

Compósito de alumina e polietileno de baixa densidade, uma alternativa de aplicação em proteção balística

Márcio J Oliveira^{a,b}, Alaelson Vieira Gomes^a, André Rocha Pimenta^b

^a Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270,

Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^b LISComp, Instituto Federal do Rio de Janeiro, Paracambi, Brasil

*alaelson@ime.cb.br

RESUMO: Este trabalho apresenta um compósito, formado por alumina e polietileno de baixa densidade, para utilização em proteções balísticas, principalmente coletes. O material foi fabricado com 70% em peso de alumina e 30% em peso de polietileno de baixa densidade e submetido a testes balísticos e caracterizações físicas e térmicas. Após o ensaio balístico, a superfície de fratura foi caracterizada por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados indicaram que uma placa de 15 mm do compósito é capaz de resistir de forma adequada a impactos balísticos de projéteis .22 LR. O compósito apresentou baixa absorção de água, suportou altas temperaturas e demonstrou boa estabilidade térmica. Contudo, apesar de aumentar o tempo de propagação de chama do polietileno, a adição de alumina não foi capaz de conferir propriedade de auto extinção de chama. Conclui-se que o compósito possui bom desempenho para proteções balísticas de projéteis .22 LR.

PALAVRAS-CHAVE: Proteção balística. Impacto balístico. Compósito alumina-PEBD.

ABSTRACT: This work presents a composite formed by alumina and low density polyethylene for use in ballistic protections, mainly bulletproof vests. The material was manufactured with 70% by weight of alumina and 30% by weight of low density polyethylene and subjected to ballistic tests and physical and thermal characterizations. After the ballistic test the fractured surface was characterized by scanning electron microscopy. The results indicated that a 15 mm composite board was able to satisfactorily withstand the ballistic impacts of .22 LR projectiles. The composite showed low water absorption, endured high temperatures and demonstrated good thermal stability. However, despite increasing the flame propagation time of polyethylene, the addition of alumina was not able to confer flame self-extinguishing properties. It is concluded that the composite has a good performance for ballistic protections of projectiles .22 LR.

KEYWORDS: Ballistic shielding. Ballistic impact. Alumina-LDPE composite..

1. Introdução

Não apenas no Brasil, mas ao redor do mundo, a segurança pessoal é uma preocupação crescente na sociedade atual, e se justifica por inúmeros motivos: intensificação de conflitos armados, atividades terroristas, aumento do poder de fogo dos armamentos, e a disponibilidade de armas para pessoas a margem da lei. Os números do setor de segurança no Brasil impressionam pela alta letalidade. Em 2018, o país teve um policial assassinado por dia, e mais de 119.000 apreensões de armas [1]. Em uma pesquisa realizada com 145 países, o Brasil ocupa o primeiro lugar como a nação com o maior número de pessoas mortas por arma de fogo [2].

Todos esses fatores estimulam o desenvolvimento de pesquisas na área de segurança, setor que foi inclusive contemplado com dois editais para apoio à projetos de pesquisa, um pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ (Edital 07/2018) e outro pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (Edital 15/2019), demonstrando a preocupação com o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para segurança.

Em especial as pesquisas em coletes para proteção balística, que visam a proteção pessoal dos agentes de segurança pública, são objetos de diversos estudos nos últimos anos [3–11]. Dependendo da tecnologia

utilizada, os coletes podem ser fabricados em apenas uma camada, ou em múltiplas camadas. Nos coletes multicamadas, uma camada é de material cerâmico, que devido a sua elevada dureza recebe a função de fragmentar a ponta do projétil, além de distribuir a energia do impacto sobre uma área maior [12–14]. Associada à camada cerâmica são utilizadas outras camadas de materiais metálicos ou poliméricos, que possuem maior tenacidade [8].

