

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO, INOVAÇÃO E EXTENSÃO -
PROPIEX
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS - PPGCEM

FERNANDO OTAVIO PIZZATTO

DESEMPENHO BALÍSTICO DE PLACA MULTICAMADA DE
COMPÓSITO POLIMÉRICO A BASE DE FITAS DE AMARRAÇÃO

CRICIÚMA

2024

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO, INOVAÇÃO E EXTENSÃO -
PROPIEX
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS - PPGCEM

FERNANDO OTAVIO PIZZATTO

DESEMPENHO BALÍSTICO DE PLACA MULTICAMADA DE
COMPÓSITO POLIMÉRICO A BASE DE FITAS DE AMARRAÇÃO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Profa. Dr^a Sabrina Arcaro

Coorientador: Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo

CRICIÚMA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P695d Pizzatto, Fernando Otavio.

Desempenho balístico de placa multicamada de compósito polimérico a base de fitas de amarração / Fernando Otavio Pizzatto. - 2024.

152 p. : il.

Tese (Doutorado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2024.

Orientação: Sabrina Arcaro.

Coorientação: Oscar Rubem Klegues Montedo.

1. Desempenho balístico. 2. Sistema de blindagem multicamada. 3. Fita de amarração. 4. Materiais poliméricos. 5. Materiais compósitos. I. Título.

CDD 23. ed. 623.5

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Fernando Otavio Pizzatto

Desempenho balístico de placa multicamada de compósito polimérico à base de fitas de amarração.

Esta Tese foi julgada adequada à obtenção do grau de Doutor(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 18 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



MATHEUS VINICIUS GREGORY ZIMMERMANN

Data: 30/01/2025 16:50:02 -0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr.

ermann

Univ

Documento assinado digitalmente



FABIANO RAUPP PEREIRA

Data: 30/01/2025 16:43:45-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente



VANIA CALDAS DE SOUSA

Data: 19/12/2024 15:34:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Vânia Caldas de Sousa

Univ

Documento assinado digitalmente

UFRGS



LUCIO FABIO CASSIANO NASCIMENTO

Data: 21/12/2024 08:22:58-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pr

mento

Instituto Militar de Engenharia - IME

Às minhas amadas filhas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as bênçãos que tenho recebido e pela força nos momentos mais difíceis desta caminhada;

A meus pais Izael e Maria Irene pelas orações, amizade e carinho durante toda minha vida. Obrigado por tudo! Amo vocês!

À minha amada esposa Sara e as minhas filhas Maria Clara e Catarina, por preencherem minha vida com alegria e amor. Vocês foram o folego em diversos momentos desta caminhada.

À minha orientadora, Profa. Dra. Sabrina Arcaro, e ao meu coorientador, Prof. Oscar Rubem Klegues Montedo, pelos constantes incentivos. Expresso meus mais sinceros agradecimentos pela oportunidade, confiança e apoio ao longo de todo o processo.

Aos professores e colaboradores do PPGCEM, pelo auxílio, suporte e cooperação na concretização deste trabalho.

Aos Professores, Cel Eduardo Sousa Lima, e ao Maj Lucio Fabio Cassiano Nascimento, do Instituto Militar de Engenharia (IME), pela colaboração na execução desta pesquisa.

Ao CAEx - Centro de Avaliações do Exército, e à equipe da linha IV, pela dedicação e prontidão na condução dos ensaios balísticos.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo financiamento do projeto.

E, por fim, a todos que, direta ou indiretamente, desenvolveram para a realização deste trabalho, deixo o meu agradecimento.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos”.

Marcel Proust

RESUMO

A crescente demanda por sistemas de blindagem multicamadas (SBM) leves, resistentes e economicamente viáveis, impulsionou a busca por materiais alternativos ao Kevlar®. Neste contexto, a tese explora, pela primeira vez, o uso de fitas de amarração como uma opção polimérica acessível para reforço como segunda camada de um SBM. As fitas de amarração são componentes têxteis utilizados em setores, como esportes, transporte e segurança, fabricadas a partir de materiais de alta resistência. Na blindagem balística, essas fitas podem ser empregadas como reforços poliméricos, oferecendo uma alternativa viável e de baixo custo aos materiais convencionais. Assim, o objetivo do trabalho é avaliar o desempenho de um SBM, contendo um compósito de matriz polimérica reforçado com fitas de amarração como segunda camada, composto por uma camada frontal de placas de alumina e uma camada de placa de compósito de resina epóxi reforçada com um dos três tipos de fita de amarração (poliéster, *nylon* ou Dyneema®), comparando-os com um sistema de referência, pelo qual um compósito de tecido de Kevlar®. O desempenho balístico destes sistemas foi avaliado por meio de ensaio de profundidade de penetração, conforme a NIJ 0108.01. Os resultados sugerem que as fitas de amarração têm potencial para substituir o Kevlar® como material de segunda camada, oferecendo uma solução funcional com materiais disponíveis no mercado. Nos ensaios realizados, os sistemas com fitas de amarração obtiveram desempenho competitivo em relação ao sistema referência. O compósito com fita de poliéster apresentou uma média de profundidade de penetração residual (P_{RES}) para a PLACA POL 1 de $0,278 \pm 0,012$ mm e a PLACA POL 2, $3,082 \pm 0,118$ mm. O compósito com fitas de Dyneema® obteve média P_{RES} para a PLACA DYN 1, de $1,448 \pm 0,063$ mm e a PLACA DYN 2, $4,345 \pm 0,594$ mm. Ambos superaram os valores de P_{RES} obtidos pelo sistema com o Kevlar® (PLACA REF 1, $7,072 \pm 0,177$ mm e PLACA REF 2, $7,745 \pm 0,542$ mm). Para o fator de eficiência balística, as placas com compósitos de poliéster e Dyneema® apresentaram valores médios de 10,664 e 15,151, respectivamente, enquanto a placa referência, alcançou uma média de 29,148. Os resultados mostram que as fitas de amarração oferecem desempenho balístico competitivo em relação ao Kevlar®, destacando a fita de Dyneema® como a alternativa mais eficiente. Além de representar uma opção mais econômica e disponível no mercado, o uso de fitas de amarração contribui para a redução da dependência de materiais importados e de alto custo. A pesquisa propõe uma inovação relevante para a blindagem balística, sugerindo que materiais alternativos podem não apenas substituir, mas potencialmente melhorar o desempenho dos sistemas de proteção multicamada, promovendo avanços no campo tecnológico de defesa pessoal e militar.

Palavras-chave: Sistema de blindagem multicamada, fita de amarração, compósitos.

ABSTRACT

The growing demand for lightweight, resistant and economically viable multi-layer armor systems (SBMs) has driven the search for alternative materials to Kevlar®. In this context, the thesis explores, for the first time, the use of lashing tapes as an affordable polymeric option for reinforcement as the second layer of an SBM. Lashing tapes are textile components used in sectors such as sports, transportation and security, made from high-strength materials. In ballistic armor, these tapes can be used as polymer reinforcements, offering a viable, low-cost alternative to conventional materials. The aim of this study is to evaluate the performance of an SBM containing a polymer matrix composite reinforced with lashing tapes as a second layer, consisting of a front layer of alumina plates and a layer of epoxy resin composite plate reinforced with one of three types of lashing tape (polyester, nylon or Dyneema®), comparing them with a reference system, in which a Kevlar® fabric composite was used. The ballistic performance of these systems was assessed by means of a depth of penetration test, in accordance with NIJ 0108.01. The results suggest that tie-down tapes have the potential to replace Kevlar® as a second layer material, offering a functional solution with materials available on the market. In the tests carried out, the systems with lashing tapes performed competitively compared to the reference system. The composite with polyester tape showed an average residual penetration depth (PRES) for PLATE POL 1 of 0.278 ± 0.012 mm and PLATE POL 2, 3.082 ± 0.118 mm. The composite with Dyneema® tapes obtained an average PRES for the DYN 1 PLATE of 1.448 ± 0.063 mm and the DYN 2 PLATE of 4.345 ± 0.594 mm. Both exceeded the PRES values obtained by the Kevlar® system (PLATE REF 1, 7.072 ± 0.177 mm and PLATE REF 2, 7.745 ± 0.542 mm). For the ballistic efficiency factor, the plates with polyester composites and Dyneema® showed average values of 10.664 and 15.151, respectively, while the reference plate achieved an average of 29.148. The results show that lashing tapes offer competitive ballistic performance compared to Kevlar®, with Dyneema® tape standing out as the most efficient alternative. In addition to representing a more economical option available on the market, the use of lashing tapes contributes to reducing dependence on expensive imported materials. The research proposes a relevant innovation for ballistic armor, suggesting that alternative materials can not only replace, but potentially improve the performance of multilayer protection systems, promoting advances in the technological field of personal and military defense.

Keywords: Multilayer armor system, lashing tape, composites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Figura mostrando os estudos feitos com materiais balísticos nos últimos 10 anos.	24
Figura 2 - Figura mostrando os três estágios do impacto balístico em um sistema multicamada (SBM): estágio 01, estágio 02 e estágio 03.	31
Figura 3 - Tipologia de fitas de amarração utilizadas no setor esportivo em escalada e montanhismo.	48
Figura 4 - Estágio 1 do mecanismo de impacto.....	50
Figura 5 - Estágio 2 do mecanismo de impacto.....	51
Figura 6 - Estágio 3 do mecanismo de impacto.....	51
Figura 7 - Fitas de amarração utilizadas na presente pesquisa: A – Poliéster, B – Nylon, C – Dyneema®.....	58
Figura 8 - Esquema de sistema de blindagem balística para o teste do DOP.....	58
Figura 9 - Formato de placas utilizadas no trabalho: A - formato das peças em condições de confinamento de um painel completo, B - formato de placas centrais, C - formato de placas laterais utilizadas na pesquisa.....	59
Figura 10 - Etapas da pesquisa.	63
Figura 11 - Fluxograma geral das etapas da pesquisa.	64
Figura 12 - Fluxograma do processo de obtenção dos compósitos.	67
Figura 13 - Montagem dos compósitos com tecido de Kevlar® e resina epóxi: A - Placa metálica, B - Tecido de Kevlar® sobre a placa metálica, C - Conjunto de COMP REF sendo confeccionados, D - Compósito de tecido de Kevlar® e resina epóxi.	69
Figura 14 - Fitas de nylon cortadas manualmente, com 20 cm de comprimento.	71
Figura 15 - Perspectiva mostrando o posicionamento das camadas para a formação dos materiais compósitos utilizando as fitas de amarração do compósito COMP NYL.	72
Figura 16 - Perspectiva mostrando as camadas de fita de amarração do compósito COMP NYL.	72
Figura 17 - Detalhe 01: Ampliação da perspectiva mostrando as camadas de fitas de amarração do compósito COMP NYL.....	73
105Figura 18 - Montagem dos compósitos desenvolvidos a partir das fitas de amarração de nylon e resina epóxi: A - Placa metálica, B - Primeira camada de fita de nylon, C - Resina epóxi sobre a camada de fitas de nylon, D - Segunda camada de fitas de nylon, E - Segunda camada de fitas de nylon concluída, F - Quarta camada de fitas de nylon, G - Placa de compósito concluída com todas as camadas, H - Placa metálica sobre a última camada do compósito. ...	74

Figura 19 - Aparência final dos compósitos, no formato geométrico quadrado, com dimensão aproximada de 20 cm x 20 cm: A - Placa de compósito: fita de poliéster e resina epóxi - COMP POL, B - Placa de compósito: fita de nylon e resina epóxi – COMP NYL e C - Placa de compósito: fita de Dyneema® e resina epóxi - COMP DYN.	75
Figura 20 - Fluxograma apresentando a etapa de montagem dos Painéis Balísticos.	77
Figura 21 - Montagem do mosaico com as placas de alumina para ser inserida na camada frontal do Sistema de Blindagem Multicamada.	78
Figura 22 - Placa de compósito COMP POL.	79
Figura 23 - Montagem do sistema de blindagem multicamada em estudo finalizado.	81
Figura 24 - Munição 7,62 mm e munição 9 mm utilizada nos ensaios balísticos: A - Munição 7,62 mm, B - Munição 9 mm.	82
Figura 25 - Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos com as placas de compósito COMP REF.	83
Figura 26 - Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos com as placas de compósitos COMP POL, COMP NYL e COMPDYN.	83
Figura 27 - Placa de compósito COMP NYL com os 5 pontos (ponto A, B, C, D e E) devidamente marcados.	84
Figura 28 - Condições de ensaio executados no CAEx: A - Dispositivo de tiro utilizado no ensaio de velocidade residual, B - Apresentação das condições em que a amostra foi posicionada no ensaio de velocidade residual.	84
Figura 29 - Projétil calibre 7,62 mm perfurante utilizado nos ensaios balísticos.	86
Figura 30 - Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos com os corpos de prova do Sistema de Blindagem Multicamada (SBM) estudados.	87
Figura 31 - Corpo de prova a ser ensaiado fixado no suporte mostrando o feixe de laser pontuando o alvo.	88
Figura 32 - Amostras SBM desenvolvidas na pesquisa, antes e após o primeiro ensaio de DOP: A - Amostra antes do ensaio, B - Amostra após o ensaio.	89
Figura 33 - Amostras de SBM desenvolvidas na pesquisa, no segundo ensaio de DOP.	90
Figura 34 - Esquema de representação do SBM nos testes balísticos.	92
Figura 35 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika, referente ao tecido de Kevlar®.	95
Figura 36 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika, referente à fita de amarração de poliéster.	96
Figura 37 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika, referente à fita de amarração de nylon.	97

Figura 38 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika, referente à fita de amarração de Dyneema®.....	98
Figura 39 - Compósitos desenvolvidos a partir do tecido de Kevlar® e resina epóxi e compósitos desenvolvidos a partir das fitas de amarração de poliéster e resina epóxi: A - Compósito COMP REF desenvolvido a partir do tecido de Kevlar® e resina epóxi, B - Compósito COMP POL desenvolvido a partir das fitas de amarração de poliéster e resina epóxi, C - Compósito COMP NYL desenvolvido a partir das fitas de amarração de poliéster e resina epóxi, D - Compósito COMP DYN desenvolvido a partir das fitas de amarração de Dyneema® e resina epóxi. ...	101
Figura 40 – Imagens extraídas do microscópio Bioptika do compósito COMP REF: A - Tecido de Kevlar®, B - Tecido de Kevlar®, C - Compósito COMP REF, D - Compósito COMP REF.	103
Figura 41 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika do compósito COMP POL: A e B - Compósito COMP POL.....	104
Figura 42 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika do compósito COMP NYL: A e B - Compósito COMP NYL.	105
Figura 43 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika do compósito COMP DYN: A e B - Compósito COMP DYN.....	106
Figura 44 - Gráfico de Tensão e Deformação dos compósitos COMP REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DYN.	111
Figura 45 - Figura mostrando os pontos experimentais obtidos a partir do espectro de radar Doppler de um corpo de prova do COMP POL.	115
Figura 46 - Figura mostrando os pontos experimentais obtidos a partir do espectro de radar Doppler de um corpo de prova do COMP NYL.....	115
Figura 47 - Figura mostrando os pontos experimentais obtidos a partir do espectro de radar Doppler de um corpo de prova do COMP DYN.	116
Figura 48 - Amostras de SBM desenvolvidas na pesquisa, no segundo ensaio de D.O.P: A - Alumínio após perfuração por munição 7,62 mm perfurante, B - Molde feito com cola quente.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos níveis de proteção em blindagens balísticas.....	32
Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas da alumina.....	35
Tabela 3 - Propriedades das Fibras de Kevlar® - DuPont.	38
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do poliéster termoplástico.....	40
Tabela 5 - Propriedades mecânica do <i>nylon</i> 6/6.....	41
Tabela 6 - Propriedades físicas e mecânicas do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE).....	42
Tabela 7 - Propriedades físicas e mecânicas da resina epóxi.	44
Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais.....	53
Tabela 9 - Propriedades da alumina de acordo com o fornecedor Engecer Ltda.	57
Tabela 10 - Propriedades balística do tecido de fibras de Kevlar® 49.	60
Tabela 11 - Propriedades mecânicas e de manuseio da resina com endurecedor.....	61
Tabela 12 - Composição química da liga de alumínio 6063.	62
Tabela 13 - Propriedades da cola epóxi.....	63
Tabela 14 – Número de amostras utilizadas de COMP REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DYN nos ensaios da presente pesquisa.	68
Tabela 15 - Número de camadas utilizadas para a composição dos compósitos.	71
Tabela 16 – Quantidade de resina utilizada para a confecção das placas dos compósitos.....	73
Tabela 17 - Denominação dos painéis balísticos do sistema de blindagem multicamada em estudo.....	81
Tabela 18 - Tabela Dimensional, densidade e porosidade do Tecido de Kevlar®, da fita de poliéster, anel de fita de nylon e anel de fita de Dyneema®.	98
Tabela 19 – Densidades aparente e real e porosidade dos compósitos estudados.....	107
Tabela 20 - Resultados de resistência mecânica à tração dos compósitos desenvolvidos na pesquisa.	109
Tabela 21 - Dados de resistência à tração de compósitos utilizados na camada intermediária de um sistema de blindagem multicamada encontrados na literatura.	112
Tabela 22 - Resultados do ensaio de velocidade residual dos compósitos desenvolvidos na pesquisa.	113
Tabela 23 - Resultados de energia absorvida específica dos compósitos COMP REF, COMP POL, COMP NYL E COMP DYN desenvolvidos na pesquisa.	117

Tabela 24 - Resultados da eficiência de espessura dos sistemas de blindagem multicamada desenvolvidos no trabalho.	121
Tabela 25 - Resultados da ρ_{ref} da placa de alumínio 6063 (camada posterior).	124
Tabela 26 - Resultados de ρ_t dos compósitos estudados.	124
Tabela 27 - Resultados da eficiência de massa dos sistemas de blindagem multicamada desenvolvidos na pesquisa.	125
Tabela 28 - Resultados do fator de eficiência balística dos sistemas de blindagem multicamada desenvolvidos na pesquisa.	126
Tabela 29 - Dados relevantes dos compósitos levantados e analisados nesta pesquisa.	127
Tabela 30 - Dados relevantes das placas levantados e analisados nesta pesquisa.	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UHMWPE	polietileno de ultra alto peso molecular
HDPE	polietileno de alta densidade
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NIJ	<i>National Institute of Justice</i>
SBM	Sistema balístico multicamada
CAEx	Centro de Avaliações do Exército
TPEs	elastômeros termoplásticos
TPOs	elastômeros de borracha misturas de poliolefinas
TPVs	misturas de polímeros vulcanizados dinamicamente
PBT	Polibutileno de Tereftalato
PET	polietileno tereftalato
EPs	resinas epóxi
DOP	ensaio de profundidade de penetração
ϵ_t	porosidade total
ρ_{ap}	densidade aparente a seco
ρ_{real}	densidade real
m	massa corpo de prova
v	volume do corpo de prova
V	volume do sólido geométrico
c	comprimento
l	largura
a	altura
E_{abs}	energia absorvida
M	massa do projétil
V_0	velocidade do projétil imediatamente antes do impacto
V_R	velocidade residual do projétil após perfurar o alvo
V_L	velocidade limite
E_{abs}	energia absorvida
M	massa do projétil.
E_t	eficiência de espessura
P_{REF}	profundidade de penetração de referência na placa de alumínio
P_{RES}	profundidade de penetração residual na placa de apoio - alumínio

T_t	espessura de placas de blindagem multicamada
E_m	eficiência de massa
ρ_{ref}	densidade do alumínio
ρ_t	média ponderada da densidade
ρ_t	média ponderada da densidade
ρ_1	densidade do material que compõe a camada frontal
t_1	espessura da camada frontal
ρ_2	densidade do material que compõe a segunda camada
t_2	espessura da segunda camada
q^2	fator de eficiência balística

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	OBJETIVOS.....	27
2.1	OBJETIVO GERAL.....	27
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1	HISTÓRICO	28
3.2	SISTEMAS DE BLINDAGEM.....	29
3.3	MATERIAIS CERÂMICOS EM BLINDAGEM BALÍSTICA	32
3.3.1	Óxido de Alumínio (Al_2O_3 , Alumina)	33
3.4	MATERIAIS POLIMÉRICOS	35
3.4.1	Fibras sintéticas.....	36
3.4.1.1	Aramida.....	37
3.4.1.2	Poliéster.....	39
3.4.1.3	Poliamida	40
3.4.1.4	UHMWPE.....	41
3.4.2	Resina Epóxi e sua aplicação em compósito	43
3.5	MATERIAIS COMPÓSITOS	44
3.6	FITAS DE AMARRAÇÃO	47
3.7	PLACA DE APOIO.....	48
3.8	MECANISMO DE IMPACTO.....	49
3.9	INOVAÇÕES NO SISTEMA DE BLINDAGEM	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS	57
4.1	MATERIAIS.....	57
4.2	Configuração do SISTEMA DE BLINDAGEM MULTICAMADA (SBM).....	58

4.2.1	Placa Frontal - Cerâmica.....	59
4.2.2	Placa intermediária – Materiais compósitos poliméricos	60
4.2.2.1	Tecido de Kevlar®.....	60
4.2.2.2	Fita de Poliéster.....	60
4.2.2.3	Fita de <i>Nylon</i>	60
4.2.2.4	Fita de Dynnema®	61
4.2.2.5	Resina Epóxi AR720 e Endurecedor AH723.....	61
4.2.3	Placa de Alumínio.....	61
4.2.4	Cola Epóxi.....	62
4.3	MÉTODOS	63
4.3.1	Caracterização das fitas de amarração	65
4.3.1.1	Análise Visual.....	65
4.3.1.2	Porosidade.....	65
4.3.2	Obtenção dos compósitos.....	66
4.3.2.1	Obtenção do compósito polimérico de tecido de Kevlar® e Resina Epóxi.....	68
4.3.2.2	Obtenção dos compósitos poliméricos com fitas e resina epóxi.....	70
4.3.2.2.1	Estudo do quantitativo de camada de Anéis de Fita.....	70
4.3.2.2.2	Método da confecção das placas de compósitos poliméricos.....	71
4.3.3	Caracterização dos Compósitos	76
4.3.3.1	Análise optica dos compósitos.....	76
4.3.3.2	Porosidade dos compósitos	76
4.3.3.3	Ensaio mecânico de tração.....	76
4.3.4	Montagem dos Painéis Balísticos	76
4.3.4.1	Preparação dos elementos compostos em cada camada do sistema de blindagem multicamada para a montagem dos painéis balísticos.....	77
4.3.4.1.1	Camada frontal – Placa cerâmica	77
4.3.4.1.2	Camada intermediária – Materiais poliméricos.....	78

4.3.4.1.3	Camada posterior – Placa de alumínio	79
4.3.4.2	Montagem dos painéis balísticos do SBM em estudo.....	79
4.3.5	Ensaio de Blindagem Balística	81
4.3.5.1	Ensaio de Velocidade Residual.....	81
4.3.5.2	Ensaio de Profundidade de Penetração – DOP	85
4.3.5.2.1	Avaliação de Desempenho Balístico	90
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	95
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	95
5.1.1	Análise visual do Kevlar® e das fitas de amarração.....	95
5.1.2	Porosidade do tecido de Kevlar® e das fitas de amarração	98
5.2	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	100
5.2.1	Análise visual dos compósitos	100
5.2.2	Porosidade dos Compósitos	106
5.2.3	Ensaio Mecânico de Tração	108
5.3	ENSAIO DE BLINDAGEM BALÍSTICA.....	112
5.3.1	Ensaio de Velocidade Residual.....	112
5.3.2	Ensaio de Profundidade de Penetração – DOP	118
5.3.2.1	Avaliação de Desempenho Balístico	120
6	CONCLUSÃO.....	130
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	132

1 INTRODUÇÃO

A armadura é definida de um modo geral como sendo uma cobertura defensiva projetada para fornecer proteção de uma maneira específica de ataque. Registros ao longo da história demonstram que os humanos utilizavam vários tipos de materiais para se protegerem de ferimentos em combate e outras situações perigosas (Sorrentino *et al.*, 2014). Com o passar do tempo, as necessidades de proteção evoluíram e o conceito de armadura foi ampliado para incluir diferentes tipos de blindagem adaptadas às condições modernas de combate. Atualmente, a blindagem pode ser classificada, dependendo das aplicações pretendidas, como: blindagem corporal (ou pessoal), blindagem leve, no caso da blindagem veicular e de aeronave, e blindagem pesada, no caso da blindagem de tanques (Sorrentino *et al.*, 2014).

À medida que os avanços tecnológicos trouxeram novos materiais e táticas de combate, a blindagem tornou-se fundamental para garantir proteção contra ameaças de alta intensidade, como os projéteis balísticos. Esse tipo de ameaça, que inclui munições de alta velocidade e alto poder de penetração, representa um risco crítico tanto para veículos blindados quanto para proteção pessoal. A penetração balística não só compromete a integridade das estruturas blindadas, mas também coloca em risco a vida dos ocupantes e usuários dos sistemas de defesa (Wang *et al.*, 2020).

A indústria de defesa, neste contexto, apresenta uma grande importância no desenvolvimento tecnológico e, conseqüentemente, um aumento de produtividade nos países (Bello; Figueiredo; Almeida, 2020). Historicamente, a solução para enfrentar a penetração balística em ambientes de combate era o uso de placas espessas de blindagem, especialmente em veículos militares e equipamentos de defesa. Embora essas placas oferecessem alta resistência, seu peso excessivo influenciava significativamente a mobilidade e a capacidade dos veículos militares e dos soldados (Wang *et al.*, 2020). A queda do muro de Berlim, em 1989, foi um divisor de águas e marcou o início de uma nova era de mudanças nas estratégias militares nos países desenvolvidos, principalmente nos Estados Unidos da América (EUA). A necessidade de dissuadir a guerra nuclear global e de dirigir grandes conflitos deixou de ser uma ameaça de prioridade alta. Missões militares recentes dos EUA no Panamá, Sudoeste Asiático, Somália, Haiti e Bósnia mostraram que podem responder rapidamente a uma vasta variedade de missões em conflitos regionais limitados, com a vantagem de forças de combate qualificadas, com número limitado de soldados, móveis e letais (Chin, 1999). Estas transformações semelhantes a pós-Guerra Fria realçaram a necessidade de se definir estratégias

e avaliar os requisitos de combate para vencer conflitos futuros. Os primeiros resultados demonstraram a necessidade de forças fisicamente ágeis com tecnologias inovadoras (Chin, 1999).

No Brasil, este setor da indústria de defesa é considerado estratégico e um dos mais importantes dentro da estrutura produtiva das economias avançadas e das grandes economias emergentes. Os EUA foi um dos principais países a estimular o desenvolvimento da indústria de defesa, pois este setor tem uma ligação muito próxima com a ciência, tecnologia e inovação e é tida como disseminadora de tecnologia para outras áreas (Bello; Figueiredo; Almeida, 2020).

No Brasil, o Ministério da Defesa, entre 2005 e 2017, destinou 1,4% do PIB do país, com um orçamento de US\$ 29,3 bilhões, para despesas militares, ficando no 11º lugar no *ranking* dos países de investimento em defesas militares. No primeiro lugar estão os EUA com 3,1% do PIB, com um orçamento de US\$ 610 bilhões; o segundo é a China, em terceiro a Arábia Saudita e em quarto lugar a Rússia com 4,3% do PIB, com um orçamento de US\$ 66,3 bilhões. A Rússia, apesar do retrocesso que teve nos anos 1990, é o único país emergente que possui estrutura produtiva compatível com sua atual demanda (Bello; Figueiredo; Almeida, 2020).

Nas últimas décadas, vários tipos de armaduras foram validados, aplicações de materiais e estruturas funcionais são soluções para melhorar o desempenho balístico. Dentre elas, as armaduras empregando sistemas multicamada, utilizando materiais compósitos, com o intuito de atingir valores mais elevados de níveis de resistência balística. Anteriormente, o aço foi amplamente utilizado em aplicações de proteção. Dentre os materiais metálicos, não metálicos e compósitos, os metálicos, são caracterizados como os que possuem a maior densidade (Oliveira *et al.*, 2019b). O aço por exemplo, tem densidade de aproximadamente 7,85 g/cm³ (Waqar *et al.*, 2024). Desta maneira, não é apropriado para uso em armadura leve, pois a torna menos favorável em situações em que o peso e a flexibilidade são fatores críticos. Diante dessa limitação, a pesquisa evoluiu para explorar materiais alternativos, mais leves e igualmente eficazes, para atender às exigências dos sistemas de defesa modernos (Sorrentino *et al.*, 2014).

Os tecidos tornaram-se objeto de estudo e passaram a ser utilizados para produzir armaduras compostas. Os compósitos de tecidos possuem altas taxas de deformação até a falha sob tração, compressão e cargas de impacto, devido ao entrelaçamento do feixe de fibras (Sorrentino *et al.*, 2014).

De acordo com Abtew *et al.* (2019), na Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945), novos coletes balísticos foram projetados e desenvolvidos a partir de fibras, a fim de fornecer proteção de fragmentos de bombas e granadas. Fibras de *nylon* juntamente com placas de aço foram

usadas para o desenvolvimento de coletes balísticos pelo exército Americano. A ampla procura por desenvolvimento de sistemas de blindagens mais eficientes estendeu-se a vários países, inclusive no Brasil nesta mesma época.

Diante desse cenário, a necessidade de novas soluções de engenharia tornou-se essencial para que a blindagem acompanhasse as inovações das munições de alto poder de penetração. Para atender a essas demandas, diversas abordagens foram exploradas, incluindo a escolha do tipo, formato, quantidade e qualidade dos materiais utilizados na blindagem. Esse esforço é refletido em muitos estudos sobre o desempenho balístico de placas em materiais compósitos, que utilizam diferentes processos tecnológicos para aprimorar a eficiência de proteção (Dharani Kumar *et al.*, 2023; Han *et al.*, 2024; Hazell; Roberson; Moutinho, 2008; Sorrentino *et al.*, 2014). Como resultado, os avanços no uso de compósitos cerâmicos têm proporcionado sistemas pessoais de proteção que oferecem uma combinação ideal de leveza e resistência. (Kaufmann *et al.*, 2003; Ma *et al.*, 2024; Selim *et al.*, 2024).

De modo geral, os sistemas de blindagem multicamada (SBM) são constituídos por uma camada frontal de material cerâmico duro e frágil, com elevada resistência à compressão e baixa densidade, cujo objetivo é destruir e quebrar a ponta do projétil, absorvendo a maior parte de energia cinética. Esta energia é dissipada por meio da fragmentação dinâmica do projétil, que envolve as etapas de nucleação, crescimento e coalescimento das microtrincas. Relatos de uso de cerâmica para aplicações de defesa em blindagens de aeronaves e pessoais remontam ao início dos anos 1960. A substituição de materiais metálicos por materiais cerâmicos garantiu muitas melhorias nas aeronaves, como redução de peso, implicando em um aumento da autonomia, capacidade de transporte e maior capacidade de blindagem (Silva *et al.*, 2014).

Normalmente, a camada seguinte é constituída de um material mais leve, cuja finalidade é reduzir a energia de impacto por meio da absorção da energia cinética dos fragmentos gerados tanto pelo projétil quanto pela cerâmica. Nestas camadas, utilizam-se usualmente materiais compósitos, como as fibras (Medvedovski, 2010a). As fibras têm propriedades estruturais diferentes, que dão respostas diferentes ao impacto balístico quando são tecidas em um tecido. São muitos os estudos em torno destes materiais, tornando os tecidos mais fortes e aumentando sua resistência à penetração balística, mantendo a flexibilidade. Alguns exemplos de fibras são as aramidas (abreviação poliamida aromática), como Kevlar®, nome comercial de um tipo específico de fibra de aramida desenvolvido pela DuPont e Twaron, uma fibra de aramida de alta resistência, desenvolvida pela empresa Teijin, polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), como Spectra, é o nome comercial de um tipo de UHMWPE, desenvolvido pela Allied Signal, que posteriormente foi adquirido pela Honeywell (Sorrentino *et al.*, 2014) e

Dyneema®, nome comercial de um tipo de UHMWPE, desenvolvido pela empresa DSM, atualmente Avient (Medvedovski, 2010a), fibras PIPD, como M5 (Sorrentino *et al.*, 2014), e compósitos de fibras de vidro (Medvedovski, 2010a).

Na segunda camada, os compósitos absorvem a energia remanescente dos fragmentos e do projétil, por meio de vários mecanismos, como o estiramento, a deformação e o deslocamento das fibras. A propagação de pulsos de energia nas interfaces entre diferentes materiais se dá por meio de uma onda de compressão, que é refletida como uma onda trativa ou compressiva. Tal camada tem como função absorver a energia cinética residual do projétil. Portanto, para uma redução maior na energia de impacto, a segunda camada pode ser composta de materiais mais leves, com densidade relativamente baixa, pois estes apresentam menor impedância de choque (Silva *et al.*, 2014), melhorando, assim, a eficácia geral do sistema de proteção. Estes materiais são utilizados para fornecer proteção adicional e dissipar a energia do impacto de forma eficiente. Alguns dos materiais usados nos sistemas de proteção balística, como por exemplo o Kevlar®, apresentam densidade de aproximadamente 1,44 g/cm³ (Vara Prasad; Talupula, 2018) e o Polietileno de Alta Densidade (HDPE), que possui densidade entre 0,95 e 0,97 g/cm³ (Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003).

No SBM, normalmente é empregado ainda uma terceira camada de um metal dúctil e cuja função é resistir à penetração do projétil e dos fragmentos gerados, pelo mecanismo de deformação plástica. Desta maneira, o propósito do SBM não é apenas absorver o impacto, mas também evitar a penetração dos fragmentos (Kaufmann *et al.*, 2003; Tian; Li; Dong, 2022).

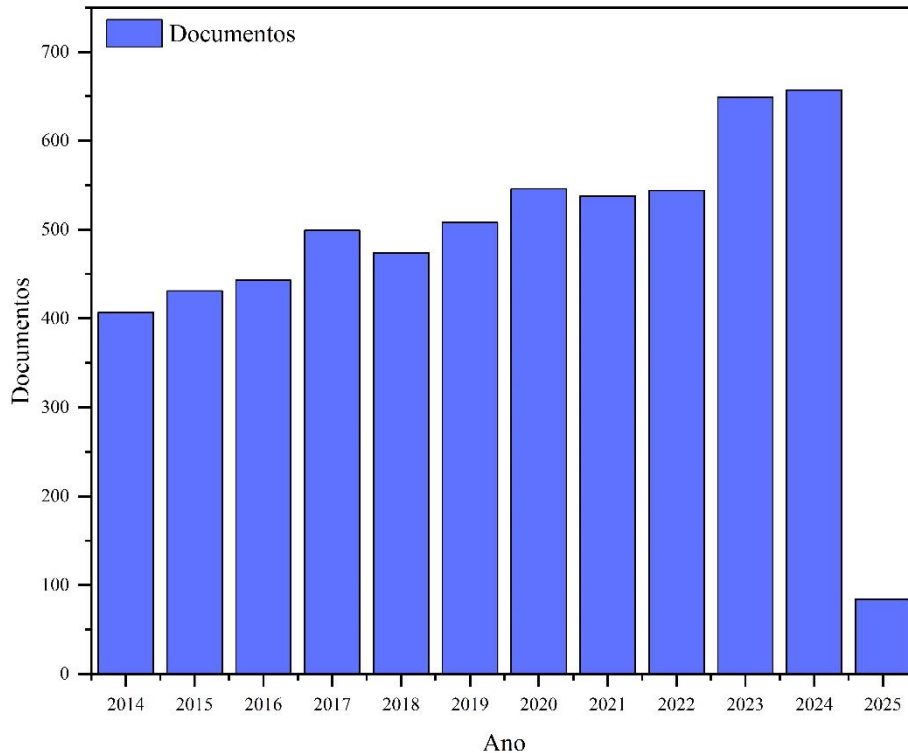
No atual cenário mundial, a busca por materiais que possam ser utilizados em SBM está em ascensão. Quando se pretende combinar peso, proteção e custo, os componentes cerâmicos e compósitos poliméricos estão sendo muito utilizados como materiais com grande potencial e largamente investigados (Marsh, 2017).

Atualmente, é crescente a busca pela substituição de materiais comumente utilizados, por materiais que tragam mais benefícios técnicos, econômicos e ambientais. A Figura 1 apresenta uma visão geral dos estudos feitos a respeito do tema materiais balísticos nos últimos 10 anos. Os dados foram extraídos da base de dados da Scopus.

A figura mostra o número de publicações documentadas ao longo dos anos na área de materiais de blindagem balística. Como pode ser visto, a tendência geral é a de crescimento na produção científica, começando em 2014 e continuando até a atualidade. Esta evolução está associada a um aumento no interesse acadêmico e industrial em relação à área, desencadeado por avanços em materiais compósitos e na ampliação da necessidade de proteção juntamente

com menor peso. Desta maneira, é possível se verificar a importância contínua de estudos e avanços na indústria de materiais de segurança.

Figura 1 - Figura mostrando os estudos feitos com materiais balísticos nos últimos 10 anos.



Fonte: Adaptado de Scopus (2025).

Os compósitos constituídos por fibras naturais e sintéticas estão ganhando espaço atualmente, devido ao aumento incessante do uso de recursos não renováveis (Singh *et al.*, 2023). As fibras vegetais, como juta, sisal, coco e abacaxi têm sido utilizadas como reforço em matrizes poliméricas, por exemplo, pois possuem um valor inferior do que as fibras sintéticas e podem substituí-las em muitas aplicações, no qual o custo é fator mais relevante do que a resistência (Joseph; Medeiros; Carvalho, 1999). Um outro exemplo é a substituição do tecido de Kevlar® convencional por um tecido de rami (Monteiro *et al.*, 2016). Além disso, o uso de compósitos de matriz cerâmica reforçados com fibra de vidro tem aumentado nas indústrias aeronáutica e automotiva (Farias-Aguilar *et al.*, 2021).

É nesse cenário que as fitas de amarração comercialmente utilizados em diversos setores, como esportes, transporte e segurança podem ganhar atenção. As fitas de amarração são componentes têxteis, fabricadas a partir de materiais de alta resistência, como poliéster, *nylon*, aramida (Kevlar®) e polietileno de ultra-alto peso molecular (Dyneema®), ideais para aplicações que exigem segurança e durabilidade.

As fitas de amarração apresentam alta tenacidade à fratura e alta resistência à tração. Cada um destes parâmetros é específico para cada material e pode sofrer alteração dependendo da composição e indicação de uso. Estes produtos apresentam durabilidade, menor desgaste de equipamentos para o processo produtivo, maior flexibilidade e menor custo de produção; desta maneira, têm sua aplicação motivada para serem reaproveitadas em outra função, ou seja, como um reforço polimérico nos sistemas de blindagem balísticas, podendo ser aplicadas em vários setores de engenharia.

Os compósitos utilizando fitas de amarração de poliéster, aramida e Dyneema® apresentam baixo custo de produção, formados a partir de materiais de fácil acesso e amplamente encontrados na indústria nacional. Sendo assim, os materiais em estudo apresentam potencialidades, pois contribuem para o progresso da utilização de novas opções nos SBM. Outra justificativa são as condições de vulnerabilidade das blindagens a base de tecido de aramida, pois se trata de um material importado e com prazo limitado de vida útil. Desta maneira, poderiam ser substituídos por materiais de fácil obtenção e abundantes no território brasileiro.

A área de materiais vem se expandindo no estudo de diversas fibras naturais no SBM. As fibras de rami, juta, sisal e cânhamo, possuem resistência inferior quando comparadas com o tecido de Kevlar®, que possui resistência à tração de 3400 MPa (Dupont, 2024). As fitas de amarração possuem, em média, resistência à tração entre 600 – 850 MPa, o que por sua vez justificaria um estudo que permita sua substituição ao tecido de Kevlar® no compósito a ser utilizado na segunda camada do SBM.

Sendo assim, o estudo dos benefícios e do desenvolvimento balístico destes materiais em estudo, em conjunto, de um SBM, se torna atraente e pode contribuir com os avanços da tecnologia de defesa militar e pessoal.

Neste contexto, o trabalho tem o intuito de substituir o tecido de Kevlar® presente no compósito da camada intermediária por fitas de amarração utilizadas no segmento esportivo. O tecido de Kevlar® é utilizado mundialmente e possui custo elevado, cerca de US\$ 100/m², dependendo da densidade e da aplicação do material. Se referindo a uma aplicação específica, o preço pode sofrer variações, principalmente por conta do quesito produção e disponibilidade do material, uma vez que este produto é fornecido por apenas um fabricante. As fitas de amarração são comercializadas com valores de custo acessível, quando comparadas com o tecido de Kevlar® e são encontradas facilmente no mercado nacional e internacional. A fim de se avaliar a efetividade desta hipótese, o trabalho estudou o desempenho balístico destes

compósitos desenvolvidos a partir destas fitas de amarração, avaliando-se se são adequadas para uso em SBM, quando comparadas com o Kevlar®.

A presente tese realizou a avaliação do desempenho de SBM por meio do ensaio de profundidade de penetração DOP (*Depth of Penetration*), de acordo com a norma NIJ – 0108.01. O SBM avaliado é constituído por camada frontal de cerâmica em alumina (Al_2O_3). A segunda camada é composta por um compósito constituído por resina epóxi e fitas de amarração em três configurações (fitas de amarração de poliéster, fitas de amarração de aramida e fitas de amarração de Dynnema®). Referente à segunda camada, também foi desenvolvido um compósito referência, formado pelo material Kevlar® e resina epóxi. A última camada, a chamada placa de apoio, foi constituída por uma placa de alumínio. O desempenho balístico destes sistemas de blindagem foi comparado com uma referência, que será um sistema de blindagem composto com placa cerâmica e compósito de Kevlar®.

Ao se analisar a literatura, não foram encontradas informações a respeito do uso de fitas de amarração para a fabricação de compósitos no SBM. Este trabalho se difere dos demais pois, além de utilizar um material de custo acessível e encontrado facilmente no mercado, a placa obtida a partir dos materiais estudados possui espessura maior do que aqueles já testados.

Este trabalho está inserido em projeto aprovado no Edital de Chamada Pública CNPq nº 01/2019 – Apoio à Formação de Doutores em Áreas Estratégicas, com o tema “Compósitos alumina/vitrocêramica para uso como material de blindagem balística”.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de um Sistema de Blindagem Multicamada (SBM) composto de alumina (Al_2O_3), na placa frontal e placas de compósitos de matriz polimérica reforçados com fitas de amarração como camada intermediária.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos:

- Desenvolver compósitos para camada intermediária de sistemas balísticos com resistência à tração específica similar ao Kevlar[®];
- Compreender o desempenho balístico dos compósitos desenvolvidos;
- Compreender o desempenho balístico dos sistemas balísticos multicamada estudados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICO

O homem sempre buscou se defender em ambientes adversos, recorrendo a diversos materiais e sistemas de proteção (Abtew *et al.*, 2019). Um dos métodos de defesa utilizados é o sistema de blindagem. Este método é muito antigo, tanto quanto a guerra. Os materiais utilizados para os itens de proteção eram confeccionados em madeira, couro, vime e tecidos (Peleg; Rivkind; Aharonson-Daniel, 2006).

