

Uma revisão sobre materiais a serem empregados em placas balísticas do tipo *stand alone* conforme Requisitos Operacionais Conjuntos do Ministério da Defesa

Jeremias Fortini^{*1}, Frederico Dal Berto², Altair Soria Pereira², Eduardo Sousa Lima¹

¹ Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270. Paia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Instituto de Física e Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Avenida Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil.

*fortini@ime.eb.br

RESUMO: O desenvolvimento de materiais balísticos resistentes a novas ameaças é um tema de grande preocupação no cenário global. Em 2018, o Ministério da Defesa estabeleceu os Requisitos Operacionais Conjuntos (ROC) para os materiais de proteção balística das Forças Armadas. A Base Industrial de Defesa não apresentou, até o momento, solução balística para alguns dos calibres levantados. Neste cenário, tem-se optado por equipamentos que permitam uma maior mobilidade ao usuário, aliada à proteção contra calibres de maior energia cinética. Assim, o presente artigo tem por finalidade apresentar uma revisão sobre materiais para comporem um Sistema de Blindagem de Multicamadas (SBM) para placas do tipo stand alone para coletes de assalto, além de apresentar as normas e condições para avaliação de materiais balísticos adotadas em âmbito interno e internacionalmente.

PALAVRAS-CHAVE: Placa balística. Stand alone. SBM. Requisitos Operacionais Conjuntos (ROC).

ABSTRACT: The development of ballistic materials resistant to new threats is a topic of great concern on the global stage. In 2018, the Ministry of Defense established the Joint Operational Requirements (JOR) for the Armed Forces' ballistic protection materials. Until now, the Defense Industrial Base has not presented a ballistic solution for some of the calibers surveyed. In this scenario, equipment has been chosen that allow greater mobility for the user combined with protection against calibers with greater kinetic energy. Thus, this article aims to present a review of materials to compose a Multilayer Armor System (MAS) for stand alone plates for assault vests, in addition to presenting the standards and conditions for evaluating ballistic materials adopted in the context of domestically and internationally.

KEYWORDS: Ballistic plate. Stand alone. MAS. Joint Operational Requirements (JOR).

1. Introdução

A evolução da humanidade pode ser descrita por meio das batalhas travadas pelas suas diversas civilizações, em que os avanços científicos e tecnológicos tiveram um papel fundamental na determinação dos seus vencedores. Os persas foram os primeiros povos a se preocuparem com a proteção individual, quando passaram a usar coletes de palha [1]. Ao longo dos séculos, diversas foram as evoluções desses dispositivos, que são representados atualmente como coletes e capacetes de proteção balística, denominados como equipamentos de proteção balística individual [2]. Esses equipamentos podem ser confeccionados em diversos tipos de ma-

téria-prima, como metais, polímeros, cerâmicos, materiais compósitos, incluindo aqueles formados por fibras naturais, que pelas suas combinações geram produtos que podem ser representados em quatro parâmetros principais de avaliação: nível de proteção, vida útil, peso e custo [3].

Os materiais metálicos foram os precursores na blindagem individual, as ligas de cobre foram substituídas por materiais ferrosos, no entanto o alto peso específico desses materiais acabou sendo um empecilho na continuidade da sua aplicação em blindagens individuais. Atualmente, os materiais metálicos são empregados em soluções em que o peso não se torna um fator determinante da sua utilização. Exemplo disso são as suas aplicações em carros de combate,

viaturas blindadas, navios e aeronaves militares, onde há resistência ao impacto, resistência à tração, ductilidade e dureza [4-5].

Os materiais poliméricos revolucionaram os equipamentos de proteção balística individual através do desenvolvimento do Kevlar®, na década de 70, uma sintética de para-aramida com estrutura molecular complexa que possui baixa densidade e resistência específica superior ao aço [6]. O polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE)

Os cerâmicos são extremamente duros e resistentes à compressão e ao desgaste. Quando utilizados em materiais balísticos, são aplicados na camada mais externa da proteção, pois a sua elevada dureza permite a erosão e o estilhaçamento de projéteis, aumentando a área impactada entre projéteis e armaduras e dissipando a carga do impacto. Além disso, a cerâmica quebrada causa erosão mútua com os projéteis, produzindo forças laterais que impactam no fluxo e impedindo a maior penetração [7]. Os materiais cerâmicos mais utilizados em blindagens balísticas individuais são a alumina (Al_2O_3), o carbeto de boro (B_4C), o carbeto de silício (SiC) e o nitreto de silício (Si_3N_4), que possuem grande variação em suas propriedades e custos de processamento [8-9].

Os materiais cerâmicos podem ser aplicados em conjunto com materiais com maiores ductilidades, como lâminas de fibras de aramida (como o Kevlar) ou lâminas de polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) [10], formando um Sistema de Blindagem de Multicamadas (SBM). As fibras e os polímeros têm maior tenacidade, força específica, módulo específico, resistência à fadiga, resistência ao desgaste e absorção de choque em comparação com os cerâmicos, e, quando usadas como material na parte traseira das placas cerâmicas, agem em conjunto, retardando a tração do material cerâmico, servindo de suporte para os estilhaços, possibilitando maior perda de energia cinética [11].

Inúmeros países possuem as suas normas de classificação de níveis de proteção balística e de realização dos ensaios balísticos. As normas que possuem maior reconhecimento neste cenário são do Instituto Nacional de Justiça dos Estados Unidos (NIJ - *National Institute*

of Justice). No entanto, essas normas são direcionadas para materiais balísticos a serem utilizados por Órgãos de Segurança Pública e Privada, não abrangendo possíveis ameaças em que as FA podem ser empregadas nos variados Teatros Operacionais, tanto que as diferentes Forças Armadas dos Estados Unidos possuem as suas normas específicas [12]. Até 2018, as Forças Armadas brasileiras utilizavam apenas as normas NIJ para definição dos níveis de proteção a serem adotados. No entanto, por meio da Portaria Normativa nº 14/MD, de 23 de março de 2018, foram definidos os Requisitos Operacionais Conjuntos (ROC) [13] para os materiais balísticos a serem adotados pelas três forças (Exército, Marinha e Aeronáutica) [14].

Considerando os novos requisitos e as novas exigências estratégicas estabelecidas pelo Ministério da Defesa, denominados *Requisitos Operacionais Conjuntos (ROC)*, nos quais são previstos a adoção de coletes balísticos resistentes aos calibres 5,56 x 45 mm (M855/SS109) e 7,62 x 39 mm MSC (*mild steel core*) (M43) [13], com dimensões e peso definidos, a presente revisão pretende apresentar potencialidades de materiais para aplicação em uma solução balística, do tipo SBM, para que sejam utilizados como placas *stand alone* em coletes de assalto. As placas *stand alone* são peças íntegras de 250 x 300 mm que, sem a conjugação de nenhum outro tipo de proteção, oferecem a proteção balística no nível desejado. Uma solução de SBM para compor essas placas é constituída pela primeira camada de material cerâmico e a segunda camada à base de material polimérico. Dentro desse escopo de materiais, serão apresentados diversos materiais postulantes para essa composição.

2. Proteção balística individual

2.1 Evolução

Ao longo dos séculos, as guerras foram determinantes para a expansão ou a extinção de inúmeras nações, sendo responsáveis diretamente pela evolução da humanidade em diversos campos, principalmente nas descobertas científicas [15].

Com a evolução dos cenários de batalhas, o homem sentiu a necessidade de cada vez mais aprimorar a sua proteção. Os persas, então, desenvolveram coletes de palha, que serviam para proteção contra flechas e impacto. Esses dispositivos foram aprimorados pelos gregos e romanos, que utilizaram cobre e bronze, conforme observado na **Figura 1** [16].

Fig. 1 - Armadura romana.



Fonte: [16].

A primeira versão de equipamento para proteção balística, que se assemelha aos modelos atuais, dando mobilidade ao usuário, é datada do século XVIII, na Coreia, onde foi desenvolvida uma vestimenta a partir de camadas de algodão em quantidade suficiente para proteger das armas de fogo da época, como observado na **Figura 2** [17]. No Japão, foram produzidas peças com trinta camadas de seda que proporcionavam proteção contra projéteis disparados por armas que utilizavam pólvora negra como propelente

[1]. No século XIX, foram desenvolvidos os coletes à base de materiais metálicos, mas ainda apresentavam um peso muito elevado, prejudicando a mobilidade do usuário [18-19].

Fig. 2 - Proteção balística coreana do século XVIII.



Fonte: [17].

Em 1902, em Chicago, nos Estados Unidos da América, foi desenvolvida uma vestimenta composta por uma mescla de chapas de metal de 1,6 mm entre quatro camadas de seda. Esse dispositivo tinha peso inferior a um quilograma e fornecia proteção para calibre .44 [18]. Esse produto se tornou um sucesso para a época; no entanto, o calor e o alto custo, devido à quantidade de seda aplicada, fizeram com que o Exército norte-americano desaprovasse tal equipamento para uso de suas tropas [19].

Na Primeira Guerra Mundial, os americanos equiparam os seus soldados com uma peça combinada que cobria o torso e a cabeça, o *Brewster Body Shield*. Era um equipamento construído à base de uma liga metálica de cromo e níquel, que fornecia proteção contra tiros de rifle, mas pesava cerca de vinte quilos [19].

Em 1918, ocorreu a primeira notícia da aplicação de materiais cerâmicos com finalidade balística, diferente

de todos os modelos desenvolvidos até o momento, que eram compostos de metais ou de fibras naturais na forma de tecidos. O *major* inglês Neville Monroe Hopkins descobriu que a aplicação de uma fina camada de esmalte na superfície do aço laminado aumentava a resistência à penetração das placas balísticas [20].

Na Segunda Guerra Mundial, os tripulantes de bombardeiros utilizaram um colete que protegia todo torso e o assento dos militares (**Figura 3**) [21].

Fig. 3 - Modelo de colete e capacete balísticos utilizados pela tripulação em bombardeios.



Fonte: [21].