Atualmente, muitos sistemas de coletes multicamadas utilizam o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) na forma de fibras, que possui baixa densidade e alta tenacidade [15]. Contudo, esse material apresenta desvantagens, quando comparados com outros tipos de polietilenos, pois apresentam custo mais elevado e não podem ser processados por métodos convencionais. Métodos de fabricação como injeção, sopro e extrusão são largamente aplicados em polímeros e possuem grande disponibilidade de equipamentos nas indústrias, contudo o UHMWPE não pode ser processado por esses métodos, demandando processos especiais como compressão a quente, extrusão por pistão hidráulico (RAM) e sinterização [13]. Uma proposta de substituição ao UHMWPE é o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), que é facilmente processado por todos os métodos convencionais, possui elevada resistência ao impacto, estabilidade dimensional, boa tenacidade e custo mais baixo [16].

Acerca das cerâmicas, a alumina (Al_2O_3) é a mais comumente aplicada em sistemas de blindagem, devido principalmente ao seu baixo custo. Entretanto, possui pior desempenho balístico quando comparada ao carbetto de silício e carbetto de boro, por exemplo. A densidade da alumina também é um fator limitador, restringindo sua aplicação em coletes, onde a mobilidade é necessária [3]. Estudo realizado por Silva e colaboradores [7] comprovaram o bom desempenho da alumina sinterizada, com 93 a 99 % em peso, em testes de impactos balísticos com altos níveis de energia. Contudo, é sabido que a utilização de materiais cerâmicos, em proporções muito altas, apresenta a grande desvantagem de não resistirem a disparos sucessivos muito próximos [4,12,16].

Os materiais cerâmicos possuem em seu interior diversas trincas e poros, descontinuidades decorrentes dos processos de fabricação empregados atualmente. Apesar de intensas pesquisas no setor, ainda não existe tecnologia disponível para eliminar essas descontinuidades. A presença delas e a fragilidade dos materiais cerâmicos podem resultar em falhas catastróficas quando submetidos a esforços de impacto. Esses motivos levaram a utilização de compósitos unindo as cerâmicas a polietilenos, esperando-se que o polímero promova ao compósito a tenacidade necessária para suportar disparos sucessivos [6,12].

Considerando os problemas apresentados, este trabalho tem por objetivo propor um novo compósito para aplicação balística, formado por alumina e PEBD. Foram analisadas propriedades mecânicas, térmicas e resistência balística do compósito proposto.

2. Materiais e métodos

Diversas técnicas de caracterização de materiais foram empregadas para identificar as propriedades do compósito de PEBD e alumina, proposto neste projeto para ser utilizado em aplicações balísticas. Algumas técnicas apresentam resultados importantes para a aplicação do produto, já outras, se demonstraram ineficazes para caracterização de compósito para proteção balística.

Com objetivo de criar um parâmetro de comparação, que por vezes era indisponível na literatura, alguns ensaios de caracterização foram realizados com o polímero PEBD puro.

2.1 Compósito

O compósito foi fabricado utilizando a alumina Alundum RR (A-620) e o PEBD Resinótipo RP 0065-000, contendo 70% de alumina e 30% de PEBD. Os materiais foram misturados em um agitador mecânico por 10 minutos para homogeneizar a distribuições dos pós. Em uma prensa com sistema de aquecimento (Solab – modelo SL-11) a mistura foi colocada no molde, aquecida até 270°C, e submetida ao seguinte ciclo de cargas, com duração total de 12 minutos: 1 tonelada por 4 min; 3 toneladas por 4 min;

5 toneladas por 4 min.

Dois tipos de moldes foram utilizados para fabricação dos compósitos, de acordo com o ensaio a ser executado: corpos de prova para ensaio de flamabilidade, medindo 12,7 x 5 x 127 mm; e discos com 51 mm de diâmetro e 15 mm de espessura para os demais ensaios e testes.

2.2 Ensaio balístico

Os ensaios balísticos foram realizados em um provete de ar comprimido (Gunpower – modelo SSS) com dois cilindros comunicantes, um com capacidade de 0,5L e outro de 6L, com pressão estimada de 280 bar e projétil de chumbo calibre .22 LB de 3,3g, com geometria conforme apresentada na **(figura 1)**. A velocidade de boca em cada disparo foi aferida com um cronógrafo balístico (Air Chrony – modelo MK3), com precisão de 0,15 m/s.