No século XX, as soluções tradicionais para blindagem eram inicialmente a base de cerâmica e placa de aço (Sorrentino *et al.*, 2014). Com isso, eram espessas e pesadas para proteção pessoal e veicular. Os avanços dos materiais nos sistemas de blindagem são normalmente impulsionados pela necessidade de redução de peso e/ou custo (Crouch, 2019).

A introdução de compósitos na blindagem chegou com o intuito de obter um material com maior leveza quando comparados com os tradicionais desenvolvidos até então. Os compósitos poliméricos, quando corretamente projetados, apresentam notáveis propriedades de dissipação de energia, tornando possível absorção da energia cinética de balas e outros projéteis de alta velocidade; desta maneira, protegendo seus usuários (Marsh, 2017).

Durante a Segunda Guerra Mundial, jaquetas de seda e *nylon* foram usadas para dar proteção balística para projeteis de baixa velocidade (Bajya *et al.*, 2021).

Após a Segunda Guerra Mundial, vários estudos têm sido concentrados no desenvolvimento de novos materiais. Surgiu no final da década de 1960, a revolução da geração moderna de coletes balísticos, após o desenvolvimento de novos materiais fibrosos sintéticos com desempenho antibalístico (Abtew *et al.*, 2019). Após a década de 1970, ocorreu o surgimento de fibras de para-aramida com alta tenacidade à fratura (Kevlar®, Twaron® e Technora®) e UHMWPE (Dyneema® e Spectra®), materiais com baixo peso e alta resistência à tração. A descoberta abriu novos horizontes na pesquisa e começaram, então, a ser empregadas em proteções balísticas (Bajya *et al.*, 2021).

A incorporação de diversos tipos de materiais nas proteções balísticas tem por finalidade desempenhar uma função específica dentro do conjunto. Este conjunto de materiais misturados tem como objetivo formar um só produto com novas propriedades, se denominando compósitos. As novas variedades de proteções balísticas são confeccionadas por materiais compósitos que possuem elevada resistência e absorção de energia.

Segundo Abtew *et al.* (2019), a revolução para o desenvolvimento de sistemas avançados de blindagem surgiu no final da década de 1960, após o desenvolvimento de novos materiais sintéticos com atuação antibalística. O desenvolvimento dos sistemas de proteção surge da pesquisa continuada sobre os diferentes tipos de tecidos balísticos e seus compósitos.

O desenvolvimento na ciência dos materiais, nas últimas décadas, possibilitou com que as blindagens fossem utilizadas e empregadas com maior frequência, desde coletes, capacetes, roupas, veículos particulares e militares, também em diversas aplicações não bélicas, como proteção de turbinas contra impacto de elementos estranhos e proteção de satélites contra micrometeoros.

A blindagem balística corresponde à proteção dos impactos de projéteis de armas de fogo e estilhaços. Com a utilização de materiais compósitos, a partir das décadas de 80 e 90, ocorreu a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais e a diminuição da massa específica, tornando os materiais de proteção mais leves (Bajya *et al.*, 2021).

3.2 SISTEMAS DE BLINDAGEM

A pesquisa de materiais que compõem a blindagem balística é importante para o desenvolvimento tecnológico do país. Durante a última década, diversos estudos foram focados no desenvolvimento de sistemas de blindagem leves e seu desempenho balístico para uso individual em veículos e aplicações estruturais. A blindagem balística é definida como “anteparo de proteção projetado para oferecer resistência à penetração de projéteis provenientes de armas de fogo”, de acordo com a norma Brasileira ABNT NBR 15000 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005). Internacionalmente, a norma vigente NIJ 0101.06 (U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice, 2008), descreve blindagem balística como sendo um “item ou equipamento que promove proteção contra ameaças balísticas específicas dentro de sua área de cobertura”.

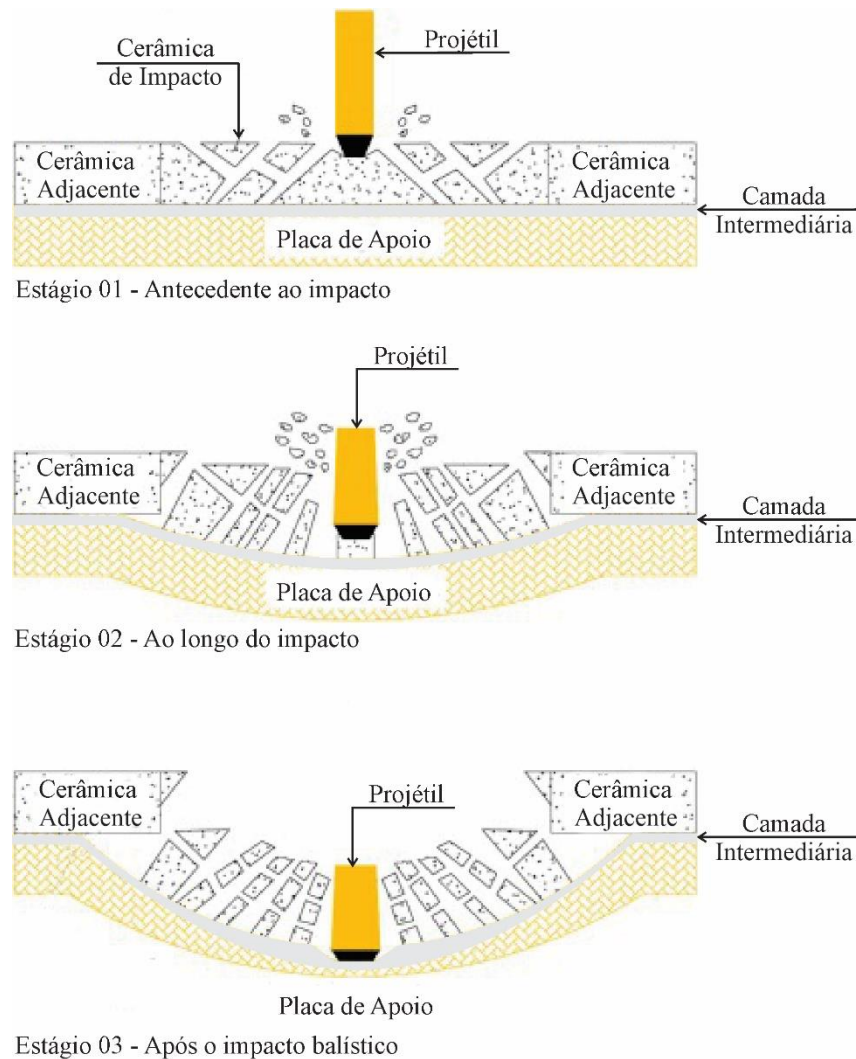
Os sistemas de blindagem são desenvolvidos por camadas de diferentes materiais, em sistemas de proteção contra munições de alto impacto. A camada inicial é normalmente utilizada por uma cerâmica avançada e é um dos componentes principais desses sistemas de blindagem, pois possuem resistência à compressão e dureza elevadas, sendo um dos elementos principais deste sistema. Porém, pode ser um problema em aplicações que bloqueiam a mobilidade, a alumina possui alta densidade com $3,9 \text{ g/cm}^3$ (Yoshimura *et al.*, 2005). Sua função é quebrar a ponta do projétil e absorver grande parte da energia proveniente do impacto,

ou seja, suportam a alta carga gerada pelo impacto do projétil, e causam deformação do material de fundo (Silva *et al.*, 2014).

Na camada intermediária, o material empregado tem como propósito absorver a energia de impacto remanescente da primeira camada, bem como reter os estilhaços, ou seja, durante o impacto, uma grande pressão de acabamento é exercida pelos materiais cerâmicos, o que resulta na erosão da ponta dos projeteis duros ou na deformação da ponta dos projeteis mais maleáveis. Em ambas as situações, isso amplia a área de contato, melhorando a distribuição da pressão sobre a blindagem (Silva *et al.*, 2014). Nesta camada, os materiais comumente utilizados são a base de fibras de elevada resistência à tração, tais como Kevlar®, Twaron®, Spectra® e Dyneema® (Medvedovski, 2010a). Embora as aramidas tenham sido usadas em armaduras leves durante anos, o UHMWPE é, atualmente, considerado um candidato superior devido à sua baixa densidade ($0,97 \text{ g/cm}^3$) e resistência à tração comparáveis ou melhores em relação ao primeiro (Bajya *et al.*, 2021).

A última camada é normalmente construída por materiais de menor rigidez e tem como finalidade absorver a energia residual dos fragmentos do projétil e da própria cerâmica por meio de deformação plástica. Materiais metálicos ou poliméricos, como alumínio aeronáutico, fibras de aramida ou aço dúctil, são os mais indicados para atender à exigência de resistência à flexão e ductilidade, dependendo do fator de peso (Medvedovski, 2010a; Silva *et al.*, 2014). A Figura 2 apresenta uma representação do mecanismo dividido em 3 estágios, antes, ao longo e após o impacto balístico.

Figura 2 - Figura mostrando os três estágios do impacto balístico em um sistema multicamada (SBM): estágio 01, estágio 02 e estágio 03.



Fonte: Adaptado de Dresch *et al.* (2024).

Placas de cerâmica coladas com tecidos de aramida com espessuras de 7 a 9 mm podem parar uma variedade de projéteis. Este número de camadas depende do tipo de tecido e do desempenho da cerâmica e da proteção balística que se deseja chegar. Normalmente, quando se emprega uma placa cerâmica mais fina em blindagens multicamada, o número de camadas de tecido de aramida ou outros materiais de suporte é maior (Medvedovski, 2010a).

Na blindagem, há diferentes níveis de proteção do sistema quanto ao impacto em função do calibre, da massa e da velocidade do projétil; essa classificação tem diferentes níveis de acordo com o tipo de calibre, conforme as normas ABNT NBR 15000 (2005) e NIJ 0101.06 (2008). São mostrados os níveis de proteção em função da massa, velocidade mínima do projétil e calibre, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos níveis de proteção em blindagens balísticas.

Nível	Calibre	Massa (g)	Velocidade mínima do projétil (m/s)
I	.22 LR	2,6	310
	.38 SPL	10,2	239
II - A	9 mm	8	320
	357 Mag	10,2	369
II	9 mm	8	343
	357 Mag	10,2	410
III - A	9 mm	8	411
	.44 Mag	15,6	411
III	7,62 x 51	9,7	823
IV	.30 - 06	10,8	853

Fonte: Adaptado de N.I.J. 0101.06 (2008).

3.3 MATERIAIS CERÂMICOS EM BLINDAGEM BALÍSTICA

A maior parte dos sistemas de proteção individual emprega uma única camada de tecido, proporcionando uma proteção limitada contra projéteis de baixa energia. Com o intuito de alcançar uma proteção superior contra projéteis de alta velocidade e energia, é necessário se incluir uma camada adicional de blindagem, formando-se um sistema de blindagem multicamada (SBM). Esta camada suplementar é normalmente composta de uma cerâmica (Dresch *et al.*, 2021). No início dos anos 1960, ocorreu o início do uso de cerâmica para aplicações em blindagens (Dresch; Venturini; Bergmann, 2021; Silva *et al.*, 2014). Os materiais cerâmicos até a atualidade têm sido considerados para aplicações de blindagem devido a sua eficácia relacionada às propriedades mecânicas (alta resistência à compressão) e elevada dureza (Silva *et al.*, 2014), quando comparados com os materiais metálicos (Polla *et al.*, 2019), permitindo a mobilidade do usuário e absorvendo a maior parte da energia do impacto (Dresch *et al.*, 2021). As cerâmicas avançadas (alumina, carboneto de silício e carboneto de boro) também apresentam excelente resistência química e interessantes propriedades elétricas, térmicas e ópticas (Dresch *et al.*, 2021, 2024). As cerâmicas balísticas, com densidade de cerca de 2,42–3,95 g/cm³, são rígidas e capazes de fragmentar os projéteis e dispersar sua energia (Dresch *et al.*, 2024).

Para o uso em blindagens balísticas, os materiais cerâmicos são interessantes pois apresentam alto valor de tensão de ruptura. Determinadas cerâmicas têm a capacidade de

combinar a elevada dureza com a massa específica baixa, proporcionando um peso reduzido com um dado nível de proteção. Referente às cerâmicas balísticas, os materiais mais utilizados incluem o carbeto de silício (SiC), o carbeto de boro (B_4C) e a alumina (Al_2O_3) e o nitreto de alumínio (AlN), diboreto de titânio (TiB_2), nitreto de silício (Si_3N_4). O material mais empregado na confecção da blindagem é a alumina. A alumina possui excelentes propriedades mecânicas, oferecendo a melhor relação custo-benefício dentre as cerâmicas avançadas (Dresch *et al.*, 2021, 2024; Dresch; Venturini; Bergmann, 2021; Silva *et al.*, 2014). Em contrapartida, um fator limitante é a densidade relativamente alta, resultando em uma blindagem balística mais pesada e diminuindo a mobilidade do usuário (Rashed *et al.*, 2016).

Desta maneira, a blindagem cerâmica demonstra um potencial para sua aplicação como revestimento rígido capaz de reduzir a velocidade do projétil, convertendo-o em fragmentos que são amortecidos pelas camadas flexíveis (Dresch *et al.*, 2021). No caso dos coletes blindados, quando estes possuem uma única camada, demandam de uma espessura relativamente maior, como é o caso dos desenvolvidos apenas em aço ou Kevlar®, interferindo na mobilidade do usuário. O SBM utilizado como proteção frontal possui dureza e fragilidade equivalente a uma cerâmica, se mostrando uma solução eficaz (Pereira *et al.*, 2019a).

Os mosaicos cerâmicos são produzidos em diversos formatos, como hexagonais, quadrados e cilíndricos. Contudo, ainda não há um tamanho ideal estabelecido, pois a eficiência depende do tipo de cerâmica e da espessura dos mosaicos. A dureza, o módulo de elasticidade e a tenacidade à fratura são características essenciais para o *design* dessas armaduras. O sistema de mosaico cerâmico deve ter alta dureza e módulo de elasticidade, e baixa tenacidade à fratura, para maximizar a absorção da energia cinética dos projéteis (Dresch *et al.*, 2021).

3.3.1 Óxido de Alumínio (Al_2O_3 , Alumina)

O óxido de alumínio (Al_2O_3), ou alumina, é um dos materiais cerâmicos mais utilizados em diversos campos de aplicação (Fei *et al.*, 2017), sobretudo no campo da blindagem balística (Liu *et al.*, 2016; Medvedovski, 2010b).

Os materiais que compõem um sistema multicamada pode ser divididos pelo tipo de dispersão de energia e tipo de absorção de energia (Wang *et al.*, 2020). O material de dispersão de energia normalmente possui alta rigidez e resistência; neste caso, os materiais cerâmicos são os comumente indicados, pois a camada de cerâmica tem por função desacelerar e quebrar o projétil (Chi *et al.*, 2013).

Atualmente há uma grande variedade de formatos de placas cerâmicas, bem como diferentes dimensões (Dresch *et al.*, 2024). O material cerâmico mais acessível na indústria de blindagem é a alumina (Çelikbaş; Acar, 2022). O óxido de alumínio (Al_2O_3), ou alumina apresenta as melhores relações custo-benefício, além de possuir um conjunto de propriedades que lhe permite ser dominante em 80% de todas as aplicações do subgrupo das cerâmicas técnicas (Solis *et al.*, 2019).

Os painéis balísticos compostos por múltiplas peças cerâmicas inseridos na camada frontal do sistema multicamada são dispostas em forma de mosaico e são facilmente adaptáveis às superfícies (Jiusti *et al.*, 2017).

A escolha do formato de revestimento cerâmico pode impactar no desempenho balístico e no custo de produção.

De acordo com o estudo de Hu *et al.* (2017), a camada frontal cerâmica composta por mosaicos quadrados apresenta desempenho balístico superior, quando comparados com as armaduras de mosaico em formatos hexagonal e cilíndrico. Porém, este estudo não apresenta dados suficientes para definir que o formato quadrado é superior aos demais formatos, pois incluiu apenas uma configuração específica para cada geometria.

Bless e Jurick (1998) afirmam que as interfaces com geometrias hexagonais têm uma vulnerabilidade de impacto ligeiramente menor do que aquelas com as outras geometrias.

De acordo com Umbharatwala, Vinoth e Goel (2023), a utilização de placas cerâmicas hexagonais aumenta a capacidade da armadura de resistir a múltiplos impactos. A aplicação de mosaicos cerâmicos garante que a propagação de fissuras causadas pelo impacto de um projeto seja restrita a uma pequena área próxima ao ponto atingido. Além disso, o uso de mosaicos cerâmicos confere maior flexibilidade ao colete de armadura, algo que não pode ser obtido com o uso de uma única placa grande de cerâmica.

Tratando-se do estado da arte da cerâmica balística, são vários os estudos feitos utilizando a alumina como fonte de pesquisa. Dresch, Venturini e Bergmann (2021) pesquisaram a melhoria da resistência à flexão de cerâmicas de alumina por meio do uso de adições pequenas de nitreto de silício. Cui *et al.* (2017), por sua vez, realizaram a análise do desempenho balístico de várias cerâmicas balísticas, incluindo alumina, carboneto de silício, carboneto de boro e diboreto de titânio, utilizando dados publicados na literatura. Jiusti *et al.* (2017) avaliaram o desempenho de painéis balísticos de mosaico construídos utilizando placas hexagonais de alumina. Diferentes condições de preenchimento foram analisadas. Na primeira opção sem preenchimento, para a segunda opção, usando resina epóxi como material de enchimento e a terceira opção usando o geopolímero como material de preenchimento. A principal diferença

entre os materiais de preenchimento foi sua impedância mecânica, que alterou a intensidade da onda que foi refletida de volta à placa de alumina.

Em relação às propriedades físicas e mecânicas, a alumina apresenta refratariedade alta, excelentes propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade elevado e dureza alta, e viabilidade comercial (Krell; Strassburger, 2014; Liu *et al.*, 2024; Medvedovski, 2010b). A Tabela 2 apresenta as principais propriedades físicas e mecânicas da alumina.

Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas da alumina.

Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Tenacidade à fratura (MPa.m ^{0,5})	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Resistividade elétrica (Ω.m)
3,98	380	282-551	4,2-5,9	39	775	1013

Fonte: Adaptado de Callister (2011).

3.4 MATERIAIS POLIMÉRICOS

Os materiais poliméricos podem ser encontrados naturalmente ou produzidos sinteticamente. Na natureza, são encontrados nas plantas e animais, gerando produtos como: lã, couro, madeira e látex. Na produção industrial, os materiais sintéticos têm por objetivo a substituição dos metais e cerâmicos para diversas aplicações. Os polímeros sintéticos geralmente possuem propriedades superiores aos seus semelhantes naturais (Mahmoud Zaghoul; Yousry Zaghoul; Yousry Zaghoul, 2021).

Os materiais poliméricos têm sido considerados para aplicações de blindagem devido à sua leveza, flexibilidade e capacidade de dissipar a energia de projéteis balísticos. Os polímeros distinguem-se entre si pelo grau da diferenciação, escala de produção, nível de consumo e valor agregado. Podem ser classificados em três grandes grupos: para uso geral (*commodities*), produzidos em alta escala, tem baixo valor agregado, não apresentam diferenciação, são utilizados para finalidades gerais e são consumidos em grandes quantidades; para uso específico (*quase-commodities*), como por exemplo as poliamidas, ABS, SAN, poliuretano, policarbonato e PET, que possuem características específicas de plástico de engenharia e mercado bem direcionado, porém produzido em maior escala; e os de alto desempenho (especialidades), que são produtos específicos, com propriedades bem definidas e incomuns, têm alto valor agregado e são produzidos em escala menor (Silva *et al.*, 2019). Em algumas blindagens balísticas utiliza-se um tecido de alto desempenho feito de fibra sintética para garantir leveza e nível de proteção

adequado. De acordo com Nascimento *et al.* (2020), as fibras mais utilizadas em tecidos flexíveis são a aramida e as fibras de polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE). Os tecidos balísticos comerciais típicos são: Kevlar® - com fibras de aramida, e o Dyneema® - com fibras de UHMWPE.

Os polímeros podem ser classificados quanto ao seu comportamento mecânico e isto varia de acordo com a variação de temperatura. Os polímeros são classificados como termoplásticos, termofixos e elastômeros (Luo *et al.*, 2022).

Os polímeros termoplásticos apresentam reações completamente reversíveis, quando aquecido amolecem e quando são resfriados endurecem. Eles podem ser remodelados várias vezes após a aplicação do calor sem causar qualquer efeito para suas propriedades. Os polímeros termoplásticos em suas cadeias interagem por meio de forças intermoleculares não covalentes. Estas cadeias podem se organizar em estado aleatório (amorfo) e estado ordenado (cristalino). Os termoplásticos podem apresentar alta resistência ao impacto, resistência química, alta capacidade de reforma e facilidade de reciclagem (Parit; Jiang, 2020).

Os polímeros termofixos se tornam permanentemente rígidos em sua constituição e não amolecem sob aquecimento. São configurados em rede e apresentam ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. No tratamento térmico, as ligações prendem as cadeias umas nas outras para resistirem as altas temperaturas. São polímeros mais duros e resistentes, quando comparados aos termoplásticos, e apresentam melhor estabilidade dimensional. Tem-se como exemplo as borrachas vulcanizadas, epóxis, resinas fenólicas, algumas resinas poliéster (Luo *et al.*, 2022).

Os materiais poliméricos têm sido estudados ao longo dos anos para diversos fins. A partir da Segunda Guerra Mundial, os tecidos poliméricos vêm sendo utilizados como blindagem balística. Estes materiais, tais como poliéster, poliaramida, polietileno e polipropileno, vem sendo explorados cientificamente e utilizados na indústria de material bélico (Bajya *et al.*, 2021). Conforme Pereira *et al.* (2019a), os laminados de tecidos de aramida, como Kevlar® e polietileno de ultra alto peso molecular como Dyneema®, têm sido utilizados como materiais da camada intermediária em um SBM, por serem materiais com resistência elevada e baixo peso, porém com custo elevado.

3.4.1 Fibras sintéticas

As fibras sintéticas foram desenvolvidas inicialmente com o objetivo de reproduzir e melhorar as características e propriedades das fibras naturais. Estas fibras são produzidas em

laboratório. A maioria delas apresenta produtos derivados de petróleo. As fibras sintéticas mais conhecidas são as de acrílico, poliamida, poliéster, polipropileno, aramida e elastano.

A utilização de fibras sintéticas nos setores aeronáutico, automotivo, petrolífero, marítimo, de defesa e esportivo, entre outros, se deve à demanda da indústria em se obter componentes e estruturas com os maiores valores de resistência mecânica específica e rigidez, além do intuito de obter um produto com um custo competitivo comparado com outros materiais (Valença *et al.*, 2015).

Atualmente, um sistema de armadura balística utiliza materiais compósitos com fibras sintéticas. As capacidades de carga de um material compósito dependem do tipo de fibra. Estas fibras melhoram as características de absorção de energia e, simultaneamente, reduzem seu peso, acarretando em um grande benefício para a redução do trauma causado pelo impacto do projétil (Bhat *et al.*, 2021).

Com o intuito de garantir leveza e um nível adequado de proteção, algumas blindagens balísticas empregam um tecido de alto desempenho fabricado com fibras sintéticas. As fibras mais comuns em tecidos flexíveis incluem aramida (Kevlar®) e polietileno de ultra-alto peso molecular -UHMWPE (Dyneema®) (Nascimento *et al.*, 2020).

3.4.1.1 Aramida

As aramidas, abreviação de “poliamida aromática” (Teijin Aramid, 2025) são polímeros em que cada parte se caracteriza como uma unidade química que contém 14 átomos de carbono, 2 átomos de nitrogênio, 2 átomos de oxigênio e 10 átomos de hidrogênio. As fibras são classificadas como fibras orgânicas da família das poliaramidas.

As poliaramidas, especialmente o Kevlar®, são conhecidas por sua alta resistência à tração (cerca de 3600 MPa), módulo de elasticidade elevado (cerca de 112.400 MPa) e boa tenacidade à fratura. Desenvolvido em 1965 por Stephanie Kwolek e Herbert Blades, o Kevlar® possui uma estrutura molecular compacta e uma forma cristalina que proporciona excelente absorção de choque contra projéteis de diferentes velocidades. No entanto, o Kevlar® é caro e exige tecnologia avançada. Recentemente, os nanocompósitos de Kevlar® surgiram como uma solução para melhorar a proteção balística (Selim *et al.*, 2024).

A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas das fibras de Kevlar®.

A poliaramida não é fabricada no Brasil e não são previstas normas técnicas específicas para a determinação da qualidade do material. Desta maneira, o principal método de avaliação do material é mediante o gráfico tensão x deformação (Boukouvalas; Wiebeck, 2007).

Segundo Li *et al.* (2022), os tecidos de alto desempenho, como Kevlar® e Spectra®, são amplamente utilizados no campo de materiais resistentes a golpes, devido à alta resistência, leveza e excelente flexibilidade.

Tabela 3 - Propriedades das Fibras de Kevlar® - DuPont.

Nome Comercial	Fabricante	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Nomex	Du Pont	1,38	8139,5	110	-
Kevlar® 29	Du Pont	1,44	3600	83	3,4
Kevlar® 49	Du Pont	1,44	3600-4100	131	2,8
Kevlar® 149	Du Pont	1,49	3400	186	2
Tawon HM	Teijin Aramid	1,45	3150	121	-

Fonte: Dupont (2024); Teijin Aramid (2024).

No mercado, é possível encontrar a poliaramida e algumas de suas aplicações, por meio das fibras cortadas, com aplicações de matrizes poliméricas, fabricação de fios têxteis e isolamento térmico, em fios fiados, no qual o processo é entrelaçar fibras de comprimentos definidos, formando fios com comprimento definido, como exemplo, fios de costura para materiais técnicos. Os fios multifilamentos contínuos têm sua principal aplicação em fios de costura, tecidos e fios de costura para materiais elétricos e técnicos (Boukouvalas; Wiebeck, 2007).

A partir dos fios multifilamentos, é possível se obter os dispositivos para transportes a partir de correia contínua, na qual sua aplicação ocorre em proteção balística, isolamento térmico, fitas de transportes, roupa e luvas para proteção térmica. Também se tem os feltros e falsos tecidos, que são aplicados em isolamento térmico (no local que se requer resistência à abrasão, química e altas temperaturas), proteção balística (quando é agregada a um substrato), luvas, roupas de proteção térmica e esteiras de transporte (Boukouvalas; Wiebeck, 2007).

As fibras de Kevlar® são amplamente utilizadas no SBM. Estes SBM são comumente compostos por uma camada frontal de cerâmica, seguida por uma segunda camada com alta resistência ao impacto e baixo peso, como Kevlar®. O uso de uma segunda camada composta por Kevlar® apresenta excelentes propriedades, o que também é fácil de se alcançar em grandes volumes. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de aramida Kevlar® são propostos como uma boa alternativa para aplicações de compósitos de armadura pessoal (Farias-Aguilar *et al.*, 2021).

Os tecidos de aramida são utilizados nesta aplicação, pois são muito mais leves, macios e confortáveis do que os materiais à prova de balas rígidos anteriores. Para melhorar ainda mais o desempenho anti-impacto, vários métodos foram desenvolvidos para modificar os tecidos de aramida (Zhao *et al.*, 2019).

3.4.1.2 Poliéster

O poliéster é uma fibra de alto desempenho, podendo ser termoplástico ou termofixo, dependendo de sua estrutura química e método de processamento.

O poliéster termoplástico pode ser obtido a partir de polibutadieno de tereftalato (PBT), produto de uma reação de duas fases e polietileno tereftalato (PET). Os poliésteres são sensíveis ao ataque hidrolítico em temperaturas elevadas, ou seja, baixos níveis de umidade devem ser mantidos durante a injeção, moldagem e extrusão. Os termoplásticos possuem baixa absorção de umidade durante imersão em água e um encolhimento mínimo comparado com outras fibras (Marcos, 2012).

Os termofixos são submetidos a uma alteração na forma com a inserção do calor, proporcionando alta tenacidade à fratura e maior módulo de Young.

A fibra de poliéster possui elevada resistência mecânica e tenacidade à fratura e não é uma fibra biodegradável. Quando comparado com outras fibras, ela demonstra ter um encolhimento mínimo. Possui uma taxa de absorção de umidade muito baixa, pois não possui atração para moléculas de água e apresenta o seu comportamento em meio úmido de alta resistência à abrasão (Mckenna; Hearle; O'Hear, 2004).

Nas blindagens balísticas, o poliéster tem sido utilizado para a fabricação de compósito reforçado com outros materiais. As suas propriedades mais importantes incluem a facilidade de manipulação, cura rápida, estabilidade dimensional e boas propriedades mecânicas. A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas do poliéster termoplástico, material utilizado no desenvolvimento de fitas de amarração de cargas e esportivas.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do poliéster termoplástico.

Massa específica (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
1,35	2,76 - 4,14	48,3 - 72,4	59,3	30 - 300

Fonte: Adaptado de Callister (2011).

3.4.1.3 Poliamida

A poliamida, conhecida popularmente como *nylon*, é um dos compostos mais utilizados na indústria, em todo o mundo. O *Nylon* surgiu nos laboratórios em meados da década de 1930 e sofreu diversas transformações desde então. Existem diversas especificações baseadas na composição polimérica do material, sendo os mais comuns o *nylon 6*, o 6/6 e o 6/12 (Silva *et al.*, 2019). Existem vários tipos de poliamida. Cada tipo é definido pela sua estrutura química e método de processamento. As principais categorias são fibras, injetadas, extrudadas e sinterizadas.

De acordo com Silva *et al.* (2019), o *nylon 6* tem aplicações variadas e abrange desde filmes para embalagens até carcaças de motor que necessitam de alta resistência ao calor. É produzido por meio da policondensação de caprolactama. O *nylon 6/6* é uma resina utilizada há mais de 50 anos, estabelecida na indústria de automóveis e de eletroeletrônicos. É produzido pela policondensação do ácido adípico e da hexametilenodiamina. Apresentam propriedades térmicas e mecânicas satisfatórias, aliadas à durabilidade e à facilidade de processamento. Em comparação ao *nylon 6*, apresenta propriedades elétricas aperfeiçoadas, bem como as mecânicas; porém, não tem a mesma resistência ao impacto nem a mesma aparência exterior da poliamida e é mais resistente à temperatura de longo e curto prazo. O *nylon 6/12* é conhecido por reter propriedades físicas, térmicas e elétricas em vários níveis de umidade. É derivado da hexametilenodiamina e do ácido diabásico carbono-12 e tem estabilidade dimensional satisfatória, resistência química e baixa absorção de umidade.

A Poliamida 46 é um dos materiais mais modernos presentes na indústria, produzida exclusivamente pela DSM. Este material possui resistência ao calor, possui temperatura de deflexão de calor de 285 °C e temperatura de uso contínuo de 166 °C (Silva *et al.*, 2019). É conhecido por sua alta tenacidade à fratura e baixo custo, tornando-o um material eficaz para proteção balística. Recentemente, avanços na ciência dos materiais e têxteis sintéticos possibilitaram o desenvolvimento de novos materiais à prova de balas que distribuem a carga sobre uma área maior e dissipam a energia do impacto. Fibras poliméricas de alto desempenho, com alta resistência e rigidez, têm sido utilizadas nas aplicações balísticas (Selim *et al.*, 2024).

A Tabela 5 apresenta as propriedades mecânicas do *nylon 6/6*, poliamida presente no desenvolvimento de fitas de amarração de cargas e produtos esportivos.

Tabela 5 - Propriedades mecânica do *nylon 6/6*.

Densidade relativa (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Resistência à Tração (MPa)	Coefficiente de Poisson
1,14	1,59 – 3,79	75,9 – 94,5	0,39

Fonte: Adaptado de Callister (2011).

3.4.1.4 UHMWPE

O Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) no estado estirado é um polímero cristalino com uma variedade crescente de aplicações estruturais. O uso inicial se deu na década de 1950 na forma a granel e incluía próteses para procedimentos artroplásticos biomédicos (Russell *et al.*, 2013). Passou-se quase 50 anos para que estas fibras de alto peso molecular fossem produzidas. Após a década de 1970, ocorreu o surgimento do UHMWPE (Dyneema® e Spectra®) (Bajya *et al.*, 2021).

As fibras de polietileno de ultra alto peso molecular se destacam pela forte ligação entre suas moléculas de carbono, tal qual a estrutura de um diamante, diferenciando-se do PE convencional em função do peso molecular. A diferença dos arranjos moleculares entre o polietileno convencional e o de alta densidade é que o primeiro contém um número de hastes curtas com muitas dobras com baixa resistência da fibra, enquanto o polietileno ultra resistente é uma versão mais longa da mesma molécula, cujo arranjo confere alta resistência a impactos e grande estabilidade química.

As fibras apresentam propriedades elevadas de resistência em combinação com a baixa densidade, conforme apresentado na Tabela 6. A combinação da baixa densidade com a tenacidade à fratura específica e o módulo de elasticidade específico muito elevados são propriedades singulares, sendo a tenacidade à fratura superior ao aço de boa qualidade (Bajya *et al.*, 2021).

Tabela 6 - Propriedades físicas e mecânicas do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE).

Nome Comercial	Massa Específica (g/cm ³)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento Percentual (%)
UHMWPE	0,93 a 0,97	90 a 150	2,4 a 3,6	3,5 a 4,0

Fonte: Joshi; Mishra; Saxena (2024).

O polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) é robusto, de baixo custo e possui fibras com longa cadeia de polímeros, oferecendo excelente resistência e baixa absorção de umidade, sendo uma opção eficiente para armaduras corporais (Selim *et al.*, 2024).

Conhecido comercialmente pelo nome de Dyneema®, da empresa holandesa DMS, o material é constituído por camadas de fibras de UHMPWE de alta tenacidade à fratura e elevada cristalinidade. É um polímero com excelentes propriedades físicas e mecânicas e oferece o máximo de resistência combinado com o peso mínimo, além de também ser resistente à umidade. O comportamento mecânico do polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) sob impacto de alta velocidade é fundamental para o projeto de coletes blindados macios. O UHMWPE possui excelentes propriedades para armaduras balísticas. Vários tipos de UHMWPE estão disponíveis com diferentes propriedades mecânicas (Peinado *et al.*, 2022).

O Dyneema® vem sendo aplicado em vários setores, desde correias transportadoras, fitas de suporte de cargas e forros de paraquedas. As fibras de UHMPWE são aplicadas e utilizadas em blindagens de veículos civis e militares, barcos e também para camadas de contenção, usado para reter estilhaços no interior de veículos bélicos. Porém, a sua principal utilização em alta escala está associada à indústria de blindagem balística. Este material, inserido na camada intermediária nas blindagens multicamadas, possui a função de reduzir danos colaterais de deformações excessivas (Dos Santos Alves; Cassiano Nascimento; Suarez, 2005)

A utilização das fibras de UHMWPE vem se destacando como um dos mais modernos e eficientes materiais para aplicação em blindagem balística, devido às suas excelentes propriedades, superiores às de qualquer outro termoplástico. Esses materiais são utilizados na produção de painéis de proteção balística (Dos Santos Alves; Cassiano Nascimento; SUAREZ, 2005). Desde os estudos iniciais, a aceitação de materiais laminados à base de Dyneema® por organizações militares em todo o mundo é uma prova de sua capacidade no campo; no entanto, o mecanismo pelo qual esses materiais resistem a ameaças balísticas permanece pouco compreendido (Russell *et al.*, 2013).

Um grande número de compósitos reforçados com fibra avançada tem sido desenvolvido para resistência balística superior, incluindo os compósitos de fibra de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), como por exemplo Dyneema® e Spectra®. Os laminados de UHMWPE devem ser combinados com materiais à prova de bala de alta dureza, devido à capacidade de proteção limitada de uma única placa de UHMWPE. Desta maneira, a resistência balística de uma armadura tradicional de duas camadas de cerâmica/metal poderia ser bastante elevada ao combiná-la com laminado UHMWPE para construir um novo sistema de blindagem, sem adicionar peso significativo (Zhao *et al.*, 2021b), pois estes sistemas de proteção ou blindagem macia possuem a vantagem de serem muito leves (Greenhalgh *et al.*, 2013).

O projeto de novos sistemas de proteção compostos de alto desempenho, usando essas novas fibras, ainda é conceitualmente uma tarefa difícil para o projetista que usa as tecnologias atuais. Obter uma compreensão fundamental dessas fibras e configurações de blindagem pode levar a um potencial economia de peso e melhor desempenho contra os efeitos das armas (Greenhalgh *et al.*, 2013).

3.4.2 Resina Epóxi e sua aplicação em compósito

As resinas epóxi são polímeros termofixos importantes e têm como aplicações a utilização como adesivos. Estes polímeros são usados para unir outros polímeros, metais, cerâmicos ou compósitos. Neste contexto, compõem um sistema de dois componentes; quando misturados às resinas passam pelo processo de cura (Qi *et al.*, 2021).

Estas resinas epóxi (EPs) têm sido reconhecidas como materiais termofixos (Mi *et al.*, 2022) e suportam diversos tipos de solicitação, dentre elas, como matriz composta, encapsulantes eletrônicos, resistência química, baixa retração, satisfatória propriedade elétrica (substâncias de isolamento elétrico) e excelente resistência mecânica (Zhao *et al.*, 2021a).

Pode ser aplicada em diversos segmentos, como: adesivos, componentes para o setor automotivo, moldes elétricos, revestimentos de proteção de matrizes para compósitos (Zhao *et al.*, 2021a), revestimentos anticorrosivos, materiais de embalagem de semicondutores e compósitos de alto desempenho, devido às suas características mecânicas intrínsecas, estabilidade química, resistência ao calor e à corrosão e fortes propriedades de ligação, devido à sua estrutura química única (Mi *et al.*, 2022).

Os EPs desempenham um papel fundamental no transporte, construção, eletrônica, isolamento, aeroespacial e outras indústrias. As resinas epóxi (EPs) têm sido amplamente empregadas como matrizes de resinas de compósitos e aplicadas na indústria aeroespacial,

aeronáutica, eólica, nuclear, ferroviária de alta velocidade, bem como em muitas outras indústrias manufatureiras (Mi *et al.*, 2022).

Os agentes de cura possuem um papel importante nas propriedades finais da resina, pois dependendo do teor utilizado do agente de cura, pode-se ter diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas. Na Tabela 7 estão elencadas algumas propriedades das resinas epóxi.

Tabela 7 - Propriedades físicas e mecânicas da resina epóxi.

Massa específica (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento percentual (%)	Tenacidade à fratura (MPa.m ^{0,5})
1,10 a 1,40	2,41	27,6 a 90,0	3 a 6	0,6

Fonte: Adaptado de Callister (2011).

No entanto, certas limitações impedem severamente outras aplicações desses materiais avançados, como baixa resistência à fadiga, baixa resistência ao impacto, dificuldade de reciclar e um equilíbrio entre tenacidade à fratura e resistência (Mi *et al.*, 2022).

Na proteção balística, as resinas epóxi têm uma grande importância na produção dos compósitos usados. Monteiro *et al.* (2016) estudaram um sistema de blindagem multicamada, com camada intermediária composta de compósito epóxi reforçado com tecido de rami, em comparação a um laminado de tecido de aramida (Kevlar®) com camadas unidas por um elastômero (Neoprene®). Eles descobriram que utilizando a mesma quantidade de epóxi, tanto o compósito de tecido de rami quanto o Kevlar®, como camada intermediária do sistema de blindagem multicamada, com os mesmos 10 mm de espessura, ambos ficaram em conformidade com os requisitos da norma NIJ 0101.06.

As principais atribuições das resinas epóxi são: a união e revestimento das fibras de reforço, transmissão das cargas e entre as fibras, impedir a propagação de trincas, proteção contra danos superficiais e a interação da matriz com as fibras, obtendo a responsabilidade por absorver a energia quando solicitados mecanicamente (Callister, 2011).

3.5 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são aqueles formados por dois ou mais materiais que, combinados, têm um desempenho mecânico elevado e apresentam propriedades superiores aos componentes isolados e desejáveis para uma aplicação específica. Esses materiais são versáteis, podendo ser combinados, de maneira a alcançar um produto que apresente propriedades

combinadas, funcionando como um conjunto. Também podem ser adaptados para várias propriedades por intermédio da escolha de seus componentes, por meio das proporções e de suas distribuições morfológicas, seu grau de cristalinidade, sua rugosidade, sua estrutura e a composição da interface entre os componentes (U.S. Department of Defense, 2004). As propriedades de um compósito dependem principalmente da interação entre a matriz e o reforço (Callister, 2011).

Compósitos com alto grau de desempenho e leves têm sido uma tendência para o campo de proteção de materiais balísticos. Os compósitos cerâmicos apresentam excelente desempenho de proteção balística (Tian; Li; Dong, 2022).

Os compósitos de matriz polimérica estão sendo utilizados em aplicações de alto desempenho e em elevada ascensão. Uma aplicabilidade relevante é que estes materiais podem ser utilizados para o impacto balístico, fornecendo uma proteção eficaz. Estes materiais contemplados neste seguimento são capazes de absorver energia cinética significativa do projétil e possuem alta resistência e rigidez específicas (López-Puente *et al.*, 2005). Os compósitos com matriz de polímero consistem em uma resina polimérica como fase matriz e fibras como meio de reforço (Callister, 2011).

Com a grande seleção de materiais para o sistema de blindagem, as características de absorção de energia tiveram um aperfeiçoamento juntamente com o seu peso; com isso, as matrizes poliméricas com reforço com fibras têm se tornado um sistema rico em alta absorção de energia e com alta resistência a rigidez (Bhat *et al.*, 2021).

As resinas termoplásticas e termofixas têm sido empregadas em compósitos, pelo fato de terem excelentes propriedades mecânicas, com uma resistência à solventes adequadas para o uso, e suportarem temperaturas relativamente altas. Percebe-se que mais da metade de todas as matrizes de compósitos poliméricos sejam constituídas por termofixos (Nash *et al.*, 2019).