Os soldados americanos que foram enviados para as guerras da Coreia e do Vietnã fizeram o uso das *flak jackets*, que eram jaquetas acolchoadas confeccionadas de placas de fibra de vidro em lâminas, *nylon* e alumínio, e tinham por objetivo defender os militares dos estilhaços de granadas. No entanto, a pouca eficácia e o grande peso tornaram este equipamento inviável após a criação de materiais mais leves e eficientes como o Kevlar [1, 22].

Foram os norte-americanos os pioneiros no emprego da proteção balística para forças policiais. O aumento dos casos de homicídios de agentes de segu-

rança na década de 1960 motivou o governo dos Estados Unidos, através do *National Institute of Justice* (NIJ), a desenvolver um colete de proteção balística para uso policial. A NIJ se tornou desde então o órgão de referência mundial na classificação dos níveis de proteção balística, bem como testes e instruções normativas acerca de coletes balísticos e blindagens de uso pessoal [1, 22].

Ainda na década de 1960, surgiram as fibras artificiais de aramida para aplicação balística, que foram responsáveis pela revolução dos equipamentos de proteção. Nessa época, a empresa norte-americana DuPont® desenvolveu o Nomex® para substituir o metal em pneus de carros de corrida e em seguida o Kevlar®, que chegou ao mercado em 1970, sendo essa a fibra sintética mais utilizada em proteção balística até os dias atuais [23]. A aramida combina resistência, baixa massa específica e flexibilidade, que possibilitou um avanço sem precedentes na produção dos coletes balísticos modernos [24].

Na década de 1970, foram desenvolvidos materiais cerâmicos para proteção balística que tinham como objetivo reduzir o peso das blindagens individuais e de aeronaves (**Figura 4**) [25]. Nessa ocasião, foram desenvolvidas placas balísticas à base de alumina e de carbeto de boro obtidas por prensagem a quente e por sinterização em fase líquida [26].

Fig. 4 - Coletes balísticos com insertos de materiais cerâmicos utilizados pelos americanos na Guerra do Vietnã.





Fonte: [25].

Na década de 1980, foram desenvolvidas placas cerâmicas maiores com aplicação em proteção veicular. Nessa década, foi desenvolvido pelo exército americano o *Personnel Armor System for Ground Troops* (PASGT, ou Sistema de Blindagem Pessoal para Tropas Terrestres), que foi um importante sistema de proteção balística utilizado pelos americanos nas décadas de 1980 e 1990 [27] (Figura 5) [28].

Fig. 5 - Colete balístico modelo PASGT.



Fonte: [28].

Os modelos de coletes atuais, por meio do aperfeiçoamento das suas matérias-primas, se adaptam à

missão a qual o militar será empregado, podendo oferecer maior ou menor área coberta, e níveis maiores ou menores de proteção, contrapondo sempre com a mobilidade necessária no combate, pois, quanto maior a área coberta e o nível de proteção, menor a mobilidade do militar. Tanto que os materiais utilizados por agentes de grupos antibombas protegem o corpo inteiro (Figura 6) [30], enquanto os operadores de tropas especiais, adotam os coletes de assalto, que possuem apenas insertos de alto nível de proteção balística frontal e dorsal [29].

Fig. 6 - Vestimenta antibombas.



Fonte: [30].

Nesse contexto, o Exército norte-americano utiliza o conceito de colete modular, denominado *Improved Outer Tactical Vest* (IOTV), que pode agregar ou retirar acessórios conforme o tipo de operação (Figura 7) [27, 31]. Para missões em que exigem o máximo de mobilidade, é utilizado o *Soldier Plate Carrier System* (SPCS) (Figura 8) [32], que foi idealizado para reduzir o peso carregado pelos militares em missões específicas [27].

Fig. 7 - Colete modular americano IOTV.



Fonte: [31].

Fig. 8 - Colete de assalto americano SPCS.



Fonte: [32].

2.2 Colete de proteção balística nacional

O modelo de colete balístico adotado desde 2004 pelo Exército Brasileiro (EB) e pelas demais FA brasileiras é do tipo *Outer Tactical Vest* (OTV), que é o modelo anterior ao IOTV adotado pelas tropas norte-americanas, que foi desenvolvido nos anos 2000 pelos americanos em substituição ao modelo PASGT [33].

O colete adotado pelo Exército brasileiro possui o sistema de abertura frontal, conforme a **Figura 9**, sendo composto de uma capa, um painel balístico frontal esquerdo, um painel balístico frontal direito, um pa-

nel balístico dorsal, uma placa balística frontal e uma placa balística dorsal. Podem compor ainda o colete: acessórios, protetor de pescoço (ou gola), protetor pélvico, protetor glúteo e protetores de ombros.

Fig. 9 - Imagem frontal (e) e dorsal (d) do colete adotado pelo EB.



3. normas para classificação e realização de ensaios balísticos

A proteção especificada para o colete do Exército brasileiro é de nível III da NIJ 0101.04 [34], obtido por meio da atuação conjunta dos painéis e das placas balísticas, enquanto os painéis balísticos isoladamente proporcionam o nível de proteção III-A, não sendo permitida a utilização das placas balísticas sem o uso dos painéis. Os painéis balísticos (flexíveis) são inseridos em bolsos internos da capa, enquanto as placas (rígidas) são inseridas nos bolsos externos da capa do colete.

As placas *stand alone* (**Figura 10**) [36] podem ser utilizadas nos coletes de assalto (**Figura 8**), que são equipamentos nos quais a relação área de cobertura x mobilidade é diminuída, mas, em compensação, buscam-se maiores níveis de proteção para a região coberta. Esse tipo de colete é denominado *Plate Carrier*, ou Porta Placa [35]. Esse formato é muito utilizado por tropas que são empregadas em ações de iminente enfrentamento com o inimigo, como no caso de tropas de Forças Especiais em missões de assalto e resgate.

Fig. 10 - Placa Balística *stand alone*.



Fonte: [36].

A definição das características dos equipamentos adotados pelos militares do Exército brasileiro deve seguir os requisitos elaborados pelos Órgãos de Direção-Geral (ODG) em consulta e coordenação com os Órgãos de Direção Setorial (ODS) e o Órgão de Direção Operacional (ODOp).

O colete balístico é considerado um Material de Emprego Militar (MEM), e assim ele deve obedecer ao previsto pelo Ciclo de Vida dos Sistemas e Materiais de Emprego Militar (SMEM), normatizado pela Portaria do Comandante do Exército nº 233, de 15 de março de 2016, que aprovou as Instruções Gerais para a Gestão do Ciclo de Vida dos Sistemas e Materiais de Emprego Militar (EB10-IG-01.018), 1ª Edição, 2016. O processo de desenvolvimento de um novo material se concentra na primeira e na segunda fase das quatro previstas do Ciclo de Vida do MEM, que são [37]:

- 1ª fase: formulação conceitual;
- 2ª fase: obtenção;
- 3ª fase: produção, utilização e manutenção;
- 4ª fase: desativação.

Na **Tabela 1**, são apresentados sumariamente os principais documentos previstos na EB10-IG-01.018 para a primeira fase do Ciclo de Vida do SMEM [37].

Tab. 1 - Documentos elaborados na fase de formulação conceitual

Fase	Documento	Finalidade	Órgão responsável
Formulação Conceitual	Compreensão das Operações (COMOP)	Documento que contém informações necessárias para orientar a concepção integrada de SMEM, tais como: a missão, o ambiente operacional, os tipos de operações, as funcionalidades a serem executadas e as intenções (desempenho esperado).	EME
	Condicionantes Doutrinárias e Operacionais (CONDOP)	Documento que contém os parâmetros que definem o emprego e o desempenho esperado de determinado MEM, considerando a Doutrina Militar Terrestre. Esse documento constitui a base para a elaboração dos Requisitos Operacionais (RO)	Centro de Doutrina do Exército (C Dout Ex/ COTER)

Fase	Documento	Finalidade	Órgão responsável
Formulação	Requisitos Operacionais (RO)	Documento que segue as condicionantes doutrinárias e operacionais no processo de obtenção de um MEM, que lhe consubstancia as características restritas aos aspectos operacionais.	4 ^a SCh do EME
	Conceitual	Documento que decorre dos RO e consiste na fixação das características técnicas, logísticas e industriais que o sistema ou material deverá ter para cumprir os requisitos operacionais.	DCT e COLOG
	Mapa de Tecnologias (MAPATEC)	Documento que indica as tecnologias necessárias para obtenção de um sistema ou material por PD&I, bem como o fluxo para obtê-las, em ordem cronológica.	DCT

Fonte: [37].

Após a elaboração de toda a documentação citada na **Tabela 1**, o Estado Maior do Exército (EME) convoca os ODS para realizar a Primeira Reunião Decisória (1^a RD) que determinará o prosseguimento ou não do ciclo de vida para a fase de obtenção, que terá início com a ordem emanada na 1^a RD, para que seja dado prosseguimento à obtenção dos SMEM, por intermédio de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) e/ou aquisição, após inclusão destes no portfólio de projetos do Exército Brasileiro [37].

No caso de obtenção por PD&I, procura-se obter um protótipo, e, posteriormente, o lote piloto do sistema ou material com as características técnicas e operacionais desejadas, por meio das seguintes etapas:

- obtenção do protótipo;
- avaliação do protótipo;
- produção do lote piloto; e
- avaliação do lote piloto.

Na obtenção por aquisição, o SMEM pode ser adquirido no mercado interno ou externo, para atender às necessidades levantadas, sendo prevista uma avaliação específica, na qual se verifica a conformidade do sistema ou material a ser adquirido com os padrões e as exigências técnicas, operacionais e logísticas estabelecidas pelo EB durante a 1^a RD.

Concluída a etapa de obtenção, seja por projeto de PD&I e/ou aquisição, e atestada a conformidade do sistema ou material avaliado, realiza-se a Segunda Reunião Decisória (2^a RD), que encerra essa fase, determinando a execução, ou não, da experimentação doutrinária para o sistema ou material, bem como sua adoção e o prosseguimento para a fase de produção, utilização e manutenção [37].