A distância entre o provete e o alvo foi de 5 m, os corpos de prova foram apoiados em uma placa de madeira aglomerada de média densidade (MDF), conforme **figura 1**. Para comparação, foi realizado um ensaio apenas com a placa de MDF. Um supressor de ruídos foi utilizado para promover uma maior estabilidade do projétil ao sair do provete, assim como diminuir o ruído.

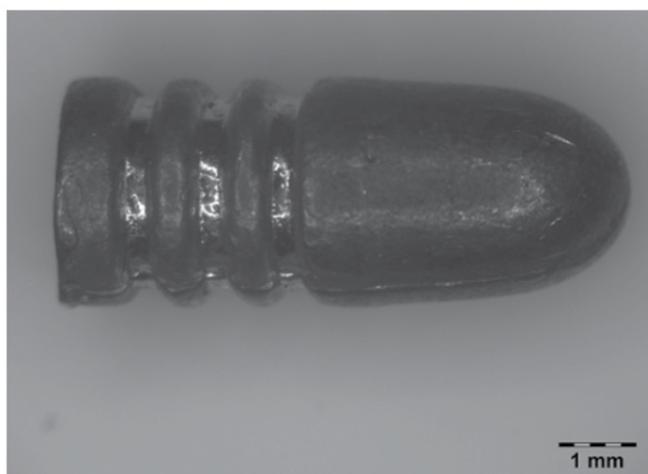


Fig. 1 – Imagem do projétil .22 utilizado no ensaio balístico

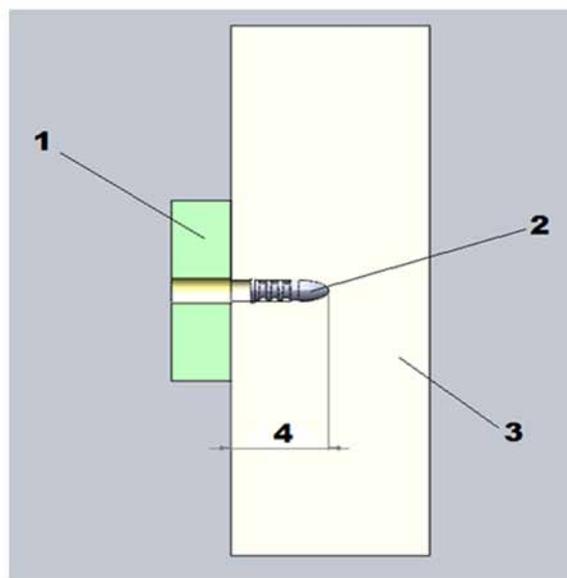


Fig. 2 – Imagem ilustrativa do ensaio balístico. 1 – Compósito; 2 – Projétil; 3 – Suporte de MDF; 4 – Medição da DOP

No ensaio balístico afere-se a profundidade de penetração (DOP), distância da ponta do projétil a face da blindagem, exemplificada na **figura 2**. Quanto menor for a DOP, mais eficaz será a proteção oferecida pela blindagem. Este tipo de teste, especialmente em munições ogivais (geometria usada no presente trabalho) tem forte dependência do material do alvo e da velocidade de impacto [17]. A simplicidade de execução, aliada ao baixo custo e facilidade na interpretação dos resultados, transformaram o ensaio de DOP na primeira opção de testes balísticos [18] the main goal being to find a way to increase the protection of soldiers and the vehicles used in the modern battlespace. Using of ceramic materials especially carbon based (carbides).

2.3 Microscopia

Após os testes balísticos, o compósito foi caracterizado por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Hitachi – modelo TM3000) com sistema de detecção por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) (Bruker – modelo X Flash MIN SVE). O MEV operou utilizando uma tensão de 15 keV e as imagens feitas em modo de Elétrons Retroespalhados (BSE), onde a diferença de cores é

dada pelo peso atômico dos elementos presentes na amostra, quanto menor o peso atômico mais escura será a tonalidade atribuída [19].