A capacidade de um compósito absorver energia durante o impacto é semelhante aos materiais utilizados comercialmente em desempenho balístico. É possível se encontrar outros fatores, como o empilhamento de camadas, o número de camadas de reforço, a geometria de reforço, as características da fibra de reforço, os parâmetros de teste e as propriedades da matriz, estes são os principais parâmetros que afetam o comportamento de impacto. Outro fator importante é a espessura do compósito, quanto mais espesso for, menor será a área danificada, levando em consideração a velocidade de impacto estabelecida (Jabbar *et al.*, 2014).

A pesquisa e o desenvolvimento recentes realizados para os sistemas de blindagem na seleção e análise de materiais ajudaram a descobrir novas e significativas propriedades de materiais adequadas para aplicações balísticas, conforme (Bhat *et al.*, 2021).

No trabalho de Nascimento *et al.* (2017), foi utilizado um sistema de blindagem multicamada (SBM), no qual na segunda camada foi testada um compósito polimérico reforçado com fibras naturais de 10 mm de espessura. O objetivo foi comparar a performance balística do tecido de Kevlar® com o compósito, por meio de munições 7,62 mm x 51 mm. Os resultados de indentação obtidos como segunda camada foram semelhantes tanto para o SBM dos compósitos poliméricos com fibras naturais quanto para o SBM com Kevlar® para fins balísticos (material tradicionalmente usado). O SBM com segunda camada reforçada com fibras naturais atende aos requisitos da norma NIJ 0101.06, uma vez que a indentação média obtida na testemunha de argila, após o impacto da munição de 7,62 mm, foi menor que 44 mm. No entanto, vantagens econômicas significativas favorecem os compostos, uma vez que o compósito polimérico com fibras naturais é muito mais barato que o tecido de aramida, representando uma redução de cerca de 30% no custo total do SBM e uma diminuição de peso de cerca de 4%.

Assis *et al.* (2018) analisaram o desempenho balístico de um SBM, utilizando como segunda camada, compósito de poliéster reforçado com manta não tecido de juta e comparar seus desempenhos com um SBM, usando como segunda camada um laminado de tecido de Kevlar®. Os testes foram realizados com munição 7,62 mm x 51 mm e com velocidade acima de 800 m/s. A camada frontal do SBM foi composta com cerâmica hexagonal (alumina dopada com 4% em peso de nióbia) e a terceira camada uma placa de liga de alumínio. O intuito de substituir tecido de aramida (Kevlar®) por compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais se fez interessante, pois seus desempenhos são semelhantes no sistema de armadura, porém o compósito apresentou menor custo. Os resultados demonstraram que o compósito de manta de juta capturou fragmentos cerâmicos por incrustação mecânica. Os resultados da profundidade média de indentação foram praticamente iguais, 24 ± 7 mm para o compósito desenvolvido e 21 ± 3 mm para o Kevlar®. Verificou-se também que a substituição do tecido de aramida por compósitos de matriz de poliéster reforçados com manta de juta proporciona redução de peso do SBM em 5,4% e uma redução de custo de 474%.

O estudo de Farias-Aguilar *et al.* (2021) teve por objetivo produzir um sistema de blindagem multicamada, baseado em placas de poliamida-6 reforçadas com fibra de vidro produzidas por moldagem por injeção contínua, combinadas com tecido Kevlar®. Os resultados mostraram que a blindagem corporal produzida impede a penetração de uma bala de 9 mm. De acordo com NIJ-Standard-0101.04, este resultado permite um uso potencial como uma blindagem urbana nível III-A. Entretanto, não é recomendado um uso potencial como

blindagem nível IV, pois após testes com armas superiores que 9 mm de calibre (armas de 5,56 mm e 7,62 mm), ele foi deformado permanentemente.

3.6 FITAS DE AMARRAÇÃO

As fitas têxteis são componentes essenciais em diversos setores, incluindo escalada, montanhismo, resgate e salvamento, trabalho em altura, amarração de cargas, sendo utilizados para a segurança no transporte de cargas e movimentação de cargas, além de serem amplamente utilizados em atividades de esportes radicais, a fim de propiciar a autossegurança do usuário em atividades esportivas.

Os materiais utilizados em sua fabricação são geralmente o *nylon*, poliéster, polietileno de ultra alto peso molecular (Dyneema® ou Spectra®) e aramida (Kevlar®). Estes produtos devem ser extremamente resistentes e leves e apresentarem baixa elasticidade.

O *nylon* é conhecido por sua resistência à abrasão e sua capacidade de absorver choques (Baniyadi *et al.*, 2024), enquanto o poliéster oferece alta resistência à proteção causada por raios UV e umidade (SUN *et al.*, 2024). O Dyneema® se destaca por sua alta resistência à tração, sendo ao mesmo tempo leve e com baixo alongamento (Zhou *et al.*, 2021) e a aramida se sobressai por sua resistência ao calor e à abrasão (Zhou *et al.*, 2021).

As fitas usadas em escalada, por exemplo, são capazes de suportar cargas de aproximadamente 22 kN, ou cerca de 2.200 kgf (Conquista Montanhismo, 2024), proporcionando um desempenho seguro em condições extremas. Uma característica essencial das fitas é sua resistência à abrasão, um fator importante quando se trata da durabilidade ao serem usados em contato com superfícies ásperas como rochas. Além disso, materiais como Dyneema® não apresentam praticamente nenhum alongamento, uma condicionante importante em situações que excluem deformação mínima da fita. A leveza das fitas é outra vantagem significativa, especialmente em atividades que exigem portabilidade, como escalada e resgate.

Estes equipamentos também devem oferecer resistência à temperatura alta, sendo capazes de suportar a exposição aos raios UV, umidade e temperaturas extremas, garantindo a integridade em diversos ambientes de uso. A flexibilidade é outro fator fundamental, tornando as fitas práticas e eficientes em operação, podendo ser instaladas e removidas com facilidade.

Devido à sua alta resistência, durabilidade e facilidade de uso, além do custo acessível e ampla disponibilidade, as fitas se destacam como componentes versáteis e indispensáveis em uma ampla gama de aplicações. O *design* e uso adequados desse material garantem uma solução robusta e confiável para todas as necessidades que exigem força e resistência garantida.

A Figura 3 apresenta tipos fitas de amarração utilizadas no setor esportivo.

Figura 3 - Tipologia de fitas de amarração utilizadas no setor esportivo em escalada e montanhismo.



Fonte: Adaptado de Alpen Pass (2024); Conquista Montanhismo(2024).

3.7 PLACA DE APOIO

O alumínio, extraído da bauxita, é o metal não ferroso mais abundante da crosta terrestre. Alguns metais macios, como chapas finas de alumínio, podem ser usados como material de suporte em sistemas balísticos. O alumínio, por ter menor densidade em relação ao aço e ter em abundância, é largamente empregado na balística (Medvedovski, 2010b; Siddesh Kumar *et al.*, 2022). Estas placas metálicas, além da blindagem, apresentam um papel estrutural, com uma vantagem de terem um custo menor (López-Puente *et al.*, 2005).

As placas de apoio devem suportar a fratura pós-impacto do corpo cerâmico e da bala. Após o impacto do projétil (velocidade superior a 700-1000 m/s), o corpo cerâmico duro usado é rompido e a energia residual é absorvida pelo material de suporte reforçado macio. A cobertura macia da blindagem também protege o sistema contra possíveis danos associados a vibrações (Medvedovski, 2010b).

A natureza e a espessura dos materiais de suporte podem ter uma influência significativa na propagação de trincas, devido às suas próprias habilidades de reduzir a tensão (Medvedovski, 2010a).

As ligas de alumínio tratáveis a calor são 2XXX, 6XXX e 7XXX. As séries Alumínio 6XXX, Mg e Si contribuem como o principal elemento de liga na formação de precipitados

metastáveis (Mg_5Si_6) e precipitados estáveis (Mg_2Si) juntamente com outros componentes que agem (Siddesh Kumar *et al.*, 2022).

De acordo com Siddesh Kumar *et al.* (2022), as ligas de alumínio da série 6XXX podem ser reforçadas, ganhando reforço de limite, endurecimento por trabalho e endurecimento por envelhecimento ou mecanismos de precipitação por meio do reforço de solução sólida. Com o aumento da dureza do alumínio, ocorre uma contribuição significativa para melhorar a capacidade de desempenho balístico.

3.8 MECANISMO DE IMPACTO

A resistência ao impacto no design de materiais únicos é melhorada com o aumento da espessura. Porém, o aumento do tamanho do material, gera complicações para a concepção da leveza do material (Zhao *et al.*, 2023). O SBM utiliza diferentes materiais que propiciam desempenho e leveza (Assis *et al.*, 2017). Desta maneira, estes materiais são desenvolvidos com camadas quebradiças e camada dúcteis. A combinação e o arranjo de diferentes materiais apresentam impactos importantes na resistência ao impacto dos compósitos. A fim de obter o melhor efeito de atenuação de ondas de choque de diferentes combinações de materiais é utilizado a técnica de impedância (Zhao *et al.*, 2023). A impedância de choque é um parâmetro utilizado na análise de materiais submetidos a impactos de alta velocidade, como no caso de aplicações de blindagem balística. A impedância da onda é igual ao produto da densidade média e da velocidade da onda (Assis *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2023). A impedância de choque determina como a energia de impacto é transmitida ou refletida nas interfaces dos materiais. Quando um projétil atinge uma blindagem, a correspondência ou a discrepância entre as impedâncias de choque dos materiais envolvidos influencia a eficiência na dissipação da energia de impacto. De acordo com a relação entre a correspondência de impedância de onda e o desempenho de atenuação do compósito, é adotado um esquema de correspondência de impedância de onda alta e baixa (Zhao *et al.*, 2023).

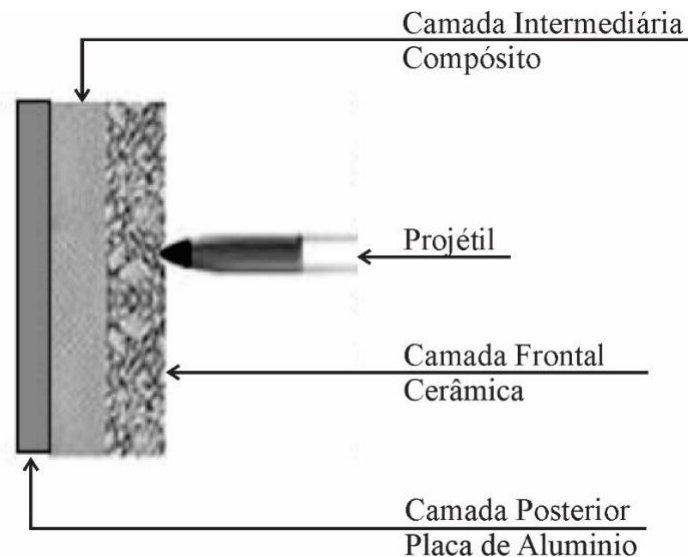
O sistema de blindagem multicamada consiste basicamente em três camadas: cerâmica, compósito e placa de apoio. A função da cerâmica na blindagem multicamada é reduzir a massa e a velocidade de impacto do projétil. Por ser um material mais duro que o projétil, a cerâmica causa a fratura desse projétil em pequenos fragmentos, que pode ser facilmente absorvido pela camada subsequente à cerâmica. A força exercida pelo projétil ao atingir a placa cerâmica cria diferentes ondas de tensão, que se propaga no material (Kaufmann *et al.*, 2003).

No mecanismo de impacto de uma blindagem, de modo geral, este fenômeno ocorre pela placa cerâmica recebendo o impacto do projétil e formando o cone de fratura. Na sequência, ocorre a deformação da placa metálica, que absorve a energia de impacto por meio de deformação plástica (Medvedovski, 2010b).

No estágio 1, ao se acertar o projétil na placa cerâmica, a força realizada cria diferentes ondas de tensão que se difundem no material. Estas ondas geradas pelo impacto se propagam ao longo da espessura do material em forma de ondas de cisalhamento e ondas longitudinais de compressão e na direção do plano ondas de cisalhamento e tração (Goel *et al.*, 2014; Sherman; Ben-Shushan, 1998).

A Figura 4 representa o estágio 1 do mecanismo de impacto.

Figura 4 - Estágio 1 do mecanismo de impacto.

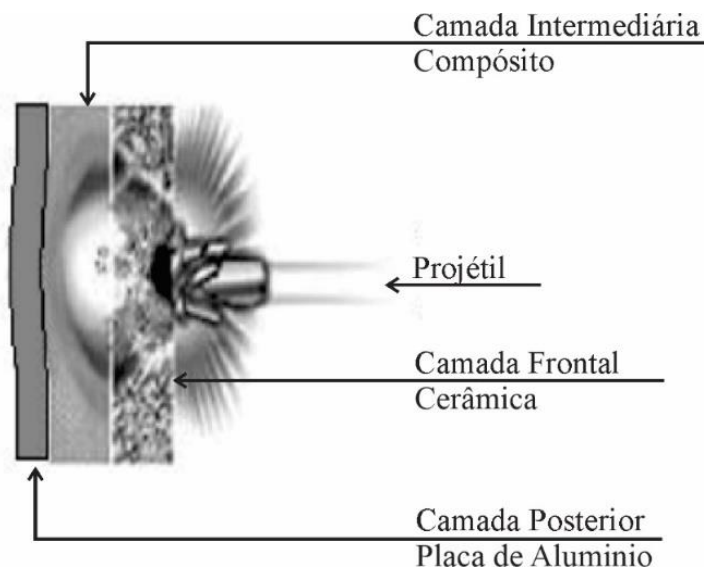


Fonte: Adaptado de Silva *et al.*, (2014).

Conforme Zaera *et al.* (2000), a fragmentação da cerâmica continua durante todo o processo de penetração, mas a fragmentação que ocorre nos primeiros microssegundos após o impacto é o principal fator na diminuição da resistência da cerâmica. Este processo é caracterizado como estágio 2.

A Figura 5 representa o estágio 2 do mecanismo de impacto.

Figura 5 - Estágio 2 do mecanismo de impacto.

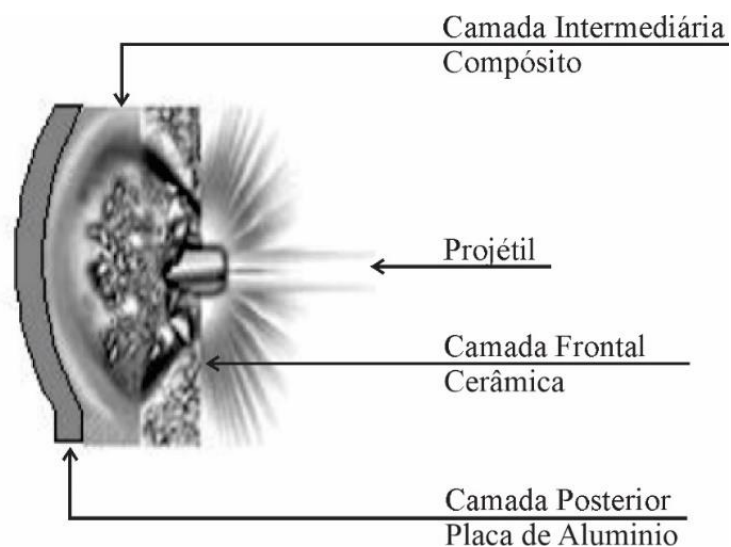


Fonte: Adaptado de Silva *et al.*, (2014).

Segundo Goel *et al.* (2014), no material, estas ondas de tensão são atenuadas quando atingem as áreas de interface; em consequência, sofrem espalhamentos por consecutivas transmissões e reflexões. No processo de atenuação por dois diferentes tipos, a microatenuação age internamente no material e a macroatenuação atinge as extremidades das placas. Este processo pode ser chamado do estágio 3 do mecanismo de impacto balístico.

A Figura 6 representa o estágio 3 do mecanismo de impacto.

Figura 6 - Estágio 3 do mecanismo de impacto.



Fonte: Adaptado de Silva *et al.*, (2014).

Na microatenuação, os responsáveis pelas transmissões e reflexões nas suas respectivas interfaces são as diferenças de impedância entre as diversas fases presentes na microestrutura; são os grãos, contorno de grãos, poros e fases secundárias, entre outras (Goel *et al.*, 2014; Naik; Goel; Kulkarni, 2008).

A macrotenuação ocorre nas extremidades das placas. Quando esta placa não está fixada a nenhuma outra superfície, os esforços que sofreram microatenuação são direcionados para o interior da placa ao atingir a borda. Estes esforços de tração interagem com os esforços de compressão transferindo para o material esforços muito elevados. Como a placa não está aderida a outro material, também ocorre os esforços de flexão livre, ocasionando o dano prematuro da placa cerâmica (Wilkins, 1978).

Os materiais mais flexíveis (compósitos) aplicado como segunda camada na blindagem são responsáveis por reduzir esforços. Esta redução de esforços é devido ao confinamento da cerâmica, que em consequência diminui a flexão da placa. Outro fator é que parte dos esforços é transmitida para a placa de apoio; desta maneira, este mecanismo retarda a fratura da cerâmica (Wilkins, 1978). Os compósitos em sua composição possuem a capacidade de interromper a propagação de trincas internas, por meio da alteração do estado de tensão atuante na fratura e impedir que o projétil penetre e observa-se que sua energia cinética se converte em diferentes formas de mecanismos de absorção balística (Abtew *et al.*, 2019).

Outro fator importante são os adesivos utilizados para produção das placas balísticas, conforme estudos de Zaera *et al.* (2000), pelo qual os esforços oriundos da cerâmica comumente chamados de onda de choque são parcialmente transferidos para o adesivo e em seguida para a placa metálica. O efeito da camada adesiva mostrou que a camada mais espessa de adesivo aumenta a área de deformação plástica da placa de suporte metálica, o que ajuda a absorver a energia cinética do projétil, consequentemente levando a cerâmica a estilhaçar mais cedo. A espessura da camada de adesivo deve ser reduzida ao máximo, de modo a retardar sua fragmentação e aumentar a degradação do projétil.

No momento do impacto no alvo (compósito), o projétil tem certa velocidade, massa e formato. A energia cinética do projétil pode ser reduzida por meio de vários mecanismos, como: deformação do compósito, delaminação entre as camadas, deformação do projétil e cisalhamento nas camadas do compósito. Todos estes mecanismos são capazes de absorver a energia cinética do projétil. A energia cinética do projétil precisa ser absorvida ou transferida para o alvo para evitar a perfuração. Quando esta perfuração ocorre e o projétil atinge a placa metálica é dito que o limite balístico foi atingido (Gonçalves *et al.*, 2004).

3.9 INOVAÇÕES NO SISTEMA DE BLINDAGEM

Comumente, os sistemas de blindagem multicamada são compostos por uma camada frontal de cerâmica, seguida por uma segunda camada com alta resistência ao impacto e baixo peso, como Kevlar® ou UHMWPE (Farias-Aguilar *et al.*, 2021), e uma terceira camada metálica (*backing*). Atualmente, diversas inovações estão sendo estudadas no SBM. Uma diversidade de materiais, como as fibras naturais (rami, juta, fique), estão sendo adicionados a esta segunda camada, a fim de se avaliar a eficiência balística do sistema (Joseph; Medeiros; Carvalho, 1999; Luz *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2019a; Pereira *et al.*, 2019b; Singh *et al.*, 2023). Polímeros, como poliésteres, UHMWPE e diferentes poliamidas, também têm sido relatadas como opção de substituição (Farias-Aguilar *et al.*, 2021).

A Tabela 8 apresenta algumas propriedades essenciais de fibras naturais que estão sendo estudadas no SBM e da aramida.

Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais.

Fibra	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Algodão	1,5 -1,6	290 - 800	6 - 12
Rami	1,5	400 -900	61 -127
Sisal	1,45	568 - 640	9 - 15
Juta	1,3	393 - 770	12 -25
Cânhamo	1,48	690	60 - 70
Linho	1,3 -1,50	344 - 1035	26 - 28
Poliéster	1,04 - 1,46	41,4 - 89,7	2,06 - 4,41
UHMWPE	0,94	38,6 - 48,3	0,69
Nylon 6,6	1,14	75,9 - 94,5	1,59 -3,79
Aramida	1,44	3000 - 4100	63 - 131

Fonte: Adaptado de Callister (2011); Dasgupta (2020); Khalid *et al.* (2021).

Farias-Aguilar *et al.* (2021) testaram a eficiência balística da armadura fabricada utilizando um compósito à base de polímero. Para o composto foi utilizado poliamida reforçada com 37% de fibras e tecido de aramida. Foram fabricados dois painéis com tamanho de 30 cm x 30 cm, um em formato de sanduíche com o compósito e outro com uma camada intermediária de tecido aramida. Foi testado em um ambiente balístico com projétil de 9 mm. Os resultados mostraram que os painéis podem ser usados como uma armadura urbana nível III-A, de acordo com o NIJ-Standard-0101.04.

No estudo de O'Brien *et al.* (2014), os compósitos de uma matriz de polímero reforçada por monofilamentos de fita de polímero foram investigados como materiais mecanicamente robustos e transparentes. Para a criação dos compósitos transparentes, foram utilizadas fitas de *nylon* achatadas combinadas com resina epóxi. Vários experimentos ópticos e mecânicos foram realizados no compósito, a fim de quantificar as propriedades e orientar o *design* do sistema. Os resultados mostraram que esses compósitos de polímeros proporcionam boa transparência e com resistência à penetração balística superior, em comparação com polímeros monolíticos transparentes.

Monteiro *et al.* (2016) estudaram um SBM com camada intermediária composta por compósito epóxi reforçado com tecido de rami, em comparação com um laminado de tecido de aramida (Kevlar®) com camadas unidas por um elastômero (Neoprene®). Eles descobriram que tanto o compósito de tecido de rami quanto o Kevlar®, como camada intermediária de SBM, com os mesmos 10 mm de espessura, atenderam aos requisitos da norma NIJ. Além do mesmo desempenho e peso, a redução de custos usando SBM com tecido de rami pode ser significativa.

Oliveira *et al.* (2021) investigaram a eficiência de compósitos de alumina e polietileno de baixa densidade em aplicações balística. Esta investigação ocorreu por meio das diferenças de concentração de alumina. As concentrações estudadas foram de 70 a 90% em peso. Após os testes balísticos, os resultados apresentaram que os compósitos com 80% em peso de alumina e 20% em peso de polietileno de baixa densidade demonstraram ter o melhor desempenho em aplicações balísticas.

No estudo de Polla *et al.* (2019), o desempenho balístico dos painéis em mosaico de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ foi investigado por meio de ensaios balístico DOP com projétil 7,62 mm. Os resultados foram comparados com placas de alumínio individual da mesma espessura dos sistemas multicamada. Os resultados indicaram que as placas individuais apresentaram melhor desempenho, no caso das estruturas $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{epóxi}$, a resistência balística diminuiu com a redução da espessura das lâminas de alumina e com o aumento da camada de epóxi.

No trabalho de Tang *et al.* (2022), o objetivo foi melhorar o desempenho de proteção balística. Para tanto, foi usado um gel de rigidez de cisalhamento resistente ao impacto (SSG), com excelente flexibilidade como placa de amortecimento para armadura e, em seguida, combinado com um painel balístico de polietileno de ultra alto peso molecular, para formar uma armadura corporal composta. Com base no experimento de impacto balístico, os resultados mostraram que a placa amortecedora SSG flexível pode endurecer rapidamente sob impacto balístico, produzindo assim o forte efeito “*Jamming*” para resistir à deformação do impacto e absorver a energia do impacto. Comparado com os materiais amortecedores tradicionais, mais

energia de impacto foi dispersa e absorvida pelo SSG, mas menos energia de impacto foi transmitida ao corpo humano.

Kumar *et al.* (2020) desenvolveram uma blindagem à prova de balas usando um sanduíche de compósito epóxi e um material cerâmico que serve como suporte. Quando atinge a armadura, o projétil fica preso em uma “teia” de fibras de reforço. A energia de impacto transmitida a blindagem é absorvida e dissipada por essas fibras. Neste trabalho, a eficácia dos painéis foi determinada por testes balísticos de penetração. Observou-se que após o disparo do projétil 9 mm, as blindagens se mostraram eficazes para os padrões do NIJ com o nível do tipo IIA.

Selim *et al.* (2024) apresentaram uma revisão que discute os usos de materiais leves, como compósitos de matriz metálica, compósitos de polímero, compósitos de matriz cerâmica, compósitos de fibra em setores de defesa. O estudo relata o desenvolvimento de pesquisa aprofundada de nanomateriais, nanocompósitos de tecido e *design* e processo de reforço de nanoenchimento para a próxima geração de armaduras mecânicas e à prova de balas, notavelmente altas. Como resultado, as descobertas indicaram que a introdução de revestimentos de micro e nanoenchimentos em tecidos de armadura é um método promissor para alta resistência ao impacto balístico e absorção de energia de impacto dos laminados compostos híbridos. Essa revisão motiva o uso de materiais de armadura à prova de balas futuristas com eficiência aprimorada para o desenvolvimento de um ambiente de proteção.

O estudo de Xu *et al.* (2024) investigou o efeito da temperatura no desempenho balístico de uma blindagem composta B₄C/aramida III/UHMWPE contra projéteis incendiários perfurantes de 12,7 mm. Testes foram realizados em três condições térmicas: baixa (-40 °C), alta (+70 °C) e ambiente (+20 °C), e em duas distâncias de disparo: 100 e 30 m. Os resultados mostraram que a blindagem se comporta melhor em baixas temperaturas, apresentando menor dano estrutural e maior resistência a penetrações, enquanto em altas temperaturas o desempenho é reduzido. O modo de falha dos painéis muda com a distância e a temperatura, e diferentes tipos de danos microscópicos foram observados, fornecendo *insights* valiosos para o *design* de blindagens compósitas leves para ambientes extremos.

Zhu *et al.* (2024) investigaram a resposta ao impacto balístico e lesões contidas em armaduras compósitas de cerâmica e laminado, causando proteção com menor peso. A técnica de Correlação de Imagem Digital Tridimensional foi usada para avaliar o impacto de uma bala de calibre de 7,62 mm em uma armadura de cerâmica/polietileno. As observações incluíram rachaduras na cerâmica, danos ao laminado e deformações na face posterior. Um modelo numérico foi utilizado para simular danos na cerâmica e no laminado. O estudo teve como

objetivo uma nova avaliação quantitativa de desempenho balístico e lesões, fornecendo evidências para entender o mecanismo de impacto e lesões anteriores. Os resultados fornecem evidências quantitativas para pesquisar o mecanismo de impacto e oferecem métodos para avaliar lesões contundentes humanas atrás da armadura.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão apresentados os materiais utilizados e os métodos empregados para o desenvolvimento deste trabalho, pelo qual envolve as etapas relacionadas as matérias-primas, o processamento e os ensaios realizados.

4.1 MATERIAIS

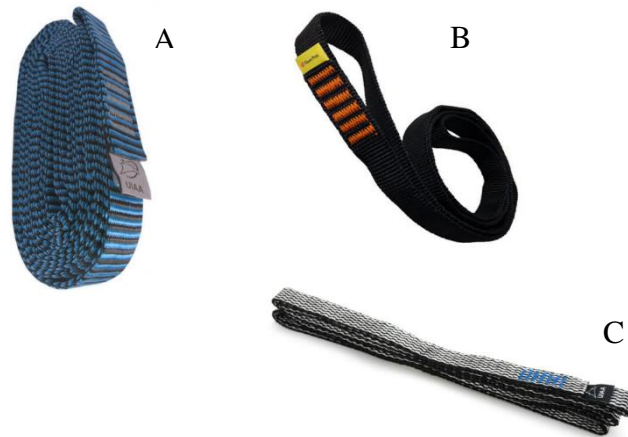
Os materiais de partida utilizados nesta pesquisa foram: placa cerâmica em alumina, fornecida pela Engecer Cerâmica Técnica Ltda, tecido de Kevlar®, fornecido pela empresa Barracuda Advanced Composites, fita de poliéster, fornecida por Conquista Equipamentos para Montanhismo Ltda, fita de *nylon*, fornecida por Alpen Pass – Sister Máquinas e Acessórios Ltda, fita de Dyneema®, fornecida por Conquista Equipamentos para Montanhismo Ltda, resina epóxi AR720 e endurecedor AH723, fabricada e fornecida pela E-Composites Comércio de Materiais Compostos Ltda, cola epóxi, produzida pela Huntsman®, e placa de alumínio, fornecida pela empresa ALUMASA Ltda. As propriedades da alumina estão apresentadas na Tabela 9, conforme dados fornecidos pelo fornecedor. A Figura 7 mostra as fitas de amarração utilizadas no presente estudo.

Tabela 9 - Propriedades da alumina de acordo com o fornecedor Engecer Ltda.

Propriedades	Valor
Teor de Al ₂ O ₃ (%)	> 99,0
Teor de MgO (%)	< 0,8
Tamanho médio de grão primário (D ₅₀ , mm)	0,7 a 0,9
Densidade (g/cm ³)	3,8 - 3,9
Porosidade aberta (%)	0
Coefficiente de expansão térmica linear (°C ⁻¹)	8,3 x 10 ⁻⁶
Temperatura máxima de uso (°C)	1500
Resistência à compressão (MPa)	2600
Resistência à flexão (MPa)	350

Fonte: Do Autor.

Figura 7 - Fitas de amarração utilizadas na presente pesquisa: A – Poliéster, B – Nylon, C – Dyneema®.



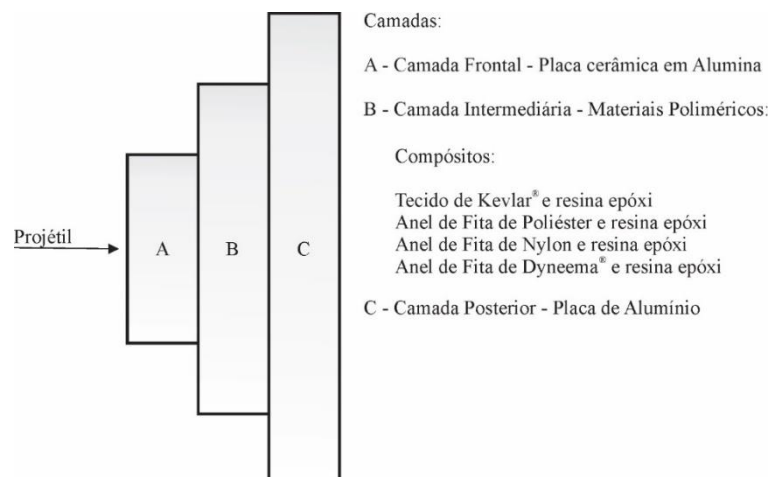
Fonte: Alpen Pass (2024); Conquista Montanhismo (2024).

4.2 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE BLINDAGEM MULTICAMADA (SBM)

O SBM utilizado no presente trabalho consiste na seguinte configuração:

- camada frontal de cerâmica: feita de placas hexagonais de alumina, cujo objetivo é deformar e destruir a frente do projétil e absorver uma fração da energia;
- camada intermediária: formada pelas placas de compósito estudados, tem como função dissipar a energia cinética dos fragmentos gerados pelo projétil e material cerâmico;
- *backing* (placa de apoio): placa de alumínio usada para reter os estilhaços (fragmentos) remanescentes e servir de estrutura empregada para absorver a energia residual por meio da sua deformação plástica e registro do impacto desses estilhaços no teste de DOP (Figura 8).

Figura 8 - Esquema de sistema de blindagem balística para o teste do DOP.



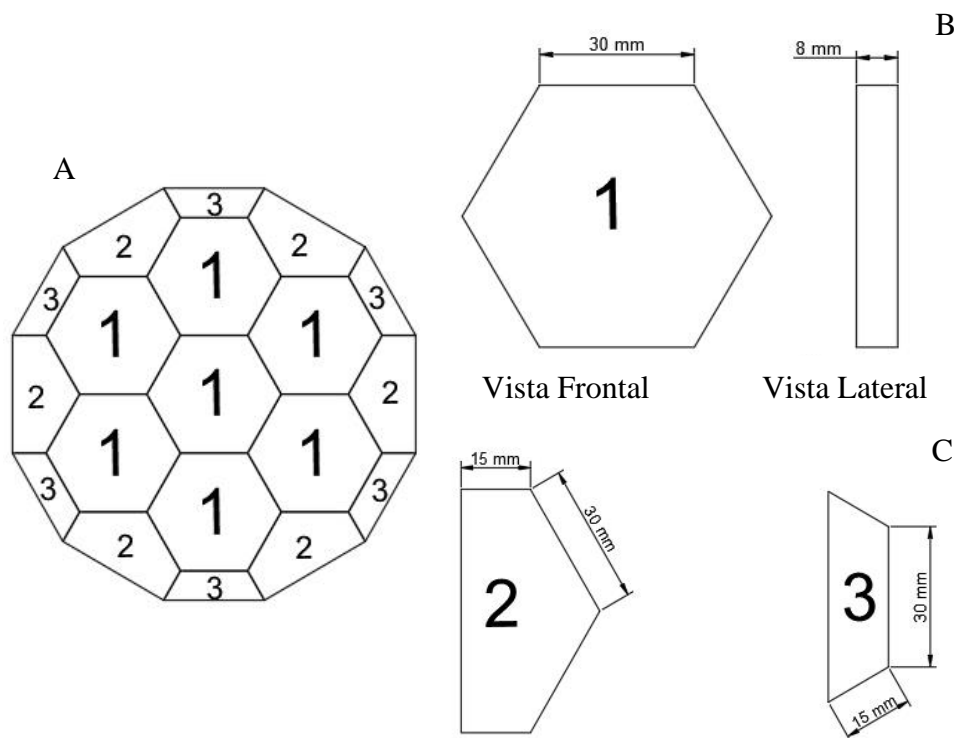
Fonte: Do Autor.

Este SBM foi desenvolvido com o objetivo de proteção de nível III, para munições de calibre 7,62 mm.

4.2.1 Placa Frontal - Cerâmica

A placa frontal é constituída de placas cerâmicas de alumina comercial (99% de pureza, Engocer), Figura 9.

Figura 9 - Formato de placas utilizadas no trabalho: A - formato das peças em condições de confinamento de um painel completo, B - formato de placas centrais, C - formato de placas laterais utilizadas na pesquisa.



Fonte: Do Autor.

As placas são constituídas no formato hexagonal para as placas centrais, de acordo com a Figura 9B. As placas laterais foram formadas com formatos diferenciados, conforme representado na Figura 9C.

Com o objetivo de proteger integralmente a área contemplada com as placas cerâmicas de alumina, os formatos das peças foram diferenciados; assim, todas as placas estavam na mesma condição de confinamento que a placa central, simulando um painel completo, de acordo com a Figura 9A.

4.2.2 Placa intermediária – Materiais compósitos poliméricos

Neste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais compósitos poliméricos na camada intermediária:

- tecido de Kevlar® e resina epóxi usados como referência denominado COMP REF;
- fita de poliéster e resina epóxi denominado COMP POL;
- fita de *nylon* e resina epóxi denominado COMP NYL;
- fita de Dyneema® e resina epóxi denominado COMP DYN.

4.2.2.1 Tecido de Kevlar®

O tecido de Kevlar® foi fabricado usando um tecido plano composto por filamentos de Kevlar® 49. A Tabela 10 apresenta as propriedades típicas desta tipologia de tecido.

Tabela 10 - Propriedades balística do tecido de fibras de Kevlar® 49.

Quantidade de fios (fios/cm)	Densidade aparente (g/cm ³)	Densidade linear (g/cm)	Relação área por fio c/s (cm ²)
6,7 x 6,7	1,44	1,656 (10 ⁻³)	1,15 (10 ⁻³)

Fonte: Adaptado de Zhu; Mobasher; Rajan, (2011).

4.2.2.2 Fita de Poliéster

A fita de poliéster utilizada neste trabalho foi fabricada com fios tubulares de poliéster de alta tenacidade. As fitas de poliéster possuem comprimento de 2000 mm, largura de 20 mm, espessura 2,1 mm, com resistência de 24 kN e peso de 120 g e foi produzido de acordo com a norma europeia EN566.

4.2.2.3 Fita de Nylon

A fita de *nylon* utilizada no trabalho foi fabricada com fios de *nylon* e possui comprimento de 2000 mm, largura de 20 mm, espessura de 2,5 mm, com resistência de 22 kN e foi produzida conforme a norma europeia EN566.

4.2.2.4 Fita de Dynnema®

A fita de Dyneema® utilizada neste trabalho foi fabricada com fios tubulares de Dyneema® de alta tenacidade. As fitas de Dyneema® possuem comprimento de 2000 mm, largura de 20 mm, espessura de 2,5 mm, e resistência de 22 kN e foi produzida conforme norma europeia EN566.

4.2.2.5 Resina Epóxi AR720 e Endurecedor AH723

Para obtenção dos compósitos, foi utilizada como matriz o polímero termofixo epóxi do tipo éter diglicídico do bisfenol A, endurecido com trietileno tetramina. O epóxi constitui um sistema de dois componentes que passa pelo processo de cura apenas quando é misturado com um endurecedor. Para a proporção estequiométrica, utiliza-se 31 partes de endurecedor para 100 partes de resina (proporções em peso). A Tabela 11 apresenta as propriedades mecânicas do material e características de manuseio da resina epóxi AR720 com o endurecedor epóxi AH723.

Tabela 11 - Propriedades mecânicas e de manuseio da resina com endurecedor.

Propriedades Mecânicas		
Dureza Shore D	83	
Modulo de tração	4,1 GPa	
Resistência à tração	79,4 MPa	
Resistência à flexão	144 MPa	
Módulo de flexão	4,0 GPa	
Deformação	7,8%	
T _g	82 °C	
Gel time	85 min	
Propriedades de Manuseio		
	AH723	AR720
Viscosidade 25 °C	70 mPa.s	2350 mPa.s
Densidade 25 °C	0,981 g/cm ³	1,155 g/cm ³
Proporção em peso (%)	31	100
Proporção em volume (%)	36,5	100

Fonte: E-Composites (2024).

4.2.3 Placa de Alumínio

A placa de apoio usada no presente trabalho é de alumínio liga 6063, com formato de tarugo cilíndrico, com dimensão de 208 mm de diâmetro e 2000 mm de espessura.

A Tabela 12 apresenta a composição química da liga de alumínio 6063.

Tabela 12 - Composição química da liga de alumínio 6063.

Elemento	Al	Mg	Si	Cr	Mn	Ti
% mássica	máx. 97,5	0,45 - 0,9	0,2 - 0,6	máx 0,1	máx. 0,1	máx. 0,1
Elemento	Cu	Zn	Fe	Outros, cada	Outros, total	
% mássica	máx. 0,1	máx. 0,1	máx. 0,35	máx. 0,05	máx. 0,15	

Fonte: ASM Handbooks (1990).

O tarugo de alumínio foi cortado com uma serra fita e não passou por processo de usinagem. As superfícies de alumínio foram lixadas e desengorduradas com tolueno durante 15 min e, em seguida, lavadas com detergente e água. Após o corte, as superfícies de alumínio adquiriram dimensão de 208 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. Foram utilizadas 8 superfícies de alumínio no presente estudo.

Os tarugos de alumínio passaram por tratamento térmico, conforme Übeyli; Yildirim; Ögel (2008). Este tratamento foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa ocorreu a solubilização. Os tarugos de alumínio foram expostos a temperatura de 520 °C, com 2 h de permanência, sendo resfriado em um recipiente com água em temperatura ambiente. Na segunda etapa ocorreu o envelhecimento. Os tarugos de alumínio foram expostos a temperatura de 175 °C, durante 7 h, a fim de se obter dureza de aproximadamente de 73 HB. Este tratamento térmico resulta menor conformabilidade ao material, porém, maior resistência ao escoamento e a resistência à tração a placa de alumínio.

4.2.4 Cola Epóxi

A cola epóxi Araldite foi utilizada para a colagem das placas cerâmicas de alumina (camada frontal) no material compósito (camada intermediária) e também entre o compósito e a placa de alumínio (camada posterior). Foi utilizado um adesivo bicomponente, que é uma resina epóxi, comumente empregada em proteções balísticas. Esta resina é disponível comercialmente com o nome de Araldite, produzida pela Huntsman[®]. O agente de cura é a base de poliamidas.

A Tabela 13 apresenta algumas propriedades da cola epóxi de acordo com o fornecedor.

Tabela 13 - Propriedades da cola epóxi.

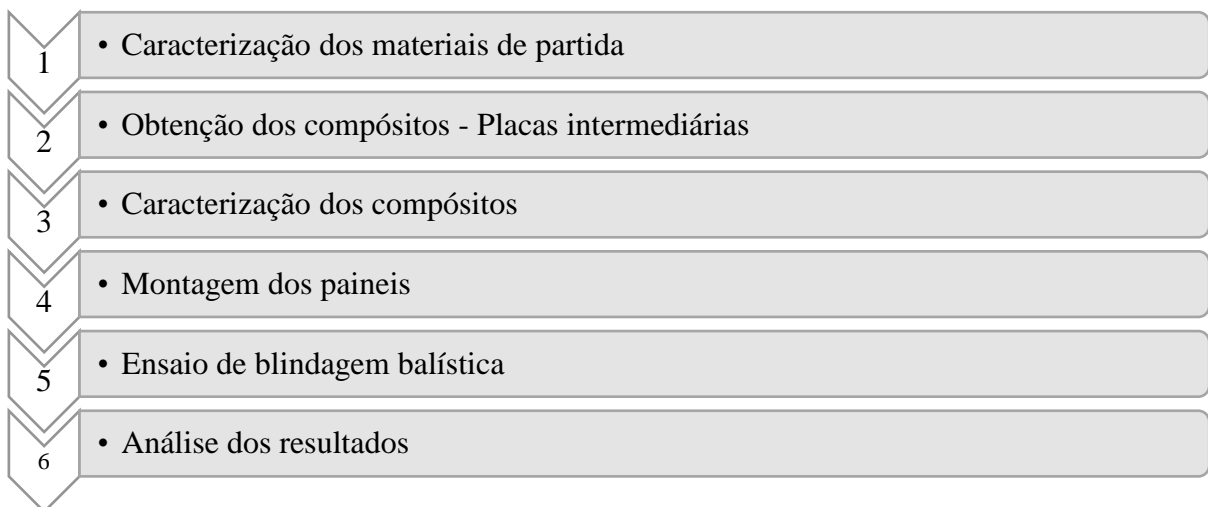
Propriedade	Valor
Densidade da resina (g/cm ³)	1,17
Densidade do endurecedor (g/cm ³)	0,92
Razão resina - Endurecedor (em volume)	100:100
Razão resina - Endurecedor (em massa)	100:80
Tempo de trabalho (min)	60
Tempo para manuseio (h)	7
Tempo mínimo de cura (h)	12
Resistência ao cisalhamento – 72 h (MPa)	15,7

Fonte: Huntsman (2024).

