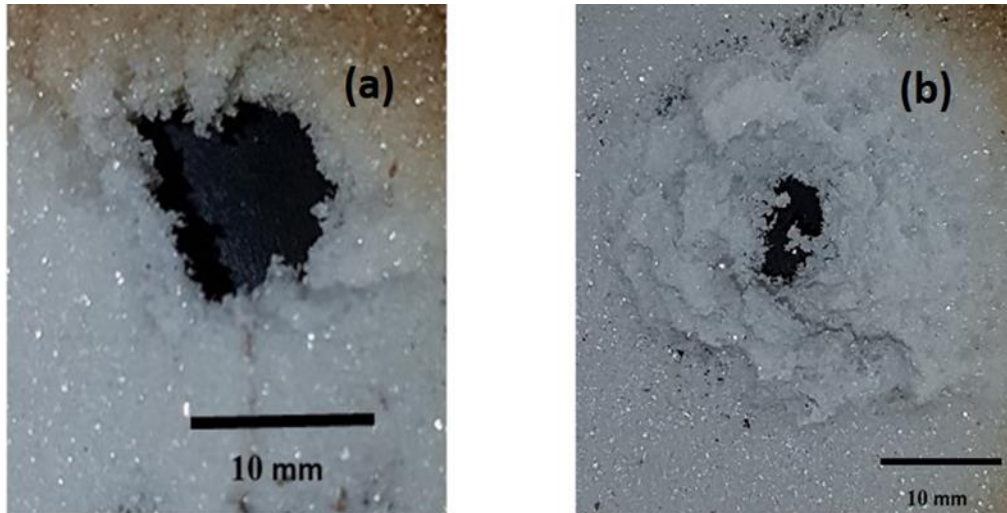


**Figura 3.** Imagem de MEV do pó de alumina.

As Figuras 4 e 5 mostram as faces frontal e distal das amostras A90 e A95. Após a fragmentação da região de impacto, devido a microfissuração e a plasticidade, as ondas de choque compressivas se propagam ao longo da espessura e são responsáveis por diversas rachaduras, cuja interação cria, subsequentemente, uma zona de dano cônico que, é a falha dominante para este tipo de impacto. É possível observar fratura dúctil na região interna do orifício nas amostras A90 e A95, Figuras 4 e 5.

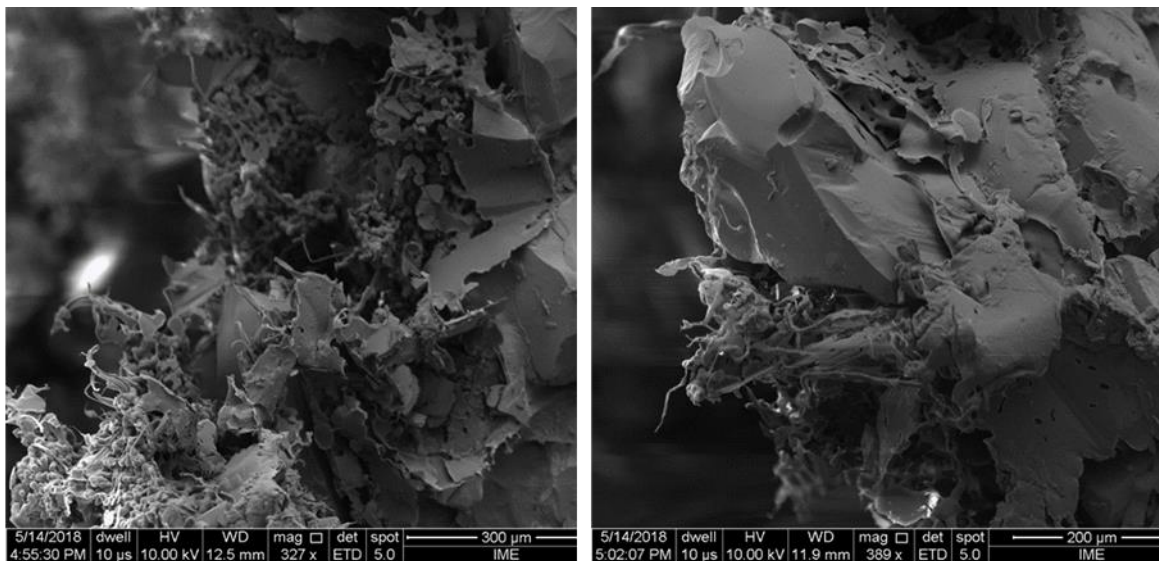


**Figura 4.** Imagem de MEV da (a) face frontal e (b) face distal de uma amostra A90, mostrando a cratera formada pelo impacto.