2.4 Propriedades físicas

A densidade do compósito foi calculada teoricamente, de acordo com a **equação 1**, e medida através do ensaio de Arquimedes de acordo com a norma ABNT NBR 16661-17 [20]. Ainda utilizando o ensaio de Arquimedes, a absorção de água foi medida de acordo com a norma ASTM D 792 [21].

$$\rho_{comp} = \frac{1}{\frac{W_{PEBD}}{\rho_{PEBD}} + \frac{W_{Al_2O_3}}{\rho_{Al_2O_3}}} \quad (1)$$

onde ρ é a densidade, W é o percentual em peso na mistura que formou o compósito.

2.5 Propriedades térmicas

Testes de flamabilidade foram executados de acordo com a norma ASTM D 635 [22]. As amostras foram fixadas a 10 cm da fonte de calor, um bico de bunsen, e mediu-se o tempo que a chama levou para se propagar em uma distância de 25 mm.

A estabilidade térmica do compósito foi analisada por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) (Netzsch – modelo DSC 404 F1 Pegasus), utilizando uma taxa de aquecimento de 10 °C/min até 200 °C, e atmosfera de nitrogênio.

3. Resultados e discussão

3.1 Ensaio balísticos

Quando o ensaio balístico foi realizado apenas com a placa de MPF, obteve-se uma DOP de $25,1 \pm 3,4$ mm, já quando o compósito era utilizado como material de proteção, a DOP foi reduzida para $2,7 \pm 0,3$ mm. Os resultados demonstram a efetividade do compósito proposto para aplicações de proteção balística de munição .22 LR. Caso ocorra um tiro disparado diretamente ao coração, uma penetração de 25 mm pode ser fatal, já uma penetração de aproximadamente

3 mm, provavelmente não causaria injúrias mais severas aos tecidos.

Figueiredo et al. [3] realizaram ensaios balísticos similares aos utilizados no presente estudo em compósitos fabricados com UHMPWE e diferentes percentuais de alumina. Os autores utilizaram corpos de prova com 5 mm de espessura e não utilizaram compósito com 70% de alumina, impedindo uma comparação mais direta. Para compósitos com 60% e 80% de alumina eles obtiveram, respectivamente, DOP de 14,5 mm e 6,9 mm.

Tab. 1 – Capacidade dos compósitos em reduzir a dop.

Compósito	Redução da DOP	Espessura do corpo de prova	Redução da DOP / mm de espessura
PEBD + 70 % Alumina	22,4 mm	15 mm	1,5 mm
UHMPWE + 60 % alumina [3]	10,6 mm	5 mm	2,12 mm
UHMPWE + 80 % alumina [3]	18,2 mm	5 mm	3,64 mm

Considerando que as espessuras dos corpos de prova utilizados neste estudo e no estudo de Figueiredo [3] são diferentes, 15 mm e 5 mm, respectivamente. A **tabela 1** apresenta os resultados de ambos os estudos através da capacidade do compósito em reduzir a DOP, quando comparada ao teste balístico apenas com MDF. Observa-se que o PEBD apresentou resultados inferiores ao UHMPWE, fato já esperado pois o PEBD possui menores energias de deformação, prejudicando a absorção da energia de impacto [23].

3.2 Microscopia

As **figuras 3 e 4** apresentam a superfície de fratura do compósito após o teste balístico. Diferentemente do procedimento utilizado em outros estudos, como por exemplo Figueiredo [3], que utilizou o MEV operando em modo de elétrons secundários, este trabalho utilizou o modo BSE, o que permitiu distinguir cada elemento do compósito. É observada a presença de uma matriz em tons mais escuros, partículas grandes em um tom de cinza claro, e pequenas regiões em coloração branca.

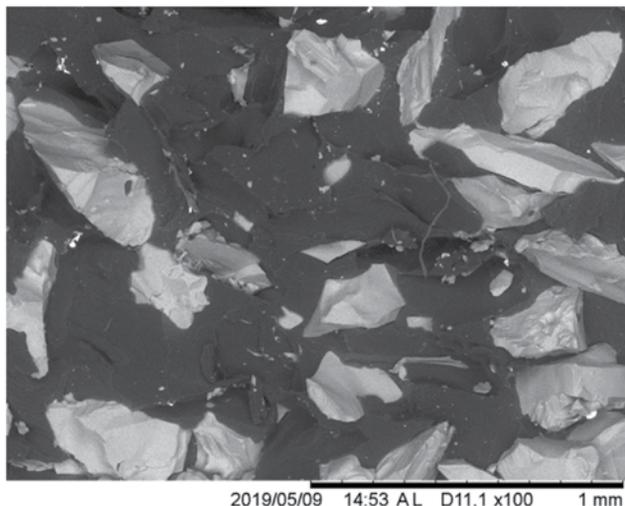


Fig. 3 – Imagem da região do impacto após o teste balístico. Imagem em MEV modo BSE, ampliação de 100x.