4.3 MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas as atividades executadas na pesquisa e organizadas conforme apresentado na Figura 10. O trabalho foi dividido em seis etapas.

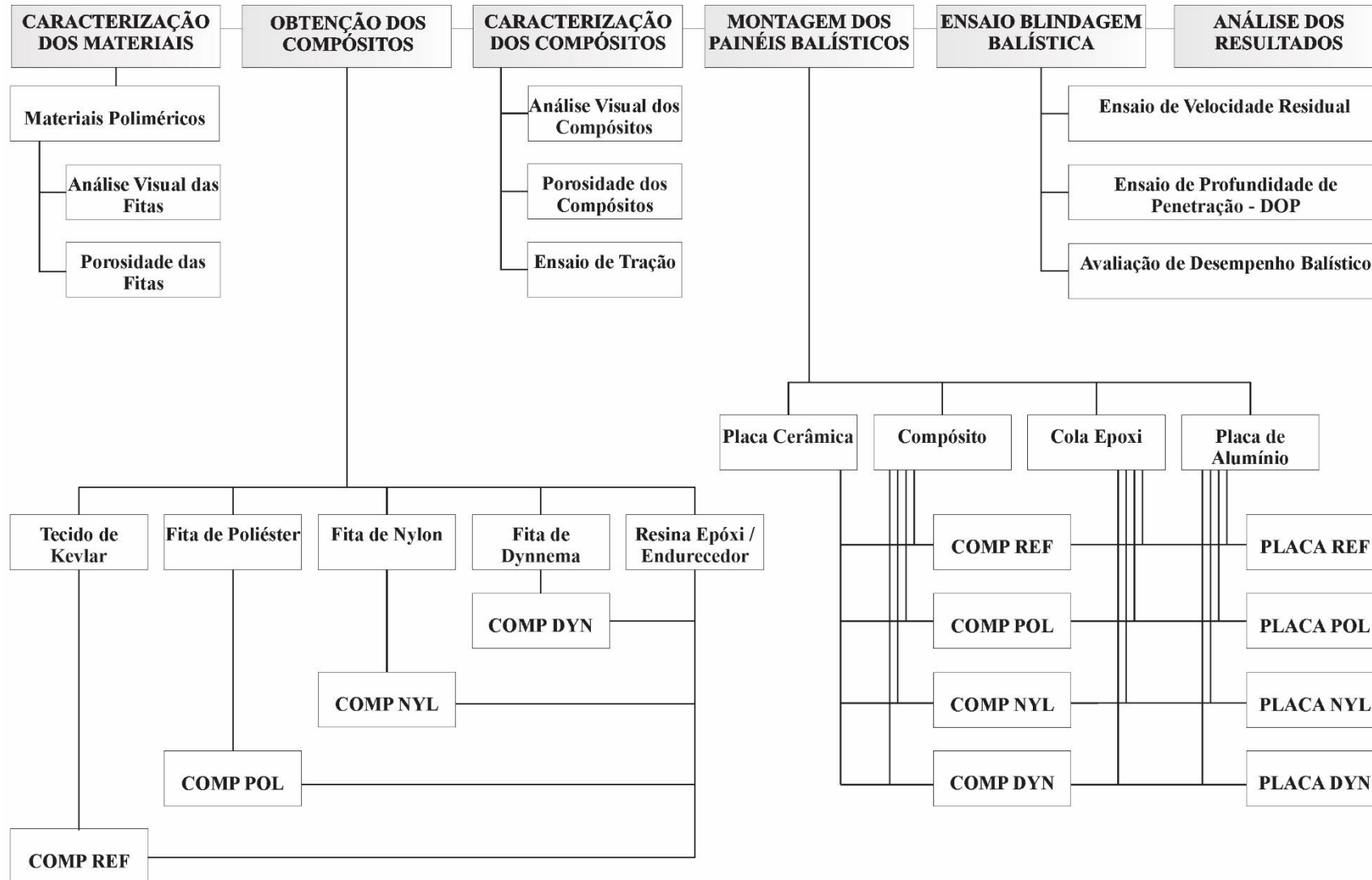
Figura 10 - Etapas da pesquisa.



Fonte: Do Autor.

A Figura 11 apresenta o fluxograma geral com todas as etapas e ensaios executados neste trabalho.

Figura 11 - Fluxograma geral das etapas da pesquisa.



Fonte: Do Autor

4.3.1 Caracterização das fitas de amarração

A caracterização das fitas de amarração foi feita a partir da análise visual e cálculo da porosidade.

4.3.1.1 Análise Visual

A análise visual das fitas de amarração foi realizada a partir das características relacionadas à textura, maleabilidade e qualidade do entrelaçamento dos fios de cada tira de fita, procurando características físicas ou defectivas que pudessem impactar no comportamento final do material.

Por meio do microscópio Biotika, modelo 12 MP USB 2.0, foram extraídas imagens das tiras de fita. Tais imagens permitiram visualizar e detalhar a caracterização detalhada das propriedades físicas e padrões de trançado das fibras, o que permitiu se identificar potenciais defeitos e variações de fabricação do material que pudessem impactar no comportamento no sistema de blindagem multicamada.

4.3.1.2 Porosidade

A porosidade total (ϵ_t) é a soma dos volumes de poros abertos e fechados presentes na amostra do material. O cálculo da porosidade total foi obtido por meio da relação entre a densidade aparente a seco e a densidade real. A porosidade total foi determinada por meio da Equação 1 (Akiyoshi *et al.*, 2001).

Equação 1

$$\epsilon_t (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} \right)$$

onde:

ϵ_t = porosidade total, em %;

ρ_{ap} = densidade aparente a seco, em g/cm³;

ρ_{real} = densidade real, em g/cm³.

A densidade aparente a seco (ρ_{ap}) foi determinada pelo método geométrico. Amostra de cada tira de fita de cada tipologia foi medida com paquímetro digital Caliper 150 mm (6"). A

massa da amostra foi determinada em balança digital, marca Marte, modelo BL3200H, com leitura de 0,01 g. A densidade foi determinada conforme Equação 2 (Akiyoshi *et al.*, 2001).

Equação 2

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v}$$

onde:

ρ_{ap} = densidade aparente, em g/cm³;

m = massa corpo de prova, em g;

v = volume do corpo de prova, em cm³.

A densidade real (ρ_{real}) foi obtida por picnometria a gás Hélio, em equipamento marca Quantachrome, modelo ULTRAPYC 1200e, a qual determina o volume real de um sólido, por variação da pressão de gás em uma câmara de volume conhecido. Essa técnica pode ser utilizada para materiais porosos. O volume das fitas foi calculado por meio da Equação 3.

Equação 3

$$V = c \times l \times a$$

onde:

V = volume do sólido geométrico, em mm³;

c = comprimento, em mm;

l = largura, em mm;

a = altura, em mm.

A análise dimensional das fitas de poliéster, *nylon* e Dyneema® foi executada por meio do método geométrico, com paquímetro digital Caliper 150 mm (6”).

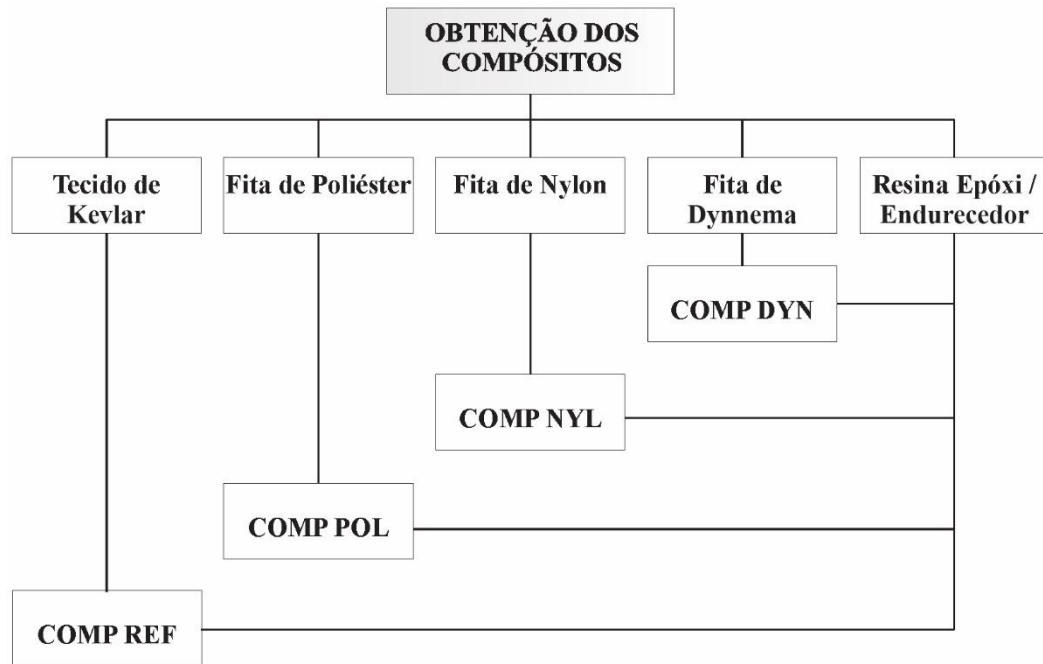
4.3.2 Obtenção dos compósitos

Este tópico apresenta as etapas de obtenção dos compósitos poliméricos. A Figura 12 apresenta o processo de obtenção dos compósitos.

Para a composição dos compósitos, foi utilizado uma placa metálica com o intuito de servir como molde. A placa metálica possui com dimensão 22 cm x 22 cm x 2,5 cm e foi

revestida com plástico, a fim de se evitar que o material compósito (resina e material polimérico) ficasse aderido à placa metálica.

Figura 12 - Fluxograma do processo de obtenção dos compósitos.



Fonte: Do Autor.

Nesta pesquisa, foram confeccionadas oito placas do compósito de tecido de Kevlar® e resina epóxi e foi denominado como COMP REF. Foram confeccionadas oito placas de cada compósito de fita de amarração (fita de poliéster, fita de *nylon* e fita de Dynnema®) e resina epóxi e foi denominado COMP POL, COMP NYL e COMP DYN. Quatro placas de cada compósito foram utilizadas no ensaio de blindagem balística – ensaio de velocidade residual, duas placas foram utilizadas na montagem do sistema de blindagem multicamada e duas placas foram utilizadas para a medição da densidade aparente e real e ensaio mecânico de tração.

A Tabela 14 apresenta a quantidade de amostras desenvolvidas para os ensaios executados na presente pesquisa.

Tabela 14 – Número de amostras utilizadas de COMP REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DYN nos ensaios da presente pesquisa.

Ensaio	Número de amostras para cada compósito
Medição da densidade aparente e real e ensaio mecânico de tração	02
Ensaio de Velocidade Residual	04
Ensaio de Profundidade de Penetração – DOP	02
TOTAL DE AMOSTRAS	08

Fonte: Do Autor.

4.3.2.1 Obtenção do compósito polimérico de tecido de Kevlar® e Resina Epóxi

Para a preparação do compósito de tecido de Kevlar® e resina epóxi, primeiramente o tecido de Kevlar® foi cortado manualmente com tesoura, em formato geométrico de retângulos, no tamanho aproximado de 22 cm x 22 cm, perfazendo-se um total de 8 peças.

Em seguida, foi colocado um papel de alumínio que serviu como anteparo, de maneira a se evitar que ocorresse o escorregamento da resina indevidamente, embaixo da placa metálica (placa que serviu como molde para a confecção da placa). Após, as peças do tecido de Kevlar® em estudo foram colocadas uniformemente em cima da placa metálica (molde).

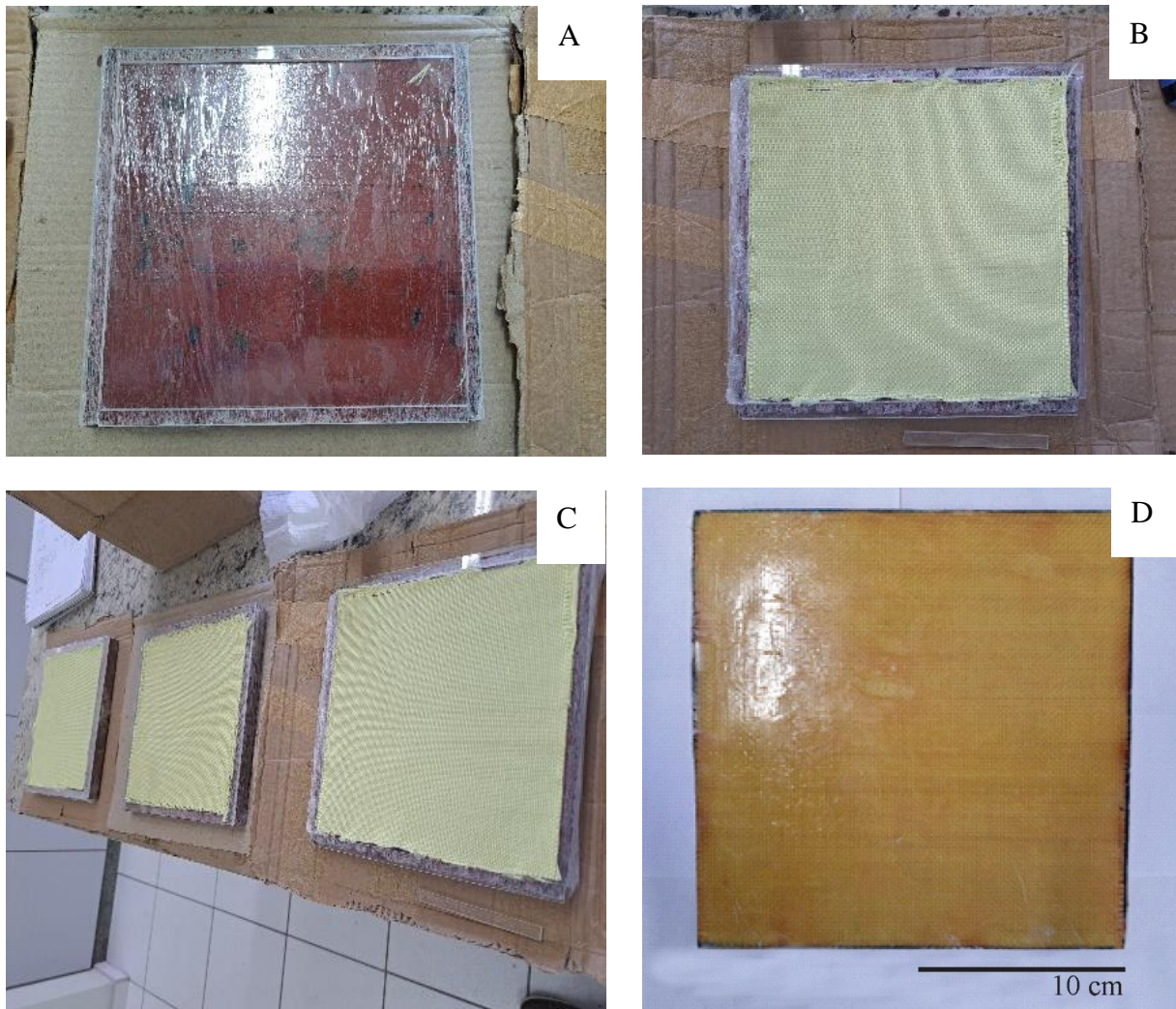
Logo depois, foi preparada a resina epóxi AR720 com o endurecedor AH723 na proporção estequiométrica, de 31 partes de endurecedor para 100 partes de resina (em peso), conforme dados do fabricante E-Composites (2024). A resina foi aquecida a uma temperatura de 40 °C para em seguida ser distribuída uniformemente na placa. A resina foi aquecida com o propósito de facilitar sua fluidez, ajudando na aplicação uniforme na placa.

Cada compósito de Kevlar® recebeu 54,37 g de resina epóxi, conforme descrita na Tabela 16. A resina foi distribuída uniformemente em toda a placa. Posteriormente, foi colocado o tecido de Kevlar®. Em seguida, uma nova camada de resina foi distribuída com rolo compactador.

A cura ocorreu em temperatura ambiente (~25 °C) por 24 h.

A Figura 13 apresenta as etapas de obtenção do compósito de tecido de Kevlar® com resina epóxi.

Figura 13 - Montagem dos compósitos com tecido de Kevlar® e resina epóxi: A - Placa metálica, B - Tecido de Kevlar® sobre a placa metálica, C - Conjunto de COMP REF sendo confeccionados, D - Compósito de tecido de Kevlar® e resina epóxi.



Fonte: Do Autor.

Este compósito foi utilizado como compósito referência, uma vez que foi utilizado o tecido de Kevlar®, produto conhecido e utilizado mundialmente na indústria de blindagem balística (Boukouvalas; Wiebeck, 2007; Farias-Aguilar *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022; Selim *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2019).

Após a cura, as placas dos compósitos COMP REF foram desmoldadas da placa metálica. Em seguida, as placas passaram por etapa de corte, com a finalidade de aparar as rebarbas. Os compósitos COMP REF adquiriram formato geométrico quadrado, com dimensão aproximada de 20 x 20 cm.

4.3.2.2 Obtenção dos compósitos poliméricos com fitas e resina epóxi

Primeiramente, foi estimada (calculada) a quantidade de camadas de cada fita de amarração que deveria ser utilizada para apresentar a mesma resistência à tração do tecido de Kevlar®. A quantidade de camadas de tiras de amarração a ser utilizada derivou da composição e resistência de cada material. De acordo com Dupont (2024), a resistência à tração do tecido de Kevlar® é 3.400 MPa. Após a definição do número de camadas e, conseqüentemente, o número de tiras de cada fita de amarração a ser utilizada em cada compósito, se deu início ao método de confecção dos compósitos poliméricos com anéis de fita e resina epóxi.

4.3.2.2.1 Estudo do quantitativo de camada de Anéis de Fita

A camada intermediária é composta por um compósito, em que, geralmente, é constituído por um tecido de fibras de aramida (Kevlar®) e resina epóxi. Sua função é absorver a parte restante da energia de impacto.

O Kevlar® foi substituído por fitas de amarração (poliéster, *nylon* e Dyneema®) e foram desenvolvidos três compósitos diferentes. Os compósitos obtidos a partir das fitas de amarração foram comparados com o compósito referência, obtido a partir de tecido de Kevlar® e resina epóxi.

Como o objetivo do trabalho é a substituição do Kevlar® por fitas de amarração na camada intermediária; o primeiro passo foi definir o número de camadas de anéis de fitas de amarração para compor o compósito utilizado.

As resistências à tração das fitas de amarração foram obtidas a partir dos catálogos dos fabricantes. Em seguida, foi utilizada a Equação 4, a fim de se encontrar a tensão (σ) dos materiais em estudo. Por fim, foi utilizada a Equação 5 com o intuito de se encontrar o número de camadas de fitas de amarração para a composição do compósito. A Tabela 15 elenca o número de camadas utilizadas para a composição dos três compósitos, bem como os dados utilizados para a definição do número de camadas das fitas.

Equação 4

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Equação 5

$$\text{Número de camadas} = \frac{\sigma \text{ Kevlar}^{\circledR}}{\sigma \text{ Fita de amarração}}$$

Tabela 15 - Número de camadas utilizadas para a composição dos compósitos.

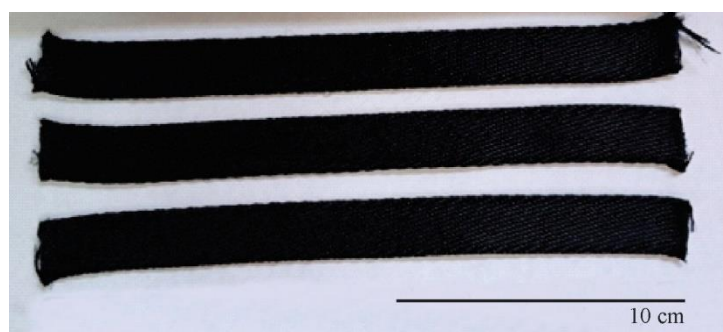
Compósito	Material do anel de fita	Resistência a tração (KN)	Dimensão		Área (mm ²)	Tensão (N/mm ²)	Resistência Kevlar® (MPa)	Número de camadas
			Larg. (mm)	Esp. (mm)				
COMP POL	Poliéster	24	20	2	40	600	3400	6
COMP NYL	Nylon	22	19	2,5	47,5	463,1579	3400	7
COMP DYN	Dyneema®	22	15	1,9	28,5	771,9298	3400	4

Fonte: Do Autor.

4.3.2.2.2 Método da confecção das placas de compósitos poliméricos

Para a confecção das placas de compósitos, primeiramente as fitas de amarração de cada polímero foram cortadas manualmente em tiras com tesoura, com comprimento aproximado de 20 cm, conforme mostrada na Figura 14.

Figura 14 - Fitas de *nylon* cortadas manualmente, com 20 cm de comprimento.



Fonte: Do Autor.

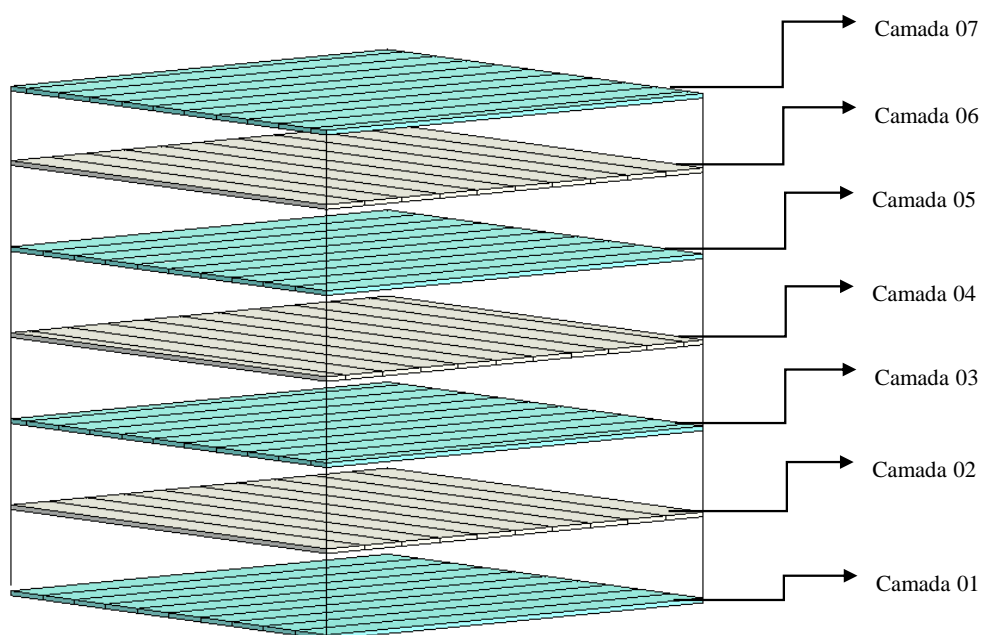
Em seguida, foram separadas as tiras de cada polímero em cima da bancada, colocadas lado a lado e separada a quantidade de tiras a ser utilizada na preparação da placa de compósito. Para a composição da placa, as tiras de fita de amarração de cada compósito foram distribuídas em camadas. Inicialmente, foi colocado um papel de alumínio, que serviu como anteparo, embaixo da placa metálica. Logo depois, a resina epóxi foi preparada utilizando o mesmo processo aplicado no COMP REF.

As tiras de fitas de amarração foram colocadas manualmente sobre a placa metálica, alinhadas e distribuídas uniformemente lado a lado por camada. As tiras da camada seguinte foram montadas transversalmente em relação as anteriores, formando um ângulo de 90° entre as camadas anterior e posterior. Entre as camadas ímpares, as fitas de amarração da camada

seguinte eram montadas com um deslocamento de $\frac{1}{2}$ largura de fita em relação à camada ímpar anterior, conforme mostrado nas Figuras 15, 16 e 17. O mesmo foi feito para as camadas pares.

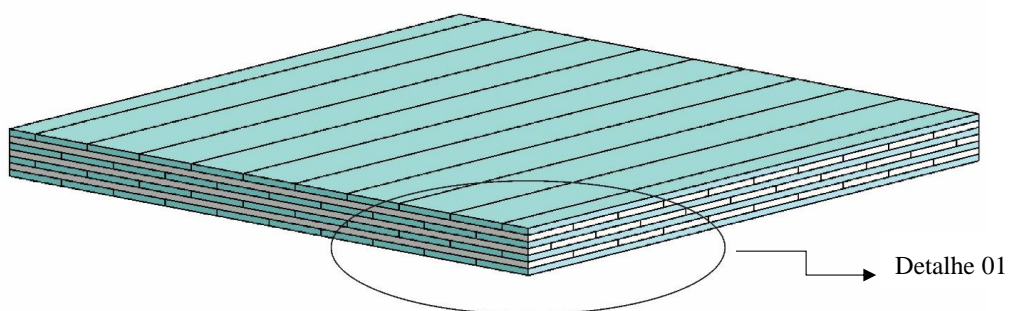
Para o compósito COMP POL, foram utilizadas 6 camadas, para o compósito COMP NYL foram utilizadas 7 camadas e para o compósito COMP DYN foram utilizadas 4 camadas, conforme exposto na Tabela 15.

Figura 15 - Perspectiva mostrando o posicionamento das camadas para a formação dos materiais compósitos utilizando as fitas de amarração do compósito COMP NYL.



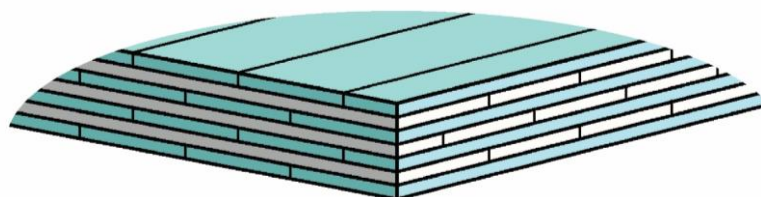
Fonte: Do Autor.

Figura 16 - Perspectiva mostrando as camadas de fita de amarração do compósito COMP NYL.



Fonte: Do Autor.

Figura 17 - Detalhe 01: Ampliação da perspectiva mostrando as camadas de fitas de amarração do compósito COMP NYL



Fonte: Do Autor.

Em conjunto com a montagem das camadas, as tiras de fitas foram molhadas com a resina epóxi.

Originalmente, o Dynnema®, material no qual o COMP DYN é composto, não foi projetado para uso combinado com resina epóxi. Apesar da baixa afinidade química com a matriz polimérica, ajustes no processamento permitiram sua incorporação. A compatibilidade da fita de amarração Dynnema® com a resina epóxi foi embasada no estudo de (Wang *et al.*, 2017). Cada camada de fita de amarração recebeu uma quantidade de resina epóxi para cada tipo de anel de fita conforme descrita na Tabela 16.

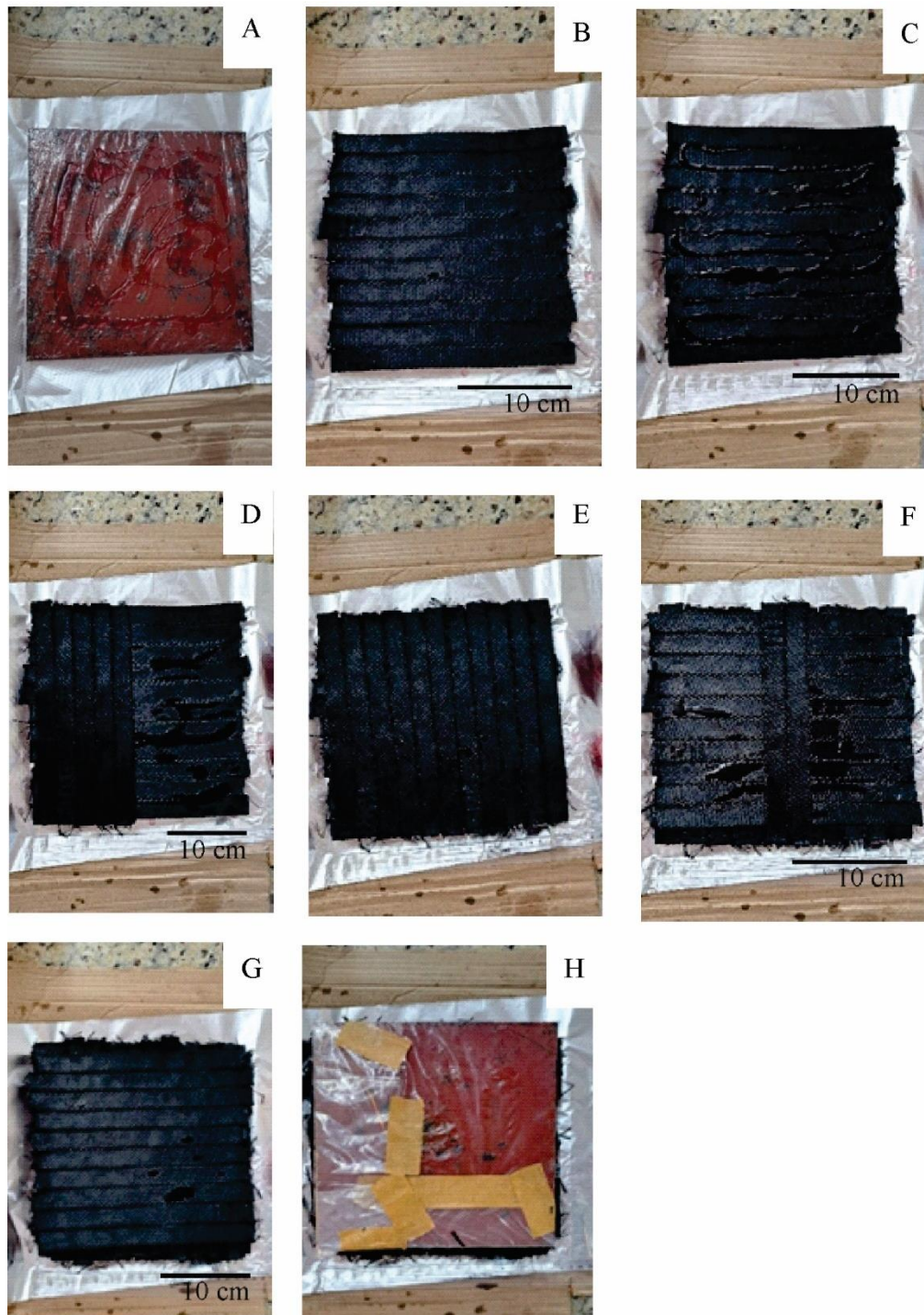
Tabela 16 – Quantidade de resina utilizada para a confecção das placas dos compósitos.

Material	Camadas (quant.)	Peso em cada camada (g)	Resina				
			AR 720 (g)	AH 723 (g)	Quant. por camada (g)	Teor de resina por camada (% em m)	Total por placa (g)
Tecido de Kevlar®	1	23,74	34,5249	19,845	54,37	69,53	54,37
Poliéster	6	94,60	207,1497	119,0703	54,37	36,49	326,22
Nylon	7	92,30	241,6747	138,9154	54,37	37,07	380,59
Dyneema®	4	76,68	138,0998	79,3802	54,37	41,48	217,48

Fonte: Do Autor.

A resina foi distribuída uniformemente em todas as camadas dos compósitos conectando as tiras em cada camada. A resina misturada foi colocada manualmente sobre as tiras de fita de amarração, de acordo com a 105 Figura 18. Após a montagem de cada placa de compósito, foi colocada a placa metálica (molde) sobre a última camada com o intuito de moldar o compósito no momento da prensagem.

105 Figura 18 - Montagem dos compósitos desenvolvidos a partir das fitas de amarração de nylon e resina epóxi: A - Placa metálica, B - Primeira camada de fita de nylon, C - Resina epóxi sobre a camada de fitas de nylon, D - Segunda camada de fitas de nylon, E - Segunda camada de fitas de nylon concluída, F - Quarta camada de fitas de nylon, G - Placa de compósito concluída com todas as camadas, H - Placa metálica sobre a última camada do compósito.



Fonte: Do Autor.

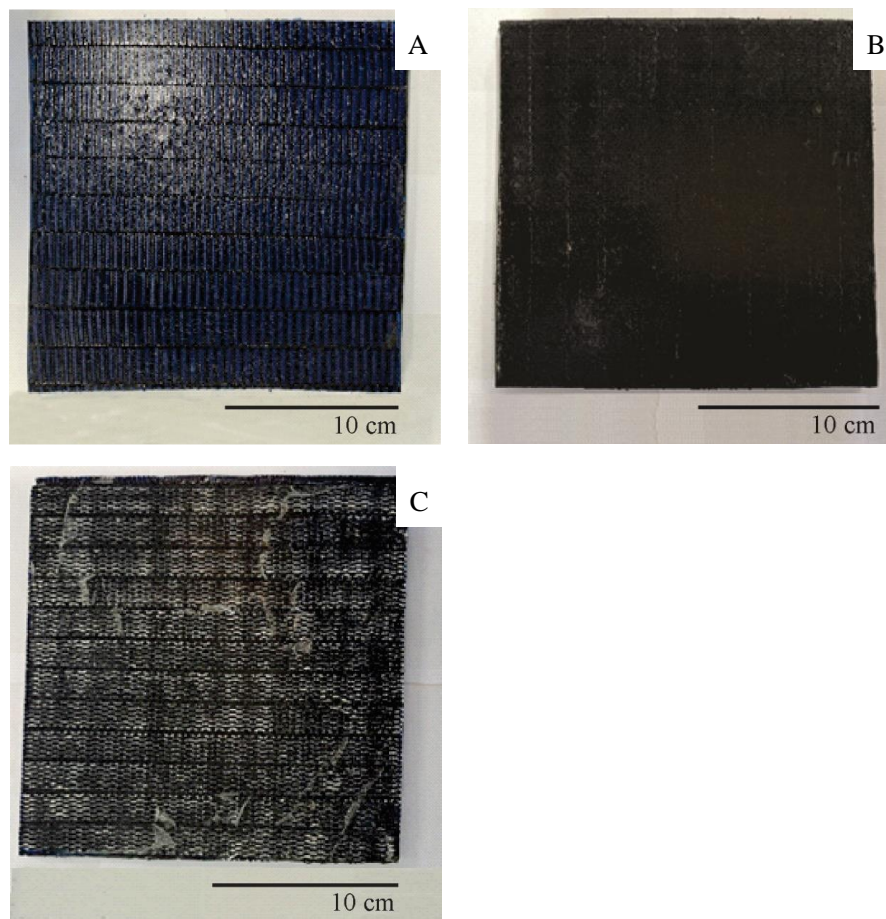
Em seguida, o conjunto foi prensado em prensa hidráulica Bovenau de 30 ton e mantido em cura sob pressão de 5 ton à temperatura ambiente por 24 h. Logo após, foi feita a extração da placa metálica (molde).

Este processo foi repetido para os três compósitos utilizados na pesquisa.

Após o processo de prensagem, as placas (20 cm x 20 cm) dos compósitos foram desmoldadas da placa metálica.

Em seguida, as placas passaram por etapa de corte, com a finalidade de aparar as rebarbas. A Figura 19 apresenta a aparência final dos compósitos.

Figura 19 - Aparência final dos compósitos, no formato geométrico quadrado, com dimensão aproximada de 20 cm x 20 cm: A - Placa de compósito: fita de poliéster e resina epóxi - COMP POL, B - Placa de compósito: fita de nylon e resina epóxi - COMP NYL e C - Placa de compósito: fita de Dyneema® e resina epóxi - COMP DYN.



Fonte: Do Autor.

4.3.3 Caracterização dos Compósitos

Neste tópico serão apresentadas as etapas de caracterização dos compósitos, referente à placa intermediária, conforme exposto no fluxograma geral.

4.3.3.1 Análise optica dos compósitos

A análise optica dos compósitos foi utilizada para se avaliar características relacionadas à confecção das placas, como na aplicação da resina e compactação, por meio de microscópio Biotika, modelo 12 MP USB 2.0. As imagens permitiram visualizar potenciais defeitos do material que pudessem impactar no comportamento no sistema de blindagem multicamada.

4.3.3.2 Porosidade dos compósitos

A porosidade dos compósitos COMP REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DYN foi executado de acordo com o item 4.3.1.2.

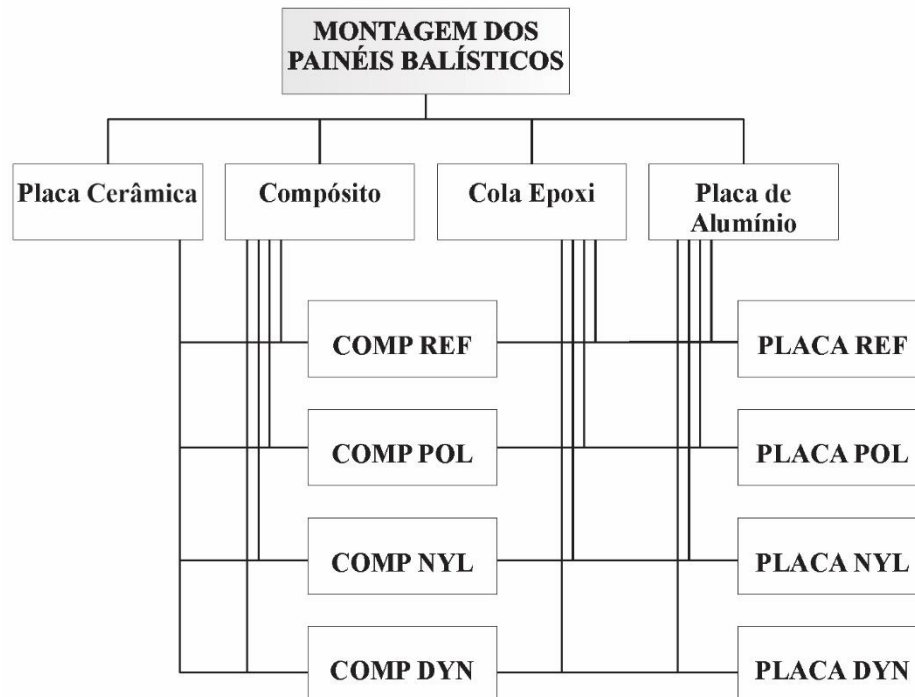
4.3.3.3 Ensaio mecânico de tração

Para realização do ensaio de resistência à tração, foi utilizada uma máquina de ensaios universal EMIC DL10000, de acordo com a norma ASTM D3039. Foram ensaiados sete corpos de prova para cada compósito (COM REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DYN). Os corpos de prova foram cortados de acordo com a norma em dimensões de 160 mm x 20 mm, fixados no equipamento por meio da garras de fixação e alongados no sentido axial até o momento do colapso. Desta maneira foi possível coletar as características físicas do material. O experimento ocorreu em baixa velocidade e com esforços solicitantes gradativos. A carga aplicada no ensaio foi mensurada na própria máquina e o ensaio ocorreu até a ruptura.

4.3.4 Montagem dos Painéis Balísticos

As etapas de montagem dos painéis balísticos no sistema de blindagem multicamada seguiram as etapas de acordo com a Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma apresentando a etapa de montagem dos Painéis Balísticos.



Fonte: Do Autor.

4.3.4.1 Preparação dos elementos compostos em cada camada do sistema de blindagem multicamada para a montagem dos painéis balísticos

A montagem dos painéis balísticos consiste em três camadas de diferentes materiais. Para a camada frontal, foi utilizada um mosaico de placa cerâmica de alumina. Para a camada intermediária, foram utilizados os compósitos de fitas de amarração de materiais poliméricos e resina epóxi. A camada posterior, normalmente construída por materiais de menor rigidez, foi uma placa de alumínio.

Antecedente à montagem dos painéis balísticos, cada elemento presente nas camadas frontal, intermediária e posterior foram preparados, a fim de se adequar as características dos painéis balísticos em estudo.

4.3.4.1.1 Camada frontal – Placa cerâmica

Para realizar a montagem das placas cerâmicas em alumina, foi utilizado o sistema de painéis em mosaico. Este mosaico foi montado no formato circular, com diâmetro de 200 mm. Primeiramente, foi montado o mosaico e, em seguida, foram utilizados espaçadores de 1 mm de espessura entre as placas, com o intuito de se fazer com que o distanciamento entre as placas

fosse o mais homogêneo possível, a fim de favorecer a aplicação do material de preenchimento (cola epóxi).

A Figura 21 apresenta a montagem do mosaico com as placas cerâmicas de alumina.

Figura 21 - Montagem do mosaico com as placas de alumina para ser inserida na camada frontal do Sistema de Blindagem Multicamada.



Fonte: Do Autor

Posterior à montagem dos mosaicos com os espaçadores, o mosaico foi colado em um dos lados com fita crepe. Em seguida, foi realizada a retirada dos espaçadores.

4.3.4.1.2 Camada intermediária – Materiais poliméricos

Após o processo de prensagem, as placas dos compósitos foram desmoldadas da placa metálica.

Em seguida, as placas passaram por etapa de corte na configuração circular com 200 mm de diâmetro. Este formato teve por finalidade se adequar ao formato e tamanho da placa de alumínio, utilizado como camada posterior. Após o corte, foi realizado o desbaste da placa de compósito, por meio de um disco flap, com a finalidade de dar o acabamento desejado. A Figura 22 mostra a placa de compósito COMP POL, no formato circular, com diâmetro de 200 mm e devidamente pronta para teste.

Figura 22 - Placa de compósito COMP POL.



Fonte: Do Autor.

4.3.4.1.3 Camada posterior – Placa de alumínio

A camada posterior foi composta pela placa de alumínio de liga 6063, com dimensão de 208 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. As placas de alumínio foram colocadas em uma solução de ácido sulfúrico a 25% (vol), contendo 67 g/L de dicromato de potássio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), durante 15 min, a fim de formar *pits* e aumentar a área superficial. Após o ataque do material com o tratamento químico, os tarugos foram lavados com detergente e álcool etílico e secos com pano de algodão.

Após o lixamento da superfície do material, a rugosidade superficial foi determinada, de acordo com a norma JIS B0601-1994, com o rugosímetro Mitutoyo SurfTest S-210. A rugosidade do tarugo de alumínio pode interferir na qualidade da aderência da resina epóxi e, conseqüentemente, afetar a qualidade da adesão das placas dos compósitos.

4.3.4.2 Montagem dos painéis balísticos do SBM em estudo

A montagem dos painéis balísticos do SBM em estudo compreende as seguintes etapas: primeiramente, a colagem do compósito no tarugo de alumínio e, em seguida, a colagem do mosaico de placa cerâmica de alumina sobre o compósito.