Em suma, para o desenvolvimento de um novo produto, diversos órgãos do Exército são mobilizados, gerando em conjunto os documentos elencados na **Tabela 1**. Entre os documentos elencados destacam-se o RO, pois é nesse documento em que serão definidas as características gerais do produto, como para o caso dos coletes balísticos, modelo, formato, tamanho, peso, níveis de proteção, entre outros, para que, basicamente, nos RTLI sejam levantadas as condições de avaliação dos requisitos levantados [37].

Para o MEM colete de proteção balística, os seguintes documentos foram elaborados conforme previsto na EB10-IG-01.018 [37]:

- COMOP nº 03/2018, do Sistema Combatente Brasileiro (COBRA), publicada pela Portaria nº 156-EME, de 13 de agosto de 2018;

- CONDOP nº 017/2018) - do Sistema Combatente Brasileiro (COBRA), publicada pela Portaria nº 090, de 20 de agosto de 2018;
- RO nº 32/2019 – colete balístico-tático, publicada pela Portaria nº 054-EME, de 13 de março de 2019;
- RTLI do colete balístico-tático, publicada pela Portaria nº 088-EME, de 27 de março de 2019;
- MAPATEC do colete balístico-tático, documento interno do Departamento de Ciência e Tecnologia.

Além dos documentos listados acima, quando um produto for comum às três Forças Armadas, o Ministério da Defesa poderá emitir documentação para padronização de requisitos, que são denominados de Requisitos Operacionais Conjuntos (ROC). Por meio da Portaria Normativa nº 14/MD, de 23 de março de 2018, foram definidos os ROC, para, entre outros materiais, colete balístico e placa balística *stand alone*. Dessa forma, os RO publicados em 2019 possuem praticamente os mesmos parâmetros levantados pelo ROC de 2018, com a ressalva de que, para a placa *stand alone*, até o momento, existe apenas o ROC [13].

Os requisitos levantados para o colete balístico e para placa no RO e/ou no ROC são divididos em Requisitos Absolutos, que são aqueles que determinado MEM deverá possuir obrigatoriamente, e Requisitos Desejáveis, que são aqueles que poderão ser solicitados ou não aos fabricantes, conforme solicitação do solicitante por ocasião da obtenção. Os Requisitos Absolutos para os coletes e placas *stand alone* contemplam os seguintes calibres para proteção balística [13]:

- a. .44 Magnum SJSP;
- b. 9 x 19 mm Luger;
- c. 5,56 x 45 mm (M193) (núcleo de chumbo);
- d. 7,62 x 39 mm FMJ (núcleo de chumbo);
- e. 7,62 x 51mm FMJ (M80).

Tais calibres correspondem ao nível de proteção III da NIJ 0101.06 [38] ou RF1 da NIJ 0123.00 [39], conforme será visto na seção 3.

Os calibres solicitados nos Requisitos Desejáveis dos coletes e placas, que correspondem ao nível RF2 da NIJ 0123.00, são os seguintes [13]:

- a. 7,62 x 39 mm MSC (M43);
- b. 5,56 x 45 mm (M855/SS109); e
- c. 7,62 x 51 mm AP.

Esses calibres correspondem, respectivamente, aos níveis especiais da NIJ 0101.06, conhecidos no mercado como “III+” e “III++”, sendo o último equivalente ao nível IV da NIJ 0101.06 [38].

Assim, fruto da demanda apontada pelo Ministério da Defesa e corroborada pelo Exército brasileiro, conforme os ROC e RO, respectivamente, é importante aprofundar em estudos que apresentem a possibilidade de uma solução balística de fabricação que atenda aos requisitos levantados.

Destaca-se, então, que não existe nenhum produto de fabricação nacional que atenda aos requisitos desejáveis levantados. Esses calibres são considerados como importantes ameaças no Teatro de Operações onde o EB é empregado. O calibre 7,62 x 39 mm MSC (M43) é utilizado pelo armamento AK47 e o 5,56 x 45 mm SS109 pode ser utilizado pelo próprio armamento de dotação do EB, o Fuzil de Assalto 5,56 IA2, que foi adotado em 2013 por meio da Portaria nº 211-EME, de 23 de outubro de 2013 [40].

De acordo com o Regulamento de Produtos Controlados, aprovado pelo Decreto nº 10.030, de 30 de setembro de 2019 [41] e pela Portaria nº 18 – D LOG, de 19 de dezembro de 2006, que aprova as Normas Reguladoras da avaliação técnica, fabricação, aquisição, importação e destruição dos materiais balísticos [43]. Conforme esses documentos, os níveis de proteção adotados no Brasil seguem o descrito na NIJ 0101.04 [34], demonstrados na **Tabela 2**, em que os níveis I a III-A que podem ser comercializados para o uso geral, enquanto os níveis III e IV só podem ser comercializados para Forças Armadas e demais Órgãos de Segurança Pública devidamente autorizados pelo Comando do Exército, sendo considerados restritos (RTO).

No Artigo 8º da Portaria 18 [43], é determinado que os coletes balísticos desenvolvidos no Brasil sejam avaliados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx) baseando-se na norma do NIJ 0101.04 [34]. O Artigo 12º, por sua vez, estabelece que as placas balísticas, destinadas a proverem o nível de proteção desejado, poderão ser testadas e comercializadas, se cumprirem as dimensões mínimas previstas na NIJ 0101.04 [34].

Para proteção contra os calibres dos níveis I a III-A, não existe a necessidade de utilização de placas balísticas, pois os painéis balísticos corretamente dimensionados oferecem a proteção balística ao

usuário. Por outro lado, para a proteção aos calibres dos níveis III e IV, é necessária a utilização de placas balísticas atuando isoladas ou em conjunto com os painéis balísticos.

Tab. 2 - Níveis de proteção estabelecidos na NIJ 0101.04

Nível	Munição	Velocidade (m/s)	Massa do projétil	Grau de restrição
I	.22 caliber LR LRN	329	2,6 g 40 gr	PERMITIDO
	.380 ACP FMJ RN	322	6,2 g 95 gr	
II-A	9mm FMJ RN	341	8 g 124 gr	PERMITIDO
	40 S&W FMJ	322	11,7 g 180 gr	
II	9mm FMJ RN	367	8 g 124 gr	PERMITIDO
	.357 Magnum JSP	436	10,2 g 158 gr	
III-A	9mm FMJ RN	436	8,2 g 124 gr	PROIBIDO
	.44 Magnum SWC Chumbo	436	15,6 g 240 gr	
III	7,62x51mm – NATO FMJ	847	9,6 g 148 gr	PROIBIDO
IV	.30 Caliber M2 AP	878	10,8 g 166 gr	

Fonte: [34]

A avaliação dos níveis balísticos realizada conforme a NIJ 0101.04 consiste em impactar o material balístico a ser testado por meio da munição do nível pretendido, carregada com uma quantidade de pólvora que atenda à velocidade especificada na norma. A massa do projétil é apresentada em gramas, unidade do Sistema Internacional (SI), e em *grains* (gr), que é a unidade utilizada usualmente nas balanças de recarga, sendo os projéteis geralmente medidos em incrementos de 1 gr, e as cargas de pólvora medidas em incrementos de 0,1 gr [34].

As munições utilizadas não são encontradas no mercado na configuração dos testes, pois nesse caso são utilizadas as pontas (projéteis) específicas, confor-

me o calibre, com o carregamento manual (**Figura 11**) ou automatizado do estojo com a quantidade de pólvora necessária para atingir a velocidade do teste.

Antes do início da realização do teste balístico, é necessário calibrar corretamente a quantidade de pólvora a ser utilizada no ensaio, de tal forma que aqueles impactos em que a velocidade estiver fora da tolerância da velocidade sejam invalidados. A velocidade é medida por meio de dois sensores ópticos instalados ao longo da trajetória e separados entre si pela distância C, conforme a **Figura 12**.

O componente do colete a ser testado será fixado na vertical com a ação de fitas elásticas sobre o material de apoio (BMF – *Backing Material Fixture*), que

possui densidade semelhante à do corpo humano, e tem por objetivo simular o impacto que o corpo humano sofreria caso fosse alvejado nas condições de ensaio.

Fig. 11 - Equipamento de carregamento manual.



O material de apoio especificado pela NIJ 0101.04 é de argila moldável, denominado plastilina. A NIJ

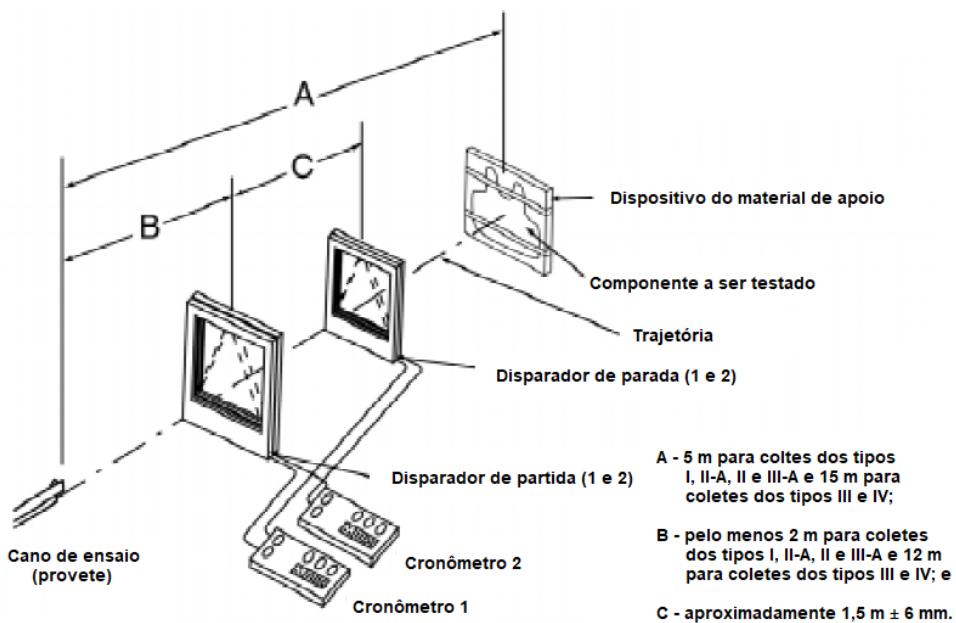
determina que seja utilizada a plastilina da marca ROMA® nº 1. A sua densidade é rigorosamente testada antes, durante e após a realização dos testes [34].