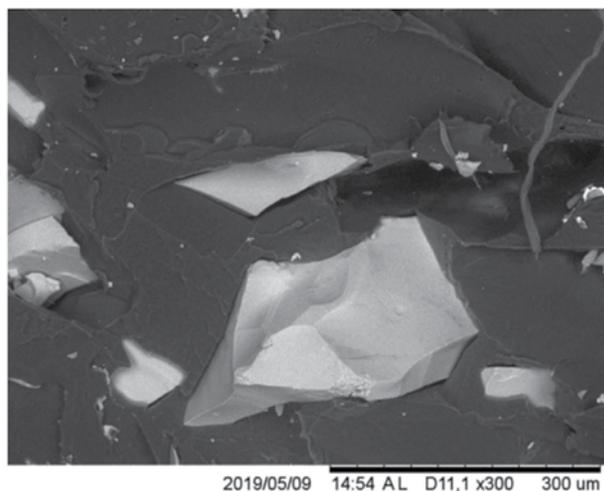


Fig. 4 – Imagem da região do impacto após o teste balístico. Imagem em MEV modo BSE, ampliação de 300x.

A técnica de EDS acoplada ao MEV permitiu confirmar a composição química de cada região. A matriz formada por PEBD adquiriu coloração mais escura, pois é formada basicamente pelo elemento químico carbono, o de menor peso atômico dentre os analisados. Os grãos de alumina adquiriram coloração cinza clara, sendo formados pela combinação dos elementos alumínio e oxigênio. E os pontos brancos são pequenos fragmentos do projétil utilizado pelo ensaio balístico de chumbo, elemento de maior peso atômico dentre os encontrados, por isso, adquiriu coloração mais clara.

3.3 Propriedades físicas

A densidade é uma importante propriedade a ser analisada em compósitos destinados a proteção balística de uso pessoal, pois a mobilidade dos usuários dos coletes é essencial em muitas ações de confronto. Aplicando a **equação 1**, o compósito apresenta uma densidade de $2,01 \text{ g/cm}^3$, a adição da alumina representa um grande aumento na densidade do PEBD, que é de $0,94 \text{ g/cm}^3$. A utilização do PEBD em substituição ao UHMWPE não representa grande ganho em relação à densidade, o compósito fica apenas cerca de 2% mais leve.

Outra importante propriedade física a ser analisada é a absorção de água. Em situações de guerra onde faz-se necessário que os soldados adentrem em rios ou mares, ou em confronto dentro das cidades por forças policiais em dias de chuva, caso a absorção de água seja grande, haverá um aumento do peso do colete, prejudicando muito a mobilidade do usuário. A absorção de água calculada de acordo com a norma ASTM D 792 foi de 1,21%, valor baixo que não compromete o desempenho do equipamento.

3.4 Propriedades térmicas

O polietileno além de possuir uma rápida propagação de chama, não possui característica de auto extinção de fogo [24], o que seria ideal para aplicação em coletes a prova de bala. Os ensaios de flamabilidade confirmaram a já esperada rápida queima do PEBD puro, 2,4 segundos. A adição de alumina retardou a propagação da chama de forma considerável, ampliando o tempo para 6,2 segundos, contudo, não conferiu ao material a propriedade de auto extinção da chama.