Inicialmente, foi preparada a cola epóxi Araldite, um adesivo bicomponente. A preparação seguiu as recomendações fornecidas pelo fabricante Huntsman®. A quantidade empregada de cola foi suficiente para garantir uma espessura de 1 mm; esta quantidade foi definida com o intuito de formar uma camada adesiva sobre o material. A cola foi passada

diretamente sobre o tarugo de alumínio e espalhada manualmente com uma espátula, até formar uma camada uniforme, mantendo o cuidado para não apresentar bolhas e evitando espaços vazios que reduzem o funcionamento do SBM.

Logo após, foi colocado o compósito no formato circular, em cima do tarugo de alumínio molhado com a cola epóxi. Os materiais ficaram por um período de 72 h de descanso, a fim de obter a cura completa.

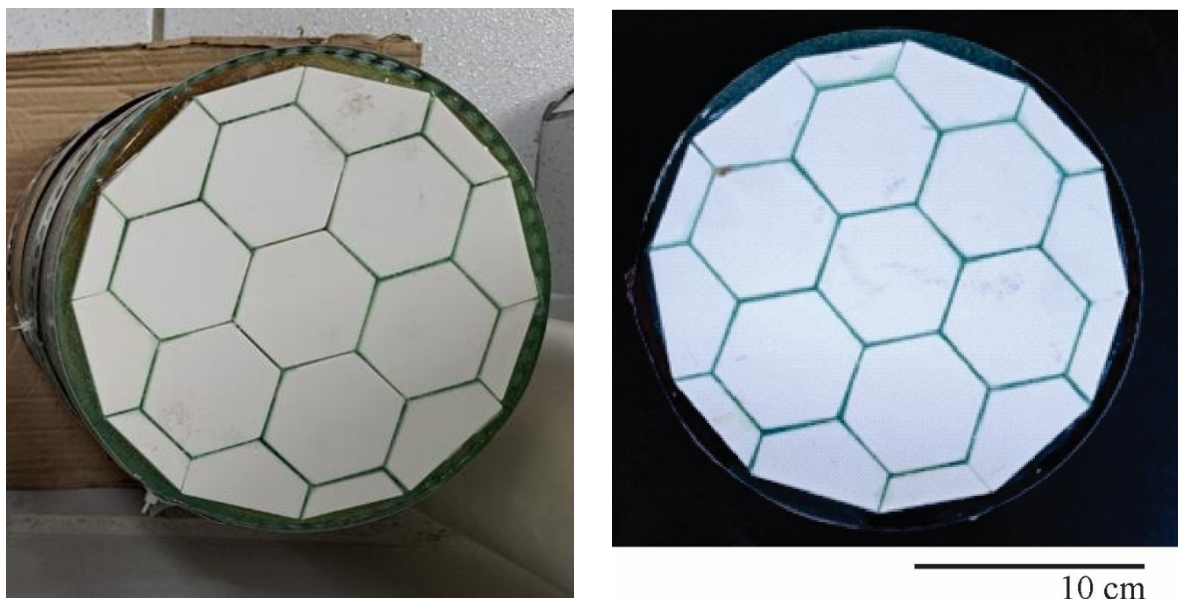
Na preparação dos painéis balísticos do SBM em estudo, ocorreu o controle para evitar o escoamento da cola epóxi, por meio da aplicação de uma fita metálica ao redor do tarugo de alumínio e a quantidade da cola epóxi foi controlado pela pesagem do volume a ser aplicado.

Após a cura da colagem do compósito no tarugo de alumínio, ocorreu a colagem dos mosaicos de placa cerâmica de alumina no compósito, por meio da cola epóxi. A quantidade de cola epóxi utilizada foi de 2 mm de espessura, com o objetivo de formar a camada adesiva. A cola epóxi foi passada sobre o compósito e espalhada manualmente com uma espátula, até formar uma camada uniforme.

Em seguida, foi colocado o mosaico de placa cerâmica de alumina (placa de cerâmica colada em um dos lados com uma fita crepe) sobre o compósito.

Logo após a colagem foi inserido sobre o mosaico de placa cerâmica um peso de 4 kg, com o objetivo de compactar e favorecer o preenchimento total dos espaços vazios entre as placas cerâmicas. Os materiais ficaram por um período de 72 h de descanso, a fim de obter a cura completa. Após a cura, a fita crepe foi completamente removida do mosaico de placas cerâmicas. Desta maneira, a montagem do Sistema de blindagem multicamada em estudo foi finalizado, de acordo com a Figura 23.

Figura 23 - Montagem do sistema de blindagem multicamada em estudo finalizado.



Fonte: Do Autor.

Após a montagem dos painéis balísticos ocorreu a denominação dos painéis, de acordo com a Tabela 17.

Tabela 17 - Denominação dos painéis balísticos do sistema de blindagem multicamada em estudo.

Camada Frontal	Camada Intermediária - Compósitos	Camada Posterior	Denominação do painel obtido
Mosaico em placa cerâmica de alumina	COMP REF	Placa de alumínio	PLACA REF
	COMP POL		PLACA POL
	COMP NYL		PLACA NYL
	COMP DYN		PLACA DYN

Fonte: Do Autor.

4.3.5 Ensaio de Blindagem Balística

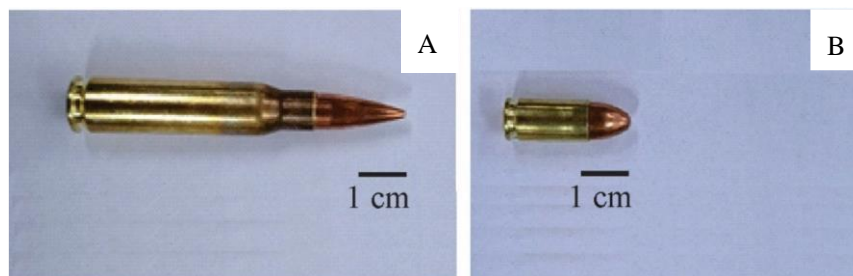
Nesse tópico foram apresentados os ensaios de blindagem balística, de acordo com o fluxograma geral.

4.3.5.1 Ensaio de Velocidade Residual

Os ensaios balísticos de velocidade residual foram submetidos no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), Rio de Janeiro – RJ. Foram ensaiadas quatro amostras para cada compósito (COMP REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DIN). Para realização dos ensaios, o

equipamento utilizado para o dispositivo de tiro foi um modelo B290 HPI (High Pressure Instrumentation), e um provete equipado com mira laser. Para a realização das medições de velocidade foi utilizado um radar Doppler, modelo SL – 520P Weibel e o *software* Weibel Remote Doppler System – versão 1.5.50.29 Doppler Signal Saved foi utilizado para processar os dados retirados do radar. A munição utilizada para este ensaio foi 7,62 mm, com peso de 9,3 g para as placas de compósitos COMP POL, COMP NYL, COMP DYN. Para as placas de compósitos COMP REF foi utilizada a munição 9 mm, com peso de 8,0 g, de acordo com a Figura 24.

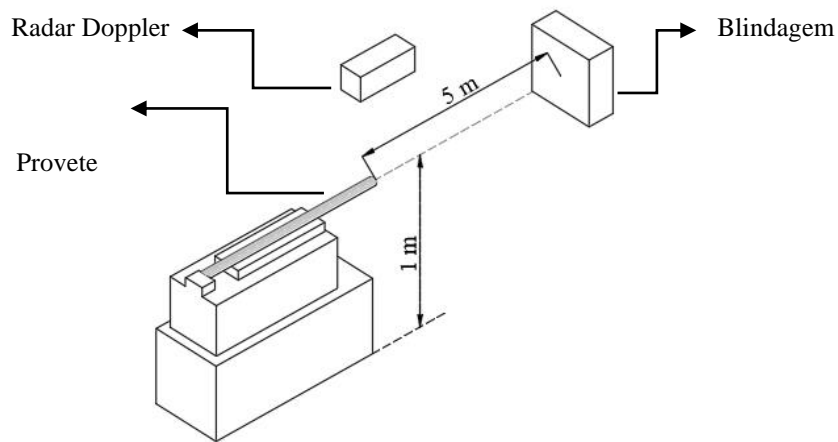
Figura 24 - Munição 7,62 mm e munição 9 mm utilizada nos ensaios balísticos: A - Munição 7,62 mm, B - Munição 9 mm.



Fonte: Do Autor.

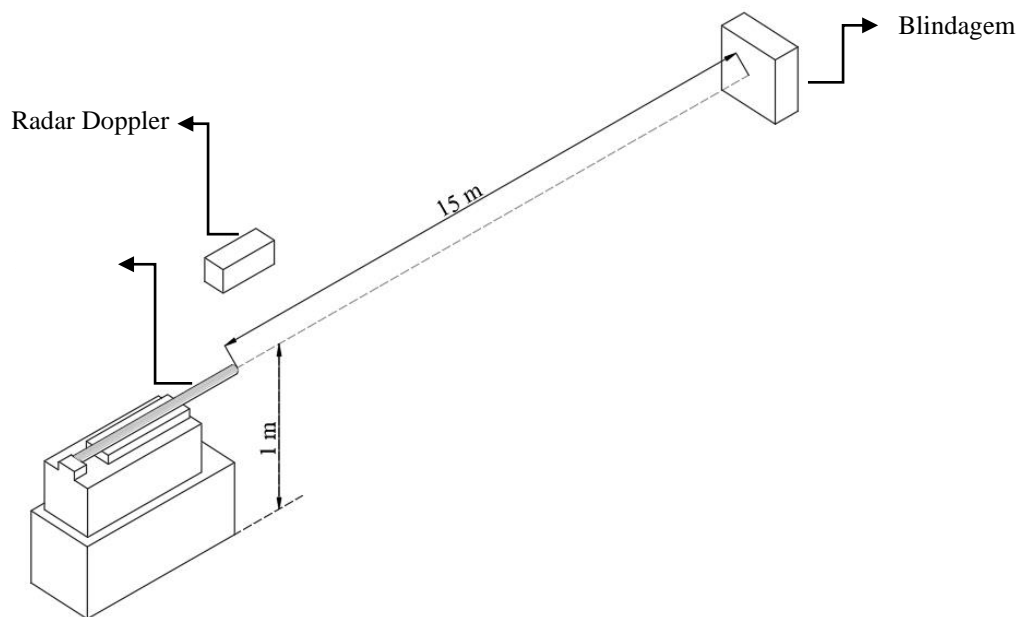
Para as placas de compósitos COMP REF, os disparos foram realizados a uma distância de 5 m do alvo, conforme especificado na norma NIJ 0101.06 (NIJ 2008) e o ângulo de incidência do projétil no alvo de 90° , de acordo com o croqui apresentado na Figura 25. Para as placas de compósitos COMP POL, COMP NYL, COMP DYN, os disparos foram realizados a uma distância de 15 m do alvo, conforme a Figura 26 e seguiu de acordo o especificado na norma NIJ 0101.06 (NIJ 2008) e o ângulo de incidência do projétil no alvo de 90° .

Figura 25 - Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos com as placas de compósito COMP REF.



Fonte: Do Autor.

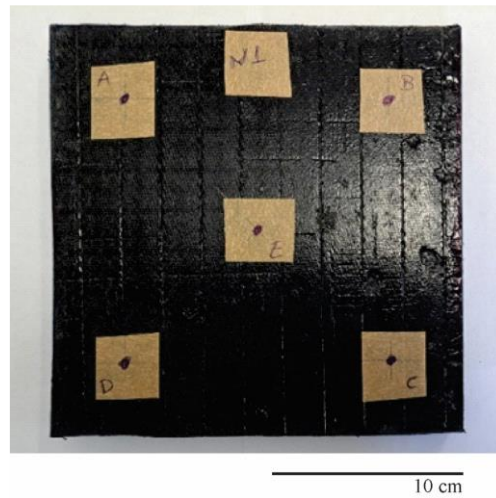
Figura 26 - Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos com as placas de compósitos COMP POL, COMP NYL e COMP DYN.



Fonte: Do Autor.

Utilizou-se os dados obtidos pelo radar Doppler para calcular a velocidade limite por meio da Equação 7. Foram considerados quatro placas para cada material a ser avaliado, sendo que cada placa recebeu cinco tiros, sendo quatro em cada lateral e um no centro da amostra Figura 27, totalizando 80 tiros.

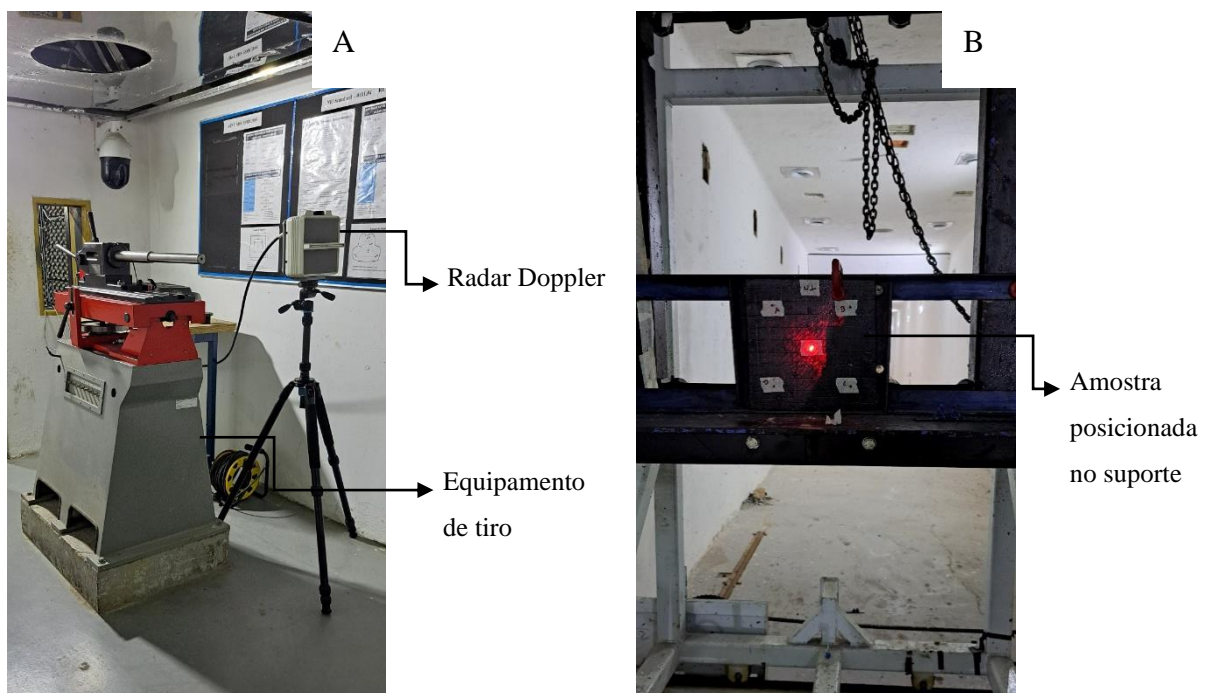
Figura 27 - Placa de compósito COMP NYL com os 5 pontos (ponto A, B, C, D e E) devidamente marcados.



Fonte: Do Autor.

A Figura 28 apresenta o dispositivo de tiro utilizado e também as condições em que a amostra foi posicionada.

Figura 28 - Condições de ensaio executados no CAEx: A - Dispositivo de tiro utilizado no ensaio de velocidade residual, B - Apresentação das condições em que a amostra foi posicionada no ensaio de velocidade residual.



Fonte: Do Autor.

Para se determinar o limite balístico para projeteis de elevada velocidade, o modelo analítico estima o VL. A velocidade limite é fundamentada em parâmetros como a energia absorvida pelo sistema de blindagem.

Pode ser determinada a energia absorvida pela diferença de energia cinética, conforme Equação 6.

Equação 6

$$E_{abs} = \frac{M(V_0^2 - V_R^2)}{2}$$

onde:

E_{abs} = energia absorvida;

M = massa do projétil;

V_0 = velocidade do projétil imediatamente antes do impacto;

V_R = velocidade residual do projétil após perfurar o alvo.

Quando toda energia cinética do projétil é absorvida pelo sistema de blindagem, a velocidade residual é igual a zero. É possível, assim, se estimar a velocidade limite por meio da relação entre a energia absorvida, e a massa do projétil; conforme demonstra a Equação 7.

Equação 7

$$V_L = \sqrt{\frac{2E_{abs}}{M}}$$

onde:

V_L = velocidade limite;

E_{abs} = energia absorvida;

M = massa do projétil.

4.3.5.2 Ensaio de Profundidade de Penetração – DOP

O teste de penetração (DOP) é um método eficaz para avaliação do desempenho de sistemas balísticos. O teste consiste em medir a profundidade de penetração do projétil na

placa de apoio (P_{REF}) e comparar com a medição do projétil em uma placa de apoio com a proteção da camada frontal e da camada intermediária (P_{RES}). Desta maneira, é possível determinar a avaliação do desempenho balístico analisando a diferença entre a penetração do projétil no suporte desprotegido e no suporte protegido pelas camadas frontais e intermediária (Dresch *et al.*, 2024).

Na literatura é possível encontrar várias equações a fim de avaliar o desempenho de sistemas balísticos em ensaios de profundidade de penetração (DOP). O item 4.3.5.2.1 apresenta equações, pelas quais é possível investigar possíveis materiais com aplicação em sistemas de proteção balística.

Todos os ensaios com a blindagem multicamada foram executados de acordo com a norma NIJ- 0108.01 (*National Institute of Penetration*), por meio do ensaio de profundidade de penetração DOP (*depth of Penetration*). Os testes foram realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), localizado no Rio de Janeiro. Foram ensaiadas duas amostras para cada sistema (PLACA REF, PLACA POL, PLACA NYL e PLACA DYN). Para a realização dos ensaios, foram utilizados como munição projétil de calibre 7,62 mm, com ponta perfurante, com peso de 9,8 g, conforme Figura 29.

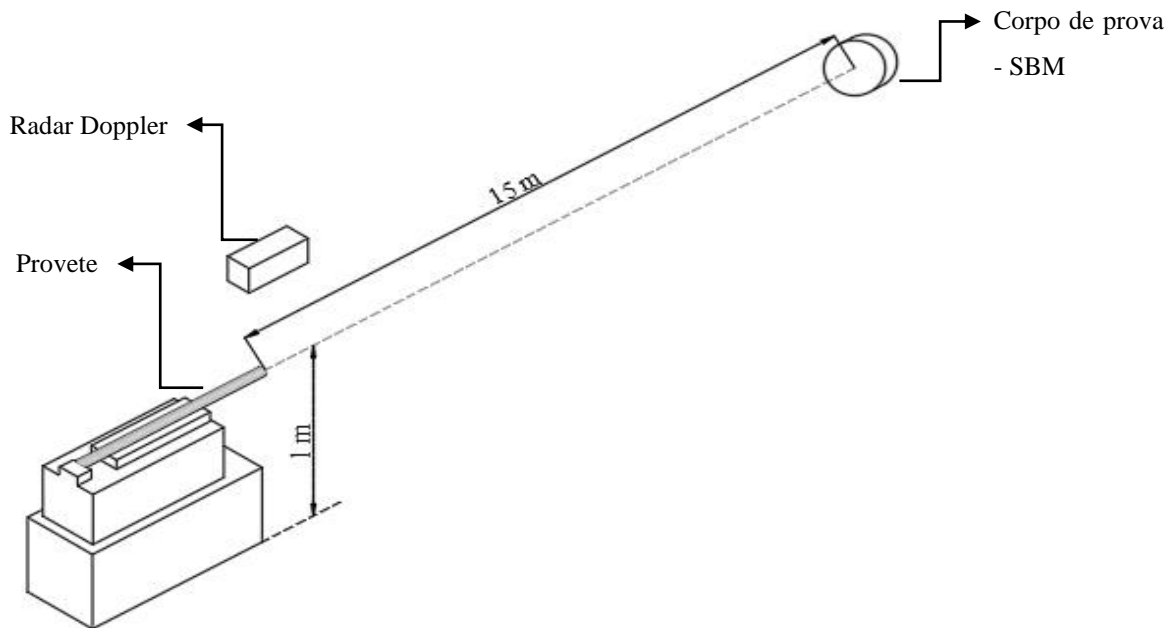
Figura 29 - Projétil calibre 7,62 mm perfurante utilizado nos ensaios balísticos.



Fonte: Do Autor.

A Figura 30 mostra o esquema do sistema utilizado para realização dos ensaios. As munições foram disparadas a partir de um provete (arma). A pontaria foi feita por meio de um feixe de laser, conforme indicada na Figura 30 por uma linha pontilhada que mostra a trajetória do projétil.

Figura 30 - Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos com os corpos de prova do Sistema de Blindagem Multicamada (SBM) estudados.



Fonte: Do Autor.

As placas de SBM desenvolvidas na pesquisa possuem configuração circular, com 200 mm de diâmetro. A partir das quatro tipologias de compósitos desenvolvidos na pesquisa foram confeccionadas quatro placas de SBM, a chamada PLACA REF, desenvolvida a partir do COMP REF, a PLACA POL, a partir do COMP POL, a PLACA NYL, a partir do COMP NYL e por fim, a PLACA DYN, a partir do COMPR DYN. Os compósitos desenvolvidos foram utilizados na camada intermediária. Os ensaios de profundidade de penetração ocorreram com as quatro tipologias de placas.

A velocidade do projétil foi medida com o auxílio de um radar doppler. Os corpos de provas ensaiados foram fixados a uma distância de 15 m do provete (arma), conforme especificado pela norma NIJ- 0108.01. Determinada a velocidade do projétil, por meio da barreira óptica, foi possível calcular a energia de impacto do projétil a partir da Equação 8.

Equação 8

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2$$

onde:

E = energia inicial do projétil (J);

M = massa do projétil (g);

v = velocidade do projétil (m/s).

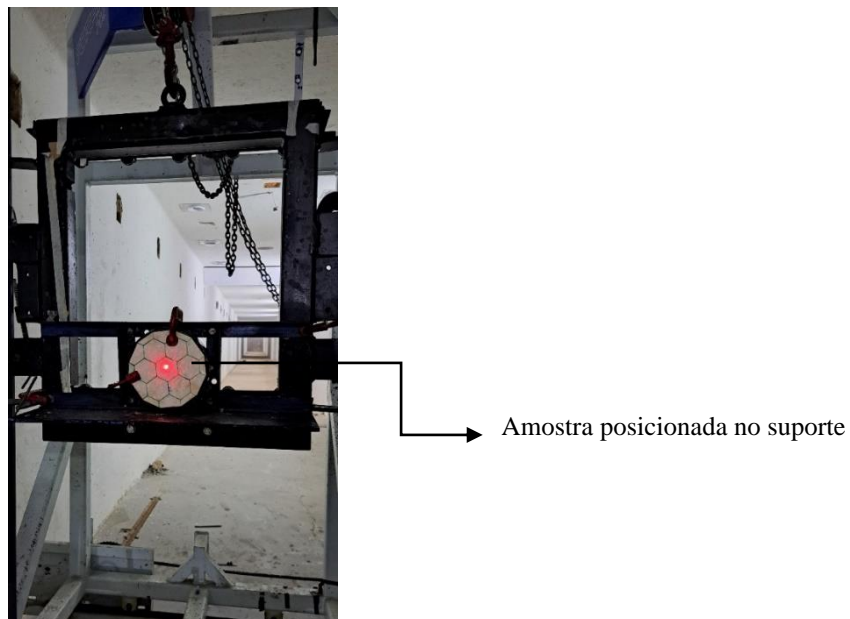
Para o ensaio de profundidade de penetração, foram ensaiadas duas amostras de cada sistema de placas de compósitos multicamadas desenvolvidas na presente pesquisa. Para cada amostra foram feitos dois ensaios de DOP

No primeiro ensaio, o compósito e a placa de alumínio não foram perfurados pelo projétil. Nesse caso, a energia cinética do projétil foi contida na placa cerâmica, sem deformações mecânicas observáveis no compósito. No entanto, o choque de onda resultou na degradação do sistema, descolando as placas cerâmicas da amostra.

Referente ao primeiro ensaio, a Figura 31 apresenta o corpo de prova a ser ensaiado fixado no suporte mostrando o feixe de laser pontuando o alvo.

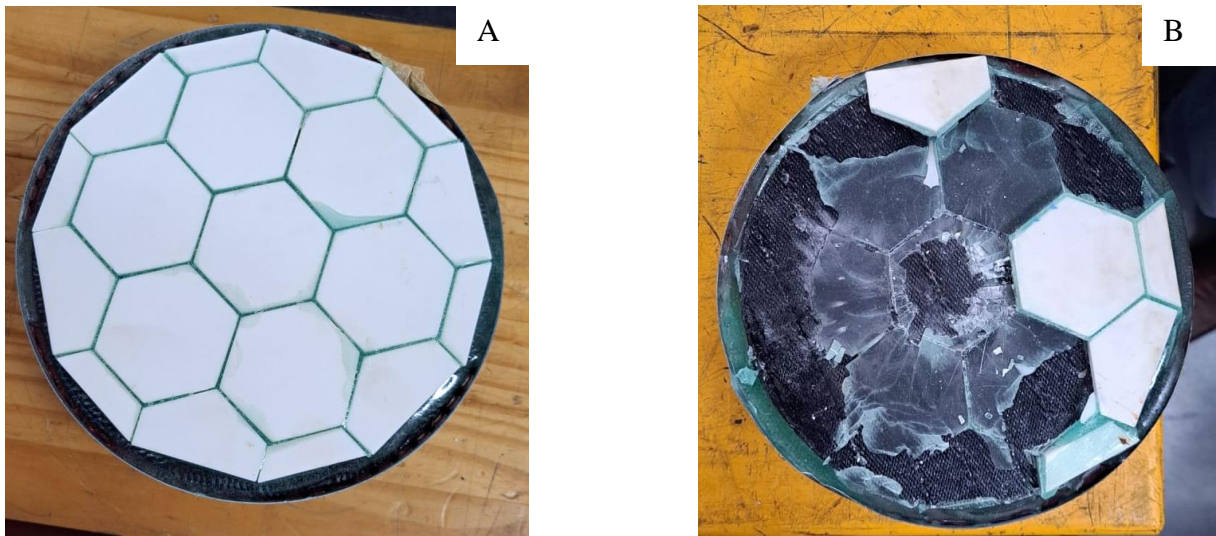
A Figura 32 apresenta os sistemas desenvolvidos na pesquisa antes e após o primeiro ensaio de DOP.

Figura 31 - Corpo de prova a ser ensaiado fixado no suporte mostrando o feixe de laser pontuando o alvo.



Fonte: Do Autor.

Figura 32 - Amostras SBM desenvolvidas na pesquisa, antes e após o primeiro ensaio de DOP: A - Amostra antes do ensaio, B - Amostra após o ensaio.



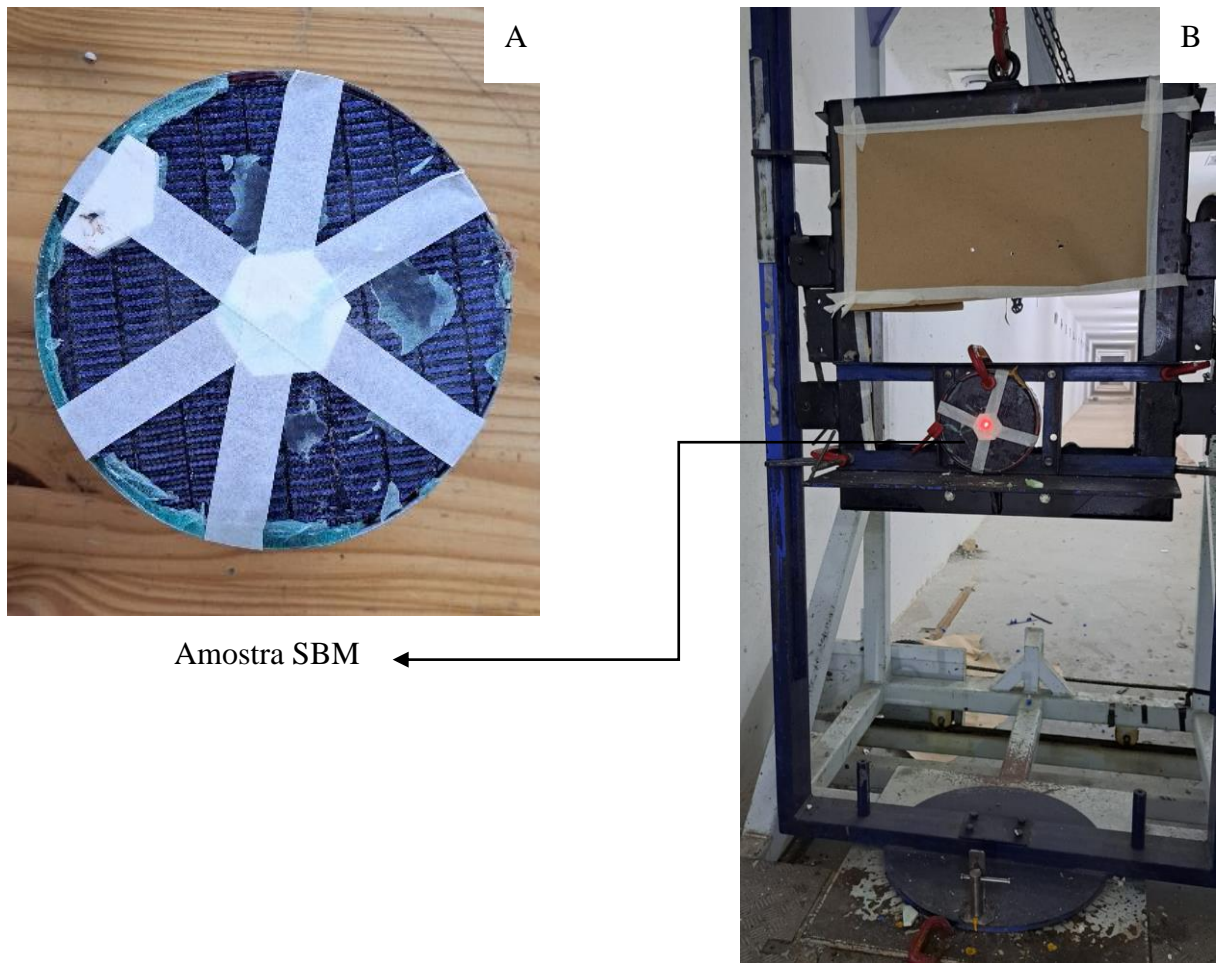
Fonte: Do Autor.

Após realizar o primeiro ensaio de DOP com as oito amostras do SBM desenvolvidas na pesquisa, foi realizado o segundo ensaio de DOP. O segundo ensaio ocorreu com as oito amostras utilizadas no primeiro ensaio, sendo que para este ensaio, as placas cerâmicas foram coladas e centralizadas com fita adesiva, conforme mostra a Figura 33.

O sistema SBM foi montado utilizando os mesmos critérios do primeiro ensaio de DOP.

Nesse caso, uma placa cerâmica foi posicionada no centro da amostra, com o objetivo de absorver a maior parte da energia do impacto. Essa placa foi fixada com fita adesiva, representando o sistema completo. Quando o projétil atingiu a amostra, a cerâmica (camada frontal) absorveu a energia do impacto e os fragmentos remanescentes passaram pela placa de compósito em estudo (camada intermediária), atingindo a placa metálica (camada posterior). A partir dos dados obtidos na placa metálica, foi possível determinar a energia residual que atravessou o sistema de blindagem multicamada.

Figura 33 - Amostras de SBM desenvolvidas na pesquisa, no segundo ensaio de DOP.



Fonte: Do Autor.

Para o segundo ensaio, as mesmas placas usadas no primeiro ensaio foram reutilizadas, uma vez que, tanto o compósito, quanto a placa de alumínio não obtiveram penetração do projétil no ensaio inicial. Foi então, colocada uma placa cerâmica de alumina no mesmo local do primeiro disparo e fixada com fita adesiva. Este procedimento foi repetido para todas as oito amostras desenvolvidas na pesquisa, usando os mesmos critérios do primeiro ensaio de DOP.

4.3.5.2.1 Avaliação de Desempenho Balístico

O desempenho balístico é avaliado por meio de um fator adimensional que combina a eficiência de massa e a eficiência de espessura do material, de acordo com (Madhu *et al.*, 2005).

O desempenho balístico dos sistemas foi calculado fazendo uma comparação entre a penetração de referência em placa de alumínio (P_{REF}) para a penetração residual na placa de apoio (P_{RES}). A P_{REF} refere-se à profundidade de penetração do projétil na placa de alumínio

apenas. A P_{REF} é estipulada como uma medida de referência. A P_{RES} refere-se à penetração residual na placa de apoio (alumínio) quando apoiada as placas de blindagem multicamadas de várias espessuras.

Para a penetração de referência em placa de alumínio (P_{REF}), foi utilizada como base, os valores analisados na pesquisa de Polla *et al.* (2019). A profundidade de penetração para as placas de apoio sem proteção é de 63 ± 4 mm.

Referente a penetração residual na placa de apoio (alumínio) quando apoiada as placas de blindagem multicamadas de várias espessuras P_{RES} , os valores foram coletados por meio de medições. Com o auxílio de uma pistola elétrica 12 W, bivolt, aplicadora de cola quente, primeiramente, foi aplicado manualmente cola quente no orifício da placa de alumínio. Após secagem da cola quente, o molde foi retirado para medição. A medição ocorreu manualmente por meio do paquímetro digital Caliper 150 mm (6"). Para cada molde foi feito uma média dos valores extraídos, bem como o desvio padrão.

Desta maneira, o desempenho balístico do SBM em termos de eficiência de espessura do material (E_t), foi calculado conforme Equação 9, de acordo com Madhu *et al.* (2005), pelo qual o T_t trata-se da espessura de placas de blindagem multicamadas (compósito e placa cerâmica de alumínio).

Equação 9

$$E_t = \frac{P_{REF} - P_{RES}}{T_t}$$

onde:

E_t = eficiência de espessura;

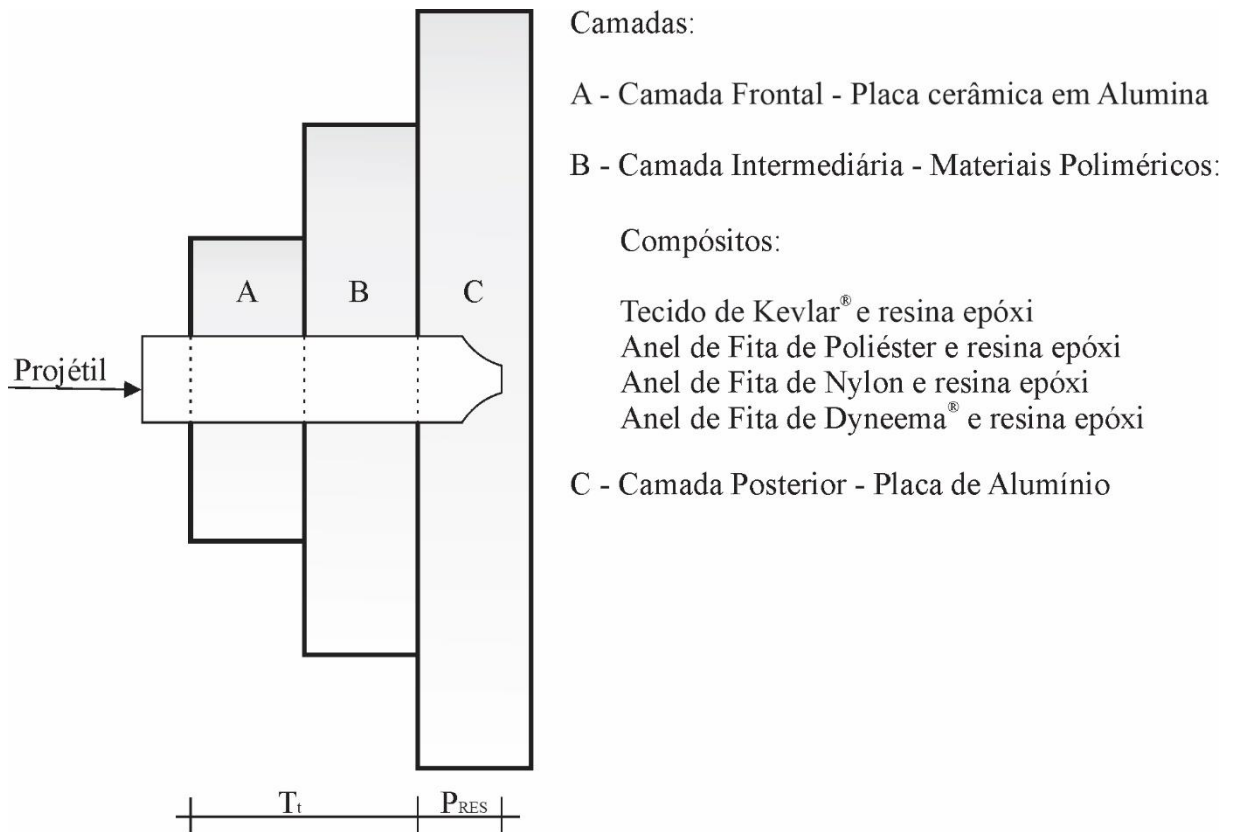
P_{REF} = profundidade de penetração de referência na placa de alumínio;

P_{RES} = profundidade de penetração residual na placa de apoio - alumínio;

T_t = espessura de placas de blindagem multicamadas (compósito e cerâmica).

A Figura 34 mostra um esquema de representação do sistema de blindagem balística nos testes balísticos.

Figura 34 - Esquema de representação do SBM nos testes balísticos.



Fonte: Do Autor.

O desempenho balístico do SBM é calculado em termos de eficiência de massa (E_m), de acordo com a Equação 10, de acordo com Madhu *et al.* (2005):

Equação 10

$$E_m = E_t * \frac{\rho_{ref}}{\rho_t}$$

onde:

E_m = eficiência de massa;

E_t = eficiência de espessura;

ρ_{ref} = densidade do alumínio;

ρ_t = média ponderada da densidade.

A densidade aparente do alumínio (ρ_{ref}) foi determinada pelo método geométrico. Quatro tarugos cilíndricos de alumínio, liga 6063, foram medidos com paquímetro digital Caliper 150 mm (6"). A massa da amostra foi determinada em balança digital, marca Toledo do Brasil, modelo 9094C/6, com leitura de 5 g. A densidade foi determinada conforme Equação 12 (Akiyoshi *et al.*, 2001):

Equação 11

$$\rho_{ref} = \frac{m}{v}$$

onde:

ρ_{ref} = densidade aparente, em g/cm³;

m = massa corpo de prova, em g;

v = volume do tarugo cilíndrico de alumínio, em cm³.

A média ponderada da densidade (ρ_t) foi extraída por meio da Equação 12.

Equação 12

$$\rho_t = \frac{(\rho_1 \times t_1) + (\rho_2 \times t_2)}{(t_1 + t_2)}$$

onde:

ρ_t = média ponderada da densidade;

ρ_1 = densidade do material que compõe a camada frontal – cerâmica alumina;

t_1 = espessura da camada frontal – cerâmica alumina;

ρ_2 = densidade do material que compõe a camada intermediária – compósito (COMP REF, COMP POL, COMP NYL ou COMP DYN);

t_2 = espessura da camada intermediária – COMP REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DYN.

O desempenho balístico do SBM é calculado em termos de fator de eficiência balística q^2 , conforme Equação 13, de acordo com (Madhu *et al.*, 2005):

Equação 13

$$q^2 = E_m * E_t$$

onde:

q^2 = fator de eficiência balística;

E_m = eficiência de massa;

E_t = eficiência de espessura.

O fator de eficiência balística relaciona os fatores de eficiência de massa e espessura. De acordo com Madhu *et al.* (2005), valores ≥ 0 para E_t e E_m indicam que o material que está sendo avaliado, neste caso as camadas intermediária e frontal, são mais finos e mais leves, quando comparado com a camada posterior, no caso a placa de alumínio que foi titulado como o material de referência equivalente, para a ameaça especificada e são indicativos de desempenho superior.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

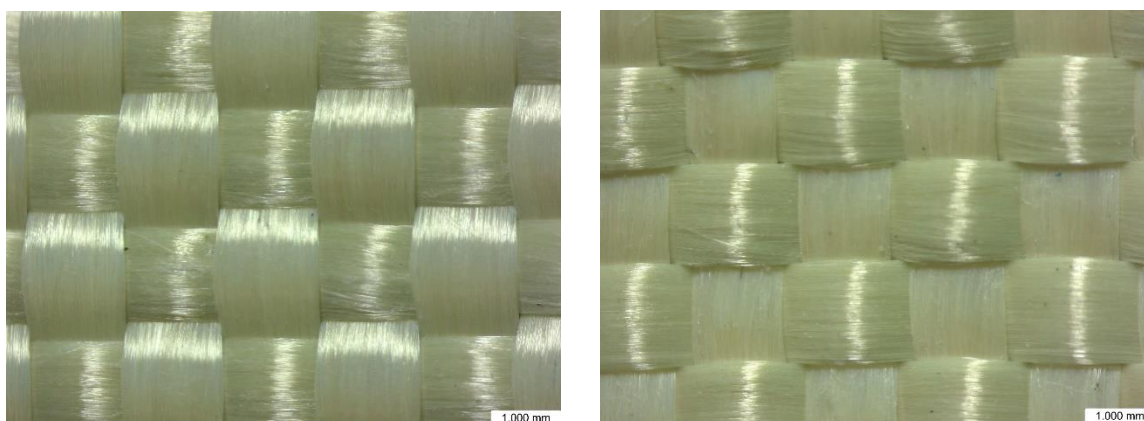
Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios executados na presente pesquisa.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Análise visual do Kevlar® e das fitas de amarração

Com base na imagem do tecido de Kevlar®, apresentada na Figura 35, observa-se que o tecido apresenta uma textura lisa. A superfície se assemelha a um acabamento fino que é típico de materiais que apresentam baixa fricção e resistência ao desgaste. Em termos de maleabilidade, muito embora a imagem não permita determinar sua flexibilidade, as imagens sugerem que o material possui flexibilidade, permitindo que seja moldado sem perder sua integridade estrutural. Quanto ao trançado de tecido, a imagem revela que é tecido em um padrão de cruz regular. As fibras estão entrelaçadas nas coordenadas x e y , em um padrão coordenado, o que é importante para a distribuição uniforme de espessura e para aumentar a resistência à penetração. A coloração amarela clara é característica do Kevlar® e destaca a uniformidade e precisão do entrelaçamento da fibra. A análise das características sugere que se trata de um material de alto desempenho, eficaz para aplicações em que exigem durabilidade e resistência.

Figura 35 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika, referente ao tecido de Kevlar®.



Fonte: Do Autor.