Após o disparo da munição por meio da ação do provete e o impacto do projétil, o colete balístico é analisado e classificado como perfuração total (*complete*), em que o projétil atravessa o material testado, sendo possível verificar a presença de fragmentos da munição no material de apoio, ou como perfuração parcial (*partial*), em que o projétil somente deforma o material testado, sem transpassá-lo [34].

Para os resultados classificados como perfuração parcial, é medida a deformação causada pelo impacto balístico por meio da indentação da plastilina (trauma). A NIJ 0101.04 estabelece como deformação máxima no material, para aprovação, o limite de 44 mm de trauma [34]. Na **Figura 13**, é possível observar como é realizada a indentação no material de apoio [34].

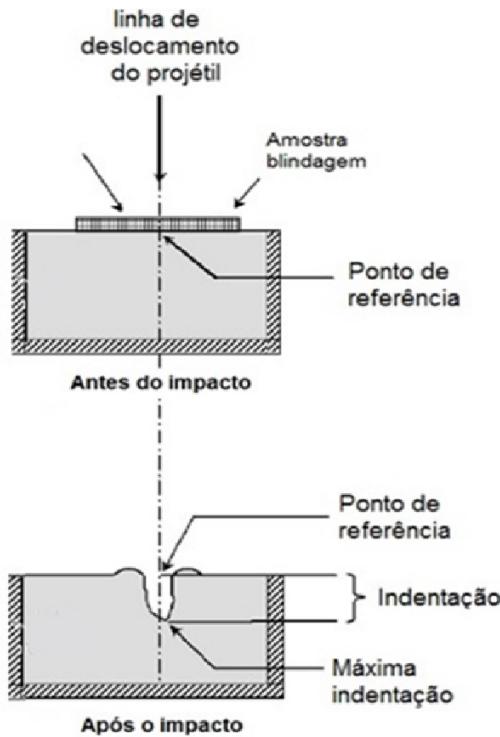
Cabe destacar que, embora a NIJ 0101.04 ainda esteja vigente, diversos países utilizam a versão mais recente para avaliação da resistência balística de coletes balísticos, que é a norma NIJ 0101.06, em vigor desde junho de 2008 [38].

Fig. 12 - Configuração do teste balístico conforme a NIJ.



Fonte: [34].

Fig. 13 - Verificação do desempenho balístico através da medida do trauma em um material de apoio (plastilina).



Fonte: [34].

Tanto os níveis de proteção quanto os mecanismos de avaliação da NIJ 0101.04 [34] e NIJ 0101.06 [38] são semelhantes. Quanto aos níveis de proteção, na NIJ 0101.06 [38] foi descartado o nível de proteção I. Os demais níveis permaneceram com os mesmos calibres, mas houve a alteração da velocidade de teste para alguns deles, com o intuito de garantir maior segurança ao usuário (**Tabela 3**).

Em relação aos testes de avaliação, o número de amostras testadas na NIJ 0101.06 é bem superior ao da NIJ 0101.04. Enquanto para a avaliação do nível III pela NIJ 0101.04 [34] são necessárias 4 amostras, na NIJ 0101.06 [38] são necessárias 14 amostras.

Outra situação não prevista na NIJ 0101.04 [34] é a realização do teste do material submetido a condições adversas de umidade, temperatura e dano mecânico. A NIJ 0101.06 [38] prevê que as amostras sejam submetidas a um ciclo de 10 dias dentro de um tambor rotativo, na temperatura de 70°C e umidade relativa de 90%. Esse equipamento, que pode ser observado na **Figura 14**, é denominado *Tumbler*.

Tab. 3 - Níveis de proteção estabelecidos na NIJ 0101.06

Nível	Munição	Velocidade (m/s)	Massa do projétil	Grau de restrição
II-A	9mm FMJ RN	355	8 g 124 gr	PERMITIDO
	40 S&W FMJ	325	11,7 g 180 gr	
II	9mm FMJ RN	379	8 g 124 gr	PERMITIDO
	.357 Magnum JSP	408	10,2 g 158 gr	
III-A	.357 SIG FMJ FN	448	8,1 g 125 gr	RTO
	.44 Magnum SJHP	408	15,6 g 240 gr	
III	7,62x51mm – NATO FMJ	847	9,6 g 148 gr	
IV	.30 Caliber M2 AP	878	10,8 g 166 gr	

Fonte: [38].

Fig. 14 - Equipamento Tumbler utilizado na avaliação de coletes balísticos pela NIJ 0101.06.



Fonte: [46].

Tab. 4 - Níveis de proteção previstos na NIJ 0123.00 [39].

Nível	Munição	Velocidade (m/s)	Massa do projétil	Grau de restrição
NIJ HG1	9mm FMJ RN	398	8g 124 gr	PERMITIDO
	.357 Magnum JSP	436	10,2 g 158 gr	
NIJ HG2	9mm FMJ RN	448	8 g 124 gr	PERMITIDO
	.44 Magnum JHP	436	15,6 g 240 gr	
NIJ RF1	7,62x51mm – M80 NATO FMJ	847	9,6 g 148 gr	RTO
	7,62x39mm Surrogate	725	7,9 g 122 gr	
	5,56mm M193 BT	990	3,6 g 56 gr	
NIJ RF2	7,62x51mm – M80 NATO FMJ	847	9,6 g 148 gr	RTO
	7,62x39mm Surrogate	725	7,9 g 122 gr	
	5,56mm M193 BT	990	3,6 g 56 gr	
NIJ RF3	5,56mm M855 BT	950	4 g 62 gr	RTO
	.30 Caliber M2 AP FMJ	878	10,8 g 166 gr	

Fonte: [39].

Em outubro de 2023 foi publicada a NIJ 0101.07, que utiliza a também publicada em outubro de 2023, NIJ 0123.00, para estabelecer os novos níveis de proteção balística adotados pelo Instituto de Justiça Americano. Os níveis da NIJ 0123.00 são divididos em proteção balística para blindagem flexível (NIJ HG1 e NIJ HG2) e proteção balística para blindagem rígida (NIJ RF1, NIJ RF2 e NIJ RF3), conforme pode ser observado na **Tabela 4** [39].

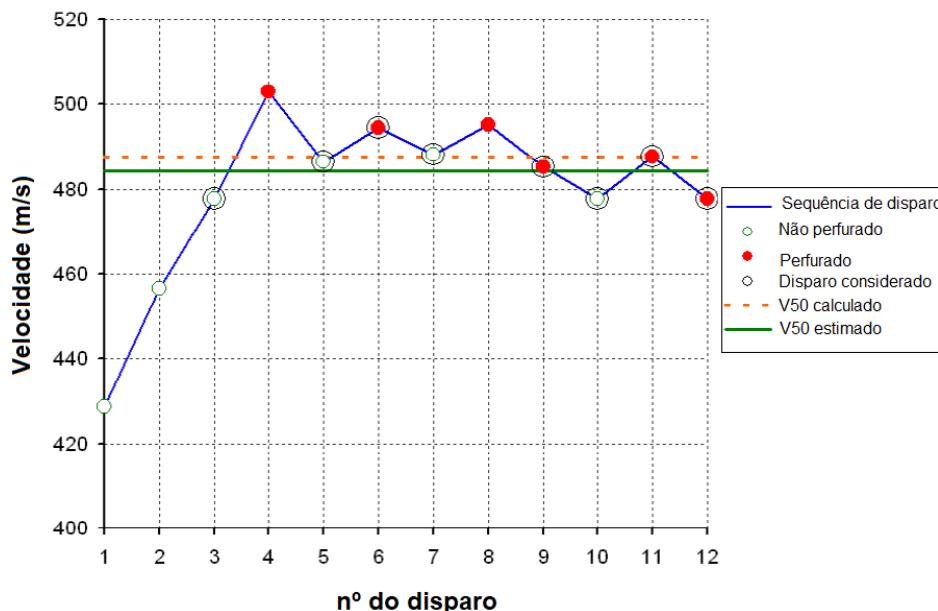
Assim como ocorreu na NIJ 0101.06 [38], na NIJ 0101.7 [39], houve o aumento considerável da quantidade de amostras para a avaliação de coletes. Para o nível NIJ RF 1, que equivale ao nível III da NIJ 0101.06 [38], serão necessárias pelo menos 39 amostras, em vez das 14 amostras da NIJ 0101.06 [38].

O limite balístico é um parâmetro avaliado desde a NIJ 0101.04 [34] e permanece nas normas NIJ até a atualização mais recente. Para a avaliação desse parâmetro, utiliza-se como norma de apoio a MIL STD 662F [44], utilizando o conceito do V50.

O teste é realizado por meio de disparos sucessivos aumentando e reduzindo a velocidade do projétil, conforme o material é perfurado ou não, até que seja determinada a velocidade conhecida como “limite

balístico”, na qual a probabilidade de perfuração do novo disparo é de 50%. Esse conceito é muito utilizado para diferenciar materiais balísticos de um mesmo nível de proteção, pois, quanto maior o limite balístico de determinado material, mais segurança ele será capaz de proporcionar em elevadas velocidades, inclusive acima das velocidades de testes padronizadas. Na **Figura 15**, é possível observar a simulação da realização de um teste de limite balístico [44].

Fig. 15 - Simulação da realização de um teste para avaliar o limite balístico de um material.



Fonte: [45].