As **figuras 5 e 6** apresentam os gráficos de DSC para o primeiro e segundo aquecimento da amostra. A temperatura de pico do ensaio foi de $130,2^\circ\text{C}$ no primeiro aquecimento e $129,8^\circ\text{C}$ no segundo. E a temperatura de *onset* foi de $119,2^\circ\text{C}$ no primeiro aquecimento e $121,2^\circ\text{C}$ no segundo. Esses resultados indicam que o compósito foi capaz de suportar temperaturas altas, se consideradas as temperaturas as quais os usuários dos coletes podem

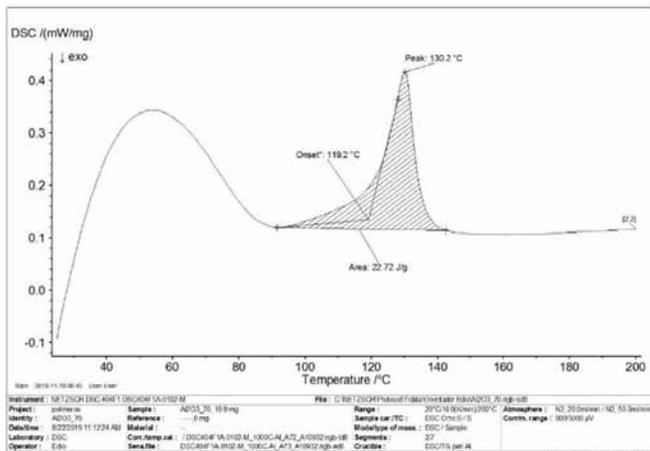


Fig. 5 – Resultado DSC para o compósito, 1º aquecimento.

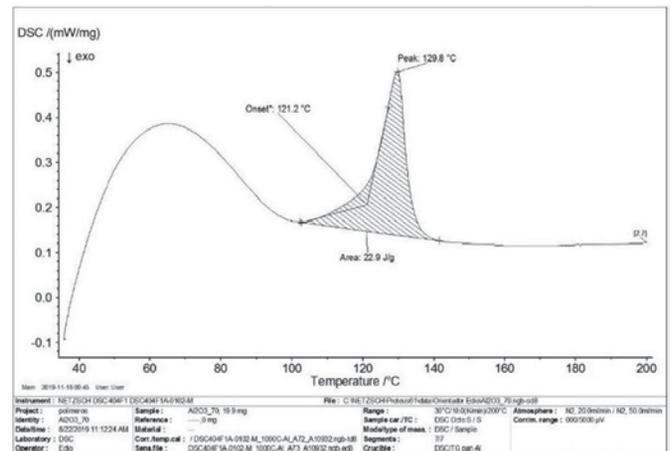


Fig. 6 – Resultado DSC para o compósito, 2º aquecimento.

ser expostos. Assim como confirmou que o compósito não se degrada após o primeiro aquecimento, suportando aquecimentos sucessivos, outro fator importante para aplicações balísticas.

4. Conclusão

Foi possível concluir que uma placa de 15 mm fabricada com o compósito proposto possui desempenho satisfatório para blindagem de projéteis .22 LR.

Referências Bibliográficas

- [1] Brasil, Anuário Brasileiro de Segurança Pública, Forum Brasileiro de Segurança Pública, 2018.
- [2] M. Naghavi, Global Mortality From Firearms 1990 - 2016, Journal of the American Medical Association, 2016.
- [3] A.B.-H. da S. Figueiredo, É.P. Lima Júnior, A.V. Gomes, G.B.M. de Melo, S.N. Monteiro, R.S. de Biasi, Response to Ballistic Impact of Alumina-UHMWPE Composites, Mater. Res. 21 (2018). doi:10.1590/1980-5373-mr-2017-0959.
- [4] E.G. Pickering, M.R. O'Masta, H.N.G. Wadley, V.S. Deshpande, Effect of confinement on the static and dynamic indentation response of model ceramic and cermet materials, Int. J. Impact Eng. 110 (2017) 123–137. doi:10.1016/j.ijimpeng.2016.12.007.
- [5] F.S. da Luz, E.P.L. Junior, L.H.L. Louro, S.N. Monteiro, Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric, Mater. Res. 18 (2015) 170–177. doi:10.1590/1516-1439.358914.
- [6] S. Leo, C. Tallon, N. Stone, G. V. Franks, Near-Net-Shaping Methods for Ceramic Elements of (Body) Armor Systems, J. Am. Ceram. Soc. 97 (2014) 3013–3033. doi:10.1111/jace.13192.
- [7] M. V. Silva, D. Stainer, H.A. Al-Qureshi, O.R.K. Montedo, D. Hotza, Alumina-Based Ceramics for Armor Application: Mechanical Characterization and Ballistic Testing, J. Ceram. 2014 (2014) 1–6. doi:10.1155/2014/618154.
- [8] G.B. Torres, J.M. Vélez Restrepo, Fractografía y disipación de energía cinética en un panel balístico de cerámica/polímero sometido al impacto de un proyectil metálico, Rev. Mater. 18 (2013) 1350–1359. doi:10.1590/S1517-70762013000300003.
- [9] M.M. Shokrieh, G.H. Javadpour, Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor, Compos. Struct. 82 (2008) 269–276. doi:10.1016/j.compstruct.2007.01.023.
- [10] M. Bajya, A. Majumdar, B.S. Butola, S.K. Verma, D. Bhattacharjee, Design strategy for optimising weight and ballistic performance of soft body armour reinforced with shear thickening fluid, Compos. Part B Eng. 183 (2020) 107721. doi:10.1016/j.compositesb.2019.107721.