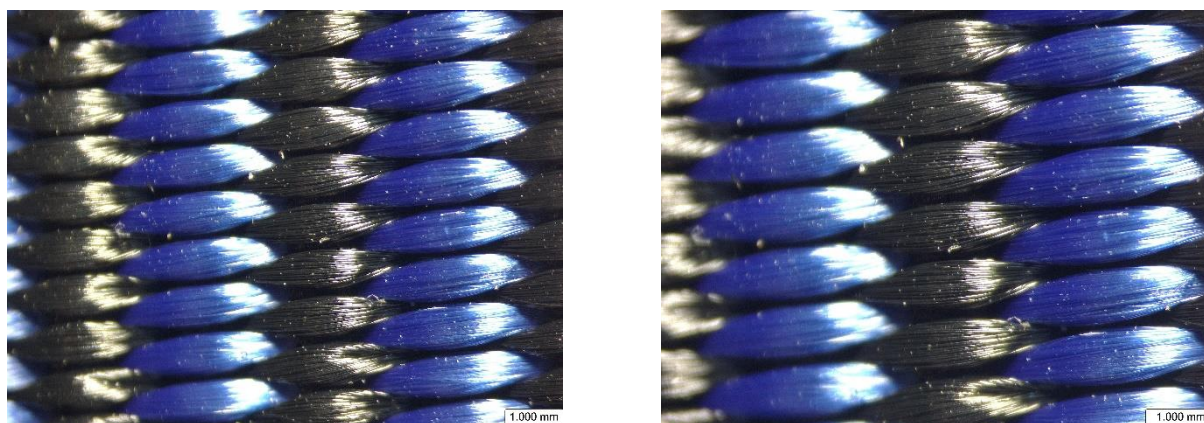
Segundo a observação da imagem obtida é possível identificar que a fita de amarração de poliéster possui textura de superfície lisa e apresenta leve brilho. Se tratando da maleabilidade,

o material apresenta uma estrutura aparentemente flexível, permitindo ajuste fácil a diferentes formatos. Essa maleabilidade é útil em configurações que bloqueiam adaptação sem perda de resistência estrutural.

Em relação ao traçado dos fios, pode-se observar que é bem definido e consistente, com alinhamento de fios uniforme. Os fios estão entrelaçados na coordenada y. O padrão denso entre os fios contribui para a resistência mecânica, auxiliando na absorção e disseminação de impactos balísticos. A imagem extraída do microscópio do anel do tecido de amarração de poliéster exibe um núcleo em um azul vibrante intercalada com um tom escuro em preto. As fibras são organizadas de maneira idêntica, formando um padrão visual e entrelaçado. A sequência de cores está localizada na coordenada x em uma sequência de azul, uma sequência de preto e assim sucessivamente.

Essas características sugerem que a fita de amarração de poliéster pode ser adequada para uso em sistemas de blindagem multicamadas, oferecendo uma combinação de resistência, flexibilidade e eficiência no custo. A Figura 36 apresenta as imagens da fita de amarração de poliéster extraídas do microscópio.

Figura 36 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika, referente à fita de amarração de poliéster.



Fonte: Do Autor.

Baseado nas imagens extraídas da fita de amarração de *Nylon*, observou-se que a fita apresenta uma textura lisa e uniforme. As fibras estão bem homologadas, fornecendo uma superfície que minimiza atritos. Quanto a maleabilidade, é possível identificar que o material apresenta um padrão estruturado das fibras, sendo assim, indica que a fita possui boa flexibilidade, permitindo que seja dobrada ou moldada sem comprometer sua integridade estrutural. Em relação ao trançado dos fios, pode-se afirmar que o entrelaçamento é apertado e

consistente, garantindo resistência e durabilidade. Essa organização ajuda na distribuição uniforme. Os fios são entrelaçados inclinadamente, a um ângulo de 72° em relação a coordenada x . A fita possui uma cor preta profunda.

A Figura 37 apresenta as imagens referente a fita de amarração de *nylon* extraídas do microscópio Biotika.

Figura 37 - Imagens extraídas do microscópio Biotika, referente à fita de amarração de *nylon*.



Fonte: Do Autor.

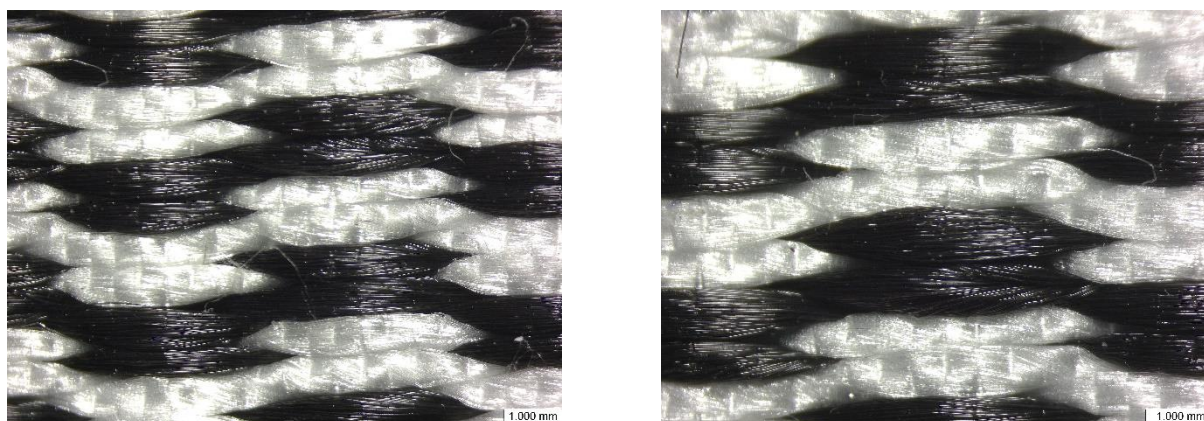
Referente as imagens extraídas do anel da fita de amarração de Dyneema®, pode-se concluir que em relação à textura do material, a fita apresenta uma superfície lisa e brilhante, aparentando ser de baixo atrito. Tais características são indicativas de resistência ao desgaste satisfatória e também favorece o processo durante a fabricação de compósitos. Quanto à maleabilidade da fita de amarração, aparentemente, é possível identificar que a fita possui certo grau de flexibilidade. Essa característica garante que a fita possa ser dobrada e/ ou ajustada a diferentes configurações. Essa característica é um critério importante, uma vez que a fita está sendo desenvolvida para ser usada em sistemas de blindagem multicamadas que exigem simultaneamente resistência e flexibilidade. Em relação à geometria do trançado, pode-se concluir que a tira da fita possui um entrelaçamento apertado e homogêneo, o que proporciona segurança estrutural apropriada para a função ao qual está sendo projetada.

Os fios estão entrelaçados na coordenada y . Essa característica é importante para a capacidade de absorção de impactos, pois uma trama densa pode ajudar a dissipar energia de maneira eficaz e aumentar a resistência ao impacto balístico. A imagem da fita de amarração de Dyneema® revela um contraste nítido entre faixas brancas e pretas. A combinação dessas cores cria um padrão visual, pelo qual, os tons claros apresentam um brilho sutil, destacado

pelo entrelaçamento preciso das fibras. A sequência de cores está organizada nas coordenadas y , em uma sequência em preto, uma sequência em branco e assim sucessivamente.

Essas propriedades indicam que a fita de amarração de Dyneema® possui atributos para ser utilizada em sistemas de blindagem multicamadas. A Figura 38 apresenta as imagens referente a fita de amarração de Dyneema®.

Figura 38 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika, referente à fita de amarração de Dyneema®.



Fonte: Do Autor.

5.1.2 Porosidade do tecido de Kevlar® e das fitas de amarração

A Tabela 18 apresenta as médias da medição dimensional do tecido de Kevlar® e das fitas de amarração utilizados na presente pesquisa. A tabela apresenta o volume e a massa dos materiais em estudo, bem como, as médias dos resultados experimentais de densidade aparente a seco e real e porosidade total.

Tabela 18 - Tabela Dimensional, densidade e porosidade do Tecido de Kevlar®, da fita de poliéster, anel de fita de nylon e anel de fita de Dyneema®.

Polímeros	Comp. (mm)	Larg. (mm)	Esp. (mm)	Volume (mm ³)	Massa (g)	Densidade Aparente (g/cm ³)	Densidade Real (g/cm ³)	Porosidade Total (%)
Tecido de Kevlar®	206	203	0,33	13799,94	20,53	1,48	1,93	23,05
Poliéster	200,61	19,42	1,59	6196,52	8,09	1,30	1,44	9,75
Nylon	200,95	19,47	2,19	8568,23	8,27	0,96	1,26	23,93
Dyneema®	202,72	15,04	1,86	5688,92	5,70	1,00	1,27	21,63

Fonte: Do Autor.

A partir dos dados é possível perceber que o volume do tecido de Kevlar® é superior quando comparado com os demais materiais, com 13799,94 mm³, o que pode fornecer uma

capacidade de absorção de impacto superior devido à maior área de dispersão de energia balística. No entanto, materiais com volumes menores, como no caso a fita de Dyneema®, que apresenta volume 5688,92 mm³, podem favorecer a leveza e a flexibilidade do compósito.

O tecido de Kevlar®, utilizado como referência apresenta a maior densidade aparente, com 1,48 g/cm³, indicando que se trata de um material mais denso em comparação aos outros materiais presentes na pesquisa. As fitas de amarração de *nylon* apresentam a menor densidade aparente quando comparado com os demais materiais estudados, com 0,96 g/cm³, apontando que é menos denso que os outros materiais e também apresenta menor densidade real, em comparação ao Kevlar®, poliéster e Dyneema®, com 1,26 g/cm³.

A maior densidade aparente e real apresentada pelo Kevlar®, indica que se trata de um material denso, favorecendo a capacidade de resistir ao impacto balístico. Esta característica torna o Kevlar® uma escolha comum para a segunda camada de sistemas de blindagem multicamadas. Nesta camada é necessário absorver e dissipar a energia do projétil e dos fragmentos resultantes da camada frontal, no caso a cerâmica.

Em contrapartida, o anel de fita de *nylon*, apresenta menor densidade aparente e real, indica menor capacidade e, conseqüentemente, uma capacidade inferior de dissipar energia de maneira eficiente. No entanto, o *nylon* devido a sua leveza, o torna útil em sistemas de blindagem multicamada, em que a redução de peso é um critério importante. O uso do anel de fita de *nylon* pode ser interessante em aplicações em que o custo é um fator importante.

Dentre os anéis de fita de amarração, o material que apresenta a maior massa é o anel de fita de *nylon*, com peso de 8,27 g e o material mais leve identificado é o anel de fita de Dyneema®, com 5,70 g.

O anel de fita feito de Dyneema® tem densidade intermediária e representa um material inovador na área de blindagem balística. É o material que apresenta menor massa. Portanto, é interessante usá-lo na blindagem leve, ou seja, no revestimento de coletes balísticos e blindagens corporais.

Estes materiais desempenham papéis distintos quando integrados a um SBM, porém, ao mesmo tempo complementares. O Kevlar® é denso, desta maneira, serve como uma barreira robusta contra a penetração. O anel de fita de *nylon*, por outro lado, é leve e pode ser utilizado em configurações em que a mobilidade e o custo são fatores críticos. O anel de fita de Dyneema® oferece uma importante relação ao peso e, portanto, é uma escolha satisfatória para otimizar o SBM.

Levando em consideração aos dados de porosidade total do tecido de Kevlar® e dos anéis de fita de amarração, é possível perceber que o anel de fita de amarração de *nylon* possui maior

porosidade, quando comparado com os demais materiais, com 23,93%, seguido do tecido de Kevlar®, com 23,05% e 21,63% para o anel de fita de Dyneema®. O material com menor porosidade é o anel de fita de poliéster, com 9,75%.

A porosidade apresentada no anel de fita de *nylon* pode tornar uma desvantagem para a aplicação do material em sistema de blindagem multicamada. A propriedade porosidade apresentada no material significa que há ocorrência de vazios que enfraquecem a resistência ao impacto. Entretanto, a porosidade pode ser positiva na capacidade de absorção de energia.

A fibra do Kevlar® é um material denso, porém é possível verificar que o tecido de Kevlar® possui espaços vazios em sua estrutura. Isso se dá provavelmente por conta do entrelaçamento dos fios do material.

O poliéster apresenta a menor porosidade, o que reflete em uma estrutura mais densamente compactada. Esta característica pode ser vantajosa em aplicações balísticas devido à resistência mecânica geralmente mais elevada e à baixa absorção de água. Porém, uma porosidade baixa pode reduzir a sua capacidade de dissipação de energia em impactos de alta intensidade.

A porosidade tem um papel importante nos sistemas de blindagem multicamada. A porosidade moderada, associada a propriedades mecânicas oferecem uma combinação de absorção de energia e resistência.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Este tópico aborda os resultados e discussões pertencentes a caracterização dos compósitos desenvolvidos na pesquisa.

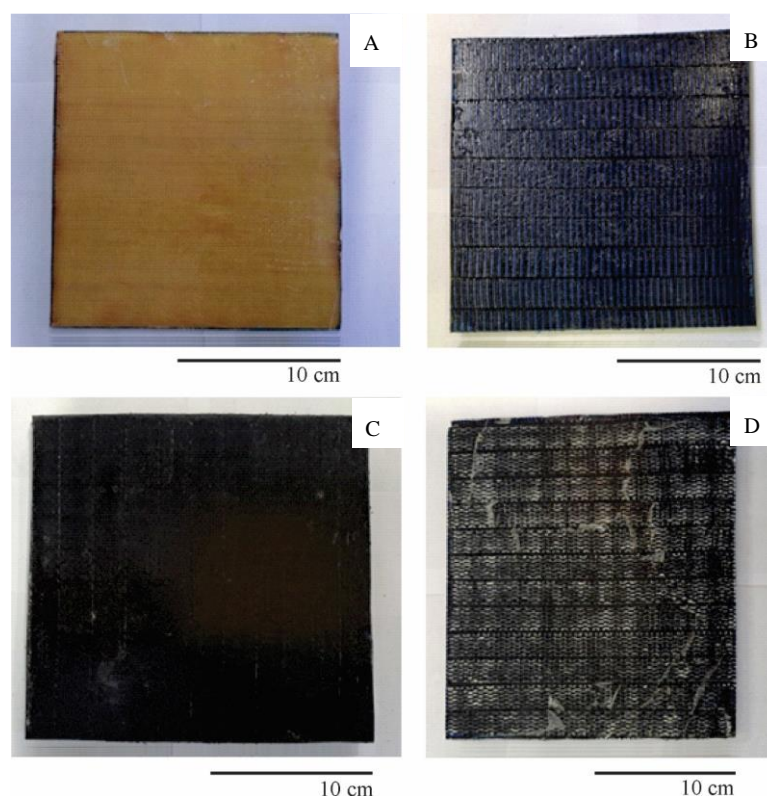
5.2.1 Análise visual dos compósitos

Para a análise visual foram analisadas características relacionadas a compactação e falha visuais. É importante ressaltar que, a análise visual é apenas uma avaliação superficial. A Figura 39 apresenta dos compósitos desenvolvidos na presente pesquisa.

Relacionado ao compósito desenvolvido a partir do tecido de Kevlar® e resina epóxi, é possível identificar que a superfície do compósito apresenta uma textura uniforme, com trama bem definida formada por fibras de Kevlar®. Esta percepção demonstra que as fibras foram distribuídas de maneira uniforme na resina. Não foram visualizadas falhas visíveis na superfície do compósito, como descolamentos e fissuras. Deste modo, pode-se concluir que a resina epóxi

aderiu às fibras de Kevlar®, formando um compósito resistente sem indícios de falhas. A cor do compósito é semelhante a cor do tecido de Kevlar®, amarelada clara.

Figura 39 - Compósitos desenvolvidos a partir do tecido de Kevlar® e resina epóxi e compósitos desenvolvidos a partir das fitas de amarração de poliéster e resina epóxi: A - Compósito COMP REF desenvolvido a partir do tecido de Kevlar® e resina epóxi, B - Compósito COMP POL desenvolvido a partir das fitas de amarração de poliéster e resina epóxi, C - Compósito COMP NYL desenvolvido a partir das fitas de amarração de poliéster e resina epóxi, D - Compósito COMP DYN desenvolvido a partir das fitas de amarração de Dyneema® e resina epóxi.



Fonte: Do Autor.

Com relação a análise visual do compósito desenvolvido a partir das fitas de amarração de poliéster e resina epóxi, conclui-se que apresenta uma disposição organizada das fitas, com um padrão regular, indicando que a compactação do material durante a produção foi realizada com qualidade. A resina epóxi parece ter sido aplicada na quantidade necessária, pois, aparentemente, os espaços entre as fitas parecem estar preenchidos completamente. A partir da análise é possível concluir que o compósito não apresenta defeitos visuais aparentes na superfície, como separações, trincas, áreas descompactadas. A cor do compósito é uniforme,

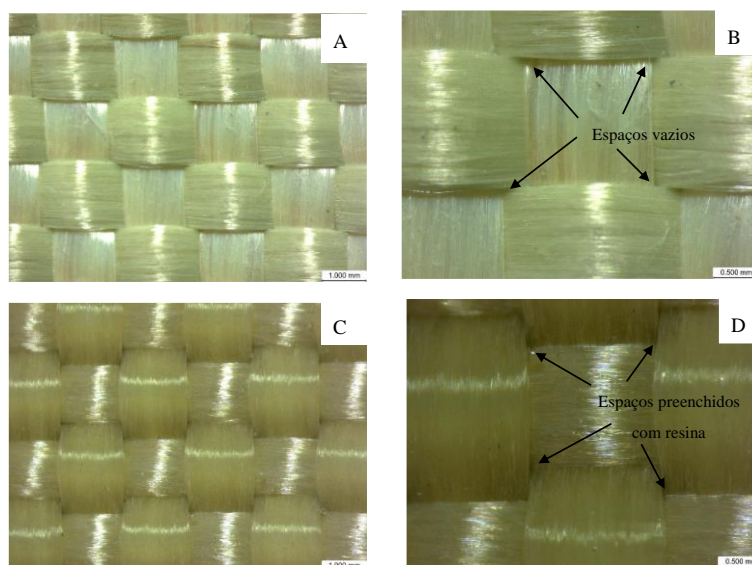
apresentando impregnação da resina epóxi e aderência adequada. A coloração do compósito é semelhante à cor da fita de amarração de poliéster, ou seja, azul e preta.

A partir da análise visual do compósito desenvolvido a partir das fitas de amarração de *nylon* e resina epóxi é possível verificar uma disposição organizada das fitas, com um padrão regular e uma textura superficial relativamente uniforme, sugerindo que a compactação do material durante o desenvolvimento do compósito foi realizada corretamente. A resina aparenta ter preenchido completamente os espaços entre os anéis. A superfície do compósito apresenta algumas marcas e irregularidades, principalmente nas bordas. É possível que estas marcas sejam resultado do processo de prensagem, como marcas de corte. O material possui uma cor escura, na cor preta. A superfície do compósito parece ser lisa e uniforme, sem textura rugosa.

A análise visual do compósito desenvolvido a partir dos anéis de fita de amarração de Dyneema® e resina epóxi sugere uma disposição organizada dos anéis de fita, com um padrão regular, mas com uma textura superficial um pouco irregular. As linhas dos anéis são visíveis e bem definidas, o que sugere que ocorreu uma compactação homogênea do material durante a prensagem. A superfície do compósito apresenta algumas marcas e irregularidades, principalmente nas bordas. É possível que essas marcas sejam resultado do processo de prensagem e marcas de corte. O compósito possui uma cor escura, semelhante a fita de amarração de Dyneema® utilizada no desenvolvimento do compósito e uma textura lisa.

As imagens dos compósitos COMP REF extraídas por meio do microscópio Bioptika, modelo 12 MP USB 2.0 são apresentadas na Figura 40.

Figura 40 – Imagens extraídas do microscópio Bioptika do compósito COMP REF: A - Tecido de Kevlar®, B - Tecido de Kevlar®, C - Compósito COMP REF, D - Compósito COMP REF.

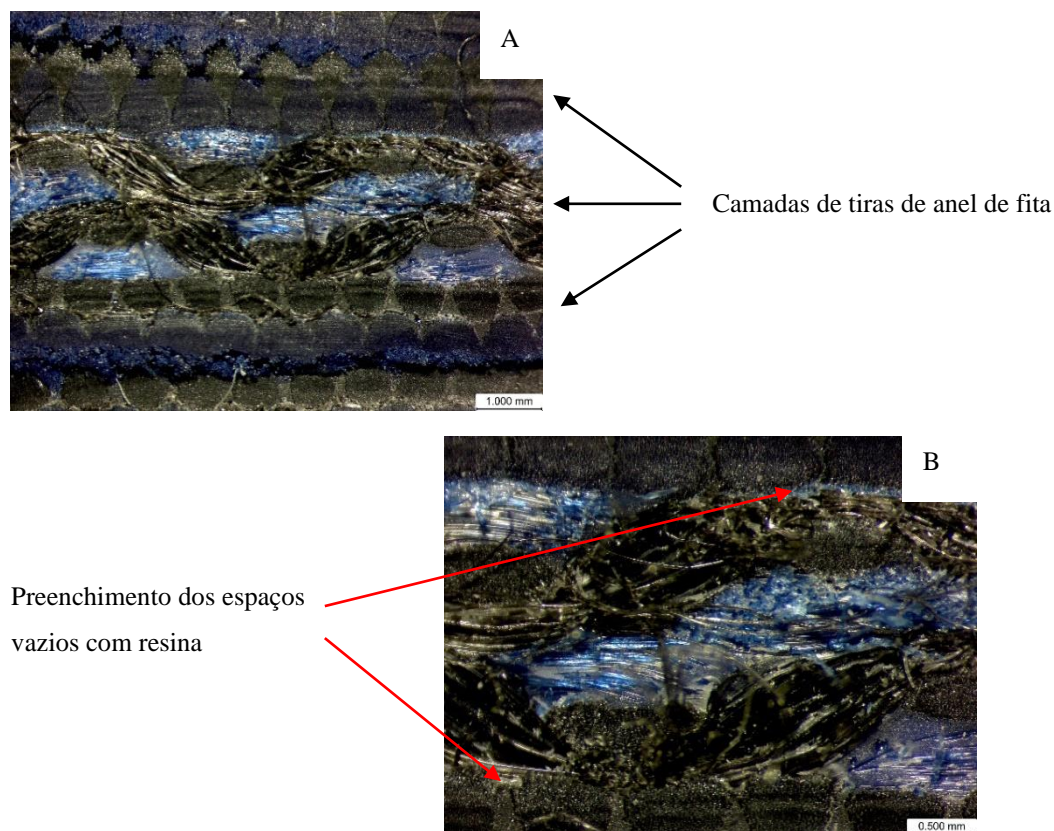


Fonte: Do Autor.

Como pode ser observado na Figura 40, ao fazer uma comparação entre o entrelaçamento do tecido de Kevlar® (A e B) e do compósito COMP REF (C e D), os dois materiais possuem uma diferença estrutural que pode influenciar no resultado mecânico do impacto. O tecido de Kevlar® (A e B) possui amplos espaços vazios preenchidos por ar, características presente em materiais têxteis, o que pode resultar em desigualdade na distribuição de tensão durante o impacto de um projétil. No COMP REF (C e D), a resina foi impregnada no tecido, preenchendo os espaços vazios no processo. Desta maneira, o Kevlar® preencheu quase na totalidade esses espaços. A camada de resina preencheu praticamente todos os espaços vazios, o que além de distribuir uniformemente a força do impacto auxiliou na coesão entre as camadas do material, resultando em desempenho superior. O processo de impregnação com resina favoreceu no preenchimento dos espaços vazios entre as fibras do tecido, melhorando a absorção de energia e a dispersão do impacto. A matriz formada pela resina confere rigidez e reforço estrutural, o que pode, a partir da comparação das imagens, conferir um nivelamento e acréscimo de resistência.

As figuras 41, 42 e 43 apresentam as imagens dos compósitos COMP POL (A e B), COMP NYL (C e D) e COMP DYN (E e F).

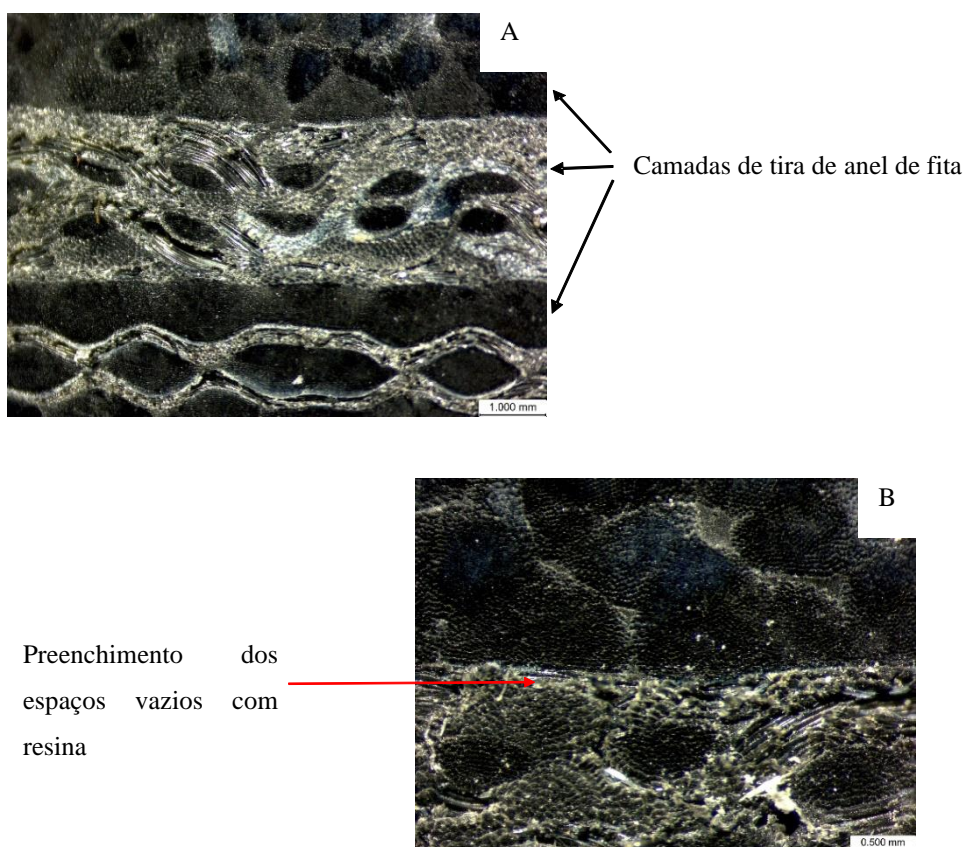
Figura 41 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika do compósito COMP POL: A e B - Compósito COMP POL.



Fonte: Do Autor.

A pesquisa em questão é macroscópica, ou seja, entre materiais. Nas blindagens multicamadas, uma interface representa a região de contato entre diferentes materiais. Para as três tipologias de compósitos desenvolvidas na pesquisa, a produção foi realizada por meio de técnica de moldagem por compressão e pela transferência de resina. Deve-se notar que o processo de fabricação das placas influencia diretamente nas propriedades mecânicas das placas. A qualidade da placa, incluindo resistência e ausência de espaços vazios, está diretamente relacionada ao processo de preenchimento dos espaços entre as camadas. De acordo com as imagens 41, 42 e 43, pode verificar que não apresenta existência de porosidade entre as fibras, que foram preenchidas com a resina.

Figura 42 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika do compósito COMP NYL: A e B - Compósito COMP NYL.

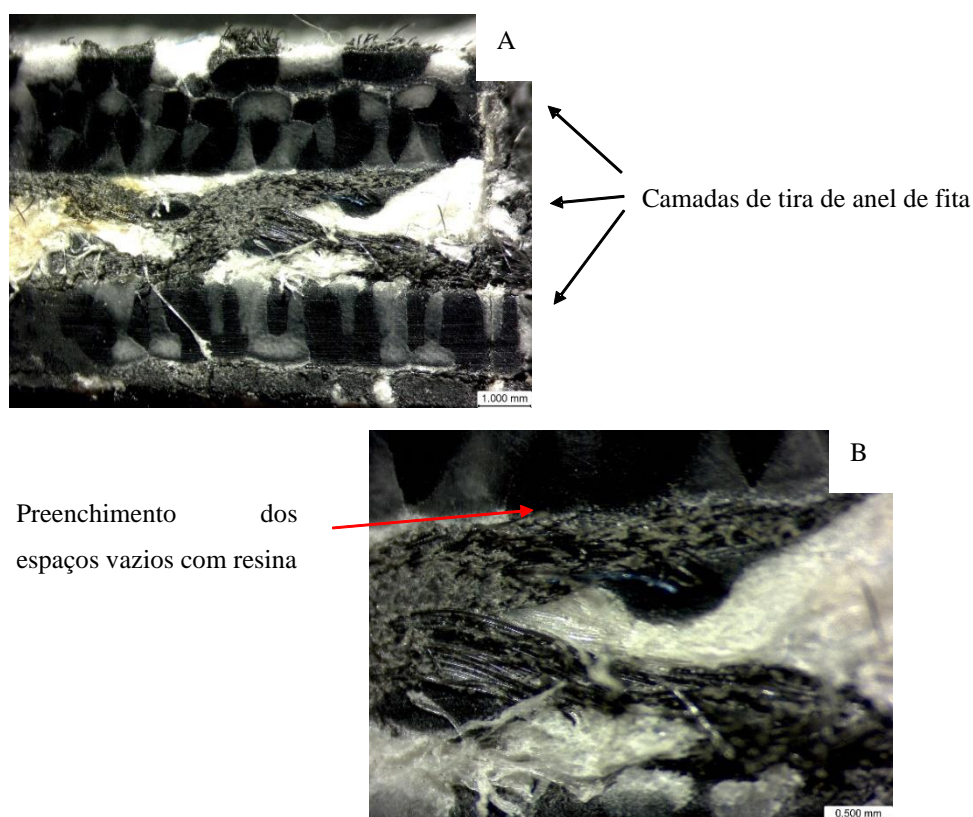


Fonte: Do Autor.

Por meio das imagens é possível perceber que a resina epóxi foi distribuída e preencheu efetivamente os espaços entre as camadas. Em ampliação, pode-se observar que as tiras de anéis de fita são impregnadas de maneira satisfatória com a resina e não é percebido lacunas significativas. Desta maneira, a resina forma uma união uniforme com as tiras de anéis de fita. A uniformidade é outro aspecto importante que deve ser abordado em todos os três compósitos. A prensagem correta resultou em materiais uniformes. Nesse caso, a resina não preencheu a lacuna, mas também compactou as camadas. O material se mostrou sólido e compacto. A compactação é de grande importância para o uso balístico, pois aumenta a resistência ao impacto e permite uma dissipação de energia eficiente.

Comparando os três compósitos desenvolvidos na pesquisa, pode-se notar que a metodologia de desenvolvimento dos compósitos teve resultado esperado e satisfatório. Desta maneira, os compósitos apresentaram compactação desejada, livres de espaços vazios, a fim de atenderem as expectativas para utilização como material balístico.

Figura 43 - Imagens extraídas do microscópio Bioptika do compósito COMP DYN: A e B - Compósito COMP DYN.



Fonte: Do Autor.

5.2.2 Porosidade dos Compósitos

A Tabela 19 apresenta os valores de densidade aparente e real e porosidade dos compósitos estudados.

Todos os compósitos desenvolvidos na pesquisa possuem formato quadrado, com dimensão média de 205 mm x 205 mm. A análise dos resultados dos compósitos desenvolvidos na pesquisa evidencia que os compósitos apresentam características físicas relevantes para aplicações em sistemas de blindagem multicamadas, uma vez que, características como espessura, volume, massa, densidade e porosidade dos compósitos contribuem na eficiência da absorção e dissipação de energia dos impactos.

Tabela 19 – Densidades aparente e real e porosidade dos compósitos estudados.

Compósito	Comp. (mm)	Larg. (mm)	Esp. (mm)	Volume (mm ³)	Massa (g)	Densidade Aparente (g/cm ³)	Densidade Real (g/cm ³)	Porosidade Total (%)
COMP REF	202,39	202,29	0,98	40121,98	52,20	1,30 ±0,023	1,31	0,75
COMP POL	207,24	203,75	12,54	529486,20	659,63	1,25 ±0,018	1,39	10,59
COMP NYL	206,80	204,89	16,38	694052,39	761,38	1,10 ±0,031	1,18	6,92
COMP DYN	203,29	205,26	8,11	338315,16	388,26	1,15 ±0,029	1,27	9,39

Fonte: Do Autor.

Com base nos resultados apresentados, pode-se notar que os três compósitos desenvolvidos na pesquisa a partir das fitas de amarração, apresentam espessura, volume e massa superiores ao compósito utilizado como referência, que utiliza o tecido Kevlar® como principal princípio ativo. O COMP REF apresenta valores de espessura, volume e massa de 0,98 mm, 40121,98 mm³ e 52,20 g respectivamente. Porém, o COMP REF é o compósito que apresenta densidade aparente superior, com 1,30 g/cm e densidade real de 1,31 g/cm³. A partir destes dados, pode-se concluir que os materiais desenvolvidos a partir de anéis de fitas de amarração, apesar de apresentarem densidade menor, oferecem vantagens significativas em termos de espessura e volume. De acordo com Medvedovski (2010a), a natureza e a espessura dos materiais podem ter uma influência significativa na propagação de rachaduras devido às suas habilidades de reduzir o estresse. Portanto, a espessura e volume são aspectos que podem influenciar na eficiência em absorver e dissipar a energia cinética residual do projétil.

O COMP POL apresenta densidade aparente de 1,25 g/cm³, a maior dentre os compósitos em estudo desenvolvidos a partir das fitas de amarração e maior densidade real, com 1,39 g/cm³, quando comparado com todos os compósitos estudados.

A partir dos dados analisados, pode-se observar que o compósito COMP NYL representa o sólido mais espesso com 16,38 mm, bem como possui maior volume e massa, com 694052,39 mm³ e 761,38 g respectivamente, quando comparados com os compósitos desenvolvidos a partir das fitas de amarração. A partir destes dados, pode-se concluir que o COMP NYL apresenta maior capacidade de absorver energia do impacto, devido a sua espessura e volume elevados. Desta maneira, contribui para a redução da propagação de fragmentos gerados pelo projétil e pela cerâmica da camada frontal. O COMP NYL é o que apresenta menor densidade aparente dentre todos os compósitos desenvolvidos, com 1,10 g/cm³ o que pode indicar menor eficiência na dissipação de energia residual. O COMP NYL apresentou também a menor densidade real, com 1,18 g/cm³.

O sólido COMP DYN, representa o sólido menos espesso com 8,11 mm, apresenta volume e massa menor, com 338315,16 mm³ e 388,26 g respectivamente, quando comparado com os demais compósitos desenvolvidos a partir das fitas de amarração. A aplicação deste material em sistemas de blindagem multicamada pode ser adequado em situações em que a redução de peso é crítica. A densidade relativamente baixa, com 1,15 g/cm³ pode contribuir para a absorção de energia com menor adição de peso ao sistema. A fibra de UHMWPE é uma fibra de alto desempenho com baixa densidade e alta resistência específica. Portanto, possui uma capacidade significativa de absorver energia de impacto, o que torna este material amplamente utilizado em produtos à prova de projéteis (Jia *et al.*, 2024). Contudo, isso pode resultar em menor resistência a múltiplos impactos, uma vez que camadas mais finas tendem a se deformar mais rapidamente após o impacto inicial.

Levando em consideração a porosidade total, esta propriedade tem um impacto significativo na capacidade de absorção de energia. Para que um material poroso alcance um desempenho satisfatório, a porosidade deve ser controlada de modo que não permita a formação de trincas nos poros por ondas de choque compressivas. Um alto nível de porosidade pode prejudicar a resistência do material (Dresch *et al.*, 2024). Valores de porosidade baixo, significa menos espaços vazios, por consequência, maior coesão estrutural e melhor dissipação de energia durante o impacto do projétil.

O COMP POL apresenta valor de porosidade total superior quando comparado com os demais compósitos estudados no presente trabalho, o que tende a permitir maior deformação interna do material, o que pode favorecer a absorção de energia. Por outro lado, o COMP NYL apresenta menor valor, com 6,92%, e pode ser mais eficiente em termos de capacidade de suportar múltiplos impactos. O COMP REF apresenta valor de 0,75% de porosidade total.

Esses resultados apontam que os compósitos desenvolvidos a partir das fitas de amarração, sobretudo o COMP NYL, apresentam potencial para serem utilizados como materiais de reforço na camada intermediária de sistemas de blindagem multicamada. A combinação de uma maior espessura e volume, aliada à densidade controlada e porosidade adequada, pode proporcionar um desempenho balístico eficaz, comparável aos sistemas que utilizam Kevlar®, com o benefício adicional de redução de custo e maior disponibilidade dos materiais.

5.2.3 Ensaio Mecânico de Tração

Os resultados de resistência mecânica à tração são apresentados na Tabela 20.

A resistência à tração de um material está diretamente relacionada à sua capacidade de absorver e dissipar energia. A blindagem multicamada é composta pela combinação de materiais diferentes e complementares em suas propriedades, sendo responsáveis por evitar a penetração do projétil. O material cerâmico possui alta resistência a compressão, alta dureza, apresentam baixa resistência a tração e são frágeis. Desta maneira, são utilizados na primeira camada, a fim de desgastar a ponta do projétil dissipando grande parte da energia cinética. Para os SBM, a segunda camada é comumente composta por materiais com alta resistência a tração e possuem a função de absorver a energia cinética residual do projétil, dos estilhados do projétil e da própria cerâmica por meio da deformação plástica (Silva *et al.*, 2014). Portanto, a resistência à tração afeta diretamente a capacidade do material de resistir à deformação sob impacto.

A Tabela 20 apresenta os resultados do ensaio de resistência mecânica à tração dos compósitos COMP REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DYN e a partir dos dados é possível correlacionar os resultados ao desempenho esperado do material em um sistema de blindagem multicamada.

Tabela 20 - Resultados de resistência mecânica à tração dos compósitos desenvolvidos na pesquisa.

Compósito	Tensão de Ruptura Média (MPa)
COMP REF	130,86 ±27,58
COMP POL	143,71 ±18,70
COMP NYL	62,00 ±23,42
COMP DYN	127,86 ±24,71

Fonte: Do Autor.

Analisando os dados, pode-se concluir que o COMP REF, que utiliza Kevlar[®] como material principal, apresentou uma tensão de ruptura média de 130,86 ±27,58 MPa, um valor de resistência intermediária, quando comparado com os demais compósitos desenvolvidos. De acordo com a literatura, as poliaramidas, especialmente o Kevlar[®], são usadas em armaduras de proteção pois, apresentam alta resistência a tração, cerca de 3600 MPa (Material Properties, 2024; Monteiro *et al.*, 2016; Selim *et al.*, 2024). O Kevlar[®] se destaca como uma fibra de alta resistência e tenacidade, com limites de resistência a tração variando de 300 a 4000 MPa, pois depende da orientação das fibras e da qualidade do processo de fabricação (Biopdi, 2024). Muito embora o Kevlar[®] seja conhecido por suas propriedades de absorção de energia e leveza,

a tensão de ruptura observada no COMP REF indica que sua resistência à tração não se mostrou superior aos compósitos estudados, sobretudo quando comparado com o COMP POL.

O COMP POL apresenta maior resistência à tração, com uma tensão de ruptura média de $143,71 \pm 18,70$ MPa, quando comparado com os demais compósitos em estudo. A partir destes dados, pode-se concluir que o COMP POL é capaz de suportar maiores cargas antes de atingir o ponto de ruptura, tornando-o um candidato potencial para aplicação na camada intermediária de um SBM, pelo qual a resistência à tração é essencial para suportar a deformação causada pelo impacto balístico. A camada intermediária de compósitos em SBM precisa não tão somente, reter os fragmentos do projétil e da cerâmica (camada frontal), mas também resistir à deformação durante o impacto. Com isso, o COMP POL, além de proporcionar maior resistência à tração, pode contribuir para uma menor deformação e maior integridade estrutural do sistema após o impacto, melhorando sua eficácia balística.

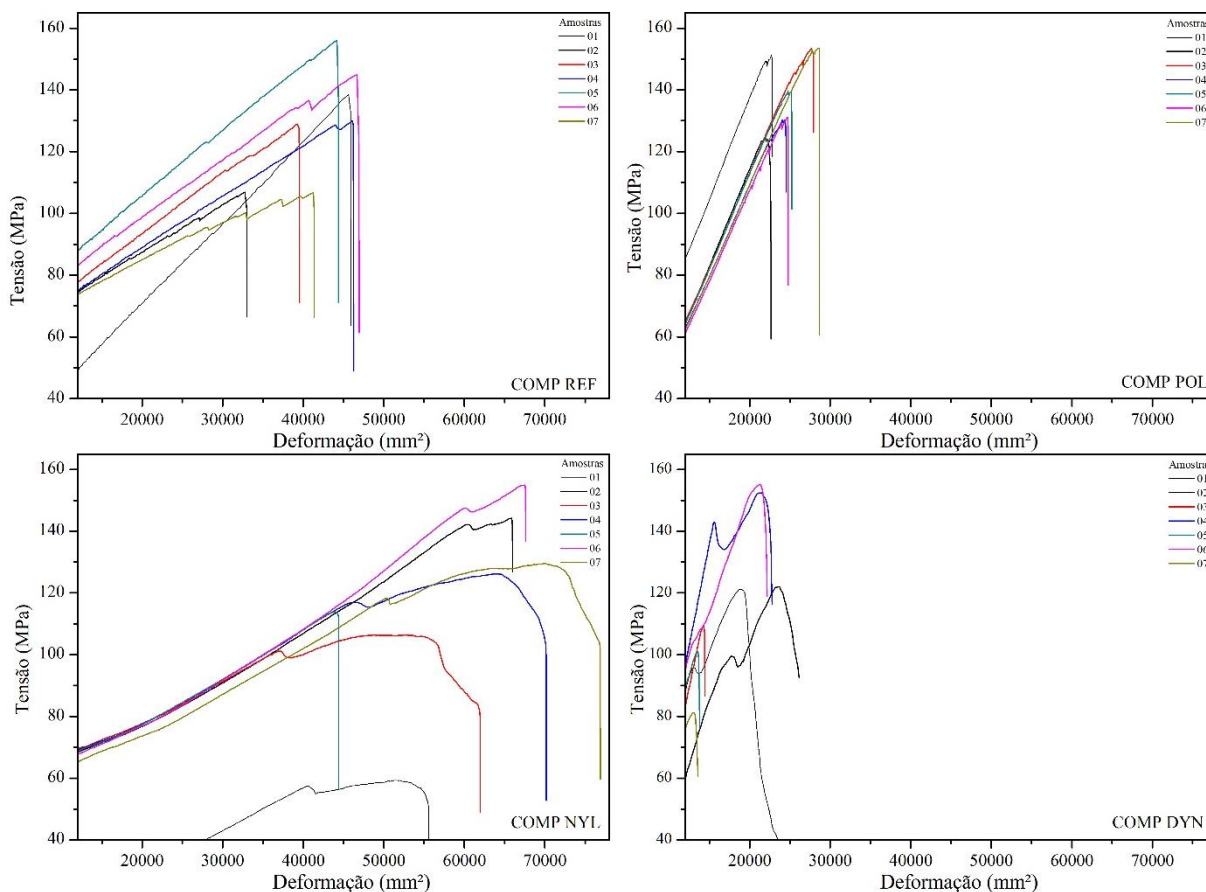
O COMP NYL apresentou a menor resistência à tração, com uma tensão de ruptura média de $62,00 \pm 23,42$ MPa, quando comparado com os demais compósitos estudados. Este baixo valor de resistência à tração aponta que o material está mais suscetível a deformação por cargas em tração, comprometendo sua atribuição na absorção de energia, quando for submetido a impactos balísticos em repetição. No entanto, outras propriedades, como a espessura e o volume, podem favorecer no contexto de SBM, sobretudo, quando características como a flexibilidade e a deformação controlada forem características prioritárias. No item 5.2.2 é possível notar que o COMP NYL apresenta os maiores valores de espessura, volume e massa.