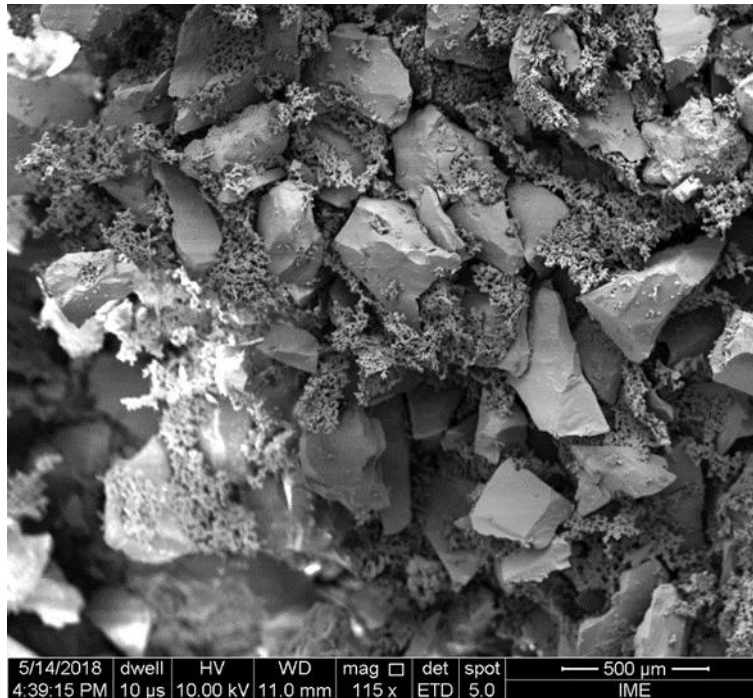
**Figura 5.** Imagem de MEV da (a) face frontal e (b) face distal de uma amostra A95, mostrando a cratera formada por impacto.

A Figura 6 é uma imagem de MEV da face distal de uma amostra A90, mostrando: (a) uma região dúctil de PEUAPM e uma região de *pullout* de alumina e (b) uma fratura dúctil de PEUAPM que contribui para aumentar a tenacidade, de uma região de *pullout* de alumina e grãos de alumina cobertos com PEUAPM.



**Figura 6.** Imagens de MEV da amostra A90 com (a) uma região dúctil e região de *pullout* de alumina e (b) grãos de alumina cobertos com PEUAPM.

A Figura 7 é uma imagem de MEV de uma amostra A95, mostrando grãos de alumina com formas irregulares e alta porosidade.



**Figura 7.** Imagens de MEV da amostra A95, mostrando uma fratura transgranular, vazios, *pullout* de alumina e grãos de alumina cobertos com PEUAPM.

### 3 CONCLUSÃO

O compósito A95 foi o que apresentou maior energia de absorção, principalmente devido ao aumento da rigidez. No entanto, compósitos com menores concentrações de alumina são mais leves e podem ser úteis para certas aplicações. tais como blindagens pessoais (coletes balísticos), caso em que o compósito A80 pode oferecer um bom compromisso de baixo peso e proteção adequada.

### Agradecimentos

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

### REFERÊNCIAS

- [1] LUZ, F.S., JUNIOR, E.P.L., LOURO, L.H.L., MONTEIRO, S.N., Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric, *Materials Research*, v. 18, p. 170-177, 2015.
- [2] CAVALLARO, P.V., Soft body armor: an overview of materials, manufacturing, testing, and ballistic impact dynamics, 1 August 2011, NUWC-NPT Technical Report 12,057
- [3] CARLUCCI, D.E.; JACOBSON, S.S. *Ballistics: theory and design of guns and ammunition*. Boca Raton [Florida]: CRC, 2008. 496p. ISBN 1420066180.
- [4] COUTINHO, F.M.B., MELLO, I.L., SANTA MARIA, L.C., *Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações*, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 13, p. 1-13, 2003.



[5] SENATOV, F.S., GORSHENKOV, M.V., TCHERDYNTSEV, V.V., KALOSHKIN, S.D., SUDARCHIKOV, V.A., Fractographic analysis of composites based on ultra high molecular weight polyethylene, Composites: Part B, v. 56, p. 869-875, 2014.

[6] MEDVEDOVSKI, E., Ballistic performance of armor ceramics: Influence of design and structure – part I, Ceramics International, v. 36, p. 2103-2115, 2010.

[7] MEDVEDOVSKI, E., Ballistic performance of armor ceramics: Influence of design and structure – part II, Ceramics International, v. 36, p. 2117-2127, 2010.

[8] MEDVEDOVSKI, E., Lightweight ceramic composite armor system, Advances in Applied Ceramics, v. 105, p. 241-245, 2006.

[9] AZEVEDO, G., ARAGÃO, J.C.T., Apontamentos sobre balística, Rio de Janeiro, 2010.

[10] SHERMAN, D., Impact failure mechanism in alumina tiles on finite thickness support and the effect of confinement, Int. J. Impact Eng., v.24, p. 313-328, 2000.