- [11] A. Majumdar, A. Laha, D. Bhattacharjee, I. Biswas, S. Verma, Soft body armour development by silica particle based shear thickening fluid coated p-aramid fabrics, *J. Text. Inst.* 110 (2019) 1515–1518. doi:10.1080/00405000.2019.1602896.
- [12] E. Medvedovski, Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1, *Ceram. Int.* 36 (2010) 2103–2115. doi:10.1016/j.ceramint.2010.05.021.
- [13] C. Alberto, D.O. Couto, B. Cristina, E.H. Backes, F.R. Passador, U. Federal, D.S. Carlos, D. De Engenharia, D.M. Rodovia, W. Luís, Mechanical and thermal properties of UHMWPE / LLDPE / CNT blends and nanocomposites for ballistic application, *Materia.* (2018).
- [14] E. Medvedovski, Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2, *Ceram. Int.* 36 (2010) 2117–2127. doi:10.1016/j.ceramint.2010.05.022.
- [15] A.L.S. Alves, L.F.C. Nascimento, J.C. Miguez Suarez, Comportamento balístico de composto de polietileno de altíssimo peso molecular: efeito da radiação gama, *Polímeros.* 14 (2004) 105–111. doi:10.1590/s0104-14282004000200014.
- [16] F.M.B. Coutinho, I.L. Mello, L.C. de Santa Maria, Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações, *Polímeros.* 13 (2003) 01–13. doi:10.1590/s0104-14282003000100005.
- [17] J.S.S. Carlucci, *Ballistics: theory and design of guns and ammunition*, CRC, Boca Raton, 2008.
- [18] I.-D. Popa, F. Dobrița, Considerations on DOP (depth of penetration) test for evaluation of ceramics materials used in ballistic protection, *ACTA Univ. Cibiniensis.* 69 (2018) 162–166. doi:10.1515/aucts-2017-0021.
- [19] J.I. Goldstein, D.E. Newbury, J.R. Michael, N.W.M. Ritchie, J.H.J. Scott, D.C. Joy, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, 4th ed., Springer New York, New York, NY, 2018. doi:10.1007/978-1-4939-6676-9.
- [20] ABNT, NBR 16661 Materiais refratários densos conformados - Determinação do volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade de massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.
- [21] ASTM, D 792 Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement, ASTM American Society for Testing and Materials, 2013.
- [22] ASTM, D 635 Standard test method for rate of burning and/or extent and time of burning of plastics in a horizontal position, ASTM American Society for Testing and Materials, 2018.
- [23] I. Mohagheghian, G.J. McShane, W.J. Stronge, Impact perforation of monolithic polyethylene plates: Projectile nose shape dependence, *Int. J. Impact Eng.* 80 (2015) 162–176. doi:10.1016/j.ijimpeng.2015.02.002.
- [24] V. Shah, *Handbook of plastics testing and failure analysis*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2007. doi:10.1002/0470100427.