O compósito COMP DYN, apresentou valores de tensão de ruptura média de $127,86 \pm 24,71$ MPa, e demonstra boa resistência à tração, ficando abaixo apenas do COMP POL ($143,71 \pm 18,70$ MPa). Porém, esses valores podem ser considerados estatisticamente equivalentes quando se for levado em consideração o desvio padrão. Devido à sua leveza, pode ser uma escolha apropriada para situações em que é necessário um equilíbrio entre resistência e peso, especialmente em aplicações em que a mobilidade do usuário ou a leveza do sistema são fatores críticos. No item 5.2.2 é possível identificar que o COMP DYN apresentou valor de massa menor, com 388,26 g, quando comparado com os demais compósitos desenvolvidos a partir das fitas de amarração.

A Figura 44 apresenta o gráfico de tensão e deformação dos compósitos em estudo. A partir dos dados da Tabela 21 e da Figura 44 é possível concluir que o COMP REF apresenta um valor intermediário de resistência, enquanto o COMP POL apresenta maior resistência e tem menor variabilidade. O COMP NYL é mais dúctil, favorecendo a absorção de energia,

porém com menor resistência e o COMP DYN dissipa energia rapidamente após a deformação máxima.

Figura 44 - Gráfico de Tensão e Deformação dos compósitos COMP REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DYN.



Fonte: Do Autor.

A fim de correlacionar os dados obtidos de resistência à tração dos compósitos desenvolvidos na presente pesquisa com dados de resistência à tração de compósitos desenvolvidos em pesquisas científicas, a Tabela 21 apresenta dados fornecidos na literatura de compósitos utilizados na camada intermediária de um SBM. A partir dos dados apresentados na tabela, é possível perceber que o COMP POL apresenta resistência superior quando comparado aos demais compósitos listados na tabela ($143,71 \pm 18,70$ MPa), com exceção apenas do compósito em estudo da pesquisa de Velez *et al.* (2012), com 772 MPa. Desta maneira, pode-se afirmar que o COMP POL é capaz de suportar cargas maiores antes de alcançar o seu ponto de ruptura. Essa característica torna o COMP POL um elemento promissor para ser usado na camada intermediária de um Sistema de Blindagem de Multicamadas.

Importante ressaltar também os valores de COMP DYN ($127,86 \pm 24,71$ MPa). Muito embora esteja abaixo de COMP POL, comparado com dados de compósitos elencados na Tabela 21, o COMP DYN também apresenta dados superiores aos demais, exceto o compósito em estudo de Velez *et al.* (2012), demonstrando que o COMP DYN também é um promissor material. Quando é levado em consideração o quesito leveza, este material pode ser uma escolha ainda mais apropriada.

Tabela 21 - Dados de resistência à tração de compósitos utilizados na camada intermediária de um sistema de blindagem multicamada encontrados na literatura.

Material / Compósito	Resistência à tração (MPa)	Trabalhos
Compósito de polímero reforçado com fibra por moldagem por injeção, variação de teor de fibra de vidro 30% em peso, ângulo de orientação θ 0°.	89,5±3,6	Bernasconi <i>et al.</i> (2007)
Painéis de fita composta opticamente transparentes (OTRC), reforçando uma matriz de polímero transparente com fitas de vidro de índice de refração correspondente (fração de volume de vidro de até 0,60).	772 MPa	Velez <i>et al.</i> (2012)
Compósitos epóxi reforçados com 30 vol.% de fibras contínuas de rami.	Menos de 69 MPa	Monteiro <i>et al.</i> (2016)
Placas de poliamida-6 reforçadas com fibra de vidro produzidas por moldagem por injeção contínua: PA6-GF	91,17	Farias-Aguilar <i>et al.</i> (2021)

Fonte: Do Autor.

5.3 ENSAIO DE BLINDAGEM BALÍSTICA

Este tópico aborda os resultados e discussões relativos aos ensaios de blindagem balísticas dos painéis balísticos do sistema de blindagem balística desenvolvidos na presente pesquisa.

5.3.1 Ensaio de Velocidade Residual

Com o intuito de avaliar o desempenho balístico dos compósitos sem a camada cerâmica frontal, foi realizado o ensaio de velocidade residual. Para a realização das medições de velocidade foi utilizado um radar Doppler e por meio da Equação 6 e Equação 7 foi possível estimar a energia absorvida (E_{abs}) e a velocidade limite (V_L) de cada amostra. Quatro amostras de cada tipo de compósito foram confeccionadas e submetidas à perfuração e transfixação por projéteis de 9 mm (COMP REF) 7,62 mm (COMP POL, COMP NYL, COMP DYN). Durante o ensaio, foi possível capturar as velocidades do projétil antes e depois do impacto. A partir destas informações, foi possível calcular a velocidade residual, que é uma medida direta da

eficácia do material na dissipação de energia do impacto. Por meio da comparação entre os compósitos estudados, é possível avaliar a capacidade de absorção de energia.

A Tabela 22 apresenta os dados obtidos do ensaio de velocidade residual dos compósitos COMP REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DYN desenvolvidos na pesquisa, incluindo massa do projétil, velocidade inicial e velocidade residual do projétil após perfurar o alvo.

Tabela 22 - Resultados do ensaio de velocidade residual dos compósitos desenvolvidos na pesquisa.

Compósito	Massa do Projétil (g)	V _o (m/s)	V _R (m/s)	E _{abs} (J)	V _L (m/s)	Nível de Proteção
COMP REF	8	435,49 ±5,57	421,99 ±5,23	35,67 ±14,74	329,95 ±2,11	Nível IIIA 9 mm
COMP POL	9,3	854,00 ±6,03	820,70 ±7,48	240,22 ±23,17	227,04 ±10,91	Nível III 7,62 mm
COMP NYL	9,3	853,99 ±5,06	813,65 ±5,90	292,71 ±28,16	250,61 ±12,14	Nível III 7,62 mm
COMP DYN	9,3	855,08 ±4,73	831,34 ±4,73	166,19 ±24,43	188,56 ±13,98	Nível III 7,62 mm

Fonte: Do Autor.

A placa COMP REF possui uma espessura significativamente menor quando comparada com os outros compósitos desenvolvidos na pesquisa (0,98 mm). Por isso, o ensaio para a leitura da velocidade residual foi executado com munição de 9 mm. O uso de munição de 7,62 mm ou calibres superiores seria impraticável, uma vez que a placa é muito fina. Como o radar Doppler faz a leitura por meio da medição da mudança no tempo e no espaço, se a bala atravessar o material muito rapidamente, o radar terá dificuldade em extrair a leitura adequada. Os demais compósitos testados são mais espessos (12,54 mm para COMP POL, 16,38 mm para COMP NYL e 8,11 mm para COMP DYN), razão pela qual foi realizada a leitura da velocidade com munição de 7,62 mm.

O COMP REF apresentou menor massa de projétil de 8 g, influenciando diretamente no valor de energia absorvida. A energia absorvida de COMP REF apresentada foi de 35,67 ±14,74 J. A velocidade residual apresentada, com 421,99 ±5,23 m/s, conclui-se que ocorreu uma elevada eficiência da desaceleração do projétil. Além disso, a velocidade limite de 329,95 ±2,11 m/s, mostra que o material atua com menor resistência balística para munição de alta energia cinética, pelo qual, o projétil com mais velocidade pode perfurar a amostra com mais eficácia. A energia absorvida apresentada é de 35,67 ±14,74.

O COMP POL, com massa de projétil de 9,3 g, apresentou uma velocidade residual relativamente alta, com 820,70 ±4,68 m/s, entre os compósitos estudados, apontando menor

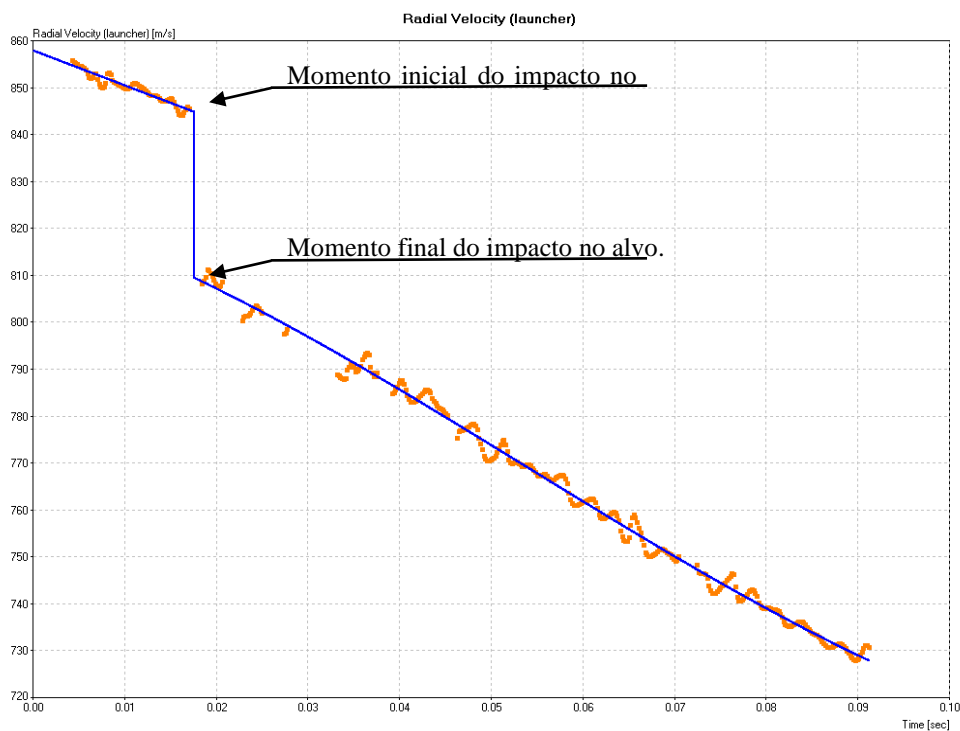
capacidade de dissipação de energia cinética do projétil. No entanto, a energia absorvida foi de $240,22 \pm 23,17$ J, superior à do COMP REF. Desta maneira, o COMP POL se mostra ser mais eficiente na absorção da energia do impacto. A velocidade limite, foi de $227,04 \pm 10,91$ m/s, inferior à do COMP REF. Portanto, pode-se concluir que COMP POL é menos eficiente na dissipação da energia cinética, independentemente da resistência a projéteis com maior velocidade. Conclui-se também que, COMP POL apresentou alta capacidade de absorção de energia, o que é importante para a eficácia das placas que exigem a quantidade máxima de dissipação de energia cinética. Porém, a alta velocidade residual impede a desaceleração do projétil e velocidade limite intermediária prejudica a dissipação eficaz em cenários de impactos mais intensos.

O COMP NYL apresentou massa de projétil de 9,3 g e uma velocidade residual de $813,65 \pm 5,90$ m/s, ligeiramente menor que o COMP POL, porém, ainda extremamente alta. No entanto, o COMP NYL absorveu a quantidade máxima de energia com $292,71 \pm 28,16$ J, que é o valor máximo entre os compósitos analisados e mostrou uma excelente capacidade de dissipação de energia do impacto balístico. O limite de velocidade, com $250,61 \pm 12,14$ m/s, se mostrou um valor intermediário, apontando um equilíbrio entre resistência e absorção de energia. Desta maneira, pode-se concluir que o COMP NYL absorveu a maior quantidade de energia de todos os compósitos analisados, porém, a velocidade residual é muito alta, desta maneira, o projétil ainda tem muita energia depois do impacto.

Por meio do ensaio utilizando o espectro de radar Doppler foi permitido capturar a velocidade do projétil antes e após o impacto. As Figura 46, 46 e 47 exemplificam os pontos experimentais obtidos no ensaio de um corpo de prova do COMP POL, COMP NYL e COMP DYN. As Figuras mostram a velocidade do projétil em função do tempo, permitindo identificar o ponto de impacto e a possível desaceleração.

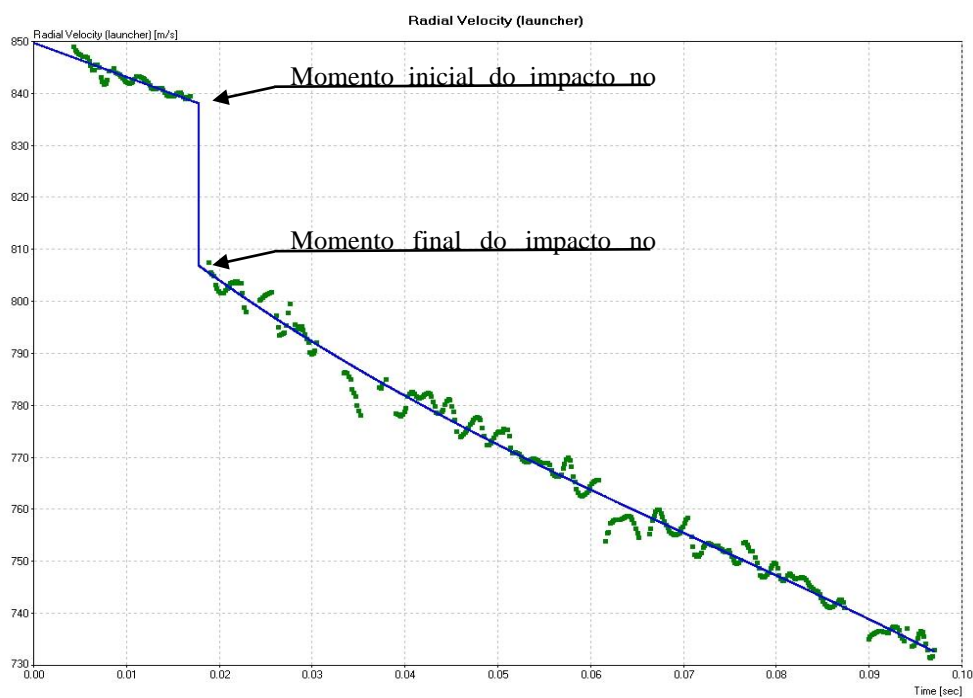
De acordo com os dados apresentados nas Figura 46, 46 e 47, inicialmente o projétil apresenta velocidade de 858, 850 e 863 m/s respectivamente e permanecem constantes até ponto de impacto. Ao atingir aproximadamente 846, 839 e 851 m/s respectivamente, o projétil sofreu uma desaceleração abrupta, caracterizando o ponto de impacto no compósito. Esse valor foi designado como a velocidade de impacto. A menor velocidade observada após essa queda foi classificada como a velocidade residual (V_R). As quedas acentuadas em velocidade após o impacto indicam que o COMP POL, NYL e DYN tiveram a capacidade de dissipar parte da energia cinética associada ao objeto.

Figura 45 - Figura mostrando os pontos experimentais obtidos a partir do espectro de radar Doppler de um corpo de prova do COMP POL.



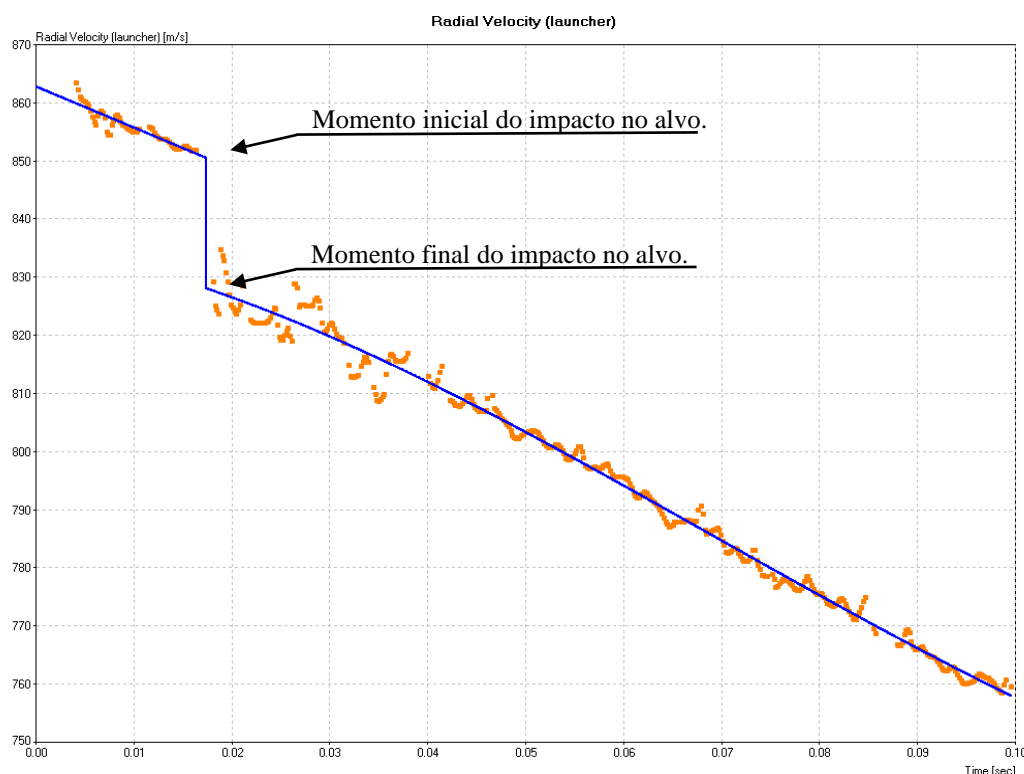
Fonte: Do Autor.

Figura 46 - Figura mostrando os pontos experimentais obtidos a partir do espectro de radar Doppler de um corpo de prova do COMP NYL.



Fonte: Do Autor.

Figura 47 - Figura mostrando os pontos experimentais obtidos a partir do espectro de radar Doppler de um corpo de prova do COMP DYN.



Fonte: Do Autor.

Figuras semelhantes foram gerados para os compósitos estudados, e, com base nos resultados quantitativos extraídos dessas figuras, foi possível calcular a velocidade limite e a energia absorvida para cada compósito em estudo.

O compósito COMP DYN apresentou a maior velocidade residual de todos os compósitos em estudo, $831,34 \pm 4,73$ m/s, apontando que é o menos eficiente na desaceleração do projétil. A energia absorvida, de $166,19 \pm 24,43$ J, também foi significativamente inferior à dos outros compósitos, o que indica baixa eficiência na dissipação da energia cinética. A velocidade limite, $188,56 \pm 13,98$ m/s, foi a mais baixa, o que sugere uma maior suscetibilidade à penetração por projéteis de alta velocidade. Portanto, pode-se concluir que o COMP DYN apresenta menor capacidade de absorção de energia e maior velocidade residual.

Para concluir, com base nos resultados apresentados na Tabela 22, referente aos compósitos estudados, pode-se observar que, os valores obtidos apresentam variações mínimas quando é considerado o desvio padrão. Embora o COMP POL e o COMP NYL tenham apresentados valores de velocidades residuais elevadas, as diferenças entre eles são mínimas quando é levado em consideração o desvio padrão, com $820,70 \pm 7,48$ m/s para o COMP POL e $813,65 \pm 5,90$ m/s para o COMP NYL. Desta maneira, dentro da margem de erro, ambos os

compósitos apresentam comportamento semelhante em termos de dissipação de energia cinética. Além disso, o COMP NYL se destacou por apresentar maior energia absorvida, com $292,71 \pm 28,16$ J, enquanto o COMP POL também mostrou eficiência, com $240,22 \pm 23,17$ J, ainda que inferior ao COMP NYL. Por outro lado, o COMP DYN apresentou maior velocidade residual, com $831,34 \pm 4,73$ m/s e menor absorção de energia, com $166,19 \pm 24,43$ J, confirmando ser o menos eficiente. Portanto, apesar das diferenças entre os compósitos, estas são menos acentuadas quando se leva em consideração o desvio padrão.

Com base nos dados extraídos do ensaio de velocidade residual, é possível fazer uma discussão entre a espessura dos compósitos, que está diretamente ligada ao número de camadas de anel de fita de amarração usados para a confecção dos compósitos e a capacidade de absorção de energia por unidade de espessura, a chamada energia de absorção específica ($E_{\text{abs esp}}$). A Tabela 23 apresenta dos dados de energia absorvida específica dos compósitos estudados na presente pesquisa.

Tabela 23 - Resultados de energia absorvida específica dos compósitos COMP REF, COMP POL, COMP NYL E COMP DYN desenvolvidos na pesquisa.

Compósito	Espessura do compósito (mm)	E_{abs} (J)	$E_{\text{abs esp}}$ (J/mm)
COMP POL	12,54	$240,22 \pm 23,17$	$19,16 \pm 1,85$
COMP NYL	16,38	$292,71 \pm 28,16$	$17,87 \pm 1,72$
COMP DYN	8,11	$166,19 \pm 24,43$	$20,49 \pm 3,01$

Fonte: Do Autor.

Por meio dos dados expostos na Tabela 23, pode-se concluir que, embora o COMP NYL tenha consumido a maior quantidade total de energia $292,71 \pm 28,16$ J, o compósito apresentou a menor energia absorvida específica $17,87 \pm 1,72$ J/mm, desta maneira, a maior espessura, com 16,38 mm é responsável significativamente por essa capacidade; no entanto, a eficiência relativa por milímetro é inferior à dos outros compósitos. O COMP POL com uma espessura de 12,54 mm, obteve a energia absorvida de $240,22 \pm 23,17$ J e a energia específica de $19,157 \pm 1,85$ J/mm. Importante ressaltar que o COMP POL apresenta maior resistência a tração, com $143,71 \pm 18,70$ MPa, indicando que o COMP POL pode suportar altas forças antes da falha. No entanto, essa propriedade não foi suficiente para garantir a melhor eficiência balística, com $10,66 \pm 0,69$. A justificativa para este fato, é que outros fatores, pode ter influenciado diretamente, como por exemplo o valor da porosidade. A porosidade total do COMP POL, apresentou valor de 10,59%, a mais alta entre todos os compósitos estudados.

Por outro lado, COMP DYN sendo o menos espesso, com 8,11 mm, obteve a maior energia específica $20,49 \pm 3,01$ J/mm mostrando que o compósito é mais eficiente na absorção de energia por unidade de espessura, embora tenha consumido a quantidade total de energia $166,19 \pm 24,43$ J. Esses resultados fortalecem que, embora COMP NYL seja eficiente em absorver a maior quantidade de energia total, o COMP DYN fornece uma dissipação mais eficiente da energia que por milímetro. Este pode ser um fator importante para aplicações que exigem materiais mais finos com alta eficiência balística.

Quando os dados são analisados levando em consideração o desvio padrão essas variações se tornam menos significativas. O COMP NYL, no caso, possui a maior energia total absorvida de $292,71 \pm 28,16$ J e eficiência por espessura de $17,87 \pm 1,72$ J/mm, ou seja, inferior à dos demais compósitos estudados, mas dentro da margem de erro. Já o COMP POL, apresentou energia total absorvida de $240,22 \pm 23,17$ J e uma eficiência específica de $19,15 \pm 1,85$ J/mm. Este compósito apresenta valores sobrepostos ao COMP NYL, portanto, ambos os compósitos se comportam de maneira semelhantes quanto à dissipação da energia total, quando os valores de desvio padrão são considerados. O COMP DYN que apresenta a maior eficiência específica, com $20,49 \pm 3,01$ J/mm e a menor energia absorvida, com $166,19 \pm 24,43$ J, também apresenta valores equivalentes, quando os valores de desvio padrão são considerados. Desta maneira, muito embora os dados absolutos pareçam discordantes, a igualdade dos valores dentro da faixa de desvio padrão mostra que os compósitos possuem os mesmos comportamentos de dissipação de energia. Reforçando que o comportamento balístico de todos os materiais pode ser considerado equivalente quando considerado os valores de desvio padrão. Desta maneira, é possível concluir que, independentemente da espessura, todos os compósitos possuem uma capacidade semelhante de absorção de energia. Isso sugere, e requer confirmação experimental, que se os três compósitos em estudo (COMP POL, COMP NYL e COMP DYN) fossem testados com a mesma espessura, os resultados, dentro do desvio padrão, corroborariam a hipótese inicial de equivalência no desempenho balístico, com valores equivalentes de velocidade limite.

5.3.2 Ensaio de Profundidade de Penetração – DOP

Por meio do teste de penetração (DOP) foi possível avaliar o desempenho de sistemas balísticos.

Referente ao ensaio de profundidade de penetração, foram feitos dois ensaios de DOP para cada amostra.

Com relação ao primeiro ensaio, pode-se observar que a placa de cerâmica impactada foi completamente fragmentada após o impacto e rachaduras também apareceram nas placas adjacentes. Ocorreu também o desprendimento das placas do sistema. Este processo de fragmentação ocorreu em outras pesquisas como exemplo o estudo de Wilkins (1978) e o estudo de Shockey *et al.* (1990). O cone de fratura se desenvolveu principalmente na superfície de impacto, permanecendo limitado à camada frontal, composta pela cerâmica, que participava da transmissão de carga de impacto para o compósito, utilizado como camada intermediária e para a placa metálica, utilizada como camada posterior (Zaera *et al.*, 2000).

Apesar do desempenho satisfatório em termos de resistência à penetração do projétil, observou-se que no mosaico, os danos nas placas cerâmicas adjacentes foram significativos. A expansão da placa transferiu parte da energia de impacto para outras placas, em diferentes graus de intensidade, resultando no descolamento das placas cerâmicas dos compósitos.

Referente ao primeiro ensaio, os valores apresentados de velocidade média do projétil são de $853,26 \pm 2,19$ m/s. A norma NIJ 0108.01 define que a velocidade do projétil para o nível IV deve ser 868 m/s. A partir dos ensaios, foi possível calcular a média de energia inicial do projétil, com valor de $3567,51 \pm 18,35$ J, que foi calculada com base na velocidade média e na massa do projétil, com valor de 9,8 g. Os resultados obtidos nos ensaios, foram similares ao especificado pela norma. Com relação aos dados coletados no primeiro ensaio, a variação da velocidade de impacto entre os corpos de prova é pequena, quando comparado os valores entre as quatro placas.

Com base nos resultados dos ensaios de profundidade de penetração realizados, no primeiro ensaio, os compósitos em estudo e a placa de alumínio não sofreram perfuração, o que implica que a energia do impacto foi absorvida pela camada cerâmica, que fragmentou o projétil e disponibilizou parte da energia para as placas adjacentes. Isso resultou em danos nas placas cerâmicas, sem comprometer a estrutura do compósito e placa de alumínio.

Referente ao segundo ensaio, os valores apresentados de velocidade média do projétil são de $853,92 \pm 3,46$ m/s. A partir dos ensaios, foi possível calcular a média de energia inicial do projétil, com valor de $3573,01 \pm 28,94$ J, que foi calculada com base na velocidade média e na massa do projétil, com valor de 9,8 g.

No segundo ensaio, ocorreu penetração do projétil nos compósitos e na placa de alumínio. Nesse ensaio, embora as placas cerâmicas tenham sido centralizadas por meio de fita adesiva, sua função na dissipação da energia foi satisfatória.

Após a execução dos dois ensaios de DOP, é possível concluir que, o comportamento da placa em relação ao segundo impacto demonstra claramente que, embora o sistema de blindagem multicamadas seja eficaz na absorção inicial de energia, ocorre uma degradação em condições de impacto repetido. Conclui-se também que esta degradação, pode estar associada ao tipo de cola utilizada no sistema. A cola utilizada é rígida, e, portanto, permite a propagação da onda de choque pela superfície do compósito.

A partir do ensaio DOP pode-se avaliar o desempenho balístico por meio de equações que consistem em um conjunto de ferramentas, pelas quais buscam pesquisar materiais para aplicações em sistemas balísticos.

5.3.2.1 Avaliação de Desempenho Balístico

A avaliação de desempenho balístico das placas em estudo foi analisada com base nos resultados de eficiência de espessura, eficiência de massa e fator de eficiência balística, todos estes, fatores adimensionais.

Os valores de eficiência de espessura do material (E_t), indicam que o material balístico está absorvendo mais energia balística para uma dada espessura, ou seja, se o material está oferecendo uma proteção melhor com menos material.

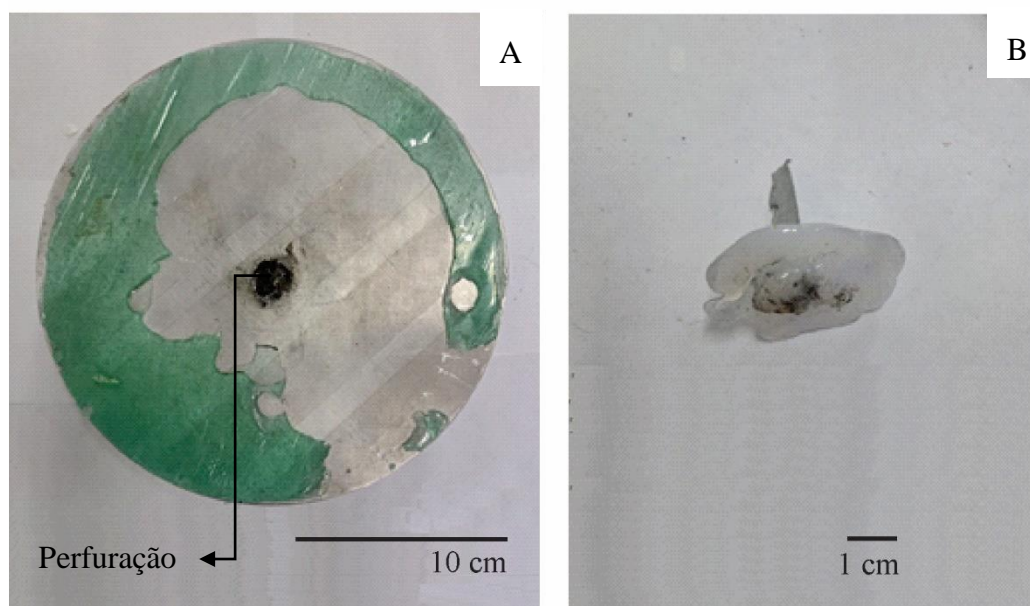
De acordo com Madhu *et al.* (2005), valores de E_t igual a 1,0 ou acima, indicam que são um indicativo de desempenho superior. O material em avaliação é mais fino e mais leve que o material de referência (placa de alumínio) para a ameaça especificada. Portanto, demonstram que o material oferece proteção balística eficiente com menor espessura e peso, em relação ao material de referência.

Para obter o desempenho balístico do SBM em termos de eficiência de espessura do material (E_t), foi necessário determinar os valores de profundidade de penetração de referência na placa de alumínio (P_{REF}) e os valores de profundidade de penetração residual na placa de apoio – alumínio (P_{RES}).

Para a penetração de referência em placa de alumínio (P_{REF}), foi utilizada como base, os valores analisados na pesquisa de Polla *et al.* (2019). O presente trabalho traz como referência, uma profundidade de penetração para as placas de apoio sem proteção 63 ± 4 mm.

Referente aos valores de penetração residual na placa de apoio (P_{RES}), a Figura 48 apresenta o alumínio após perfuração por munição 7,62 mm, perfurante e apresenta o molde feito com cola quente a fim de obter os dados de P_{RES} .

Figura 48 - Amostras de SBM desenvolvidas na pesquisa, no segundo ensaio de D.O.P: A - Alumínio após perfuração por munição 7,62 mm perfurante, B - Molde feito com cola quente.



Fonte: Do Autor.

A Tabela 24 apresenta os valores de P_{RES} , e os valores de eficiência de espessura (E_t). A análise de valores de P_{RES} demonstram, que a PLACA REF apresenta uma penetração residual moderada. A pequena diferença entre as duas amostras corrobora um comportamento constante em relação à proteção balística. A PLACA POL têm penetração residual muito baixa, com 0,278 mm em uma das duas amostras estudadas. Esta descoberta indica alta absorção de energia, embora ocorra discrepâncias, já que a outra amostra é ligeiramente maior.

Tabela 24 - Resultados da eficiência de espessura dos sistemas de blindagem multicamada desenvolvidos no trabalho.

Compósito	P_{REF} (mm)	P_{RES} (mm)	Média da massa do sistema (g) ¹	t_1 (mm)	t_2 (mm)	T_t (mm)	E_t (mm)	Média E_t (mm)
PLACA REF 1	63	7,072	862,00	8	0,98	8,98	6,23	6,19 ±0,05
PLACA REF 2	63	7,745		8	0,98	8,98	6,15	
PLACA POL 1	63	0,278	1333,19	8	12,54	20,54	3,05	2,99 ±0,10
PLACA POL 2	63	3,082		8	12,54	20,54	2,92	
PLACA NYL 1	63	7,092	1413,20	8	16,38	24,38	2,29	2,43 ±0,20
PLACA NYL 2	63	0,305		8	16,38	24,38	2,57	
PLACA DYN 1	63	1,448	1120,14	8	8,11	16,11	3,82	3,73 ±0,13
PLACA DYN 2	63	4,345		8	8,11	16,11	3,64	

1 – Média da massa do sistema: camada frontal (alumina) + camada intermediária (compósito).

Fonte: Do Autor.

Portanto, pode ter ocorrido variações de desempenho ou materiais. O mesmo ocorre para os valores referente a PLACA NYL, há uma variação significativa entre as amostras, enquanto uma amostra apresenta penetração quase desprezível, com 0,305 mm, a outra exibe valores semelhantes aos apresentados pela PLACA REF. A variação substancial indica inconsistência no desempenho. A PLACA DYN também apresentou uma penetração residual relativamente baixa, com 1,448 e 4,345 mm, sugerindo uma eficiência balística eficaz. A variação entre as amostras, pode indicar diferenças no comportamento balístico. Em suma, as PLACAS REF e DYN apresentaram resultados consistentes e resistência ao impacto.

Considerando os dados de P_{RES} para PLACA POL, PLACA NYL e PLACA DYN, os valores apresentados foi maior do que os exibidos pela PLACA REF. Portanto, esses sistemas alternativos proporcionam um nível de proteção superior em termos de resistência à penetração. Desta maneira, para garantir que a PLACA REF atingisse o mesmo nível de P_{RES} que foram observadas nas placas em estudo, seria necessário aumentar a espessura do COMP REF, ou seja, seria necessário adicionar um maior número de camadas do Kevlar[®], o que implicaria em um maior custo agregado. Sendo assim, o PLACA POL, PLACA NYL e PLACA DYN não apenas oferecem melhor desempenho em termos de proteção balística, mas também forneceu uma solução mais econômica para um sistema de blindagem multicamadas.

Ao analisar a massa dos conjuntos dos sistemas de proteção balística (camada frontal + camada intermediária) apresentadas na Tabela 24, pode-se observar que os valores das placas desenvolvidas no presente trabalho não são significativamente maiores quando comparados com a placa utilizada como referência, a PLACA REF. De acordo com os dados, a PLACA REF apresentou peso de 862 g e a placa em estudo que apresentou menor valor entre as amostras estudadas foi a PLACA DYN, com 1120,14 g. Em situações práticas, como, a aplicação em blindados, a diferença torna-se irrelevante, ou seja, essa diferença no peso não comprometerá a mobilidade do veículo, garantindo proteção eficiente sem impactar na qualidade de desempenho balístico.

Os valores de eficiência de espessura (E_t) para as diferentes tipologias de placas (PLACA REF, PLACA, POL, PLACA NYL e PLACA DYN) foi analisada com base nos valores de P_{REF} e P_{RES} , além das espessuras das placas.

A Tabela 24 apresenta os dados de E_t – eficiência de espessura para os diferentes sistemas de blindagem multicamada estudados na presente pesquisa. A análise se deu no comportamento de cada um em relação à capacidade de reduzir a penetração balística de cada sistema em estudo.

De acordo com os dados apresentados, pode-se observar que quando comparados os valores referentes a PLACA REF com os valores das demais placas analisadas, a PLACA REF

possui o maior valor de E_t , com $6,19 \pm 0,05$ mm. O valor da espessura total é relativamente baixo, com T_t de 8,98 mm e mesmo apresentando T_t baixo em relação as demais placas, a PLACA REF apresentou um bom desempenho balístico. O que era de se esperar, uma vez que a PLACA REF é composta por um material de alto desempenho balístico.

Os valores obtidos para a PLACA POL apresentaram uma eficiência de espessura média de $2,99 \pm 0,10$ mm, perdendo apenas para os valores referente a PLACA NYL. Os valores de T_t apresentaram valores de 20,54 mm. A eficiência de espessura da PLACA POL foi consideravelmente inferior à da PLACA REF. Pode-se concluir que o sistema aplicado a PLACA POL necessita de maior espessura para atingir um nível similar de proteção balística, isso implica em maior peso, influenciando na mobilidade.

A PLACA NYL apresentou valores de eficiência de espessura média de $2,43 \pm 0,20$ mm, o valor mais baixo dentre as placas estudadas. T_t apresentaram valores de 24,38 mm, demonstrando ser a placa de maior espessura. Com estes valores pode-se constatar que mesmo a PLACA NYL tendo a maior espessura, dentre as placas testadas, o desempenho balístico foi inferior, com o menor valor de E_t . Portanto, a PLACA NYL fornece proteção, porém não é eficiente em termos de espessura e desta maneira, requer mais material para uma proteção comparável a outros sistemas.

A PLACA DYN apresenta eficiência de espessura média de $3,73 \pm 0,13$ mm. O valor de T_t é intermédio, com 16,11 mm. Por meio dos dados exibidos, a PLACA DYN apresentou um equilíbrio de espessura e eficiência. Portanto, a PLACA DYN é considerado uma escolha eficiente em termos de espessura, proporcionando boa proteção balística e espessura intermediária, quando comparada com as demais placas analisadas. Importante ressaltar que para a composição da PLACA DYN foram utilizados materiais comerciais e a partir dos dados extraídos é possível concluir que, a PLACA DYN obteve resultados significativos de proteção balística com um material com custo acessível, quando comparado com o material de referência Kevlar®.

De acordo com os resultados, a PLACA REF apresenta o maior valor de E_t , portanto, o sistema de maior eficiência de proteção balística, com a menor espessura total e a capacidade de absorção de impacto aceitável, quando comparado com as placas em estudo. A PLACA DYN também apresenta um desempenho razoável, embora abaixo das placas de referência, enquanto as placas PLACA POL e PLACA NYL necessitam de espessuras muito maiores para desempenhar o mesmo nível de proteção.

A eficiência de massa (E_m) é um parâmetro utilizado na avaliação de desempenho balístico que relaciona a capacidade de proteção que um material oferece em relação ao seu

peso, ou seja, valores mais altos de E_m indicam que o material é mais eficiente para fornecer proteção com menos peso. De acordo com Madhu *et al.* (2005), valores de E_m igual a 1,0 ou acima, indicam que são um indicativo de desempenho superior.

Para calcular os valores de E_m foi necessário calcular os valores da densidade aparente da placa de alumínio 6063 utilizado na pesquisa como camada posterior. O resultado da densidade aparente do alumínio 6063 é de $2,68 \pm 0,01$ g/cm³, conforme a Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados da ρ_{ref} da placa de alumínio 6063 (camada posterior).

Compósito	Raio (mm)	Alt. (mm)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade Aparente (g/cm ³)	Média densidade aparente (g/cm ³)
Alumínio 01	101,45	50,19	1622,88	4355	2,68	
Alumínio 02	101,44	50,15	1621,00	4355	2,68	
Alumínio 03	101,53	50,23	1626,57	4355	2,67	2,68 ±0,01
Alumínio 04	101,23	50,19	1615,85	4355	2,69	

Fonte: Do Autor.

Com o intuito de obter os cálculos de E_m , a média ponderada da densidade dos materiais que compõem a camada frontal (cerâmica – alumina) e a camada intermediária (COMP REF, COMP POL, COMP NYL e COMP DYN) também foram calculados e são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados de ρ_t dos compósitos estudados.

Compósito	ρ_1 (g/cm ³)	t_1 (mm)	ρ_2 (g/cm ³)	t_2 (mm)	Média ponderada da densidade (g/cm ³)
COMP REF	3,8	8	1,30	0,98	3,53
COMP POL	3,8	8	1,25	12,54	2,24
COMP NYL	3,8	8	1,10	16,38	1,99
COMP DYN	3,8	8	1,15	8,11	2,47

Fonte: Do Autor.

A Tabela 27 apresenta os valores de E_m das placas em estudo.

Tabela 27 - Resultados da eficiência de massa dos sistemas de blindagem multicamada desenvolvidos na pesquisa.

Compósito	E_t (mm)	ρ_{ref} (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	E_m (mm)	Média E_m (mm)
PLACA REF 1	6,23	2,68	3,53	4,737	4,71 \pm 0,04
PLACA REF 2	6,15	2,68	3,53	4,68	
PLACA POL 1	3,05	2,68	2,24	3,652	3,57 \pm 0,12
PLACA POL 2	2,92	2,68	2,4	3,489	
PLACA NYL 1	2,29	2,68	1,99	3,098	3,29 \pm 0,27
PLACA NYL 2	2,57	2,68	1,99	3,474	
PLACA DYN 1	3,82	2,68	2,47	4,156	4,06 \pm 0,14
PLACA DYN 2	3,64	2,68	2,47	3,961	

Fonte: Do Autor.