4. Fibras poliméricas de alto desempenho para aplicação balística

As fibras e os tecidos foram os principais responsáveis pelo avanço mais significativo das blindagens individuais nos últimos 20 anos, muito em virtude do aperfeiçoamento dos processos de fabricação do polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) e das fibras de aramida [12].

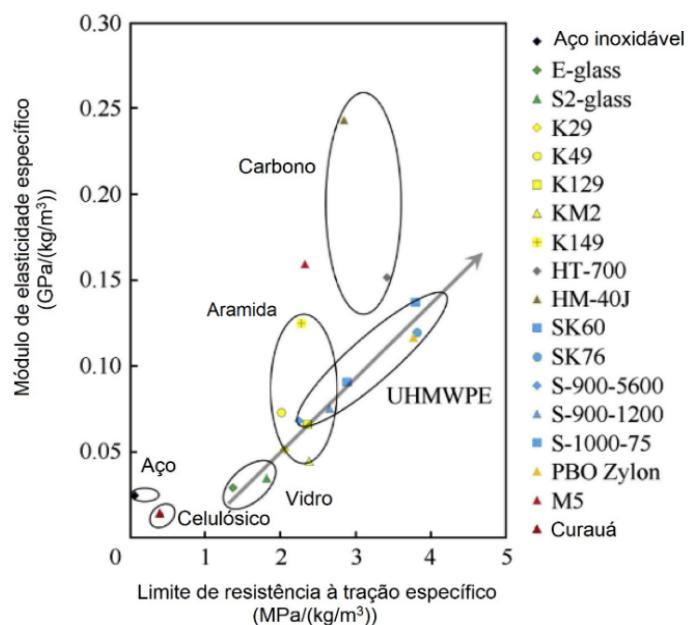
As fibras balísticas de alto desempenho têm propriedades específicas que as diferenciam de outras fibras artificiais utilizadas para aplicações industriais. A resistência à tração e o módulo de elasticidade são

maiores e o alongamento é menor do que as fibras tradicionais [47].

Cada fibra balística de alto desempenho tem propriedades relacionadas ao polímero e ao processo de fiação utilizado na sua fabricação. A resistência à tração dessas fibras é determinada pelas características estruturais, orientação molecular, área de seção transversal e grau de linearidade da cadeia polimérica. Como em qualquer produto de alta tecnologia agregada, tais aperfeiçoamentos resultam no aumento dos custos de produção do item, devendo o fabricante sempre realizar esse equilíbrio para tornar o item competitivo no mercado [48]. A **Figura 16** apresenta a correlação en-

tre as principais propriedades mecânicas de algumas fibras em comparação com o aço.

Fig. 16 - Gráfico correlacionando o módulo de elasticidade específico com o limite de resistência à tração específico das principais fibras do mercado.



Fonte: [48].

As fibras balísticas possuem aplicabilidade em três possíveis componentes dos coletes balísticos: painéis balísticos em forma de tecidos, placas balísticas monolíticas em forma de polímeros e como componentes de um Sistema de Blindagem Multicamadas (SBM). Para essas aplicações, podem ser utilizadas tanto fibras orgânicas como inorgânicas.

A Empresa DuPont® desenvolveu as fibras de aramidas, cuja composição química é de poliparafenileno tereftalamida (PPTA). Essas fibras foram estruturadas e transformadas em fios e em seguida tecidas, dando origem ao tecido flexível denominado Kevlar® [49]. Atualmente, existem diversas outras empresas que fabricam tecidos à base de aramida, uma delas é a Empresa Teijin Group®, que fabrica o tecido de aramida registrado como Twaron®.

Apesar de a aramida não apresentar a maior resistência a tração nem o maior módulo de elasti-

cidade entre as fibras de alto desempenho, elas se caracterizam por apresentar uma favorável relação entre suas propriedades, tais como baixa densidade, elevadas propriedades em tração, alta resistência química, alta temperatura de decomposição (acima de 500°C), baixa flamabilidade e boas estabilidades térmica e dimensional [50].

As aramidas, em geral, não se fundem, pois, a decomposição ocorre na mesma temperatura de fusão cristalina (T_m). A grande desvantagem das aramidas é a fraca resistência à absorção de umidade. Dessa forma, quando utilizadas, devem estar acondicionadas de forma a terem o mínimo contato possível com o ar [51].

O UHMWPE foi desenvolvido recentemente, tendo como principais características a baixa densidade e alta tenacidade. Ele é responsável pela redução significativa do peso dos coletes balísticos, que podem ser utilizados tanto nos painéis balísticos como nas placas balísticas monolíticas ou SBM. No mercado, as suas marcas mais conhecidas são a Dyneema®, da empresa DSM, e o Spectra®, da empresa Honeywell [51].

O UHMWPE é a fibra menos densa e de maior resistência à abrasão de todas as fibras de alto desempenho. É também mais resistente à radiação ultravioleta e a produtos químicos do que as fibras de aramida. Estudos indicam que a fibra de UHMWPE, após uma prolongada exposição à radiação UV, apresenta uma perda de tenacidade e diminuição do alongamento (devido à cisão das cadeias poliméricas), e paralelamente ocorre um aumento do módulo de elasticidade (devido à reticulação das cadeias) [52].

O polibenzobisoxazol (PBO) teve o seu desenvolvimento iniciado junto ao UHMWPE. Fibras de PBO são extremamente fortes, duras e rígidas, e com resistência à tração e módulo maior do que as fibras de poliaramidas ou de alguns polietilenos de ultra-alto peso molecular. Estas também apresentam excelente resistência química a vários solventes orgânicos, ácidos e bases, porém são facilmente degradadas quando expostas à radiação UV e à combinação de alta temperatura com umidade [53].

A fibra de PBO é comercialmente conhecida como Zylon®. Ela é fabricada pela empresa japonesa Toyobo [54]. Os tecidos Zylon® absorvem quase duas vezes a energia por unidade de densidade de área do Kevlar® e do Spectra®, e quase 12 vezes mais que o alumínio. O desempenho de impacto balístico dos sistemas PBO é substancialmente superior aos sistemas Kevlar® 29 e marginalmente melhor do que os sistemas Kevlar® KM2 [54, 55].

No entanto, a comercialização de coletes contendo a fibra Zylon® sofreu um grave impacto após um evento em 2003 em Forest Hills, no estado da Pensilvânia, nos EUA, no qual um policial que utilizava um colete balístico teve o seu equipamento perfurado por um disparo de pistola de calibre .40, que, de acordo com o nível de proteção do material, não deveria perfurar, o que acabou causando-lhe sérios ferimentos [56].

Em consequência disso, a NIJ realizou uma extensa apuração de todos os coletes balísticos que utilizavam a fibra de Zylon® em sua composição e, em 2005, chegou à conclusão de que cerca de 50% desses coletes não forneciam a proteção adequada para os seus usuários, concluindo que as fibras Zylon® apresentavam uma perda sistemática de resistência à tração, deformação à tração e desempenho balístico correlacionado com a quebra de ligações específicas na estrutura química do material [56-57].

A empresa responsável pela fabricação do material, assim como as empresas fabricantes dos coletes, foi punida com multas significativas, além de ter sido proibida pela NIJ a comercialização de coletes com essa composição [34, 48].

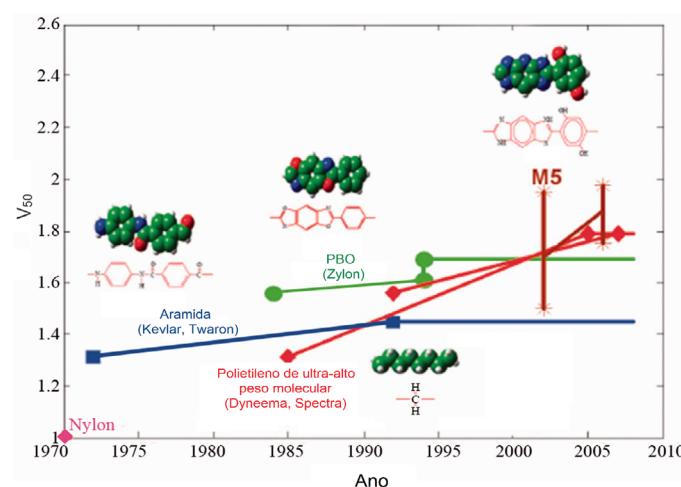
A fibra M5®, que é uma fibra de alto desempenho baseada em polipiridobisimidazol ou PIPD, foi desenvolvida pela empresa *Magellan Systems International* (USA), que se tornou uma parte da DuPont® em 2005. Essa fibra demonstra capacidade de absorção de energia específica muito alta em velocidades sônicas, e, portanto, tem um grande potencial para aplicação de balística, como observado na **Figura 17**, na comparação do seu desempenho com as demais fibras balísticas [2, 58]. Embora a literatura

apresente futuro promissor da fibra M5®, não existem no mercado itens que contenham essa fibra na sua composição.

A fibra P 120 é uma fibra de carbono de altíssimo módulo de elasticidade e possui a velocidade de onda de deformação mais alta comparada com as outras fibras. No entanto, não é um material tão indicado para aplicações balísticas, devido à baixa capacidade de absorção de energia [48].

A **Figura 17** mostra a evolução das fibras balísticas ao longo dos anos, considerando o desempenho balístico de V50 de cada uma delas.

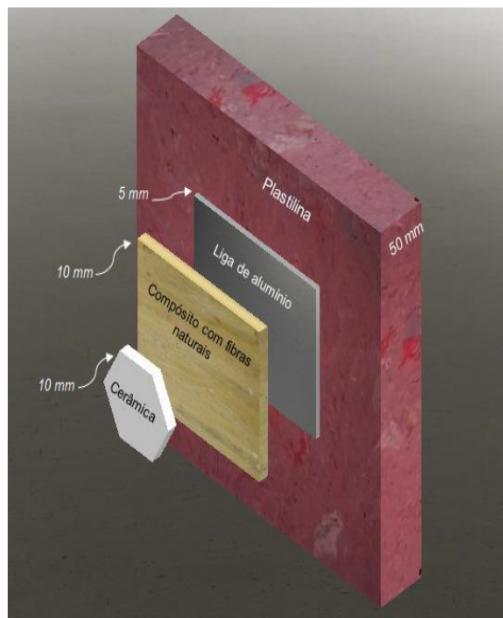
Fig. 17 - Evolução das fibras balísticas conforme o desempenho de V50.



Fonte: [48].

Nos últimos anos, a busca por produtos ecológicamente sustentáveis fez com que a pesquisa em fibras naturais com aplicações balísticas ganhasse grande notoriedade nas pesquisas de novos materiais balísticos. Diversos estudos têm sido publicados sobre a aplicação de fibras naturais, principalmente inseridas como segunda camada nos SBM, em que comumente a fibra natural compõe 30% de volume da camada de matriz de epóxi ou poliéster [59-61]. A **Figura 18** apresenta a composição do SBM com fibras naturais.

Fig. 18 - Composição do SBM com fibras naturais.



Fonte: [59].

Entre as fibras naturais em estudo, pode-se elencar algumas delas, como: Bambu, Malva, Cânhamo, Juta, Sisal, Rami e Curauá. Foram encontradas evidências de captura massiva de fragmentos maiores do que com fibras de Kevlar em alguns casos, principalmente nos compostos de Curauá. A nucleação e a propagação de trincas na matriz epóxi foram sugeridas para fornecer um mecanismo adicional de dissipação de energia em favor dos compósitos epóxi. Além de serem sustentáveis, essas fibras apresentam vantagens adicionais de fornecer sistemas de blindagem mais leves e com melhor custo-benefício quando comparados aos constituídos de aramida, o que torna essas fibras capazes de competir com a aramida nos SBM [48, 59].

Na **Tabela 5**, é possível visualizar as principais propriedades mecânicas de algumas fibras naturais comparadas à fibra de aramida.

Tab. 5 - Propriedades mecânicas de algumas fibras naturais em comparação com a fibra de aramida

Fibra	Massa Específica (ρ) (g/cm ³)	Limite de Resistência à Tração (σ) (MPa)	Módulo de Elasticidade (E) (GPa)	Máx. (σ/ρ) (MPa.cm ³ /g)
Bambu	1,03 – 2,21	106 - 204	-	198
Malva	1,37 – 1,41	160	17,4	117
Juta	1,30 – 1,45	393 - 800	13 - 27	615
Cânhamo	1,07	389 - 690	35	649
Sisal	1,26 – 1,50	287 - 913	9 - 28	725
Rami	1,5	400 - 1620	61 - 128	1.080
Curauá	0,57 – 0,92	117 - 3000	27 - 80	2.193
Aramida	1,44	3000 - 4100	63 - 131	2.847

Fonte: [62-63].

5. Materiais cerâmicos para aplicação balística

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos não metálicos, que têm por característica serem muito duros e frágeis. Eles são constituídos por meio de ligações predominantemente covalentes ou iônicas entre elementos metálicos e não metálicos. O seu emprego

como produto final é normalmente obtido por meio de processos de tratamento térmico em altas temperaturas, denominados sinterização [64].

Esses materiais possuem elevados módulos de elasticidade e baixas densidades, em comparação aos metais, sendo capazes de suportar temperaturas extremamente elevadas, muitas vezes acima do ponto de fusão da maioria dos metais utilizados em compo-

nentes. A principal desvantagem dos materiais cerâmicos é a sua fragilidade. Mesmo as menores falhas de superfície (arranhões ou cortes) ou falhas internas (inclusões, poros e microfissuras) podem ter resultados desastrosos [65].

Os materiais cerâmicos podem ser fabricados a partir de matérias-primas naturais ou sintéticas. As matérias naturais mais utilizadas industrialmente são: argila, caulim, quartzo, feldspato, filito, talco, grafita e zirconita. As sintéticas incluem, entre outras, Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , ZrO_2 e B_4C [66-67]. Na **Tabela 6**, são apresentadas as principais propriedades mecânicas de materiais cerâmicos utilizados em blindagens balísticas.

A ação das cerâmicas em blindagem conjugada é efetiva, porque o impacto do projétil com a face cerâmica cria ondas de choque compressivas associadas às elevadas pressões, que atravessam o projétil e o cerâmico nas respectivas velocidades de onda. A interação das ondas, após reflexão, ocorre no interior do projétil e ocasiona a sua fragmentação. Além disso, quando a ponta do projétil atinge o alvo, uma região reduzida é submetida a alta compressão, com o surgimento de um cone de fraturas [68-69].

A erosão do projétil, ao atravessar o material cerâmico, causada pela ação das partículas fragmentadas, é responsável em grande parte pela sua perda de energia. Assim, é fundamental que a face cerâmica tenha uma dureza elevada [68-69].

A porosidade do material cerâmico em excesso reduz o desempenho da blindagem, devido à queda da dureza e da densificação. No entanto, uma porosidade residual pode favorecer a proteção balística, pois os poros constituem pontos de aquecimento localizados [70], em que parte da energia cinética do projétil é convertida em energia térmica. Sendo assim, a relação entre absorção de energia e dureza é importante para determinar a quebra da ponta do projétil.

Os principais materiais cerâmicos monolíticos usados em sistemas de blindagem para proteção balística pessoal e coletiva são: cerâmicas óxidas, especialmente a alumina (Al_2O_3); cerâmicas não óxidas à base de nitrogênio (nitretos); à base de carbono (carbetos), como carbeto de boro (B_4C) e carbeto de silício (SiC);

ou boretos e suas combinações, como diboreto de titânio (TiB_2) [71-72].

As blindagens de alumina são os materiais cerâmicos que possuem o uso mais difundido para esse fim. Elas possuem desempenho balístico adequado e baixo custo de fabricação. As cerâmicas à base de alumina também são amplamente utilizadas como blindagem transparente na forma de safira ou oxinitrato policristalino de alumínio (AlON), que são úteis para janelas de veículos e de visualização de instrumentos. Essa versatilidade e a eficácia econômica têm como custo a alta massa específica, quando comparada com outras blindagens cerâmicas [73].

A pesquisa e o desenvolvimento de blindagens de B_4C demonstraram que esse material tem muita utilidade para a indústria de defesa, apresentando maior dureza e menor massa específica do que a alumina [74].

As blindagens de B_4C apresentam alta eficiência para velocidades de impacto relativamente baixas, no entanto, para projéteis perfurantes com alta energia cinética, quando a pressão gerada pela interação atinge a ordem de 20 GPa, o material acaba passando por um processo de amorfização que ocasiona uma queda no desempenho balístico [75]. A principal desvantagem das blindagens de B_4C é o seu elevado custo de fabricação [76].

Em contrapartida, as blindagens de SiC apresentam menor custo de produção do que as de B_4C , com propriedades mecânicas ligeiramente inferiores [76]. Blindagens produzidas com esse material são indicadas, também, como substitutas para as situações em que a amorfização do B_4C possa ocorrer [75].

Kaufmann et al. [77] avaliaram o desempenho de blindagens de SiC , B_4C e Al_2O_3 submetidas a impactos de munição .50 perfurante pela profundidade de penetração. Das conclusões do trabalho, o SiC apresentou a melhor performance e a Al_2O_3 a pior. O SiC , em muitos casos, apresentou comportamento similar ao do B_4C .

A principal desvantagem das blindagens cerâmicas reside no fato de que, ao serem impactadas, acabam favorecendo a produção de microtrincas, que podem se estender até a região de impacto [78], provocando fragmentação do material e induzindo uma vulnerabilidade no material em resistir a novos impactos.

A resposta balística de um material cerâmico está associada a uma série de fatores, como microestrutura, composição química, constituição de fases, propriedades físicas (densidade, dureza, módulo de Young, resistência mecânica, resistência à fratura e velocidade sônica), além da eficiência em dissipar a energia do impacto balístico. Uma propriedade isoladamente não define o comportamento do material, principalmente porque o mecanismo de fratura durante o impacto do projétil é muito complexo, e as fraturas são criadas por gradientes de tensão que ocorrem em um período relativamente pequeno. Somente a combinação de diferentes propriedades leva o material a proporcionar desempenho satisfatório. Para uma melhor análise da escolha da blindagem, a associação entre essas diferentes condições deve ser considerada, aliada ainda ao correto processo de fabricação, que é fundamental para a otimização das propriedades do material cerâmico acabado [8-9].

Para exemplificar, a dureza é vital para fraturar e erodir projéteis, a tenacidade à fratura e a resistência à flexão ajudam a cerâmica a resistir a impactos múltiplos, o módulo de elasticidade está relacionado à propagação da onda de tensão, e o modo de fratura está relacionado à quantidade de energia absorvida pela cerâmica. Assim, melhorias em várias propriedades são necessárias para que sua combinação resulte em uma cerâmica balística mais eficiente [67].

O processo de fabricação é muito importante na determinação das propriedades finais do produto. No entanto, geralmente, os processos que proporcionam as melhores propriedades são os mais onerosos, como é o caso do processo *hot pressing* (HP) para as cerâmicas de SiC, nas quais as propriedades atingem muitas vezes valores próximos aos limites previstos teoricamente para os materiais, mas são extremamente caros e limitados quanto à geometria de peças [8-9].

Tab. 6 - Propriedades das principais cerâmicas avançadas

Massa Específica (g/cm ³)	Limite de Resistência à Flexão (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tenacidade à Fratura (MPa.m ^{1/2})
Al ₂ O ₃	3,98	379	3.025	379
SiC	3,1	260 - 612	3.860	414
Si ₃ N ₄ (reação química)	2,5	350	1.030	207
Si ₃ N ₄ (prensado a quente)	3,2	650	3.450	3,3
ZrO ₂ (tenacificada)	5,8	674	1.725	310
B ₄ C	2,5	235 - 321	2.200	425

Fonte: [76, 80].

6. Sistema de Blindagem Multicamadas

As blindagens multicamadas ou mistas, denominadas anteriormente como SBM, consistem na sobreposição de camadas de materiais distintos com o objetivo de explorar a diferença das suas proprie-

dades de forma a garantir o melhor desempenho. A combinação desses materiais com propriedades distintas e complementares visa evitar a penetração do projétil e reduzir o trauma causado pelo impacto. A **Figura 19** apresenta uma ilustração de um SBM sob impacto balístico.

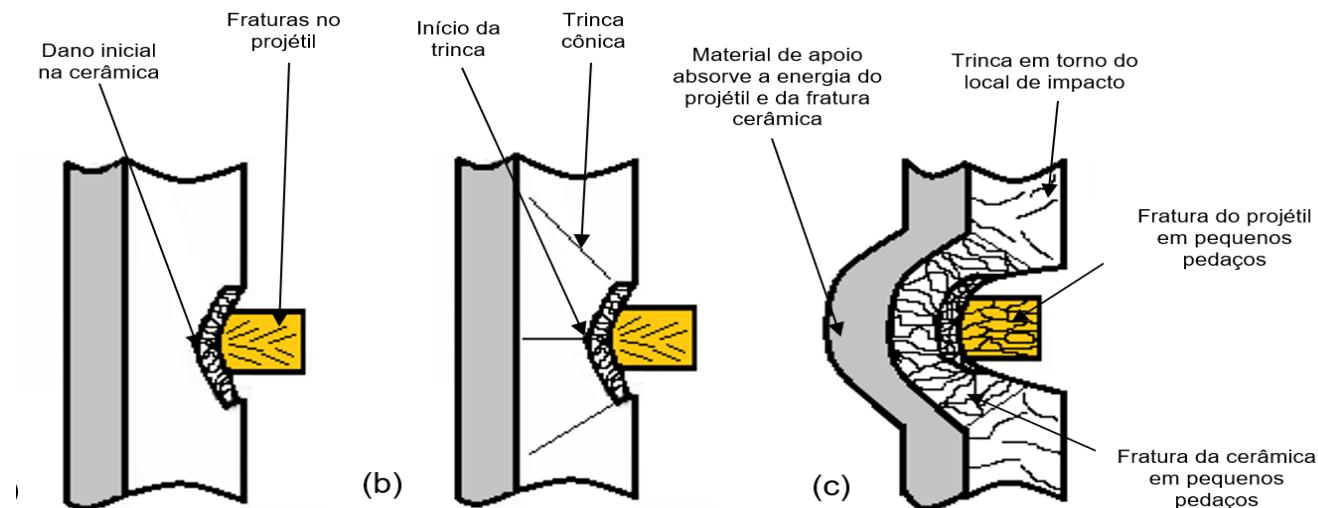
No SBM, os materiais cerâmicos são utilizados para resistir aos esforços provenientes dos eventos iniciais, servindo como uma primeira camada, em que ocorre o impacto inicial do projétil. A sua função é desgastar a ponta e dissipar parte da energia cinética através da fragmentação da sua massa, o que acaba melhorando a distribuição da pressão do impacto sobre a segunda camada, conforme apresentado na seção 6.

A segunda camada da blindagem, nesse sistema multicamadas, é formada por materiais dúcteis (metálicos ou poliméricos) e têm como função absorver

a energia cinética residual do projétil, dos estilhaços oriundos da munição e da própria cerâmica através de sua deformação plástica. Os materiais mais aplicados para essa finalidade são a aramida, o polietileno de ultra-alto peso molecular ou compostos de fibras naturais em matriz polimérica, conforme apresentado na seção 5.

Dependendo do sistema, pode ser aplicada uma terceira camada constituída por um metal dúctil, geralmente uma liga de alumínio, a fim de absorver a energia residual por meio da sua deformação plástica [76].

Fig. 19 - Diferentes estágios associados ao impacto entre projétil e material cerâmico de blindagem: (a) estágio da quebra; (b) estágio da erosão; (c) estágio da captura.



Fonte: [79].

7. Conclusão

Embora algumas soluções balísticas para os calibres levantados pelos ROC sejam atendidas no mercado externo, atualmente a Base Industrial de Defesa (BID) nacional não possui materiais homologados que atendam à demanda levantada pelo Ministério da Defesa. A Seção de Engenharia de Materiais do IME possui inúmeras pesquisas na área de blindagem individual, entre outras aplicações, com materiais metálicos, materiais compósitos de fibras naturais, materiais poliméricos e, finalmente, com materiais cerâmicos.

A BID enfrenta grandes dificuldades no desenvolvimento de soluções balísticas para atender ao solicitado pelo MD. O principal obstáculo é que a maior parte das matérias-primas em uso no mercado são importadas, o que torna a pesquisa no âmbito do IME de enorme relevância, pois o Programa de Ciência dos Materiais busca soluções em materiais abundantes no território nacional, como no caso das fibras naturais e nos materiais cerâmicos à base de SiC, visto que o Brasil é o quinto maior produtor mundial desse tipo de composto e de Al_2O_3 , que tem a vantagem de poder ser processado em menores temperaturas que o SiC, sem o controle de atmosfera.

Assim, as pesquisas desenvolvidas no IME têm por objetivo atender ao critério determinado pelo MD e fomentar a BID, ou ainda as próprias unidades fabris do Exército, como já foi realizado em anos anteriores por meio da fabricação de coletes balísticos pelo Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar, que foram distribuídos para as “tropas” e ainda se en-

contram em uso em diversas organizações militares do Exército brasileiro.

Agradecimentos

Agradecimentos às empresas RIMA, FIVEN e DuPont, pelo fornecimento de matérias-primas.

Referências

- [1] HENDERSON, J. Ballistic Body Armor Protecting The Protectors. *Strategic Standardization*, v. 12, n. 4, p. 1-18, 2008.
- [2] MAWKHLIENG, U.; MAJUMDAR, A.; LAHA, A. A review of fibrous materials for soft body armour applications. *RSC Advances*, v. 10, n. 2, p. 1066-1086, 2020.
- [3] PRAT, N. et al. Contemporary body armor: technical data, injuries, and limits. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, v. 38, n. 2, p. 95-105, 2012.
- [4] BALOS, S. et al. Perforated Plate for Ballistic Protection – A Review. *Metals*, v. 11, n. 4, p. 526, 2021.
- [5] CHENG, Y. H. et al. Mechanical characteristics and ballistic behaviors of high strength and hardness armor steels. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 197, p. 107502, 2022.
- [6] NAIK, S.; DANDAGWAL, R. D.; LOHARKAR, P. K. A review on various aspects of Kevlar composites used in ballistic applications. *Materials Today: Proceedings*, v. 21, p. 1366-1374, 2020.
- [7] DENOUAL, C. et al. Visualization of the damage evolution in impacted silicon carbide ceramics. *International Journal of Impact Engineering*, v. 21, n. 4, p. 225-235, 1998.
- [8] MEDVEDOVSKI, E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, v. 36, n. 7, p. 2103-2115, 2010.
- [9] MEDVEDOVSKI, E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2. *Ceramics International*, v. 36, n. 7, p. 2117-2127, 2010.
- [10] FIGUEIREDO, A. B.H. S. et al. Response to ballistic impact of alumina-UHMWPE composites. *Materials Research*, v. 21, n. 5, 2018.
- [11] BUFFON, S. J.; BORGES, P. C.; AZEVETO, E. C.; LIMA, E. S. Influência do Número de Camadas de Tecido no Desempenho Balístico de Alvos de Kevlar® XP S104. *C&T. Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, v. 36, p. 51-62, 2019.
- [12] CROUCH, I. G. Body armour - New materials, new systems. *Defence Technology*, v. 15, n. 3, p. 241-253, 2019.
- [13] BRASIL. Portaria Normativa nº 14/MD, de 23 de março de 2018. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2018.
- [14] GOMES FILHO, P. R. S. O projeto Sistema Combatente Brasileiro-COBRA. *Doutrina Militar Terrestre em Revista*, v. 7, n. 19, p. 6-9, 2019.
- [15] LESKE, A. Uma revisão sobre a inovação em defesa: do spin-off ao spin-in. *Brazilian Journal of Political Economy*, v. 38, n. 2, p. 377-391, 2018.
- [16] GUADAHUMI, C. História antiga 16 – Hegemonia de Roma. *Babilonialabella.blogspot*, [s. l.], 1 mar. 2017. Disponível em: <http://babilonialabella.blogspot.com/2017/03/historia-antigua-16-hegemonia-de-roma-5.html>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [17] ROMERO, F. A brief history of body armor. *Time*, New York, 2009. Disponível em: <https://content.time.com/time/business/article/0,8599,1889795,00.html>. Acesso em: 29 maio 2024.
- [18] LAMMLE, R. A Brief History of Bulletproof Vests. *Mental Floss*, [s. l.], 2010. Disponível em: <https://www.mentalfloss.com/article/24039/brief-history-bulletproof-vests>. Acesso em: 29 maio 2024.
- [19] ROWEL, D. M. A History of Bulletproof vest and Body Armor. *Thought Co.*, [s. l.], 2011. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/history-of-body-armor-and-bullet-proof-vests-1991337>. Acesso em 29 maio 2024.
- [20] HAZELL, P. J. Advances in Applied Ceramics: Structural, Functional and Bioceramics. *Guest Editorial*, v. 109, n. 8, p. 445, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1179/174367610X12804792635864>
- [21] MORRIS, R. Relembrando os aviadores da 2ª Guerra Mundial. *untoldvalor.blogspot*, [s. l.], 26 abr. 2008. Disponível em: <http://untoldvalor.blogspot.com/2008/04/flight-clothing-for-high-altitudes.html>. Acesso em: 5 dez. 2022.

- [22] DAVID, N. V.; GAO, X.-L.; ZHENG, J. Q. Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms. *Applied Mechanics Reviews*, v. 62, n. 5, 2009.
- [23] KABIR, R. B.; FERDOUS, N. Kevlar-the super tough fiber. *International Journal of Textile Science*, v. 1, n. 6, p. 78-83, 2012.
- [24] WANG, M. et al. Research on Bending and Ballistic Performance of Three-Dimensional Ply-to-Ply Angle Interlock Kevlar/EP Armor Material. *Materials*, v. 15, n. 19, p. 6994, 2022.
- [25] Les gilets pare-eclats des membres d'équipage aviation aircrew body armor. US Army Collectors. Disponível em: <https://usarmy-collectors.pagesperso-orange.fr/fichiers%20listes%20et%20divers/body%20armor%203.htm>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [26] FOUST, C.; JENSON, C. Industry analysis for body armor procurement. 2006.
- [27] HOWARD, C. E. This Vest May Save Your Life!. Azimuth, p. 21.
- [28] PASGT (Sistema de Armadura Pessoal para Tropas Terrestres). IWM Museum. Disponível em: <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30013077>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [29] MITCHELL, K. B.; CHOI, H. J.; GARLIE, T. N. Anthropometry And Range Of Motion Of The Encumbered Soldier. Army Natick Soldier Research Development And Engineering Center Ma Natick United States, 2017.
- [30] SecPro Advanced EOD Suit. Security Pro USA. Disponível em: <https://www.securityprousa.com/products/sec-pro-advanced-eod-suit>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [31] LOPEZ, C.T. New Soldier armor weighs less, offers more options. US Army, Washington, D.C., 20 mar. 2017. Disponível em: https://www.army.mil/article/184156/new_soldier_armor_weighs_less_offers_more_options. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [32] SPC - Soldier Plate Carrier. Armor Express. [S. l.]: [20--]. Disponível em: <https://www.armorexpress.com/kdh-defense-systems/>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [33] PARKER III, C. An Approach for the Enhancement of Military Combat, Performance and Personal Protective Equipment for Ground Troops. 2010. Dissertação (Mestrado) – Faculty of Auburn University, Auburn, 2010.
- [34] NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. NIJ 0101.04: Ballistic resistance of body armor. Washington, D.C.: National Institute of Justice; 2000.
- [35] KELLY, K. et al. Evaluation of the Low Intensity Threat Environment (LITE) Armor Plate and Third Generation Plate Carrier System for the United States Marine Corps. San Diego: Naval Health Research Center San Diego, 2019.
- [36] PLACA BALÍSTICA STAND ALONE. Cop, [s. l.], [20--]. Disponível em: <https://www.cop-shop.de/en/product/ballistic-plate-level-vpam9-stand-alone-250-x-300-mm-2610-g-5888>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [37] BRASIL. Instruções Gerais para a Gestão do Ciclo de Vida dos Sistemas e Materiais de Emprego Militar (EB10-IG-01.018). Brasília, DF: Comando do Exército, 2016.
- [38] NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. NIJ 0101.06: Ballistic resistance of body armor. Washington, D.C.: National Institute of Justice, 2008.
- [39] NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. NIJ 0123.00: Ballistic resistance of body armor. Washington, D.C.: National Institute of Justice, 2023.
- [40] BRASIL. Portaria nº 211-EME, de 23 de outubro de 2013. Brasília, DF: Estado Maior do Exército, 2013.
- [41] BRASIL. Regulamento de Produtos Controlados, aprovado pelo Decreto nº 10.030, de 30 de setembro de 2019.
- [42] BRASIL. Portaria nº 18 – D LOG, de 19 de dezembro de 2006.
- [43] GREENE, M. Body armor: Protecting our nation's officers from ballistic threats. *NIJ Journal*, v. 280, p. 24-28, 2018.
- [44] V50 Ballistic test for armor. MIL- STD-662F, 1997.
- [45] DUPONT. O que é o V50 e como ele pode salvar a sua vida? Dupont, [s. l.], [20--]. Disponível em: https://www.dupont.com.br/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Newsletter_car_armor.pdf. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [46] MS Instruments. Disponível em: <https://msinstruments.co.uk/ballistic-instrumentation/>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- [47] BHATNAGAR, A. 4.19 Lightweight Fiber-Reinforced Composites for Ballistic Applications. In: *Comprehensive Composite Materials II*. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 527-544.
- [48] BENZAIT, Z.; TRABZON, L. A review of recent research on materials used in polymer-matrix composites for body armor application. *Journal of Composite Materials*, v. 52, n. 23, p. 3241-3263, 2018.
- [49] THOMAS, E. L. Opportunities in protection materials science and technology for future Army applications. *Advances in Ceramic Armor VIII*, p. 145-148, 2012.

- [50] YADAV, R. et al. Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems. *RSC Advances*, v. 6, n. 116, p. 115145-115174, 2016.
- [51] DEWANGAN, M. K.; PANIGRAHI, S. K. Factors influencing the ballistic impact mechanisms of textile composite materials: a review. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021.
- [52] ZHANG, H.; SHI, M.; ZHANG, J.; WANG, S. Effects of Sunshine UV Irradiation on the Tensile Properties and Structure of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fiber. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 89, p. 2757-2763, 2003.
- [53] VIVAS, V.; SUAREZ, J. C. M.; WERBER, R. P. Influência da degradação ambiental no comportamento mecânico e balístico de compósitos produzidos com fibra de polietileno de ultra alto peso molecular. 2013, 216f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.
- [54] CUROSU, I. et al. Tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) made with high-performance polyethylene, aramid and PBO fibers. *Cement and Concrete Research*, v. 98, p. 71-81, 2017.
- [55] TABIEI, A.; NILAKANTAN, G. Ballistic impact of dry woven fabric composites: a review. *Applied Mechanics Reviews*, v. 61, n. 1, 2008.
- [56] WILHELM, M.; BIR, C. Injuries to law enforcement officers: the backface signature injury. *Forensic Science International*, v. 174, n. 1, p. 6-11, 2008.
- [57] NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE (NIJ) et al. Status Report to the Attorney General on Body Armor Safety Initiative Testing and Activities, 2004.
- [58] LAMMERS, M. et al. Mechanical properties and structural transitions in the new rigid-rod polymer fibre PIPD (M5') during the manufacturing process. *Polymer*, v. 39, n. 24, p. 5999-6005, 1998.
- [59] MONTEIRO, S. N. et al. Natural fibers reinforced polymer composites applied in ballistic multilayered armor for personal protection – an overview. *Green Materials Engineering*, p. 33-47, 2019.
- [60] COSTA, U. O. et al. Effect of graphene oxide coating on natural fiber composite for multilayered ballistic armor. *Polymers*, v. 11, n. 8, p. 1356, 2019.
- [61] NURAZZI, N. M. et al. A review on natural fiber reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications. *Polymers*, v. 13, n. 4, p. 646, 2021.
- [62] DE LIMA, T. E. S. et al. Potential of Using Amazon Natural Fibers to Reinforce Cementitious Composites: A Review. *Polymers*, v. 14, n. 3, p. 647, 2022.
- [63] BRAGA, F. O.; LIMA JR., E. P.; LIMA, E. S.; MONTEIRO, S. The Effect of Thickness on Aramid Fabric Laminates Subjected to 7.62 mm Ammunition Ballistic Impact. *Materials Research-Ibero-american. Journal of Materials*, v. 1, p. 1, 2017.
- [64] WACHTMAN, J. B. Jr, *Structural ceramics*, Academic Press Inc., San Diego, 1989.
- [65] CHAWLA, K. K. *Composite materials: Science and engineering*. London: Springer, 1987.
- [66] SALEIRO, G. T. et al. Mechanical behavior of SiC additivated with Al_2O_3 and Y_2O_3 produced by synthesis by auto combustion sustained at high temperature. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 15, n. 2, p. 96, 2018.
- [67] DRESCH, A. B. et al. Ballistic Ceramics and Analysis of their Mechanical Properties for Armour Applications: A Review. *Ceramics International*, v. 47, n. 7, Part A, p. 8743-8761, 2021.
- [68] REED, J. S. *Principles of ceramics processing*. London: John Wiley & Sons, 1995.
- [69] GOMES, A. V., Comportamento balístico da alumina com adição de nióbio e variação da geometria do alvo. 2004. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - IME, 2004.
- [70] MEYERS, M. A. *Dynamic behavior of materials*. London: John Wiley & Sons, 1994.
- [71] POPA, I.-D.; DOBRITĂ, F. Considerations on Dop (Depth Of Penetration) Test for Evaluation of Ceramics Materials Used in Ballistic Protection. *ACTA Universitatis Cibiniensis*, v. 69, n. 1, p. 162-166, 2017.
- [72] RAHBEK, D. B. et al. Effect of composite covering on ballistic fracture damage development in ceramic plates. *International Journal of Impact Engineering*, v. 99, p. 58-68, 2017.
- [73] HEALEY, Adam. Understanding the ballistic event: methodology and observations relevant to ceramic armour. 2017. Tese (Doutorado) – University of Surrey, Surrey, 2017.
- [74] CONSENTINO, P.A. S. L. Efeito de carbetos metálicos na sinterização do carbeto de boro por prensagem a quente. 2006. 150f. 2006. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [75] RAHBEK, D. B.; JOHNSEN, B. B. *Dynamic behaviour of ceramic armour systems*. Kjeller: Norwegian Defence Research Establishment, 2015.

- [76] DA SILVA, M.V.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H.A.; HOTZA, D. Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: Uma Revisão. *Cerâmica*, v. 60, p. 323-331. 2014.
- [77] KAUFMANN, C. et al. Influence of material properties on the ballistic performance of ceramics for personal body armour. *Shock and Vibration*, v. 10, n. 1, p. 51-58, 2003.
- [78] PICKERING, E. G. et al. Effect of confinement on the static and dynamic indentation response of model ceramic and cermet materials. *International Journal of Impact Engineering*, v. 110, p. 123-137, 2017.
- [79] FISHER, J.T. Validation of a simple go/no-go damage detection system for personal ceramic body armor using pressure sensitive film. *Graduate Theses and Dissertations*. Iowa State University, Iowa, 2011.
- [80] KARANDIKAR, P. G. et al. A review of ceramics for armor applications. *Advances in Ceramic Armor IV*, v. 29, p. 163-175, 2009.