De acordo com os dados apresentados, a PLACA REF apresentou uma eficiência de massa média de 4,71 \pm 0,04 mm, a mais alta de todas as placas avaliadas. A massa dos compósitos influencia no desempenho balístico. Os dados de massa e densidade aparente do COMP REF, com 52,20 g de 1,30 g/cm³ respectivamente, combina uma boa capacidade de absorção de energia com uma distribuição eficiente de massa. Este valor elevado reflete na capacidade de oferecer proteção sem comprometer o peso. Portanto, a PLACA REF fornece proteção balística com um peso relativamente baixo. Dessa maneira, o sistema de blindagem multicamadas da PLACA REF deve ser considerado um padrão de comparação, pois, estas placas, além de terem apresentado alta eficiência de espessura E_t , proporcionam proteção balística eficaz com pouco peso.

A PLACA POL, apresentou eficiência de massa média de 3,57 \pm 0,12 mm, por sua vez, teve um desempenho inferior à PLACA REF. Fazendo uma comparação com os dados extraídos da PLACA REF, a PLACA POL fornece menos proteção balística por seu peso. Portanto, para atingir níveis semelhantes de proteção balística da PLACA REF, a PLACA POL necessita de mais espessura ou peso adicional.

A PLACA NYL apresentou uma média de 3,29 \pm 0,27 mm de eficiência de massa, o valor mais baixo dentre as placas estudadas. De um modo geral, a PLACA NYL não se apresenta eficaz em termos de eficiência de massa e também em termos de eficiência de espessura, pois apresentou o valor mais baixo dentre as placas estudadas.

A PLACA DYN apresentou eficiência de massa média de 4,06 \pm 0,14 mm, sendo a segunda mais viável quando comparada com as demais placas estudadas, próxima da PLACA REF. O sistema de PLACA DYN é uma alternativa viável, pois apresenta dados promissores em termos de eficiência de espessura e de massa.

Com base nos resultados, a PLACA REF teve o melhor desempenho em termos de eficiência de massa, indicando ser o primeiro em termos de eficácia na proteção balística de alto nível com menor massa. No entanto, a PLACA DYN também teve um desempenho com equilíbrio entre proteção e massa. As placas PLACA POL e PLACA NYL apresentaram uma eficiência de massa inferior, portanto não são os melhores em opções em desempenho balístico quando comparados com todas as placas estudadas. Desta maneira conclui-se que, a PLACA REF é a melhor escolha, seguido do PLACA DYN como material balístico eficiente.

O fator de eficiência balística é uma combinação de eficiência de massa e de eficiência de espessura. Valores maiores de q^2 indicam melhor desempenho balístico. Em termos de avaliação de desempenho balístico, foi também calculado o fator de eficiência balística (q^2). Por meio da Tabela 28 é apresentado os dados.

Tabela 28 - Resultados do fator de eficiência balística dos sistemas de blindagem multicamada desenvolvidos na pesquisa.

Compósito	E_m (mm)	E_t (mm)	q^2	Média q^2
PLACA REF 1	4,737	6,23	29,501	29,15 \pm 0,50
PLACA REF 2	4,68	6,15	28,795	
PLACA POL 1	3,652	3,05	11,151	10,66 \pm 0,69
PLACA POL 2	3,489	2,92	10,177	
PLACA NYL 1	3,098	2,29	7,103	8,02 \pm 1,29
PLACA NYL 2	3,474	2,57	8,933	
PLACA DYN 1	4,156	3,82	15,88	15,15 \pm 1,03
PLACA DYN 2	3,961	3,64	14,421	

Fonte: Do Autor.

Com base nos dados apresentados, pode-se concluir que a PLACA REF apresenta o melhor fator de eficiência balística, tendo uma média de 29,15 \pm 0,50. Este valor corrobora com os resultados da porosidade total dos compósitos, pelo qual, o COMP REF apresentou menor valor de porosidade total, com 0,75%, demonstrando que o menor valor de porosidade contribuiu para o maior valor de eficiência balística. Esses resultados indicam que a placa referência apresenta uma combinação positiva entre proteção e leveza. Devido aos maiores valores de E_t e E_m entre os materiais utilizados para a análise, a PLACA REF é ainda o padrão de comparação, com o desempenho mais equilibrado e eficiente.

O PLACA POL apresentou média de q^2 de 10,66 \pm 0,69, um valor significativamente menor a média apresentada pela PLACA REF. O valor da porosidade total do COMP POL, o maior entre todos os compósitos estudados, com 10,59%, possivelmente comprometeu na

eficiência balística. O COMP POL também apresentou o menor resultado de resistência à tração, com $62,00 \pm 23,42$ MPa, impactando no desempenho balístico, pois a menor resistência ao impacto, torna o material mais suscetível a falhas sob carga.

A PLACA NYL apresentou uma média q^2 de $8,02 \pm 1,29$, sendo a mais baixa de todas as placas estudadas. O valor de porosidade total do COMP NYL (6,92%) foi o menor entre todas aos compósitos estudados, porém, o COMP NYL apresentou maior espessura, com 16,38 mm entre os compósitos. Portanto, o resultado de q^2 indica a pior eficiência de espessura (E_t) e uma baixa eficiência de massa (E_m) em comparação com todas as outras placas em estudo. Isso torna a PLACA NYL a menos eficiente de todas as opções testadas.

A PLACA DYN obteve valor de q^2 igual a $15,15 \pm 1,03$, o que é significativamente mais alto do que a PLACA POL e a PLACA NYL, tornando-a uma opção viável, porém inferior a PLACA REF. Em termos de porosidade, o COMP DYN, é o segundo material mais poroso, quando comparado com os demais compósitos, perdendo apenas para o COMP POL, com 9,39%, porém, o COMP DYN apresentou o maior resultado de energia de absorção específica dentre todos os compósitos, com 20.492 J/mm, o que reflete na capacidade de dissipar a energia de impacto. O valor de q^2 reflete diretamente em uma combinação de eficiência de massa (E_m) e espessura (E_t). A PLACA DYN é uma opção viável em sistema de blindagem multicamadas, oferecendo proteção balística e redução de peso. Importante ressaltar que a PLACA DYN foi desenvolvida a partir de material comercial, barato e disponível no mercado com facilidade.

Para complementar a análise explanada neste tópico (5.3.2.1), as Tabela 29 e 30 apresentam resumidamente os principais dados levantados e analisados nesta pesquisa.

Tabela 29 - Dados relevantes dos compósitos levantados e analisados nesta pesquisa.

PARÂMETRO	COMP REF	COMP POL	COMP NYL	COMP DYN
Espessura (mm)	0,98	12,54	16,38	8,11
Massa (g)	52,20	659,63	761,38	388,26
Densidade Aparente (g/cm^3)	$1,30 \pm 0,023$	$1,25 \pm 0,018$	$1,10 \pm 0,031$	$1,15 \pm 0,029$
Porosidade (%)	0,75	10,59	6,92	9,39
Resistência a Tração (MPa)	$130,86 \pm 27,58$	$143,71 \pm 18,70$	$62,00 \pm 23,42$	$127,86 \pm 24,71$
Velocidade Residual (m/s)	$421,99 \pm 5,23$	$820,70 \pm 7,48$	$813,65 \pm 5,90$	$831,34 \pm 4,73$
E_{abs} (J)	$35,67 \pm 14,74$	$240,22 \pm 23,17$	$292,71 \pm 28,16$	$166,19 \pm 24,43$
Nível de Proteção	Nível IIIA 9 mm	Nível III 7,62 mm	Nível III 7,62 mm	Nível III 7,62 mm

Fonte: Do Autor.

Tabela 30 - Dados relevantes das placas levantados e analisados nesta pesquisa.

PARÂMETRO	PLACA REF	PLACA POL	PLACA NYL	PLACA DYN
Projétil	calibre 7,62 mm perfurante	calibre 7,62 mm perfurante	calibre 7,62 mm perfurante	calibre 7,62 mm perfurante
P_{PRES} (mm)	7.072 – 7.745	0,278 – 3,082	0,305 – 7,092	1,448 – 4,345
Média da massa do sistema (g)	862,00	1333,19	1413,20	1120,14
Eficiência de espessura (E_t)	6,19 ±0,05	2,99 ±0,10	2,43 ±0,20	3,73 ±0,13
Eficiência de massa (E_m)	4,71 ±0,04	3,57 ±0,12	3,29 ±0,27	4,06 ±0,14
Eficiência balística (q²)	29,15 ±0,50	10,66 ±0,69	8,02 ±1,29	15,15±1,03

Fonte: Do Autor.

Em suma, conclui-se que, embora todos os sistemas analisados sejam inferiores em termos de eficiência de espessura, massa e fator de eficiência balística comparativamente à PLACA REF, os sistemas em estudo apresentam melhor resistência à penetração balística, a chamada, penetração residual (P_{PRES}), com destaque para a PLACA POL. Em relação ao parâmetro de peso, os sistemas PLACA POL, PLACA NYL e PLACA DYN são equivalentes ao sistema referência, com pesos similares a PLACA REF, embora sejam mais espessos. No entanto, os sistemas em estudo são materiais relativamente leves, considerando todo o conjunto de proteção balística. Portanto, embora os compósitos COMP POL, COMP NYL e COMP DYN tenham apresentado maior espessura e massa, seus desempenhos reforçam a viabilidade do uso de fitas de amarração em SBM.

Além das propriedades técnicas, o custo e a disponibilidade dos materiais são fatores importantes na escolha do material de proteção balística. O COMP REF, foi desenvolvido a partir do Kevlar®, que é um material de engenharia muito utilizado para aplicações balísticas, no entanto, é um material caro e é fornecido por um único fabricante. Os anéis de fitas de amarração, material base no desenvolvimento dos compósitos em estudo (COMP POL, COMP NYL e COMP DYN), são materiais comerciais, altamente disponíveis e custo acessível.

Ao analisar os valores de velocidade residual e energia absorvida dos compósitos estudados, pode-se notar que o COMP NYL apresentou os melhores índices de velocidade residual e energia de absorção. Enquanto o COMP REF, submetido a munição 9 mm, registrou uma energia de absorção de $35,67 \pm 14,74$ J, o COMP NYL, testado com munição 7,62 mm, absorveu $292,71 \pm 28,16$ J. Para que o COMP REF atingisse esse mesmo nível de absorção, seria necessário aumentar suas camadas em oito vezes, elevando seu custo de R\$ 40,00 para R\$ 320,00 (valores analisados em setembro de 2022) e sua massa para 417,6 g, ainda inferior à do COMP NYL (761,38 g). Embora o Kevlar, utilizado no COMP REF, apresente um custo inicial inferior, o COMP NYL pode ter uma redução significativa no preço caso seja adquirido em

larga escala diretamente da indústria, além de possuir maior disponibilidade no mercado, com diversos fornecedores. Dessa maneira, considerando o desempenho e a relação custo-benefício, o COMP NYL demonstrou um resultado satisfatório nas mesmas condições de proteção.

Ao analisar os resultados de taxa de eficiência balística, embora estes compósitos não tenham q^2 igual ou superior ao do COMP REF, todos apresentaram boa relação custo-benefício, especialmente o COMP DYN, devido à alta eficiência de espessura e eficiência em massa e fator de eficiência balística.

Portanto, os resultados demonstram que a substituição do Kevlar® por fitas de amarração em compósitos poliméricos impacta diretamente o desempenho balístico, com destaque para o Dynnema®, que apresentou eficiência de espessura ($3,73 \pm 0,13$), massa ($4,06 \pm 0,14$) e eficiência balística ($15,15 \pm 1,03$) superior entre os materiais alternativos testados.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa apresentou o desenvolvimento e a análise do desempenho balístico de placas multicamadas incorporando compósitos na camada intermediária à base de anéis de fita de amarração em substituição ao material de engenharia usado convencionalmente em materiais balísticos, Kevlar[®]. Foram utilizadas três configurações de anéis de fitas de amarração (poliéster, nylon e Dyneema[®]). Este estudo teve por objetivo abordar materiais com proteção balística por meio de soluções viáveis, economicamente acessíveis e baseadas em materiais disponíveis no mercado.

Na fase de desenvolvimento dos compósitos, a resistência à tração dos três tipos de anéis de fita de amarração combinadas com a matriz de resina epóxi foi avaliada. Foram obtidos resultados de resistência à tração dos compósitos, com média de 140 MPa, o que é um resultado satisfatório, exceto para o COMP NYL, que apresentou resultado de 62 MPa, mesmo apresentando um resultado de porosidade, com 6,92%, a menor dentre os compósitos estudados. O COMP POL que se mostrou ser o compósito mais poroso, com 10,59%, apresentou valores de resistência a tração superiores aos demais compósitos, com $143,71 \pm 18,70$ MPa. O COMP DYN, o sólido menos espesso, com 8,11 mm, com valores reduzidos de massa e volume, apresentou densidade relativamente baixa, com $1,15 \text{ g/cm}^3$ e porosidade total de 9,39%, o que contribui para a absorção de energia com menor adição de peso ao sistema e foi declarado como um compósito promissor, devido a sua leveza e altas propriedades balísticas, justificando sua adequação como alternativa em substituição do Kevlar[®] nas aplicações balísticas pretendidas. Como já era de se esperar, o compósito utilizado como referência apresentou valores superiores de resistência a tração, com $130,86 \pm 27,58$ MPa e se mostrou ser o material menos poroso, com 0,75%.

Referente as placas multicamadas desenvolvidas, pela qual, a camada frontal é formada por cerâmica alumina, a camada intermediária é composta pelos compósitos desenvolvidos no presente trabalho e a camada posterior é constituída por alumínio 6063, quanto aos dados de penetração residual é possível concluir que a PLACA POL e a PLACA NYL se destacaram, apresentando menores valores, porém, ocupando maior espessura, com 0,278 e 0,305 mm, respectivamente, o que indica uma eficiência nos parâmetros DOP em comparação a placa de referência, a PLACA REF, com valor de 7,072 mm. A PLACA DYN apresentou desempenho em absorção de impacto satisfatório, com 1,448 mm, porém com menor espessura agregada, o que é um fator importante e relevante. Portanto, é possível afirmar que o uso de diferentes

materiais podem estar associados em aplicações de proteção balística, desde que seja respeitado os limites de peso e espessura. Quanto a avaliação do desempenho balístico, percebe-se que a PLACA DYN atingiu um fator de eficiência balística satisfatório, com, $15,15 \pm 1,03$, quando comparado com a PLACA REF, com q^2 de $29,15 \pm 0,50$. Portanto, pode-se concluir a partir dos dados que os compósitos desenvolvidos a partir das fitas de amarração apresentaram boa relação custo-benefício, especialmente o COMP DYN, devido à alta eficiência de espessura e massa e fator de eficiência balística.

Com tudo, pode-se concluir que os compósitos desenvolvidos a partir de anéis de fita de amarração testados neste estudo, são candidatos promissores na substituição do Kevlar[®] em aplicações balísticas para sistemas de blindagens multicamadas. O compósito composto por Dyneema[®] e resina epóxi, em particular, se mostrou vantajoso devido ao seu nível de desempenho balístico, sendo uma escolha promissora quando a redução de peso exerce um fator importante. O custo e a disponibilidade destes materiais também sustentam a solução para uso em estruturas de blindagem com esta tipologia de material agregado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a resistência a múltiplos disparos de sistemas multicamadas, utilizando placas com dimensões superiores as que foram utilizadas neste estudo.
- Analisar o desempenho dos sistemas multicamadas, substituindo a cola epóxi rígida por uma variante com maior flexibilidade.
- Investigar o efeito do número de camadas e da espessura no desempenho balístico, mantendo constante o número de camadas para todos os compósitos estudados.
- Avaliar, por meio de simulação computacional, o impacto do número de camadas e da espessura sobre o desempenho balístico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABTEW, Mulat Alubel; BOUSSU, François; BRUNIAUX, Pascal; LOGHIN, Carmen; CRISTIAN, Irina. Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Composite Structures*, [S. l.], v. 223, p. 110966, 2019. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110966. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822318343411>.

AKIYOSHI, M. M.; SILVA, A. P. Da; SILVA, M. G. Da; PANDOLFELLI, V. C. Condutividade térmica e sua correlação com a temperatura e a massa específica volumétrica de materiais refratários sílico-aluminosos e aluminosos. *Cerâmica*, [S. l.], v. 47, n. 301, p. 19–27, 2001. DOI: 10.1590/s0366-69132001000100005.

ALPEN PASS. Alpen Pass. 2024. Disponível em: <https://www.alpenpass.com.br/>. Acesso em: 16 set. 2024.

ASM HANDBOOKS. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. [s.l.] : ASM International, 1990. DOI: 10.31399/asm.hb.v02.9781627081627. Disponível em: <http://dl.asminternational.org/handbooks/book/14/Properties-and-Selection-Nonferrous-Alloys-and>.

ASSIS, Foluke Salgado De; MONTEIRO, Sergio Neves; NETO, Aderson Dionísio Leite; SOARES, Maria Clara Sagratzki; PEREIRA, Vinicius de Souza. AVALIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE CHOQUE DA BLINDAGEM MULTICAMADA COM COMPÓSITO DE MATRIZ POLIÉSTER REFORÇA COM TECIDO DE JUTA. *Em: ANAIS DO CONGRESSO ANUAL DA ABM 2017, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Editora Blucher, 2017. p. 1059–1066. DOI: 10.5151/1516-392X-27927. Disponível em: <http://abmproceedings.com.br/ptbr/article/avaliacao-da-impedancia-de-choque-da-blindagem-multicamada-com-composito-de-matriz-poliester-reforca-com-tecido-de-juta>.*

ASSIS, Foluke Salgado De; PEREIRA, Artur Camposo; FILHO, Fábio da Costa Garcia; LIMA, Édio Pereira; MONTEIRO, Sergio Neves; WEBER, Ricardo Pondé. Performance of jute non-woven mat reinforced polyester matrix composite in multilayered armor. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 535–540, 2018. DOI:

10.1016/j.jmrt.2018.05.026. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785417307627>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 1500: Blindagem para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação. [s.l: s.n.].

BAJYA, Mukesh; MAJUMDAR, Abhijit; BUTOLA, Bhupendra Singh; ARORA, Sanchi; BHATTACHARJEE, Debarati. Ballistic performance and failure modes of woven and unidirectional fabric based soft armour panels. *Composite Structures*, [S. l.], v. 255, p. 112941, 2021. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112941. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822320328671>.

BANIASADI, Hossein; LIIZUNDIA, Erlantz; PAGANELLI, Zoe; DAMMANN, Nele; VÄLINEN, Lauri; SEPPÄLÄ, Jukka; NISKANEN, Jukka. Structure-property correlations study in biochar-enhanced polyamide composites for sustainable materials development. *Composites Part B: Engineering*, [S. l.], v. 286, p. 111809, 2024. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111809. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836824006218>.

BELLO, LUIZ HENRIQUE ABREU DAL; FIGUEIREDO, PAULO N.; ALMEIDA, THAINÁ BALLERO DOS ANJOS DE. Acumulação de capacidades tecnológicas inovadoras na indústria de defesa em economias emergentes: a experiência dos projetos REMAX e TORC30 no Exército Brasileiro. *Cadernos EBAPE.BR*, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 431–458, 2020. DOI: 10.1590/1679-395177563. Disponível em:
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-39512020000300431&tlng=pt. Acesso em: 7 nov. 2023.

BERNASCONI, A.; DAVOLI, P.; BASILE, A.; FILIPPI, A. Effect of fibre orientation on the fatigue behaviour of a short glass fibre reinforced polyamide-6. *International Journal of Fatigue*, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 199–208, 2007. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2006.04.001. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112306001484>.

BHAT, Aayush; NAVEEN, J.; JAWAID, M.; NORRRAHIM, M. N. F.; RASHEDI, Ahmad; KHAN, A. Advancement in fiber reinforced polymer, metal alloys and multi-layered armour

systems for ballistic applications – A review. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 15, p. 1300–1317, 2021. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.08.150. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785421009753>.

BIOPDI. Biopdi. 2024. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/limite-de-resistencia-a-tracao/>. Acesso em: 8 nov. 2024.

BLESS, S. J.; JURICK, D. L. DESIGN FOR MULTI-HIT CAPABILITY. *International Journal of Impact Engineering*, [S. l.], v. 21, n. 10, p. 905–908, 1998. DOI: 10.1016/S0734-743X(98)00042-6. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X98000426>.

BOUKOUVALAS, Nicolas T.; WIEBECK, Hélio. Caracterização térmica de fios de poliaramida. *Polímeros*, [S. l.], v. 17, n. 4, p. 284–288, 2007. DOI: 10.1590/S0104-14282007000400006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282007000400006&lng=pt&tlng=pt.

CALLISTER, Willian D. *Ciência e Engenharia de Materiais*. [s.l.: s.n.].

ÇELIKBAŞ, Deniz; ACAR, Erdem. Effect of sphere radius and bullet hitting location on the ballistic performance of alumina ceramic tile. *Procedia Structural Integrity*, [S. l.], v. 35, p. 269–278, 2022. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452321622000130>.

CHI, Runqiang; SERJOUEI, Ahmad; SRIDHAR, Idapalapati; TAN, Geoffrey E. B. Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: A semi-analytical approach. *International Journal of Impact Engineering*, [S. l.], v. 52, p. 37–46, 2013. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.10.001.

CHIN, Ernest S. C. Army focused research team on functionally graded armor composites. *Materials Science and Engineering: A*, [S. l.], v. 259, n. 2, p. 155–161, 1999. DOI: 10.1016/S0921-5093(98)00883-1. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509398008831>.

CONQUISTA MONTANHISMO. Anel de Fita Conquista - Escalada. 2024. Disponível em: <https://conquistamontanhismo.com.br/anel-de-fita-80cm-conquista>. Acesso em: 12 set. 2024.

COUTINHO, Fernanda M. B.; MELLO, Ivana L.; SANTA MARIA, Luiz C. De. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros*, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 01–13, 2003. DOI: 10.1590/S0104-14282003000100005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282003000100005&lng=pt&tlng=pt.

CROUCH, Ian G. Body armour – New materials, new systems. *Defence Technology*, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 241–253, 2019. DOI: 10.1016/j.dt.2019.02.002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214914718305932>.

CUI, Fengdan; WU, Guoqing; MA, Tian; LI, Weiping. Effect of Ceramic Properties and Depth-of-penetration Test Parameters on the Ballistic Performance of Armour Ceramics. *Defence Science Journal*, [S. l.], v. 67, n. 3, p. 260, 2017. DOI: 10.14429/dsj.67.10664. Disponível em: <http://publications.drdo.gov.in/ojs/index.php/dsj/article/view/10664>.

DASGUPTA, Kinshuk. Role of carbon nanotubes in the ballistic properties of boron carbide/carbon nanotube/ultrahigh molecular weight polyethylene composite armor. *Ceramics International*, [S. l.], v. 46, n. 4, p. 4137–4141, 2020. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.10.129. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S027288421932992X>.

DHARANI KUMAR, S.; SAMVEL, R.; ARAVINDH, M.; VIBIN, R. A.; POOVARASU, E.; SIVA PRASAD, M. S. Ballistic studies on synthetic fibre reinforced polymer composites and its applications –A brief review. *Materials Today: Proceedings*, [S. l.], 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.679. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785323017467>.

DOS SANTOS ALVES, Andreia Leite; CASSIANO NASCIMENTO, Lucio Fabio; SUAREZ, João Carlos Miguez. Influence of weathering and gamma irradiation on the mechanical and ballistic behavior of UHMWPE composite armor. *Polymer Testing*, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 104–

113, 2005. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2004.06.003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941804000893>.

DRESCH, Alexander B.; PIZZATTO, Fernando Otávio; VENTURINI, Janio; MONTEDO, Oscar R. K.; ARCARO, Sabrina; BERGMANN, Carlos P. Mosaic ballistic ceramics: A review. *Journal of Alloys and Compounds Communications*, [S. l.], v. 3, p. 100012, 2024. DOI: 10.1016/j.jacomc.2024.100012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2950284524000122>.

DRESCH, Alexander B.; VENTURINI, Janio; ARCARO, Sabrina; MONTEDO, Oscar R. K.; BERGMANN, Carlos P. Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review. *Ceramics International*, [S. l.], v. 47, n. 7, p. 8743–8761, 2021. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.12.095. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884220336968>.

DRESCH, Alexander B.; VENTURINI, Janio; BERGMANN, Carlos P. Improving the flexural-strength-to-density ratio in alumina ceramics with the addition of silicon nitride. *Ceramics International*, [S. l.], v. 47, n. 3, p. 3964–3971, 2021. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.260. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884220329795>.

DUPONT. DUPONT. 2024. Disponível em: <https://www.dupont.com.br/brands/kevlar.html>. Acesso em: 7 mar. 2024.

E-COMPOSITES. Resina Epoxi AR720 - Endurecedor AH723. 2024. Disponível em: https://www.e-composites.com.br/ar720_ah723/p. Acesso em: 16 maio. 2024.

FARIAS-AGUILAR, J. C.; RAMÍREZ-MORENO, M. J.; GONZALEZ-GARCÍA, D. M.; TÉLLEZ-JURADO, L.; BALMORI-RAMÍREZ, H. Evaluation of the ballistic protection level of (glass-fiber reinforced polyamide 6)-aramid fabric sandwich composite panels. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 12, p. 1606–1614, 2021. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.088. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S223878542100315X>.

FEI, Mingming; LIN, Ruizhi; LU, Yingwei; ZHANG, Xiaole; BIAN, Renji; CHENG, Jigui; LUO, Paifeng; XU, Chenxi; CAI, Dongyu. MXene-reinforced alumina ceramic composites. *Ceramics International*, [S. l.], v. 43, n. 18, p. 17206–17210, 2017. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.08.202. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884217318746>.

GOEL, Rahul; KULKARNI, Mandar D.; PANDYA, Kedar S.; NAIK, N. K. Stress wave micro–macro attenuation in ceramic plates made of tiles during ballistic impact. *International Journal of Mechanical Sciences*, [S. l.], v. 83, p. 30–37, 2014. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.03.020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740314001076>.

GONÇALVES, D. P.; DE MELO, F. C. L.; KLEIN, A. N.; AL-QURESHI, H. A. Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, [S. l.], v. 44, n. 2–3, p. 307–316, 2004. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.09.005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695503002542>.

GREENHALGH, E. S.; BLOODWORTH, V. M.; IANNUCCI, L.; POPE, D. Fractographic observations on Dyneema® composites under ballistic impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, [S. l.], v. 44, p. 51–62, 2013. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.08.012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X12002527>.

HAN, Feilong; WANG, Chenghao; ZHANG, Ya; WANG, Ziyu; YUE, Hangyu; ZONG, Lishuai; WANG, Jinyan; JIAN, Xigao. The investigation and fabrication of novel ballistic composites with checkerboard-shaped lay-up design to improve ballistic performances. *Composites Science and Technology*, [S. l.], v. 249, p. 110511, 2024. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110511. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353824000812>.

HAZELL, Paul J.; ROBERSON, Colin J.; MOUTINHO, Mauricio. The design of mosaic armour: The influence of tile size on ballistic performance. *Materials & Design*, [S. l.], v. 29,

n. 8, p. 1497–1503, 2008. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.03.003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306908000319>.

HU, Dean; ZHANG, Youmin; SHEN, Zhiwei; CAI, Qingyu. Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems. *Ceramics International*, [S. l.], v. 43, n. 13, p. 10368–10376, 2017. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.05.071.

HUNTSMAN. Araldite. 2024. Disponível em: <https://www.huntsman.com/products/detail/333/araldite>. Acesso em: 16 maio. 2024.

JABBAR, Abdul; HASAN MALIK, Mumtaz; HUSSAIN, Tanveer; ZULIFQAR, Adeel; TAUSIF, Muhammad. Comparison of mechanical and ballistic performance of composite laminates produced from single-layer and double-layer interlocked woven structures. *Polymer Composites*, [S. l.], v. 35, n. 8, p. 1583–1591, 2014. DOI: 10.1002/pc.22811. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pc.22811>.

JIA, Dongsheng; XU, Yingjie; WANG, Liangdi; ZHU, Jihong; ZHANG, Weihong. Study of the Ballistic Impact Behavior of Protective Multi-Layer Composite Armor. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, [S. l.], v. 140, n. 1, p. 171–199, 2024. DOI: 10.32604/cmescs.2024.046703.

JIUSTI, J.; KAMMER, E. H.; NECKEL, L.; LÓH, N. J.; TRINDADE, W.; SILVA, A. O.; MONTEDO, O. R. K.; DE NONI, A. Ballistic performance of Al₂O₃ mosaic armors with gap-filling materials. *Ceramics International*, [S. l.], v. 43, n. 2, p. 2697–2704, 2017. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.11.087. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884216320892>.

JOSEPH, Kuruvilla; MEDEIROS, Eliton S.; CARVALHO, Laura H. Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. *Polímeros*, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 136–141, 1999. DOI: 10.1590/S0104-14281999000400023.

JOSHI, Ashish; MISHRA, Ashish; SAXENA, Vikas Kumar. Impact response and energy absorption mechanisms of UHMWPE fabric and composites in ballistic applications: A

comprehensive review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, [S. l.], v. 185, p. 108314, 2024. DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108314.

KAUFMANN, Christian; CRONIN, Duane; WORSWICK, Michael; PAGEAU, Gilles; BETH, Andre. Influence of Material Properties on the Ballistic Performance of Ceramics for Personal Body Armour. *Shock and Vibration*, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 51–58, 2003. DOI: 10.1155/2003/357637. Disponible en: <http://www.hindawi.com/journals/sv/2003/357637/abs/>.

KHALID, Muhammad Yasir; AL RASHID, Ans; ARIF, Zia Ullah; AHMED, Waqas; ARSHAD, Hassan; ZAIDI, Asad Ali. Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. *Results in Engineering*, [S. l.], v. 11, p. 100263, 2021. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100263. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590123021000645>.

KRELL, Andreas; STRASSBURGER, Elmar. Order of influences on the ballistic resistance of armor ceramics and single crystals. *Materials Science and Engineering: A*, [S. l.], v. 597, p. 422–430, 2014. DOI: 10.1016/j.msea.2013.12.101. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509314000069>.

LI, Danyang; WANG, Rui; GUAN, Fuwang; ZHU, Yujing; YOU, Feifei. Enhancement of the quasi-static stab resistance of Kevlar fabrics impregnated with shear thickening fluid. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 18, p. 3673–3683, 2022. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.04.052. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S223878542200552X>.

LIU, Dazhao; HU, Junfeng; ZHANG, Guangyuan; WANG, Gang; GUI, Kaixuan; WANG, Miao; HAN, Wenbo; ZHANG, Dongyang. Effect of synthesizing temperature of alumina powder with rose-like structure on the microstructure and mechanical property of alumina ceramic. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 28, p. 1907–1914, 2024. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.12.104.

LIU, Weilan; CHEN, Zhaofeng; CHENG, Xingwang; WANG, Yangwei; AMANKWA, Adjei Richard; XU, Jiang. Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor.

Composites Part B: Engineering, [S. l.], v. 84, p. 33–40, 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.08.071. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836815005119>.

LÓPEZ-PUENTE, J.; ARIAS, A.; ZAERA, R.; NAVARRO, C. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. International Journal of Impact Engineering, [S. l.], v. 32, n. 1–4, p. 321–336, 2005. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.07.014.

LUO, Jiancheng; DEMCHUK, Zoriana; ZHAO, Xiao; SAITO, Tomonori; TIAN, Ming; SOKOLOV, Alexei P.; CAO, Peng-Fei. Elastic vitrimers: Beyond thermoplastic and thermoset elastomers. Matter, [S. l.], v. 5, n. 5, p. 1391–1422, 2022. DOI: 10.1016/j.matt.2022.04.007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S259023852200159X>.

LUZ, Fernanda Santos Da; LIMA JUNIOR, Edio Pereira; LOURO, Luis Henrique Leme; MONTEIRO, Sergio Neves. Ballistic Test of Multilayered Armor with Intermediate Epoxy Composite Reinforced with Jute Fabric. Materials Research, [S. l.], v. 18, n. suppl 2, p. 170–177, 2015. DOI: 10.1590/1516-1439.358914. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392015000800170&lng=en&tlng=en. Acesso em: 29 out. 2023.

MA, Ming-hui; WU, Yi-ding; YU, Yi-lei; LU, Wen-cheng; GAO, Guang-fa. Ballistic resistance of biomimetic ceramic composite armor: An integrated analysis of impact dynamics and structural response. Finite Elements in Analysis and Design, [S. l.], v. 240, p. 104209, 2024. DOI: 10.1016/j.finel.2024.104209. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168874X24001033>.

MADHU, Vemuri; RAMANJANEYULU, K.; BALAKRISHNA BHAT, T.; GUPTA, N. K. An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact. International Journal of Impact Engineering, [S. l.], v. 32, n. 1–4, p. 337–350, 2005. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.03.004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X0500059X>.

MAHMOUD ZAGHLOUL, Mahmoud Yousry; YOUSRY ZAGHLOUL, Moustafa Mahmoud; YOUSRY ZAGHLOUL, Mai Mahmoud. Developments in polyester composite materials – An in-depth review on natural fibres and nano fillers. *Composite Structures*, [S. l.], v. 278, p. 114698, 2021. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114698.

MARCOS, Haroldo. Poliamidas, poliésteres e termoplásticos elastoméricos: uma perspectiva sustentável na indústria moderna. *Polímeros*, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 107–110, 2012. DOI: 10.1590/S0104-14282012000200003. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282012000200003&lng=pt&tlng=pt.

MARSH, George. Ballistic composites – protecting the protectors. *Reinforced Plastics*, [S. l.], v. 61, n. 2, p. 96–99, 2017. DOI: 10.1016/j.repl.2015.10.003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034361715007018>.

MATERIAL PROPERTIES. Kevlar – Density – Strength – Melting Point – Thermal Conductivity. 2024. Disponível em: <https://material-properties.org/kevlar-density-strength-melting-point-thermal-conductivity/>. Acesso em: 8 nov. 2024.

MCKENNA, H. A.; HEARLE, J. W. S.; O’HEAR, N. *Handbook of fibre rope technology*. [s.l.] : Woodhead Publishing Limited, 2004. DOI: 10.1533/9781855739932.

MEDVEDOVSKI, Eugene. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2. *Ceramics International*, [S. l.], v. 36, n. 7, p. 2117–2127, 2010. a. DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.05.022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884210002099>.

MEDVEDOVSKI, Eugene. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, [S. l.], v. 36, n. 7, p. 2103–2115, 2010. b. DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.05.021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884210002087>.

MI, Xiaoqian; LIANG, Nuo; XU, Haifeng; WU, Juan; JIANG, Yu; NIE, Bei; ZHANG, Daohong. Toughness and its mechanisms in epoxy resins. *Progress in Materials Science*, [S.

l.], v. 130, p. 100977, 2022. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2022.100977. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642522000585>.

MONTEIRO, Sergio N.; MILANEZI, Thiago L.; LOURO, Luiz Henrique L.; LIMA, Édio P.; BRAGA, Fabio O.; GOMES, Alaelson V.; DRELICH, Jaroslaw W. Novel ballistic ramie fabric composite competing with KevlarTM fabric in multilayered armor. *Materials & Design*, [*S. l.*], v. 96, p. 263–269, 2016. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026412751630171X>.

NAIK, N. K.; GOEL, Rahul; KULKARNI, Mandar D. Stress wave attenuation in ceramic plates. *Journal of Applied Physics*, [*S. l.*], v. 103, n. 10, 2008. DOI: 10.1063/1.2921971. Disponível em: <https://pubs.aip.org/jap/article/103/10/103504/371078/Stress-wave-attenuation-in-ceramic-plates>.

NASCIMENTO, Lucio Fabio Cassiano; LOURO, Luis Henrique Leme; MONTEIRO, Sergio Neves; GOMES, Alaelson Vieira; MARÇAL, Rubens Lincoln Santana Blazutti; LIMA JÚNIOR, Édio Pereira; MARGEM, Jean Igor. Ballistic Performance of Mallow and Jute Natural Fabrics Reinforced Epoxy Composites in Multilayered Armor. *Materials Research*, [*S. l.*], v. 20, n. suppl 2, p. 399–403, 2017. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2016-0927. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392017000800399&lng=en&tlng=en.

NASCIMENTO, Rodrigo Fernandes; SILVA, Anderson Oliveira Da; WEBER, Ricardo Pondé; MONTEIRO, Sergio Neves. Influence of UV radiation and moisture associated with natural weathering on the ballistic performance of aramid fabric armor. *Journal of Materials Research and Technology*, [*S. l.*], v. 9, n. 5, p. 10334–10345, 2020. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.046.

NASH, N. H.; PORTELA, A.; BACHOUR-SIREROL, C. I.; MANOLAKIS, I.; COMER, A. J. Effect of environmental conditioning on the properties of thermosetting- and thermoplastic-matrix composite materials by resin infusion for marine applications. *Composites Part B: Engineering*, [*S. l.*], v. 177, p. 107271, 2019. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107271. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836819312405>.

NIKHIL KUMAR, K.; BHARAT KUMAR, C. H.; HEMANTH KUMAR, K.; NOOLVI, Basavaraj. Investigation of composite sandwich plates for ballistic armor application. *Materials Today: Proceedings*, [S. l.], v. 27, p. 1738–1742, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.651. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785320324330>.

O'BRIEN, D. J.; CHIN, W. K.; LONG, L. R.; WETZEL, E. D. Polymer matrix, polymer ribbon-reinforced transparent composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, [S. l.], v. 56, p. 161–171, 2014. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.09.015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X13002662>.

OLIVEIRA, Marcio Jardim; GOMES, Alaelson Vieira; PIMENTA, André Rocha; FIGUEIREDO, André Ben-Hur da Silva. Alumina and low density polyethylene composite for ballistics applications. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 14, p. 1791–1799, 2021. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.07.069. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785421007328>.

OLIVEIRA, Michelle Souza; FILHO, Fabio da Costa Garcia; PEREIRA, Artur Campos; NUNES, Larissa Fernandes; LUZ, Fernanda Santos Da; BRAGA, Fábio de Oliveira; COLORADO, Henry Alonso; MONTEIRO, Sergio Neves. Ballistic performance and statistical evaluation of multilayered armor with epoxy-fique fabric composites using the Weibull analysis. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 8, n. 6, p. 5899–5908, 2019. a. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.09.064. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785419305587>.

OLIVEIRA, Suzane de Sant'ana; WEBER, Ricardo Pondé; SUAREZ, João Carlos Miguez; SOUZA, Elson Renato Santos. Aço de alta dureza para aplicação balística: propriedades mecânicas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, [S. l.], v. 24, n. 3, 2019. b. DOI: 10.1590/s1517-707620190003.0764. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762019000300360&tlng=pt.

PARIT, Mahesh; JIANG, Zhihua. Towards lignin derived thermoplastic polymers. *International Journal of Biological Macromolecules*, [S. l.], v. 165, p. 3180–3197, 2020. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.173.

PEINADO, Jairo; JIAO-WANG, Liu; OLMEDO, Álvaro; SANTIUSTE, Carlos. Influence of stacking sequence on the impact behaviour of UHMWPE soft armor panels. *Composite Structures*, [S. l.], v. 286, p. 115365, 2022. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115365. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822322001672>.

PELEG, Kobi; RIVKIND, Avraham; AHARONSON-DANIEL, Limor. Does Body Armor Protect from Firearm Injuries? *Journal of the American College of Surgeons*, [S. l.], v. 202, n. 4, p. 643–648, 2006. DOI: 10.1016/j.jamcollurg.2005.12.019. Disponível em: <https://journals.lww.com/00019464-200604000-00014>.

PEREIRA, Artur Camposo; ASSIS, Foluke Salgado De; FILHO, Fabio da Costa Garcia; OLIVEIRA, Michelle Souza; DEMOSTHENES, Luana Cristyne da Cruz; LOPERA, Henry Alonso Colorado; MONTEIRO, Sergio Neves. Ballistic performance of multilayered armor with intermediate polyester composite reinforced with fique natural fabric and fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 4221–4226, 2019. a. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.07.031.

PEREIRA, Artur Camposo; ASSIS, Foluke Salgado De; GARCIA FILHO, Fabio da Costa; OLIVEIRA, Michelle Souza; LIMA, Eduardo Sousa; LOPERA, Henry Alonso Colorado; MONTEIRO, Sergio Neves. Evaluation of the Projectile's loss of Energy in Polyester Composite Reinforced with Fique Fiber and Fabric. *Materials Research*, [S. l.], v. 22, n. suppl 1, 2019. b. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2019-0146. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392019000700244&tlng=en.

POLLA, M. B.; FABRIS, D. C. N.; NONI JR., A. De; MONTEDO, O. R. K. Desempenho balístico de estruturas multicamadas à base de alumina/epóxi. *Cerâmica*, [S. l.], v. 65, n. 374, p. 207–215, 2019. DOI: 10.1590/0366-69132019653742457. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132019000200207&tlng=pt.

QI, Yu; WENG, Zhihuan; KOU, Yan; LI, Jiahui; CAO, Qi; WANG, Jinyan; ZHANG, Shouhai; JIAN, Xigao. Facile synthesis of bio-based tetra-functional epoxy resin and its potential

application as high-performance composite resin matrix. *Composites Part B: Engineering*, [S. l.], v. 214, p. 108749, 2021. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108749. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836821001414>.

RASHED, A.; YAZDANI, M.; BABALUO, AA; HAJIZADEH PARVIN, P. Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers. *Journal of Composite Materials*, [S. l.], v. 50, n. 25, p. 3561–3576, 2016. DOI: 10.1177/0021998315622982.

RUSSELL, B. P.; KARTHIKEYAN, K.; DESHPANDE, V. S.; FLECK, N. A. The high strain rate response of Ultra High Molecular-weight Polyethylene: From fibre to laminate. *International Journal of Impact Engineering*, [S. l.], v. 60, p. 1–9, 2013. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.03.010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X13000742>.

SCOPUS. Ballistic and Materials. 2024. Disponível em: <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=501cd496a0b7e64202fc5c0fdb4e8fa3&sot=a&sdt=a&sl=34&s=TITLE-ABS-KEY%28ballistic+materials%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results>. Acesso em: 2 set. 2024.

SELIM, Mohamed S.; EL-SAFTY, Sherif A.; SHENASHEN, Mohamed A.; ELMARAKBI, Ahmed. Advances in polymer/inorganic nanocomposite fabrics for lightweight and high-strength armor and ballistic-proof materials. *Chemical Engineering Journal*, [S. l.], v. 493, p. 152422, 2024. DOI: 10.1016/j.cej.2024.152422. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894724039093>.

SHERMAN, Dov; BEN-SHUSHAN, Tamir. Quasi-static impact damage in confined ceramic tiles. *International Journal of Impact Engineering*, [S. l.], v. 21, n. 4, p. 245–265, 1998. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00063-8. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X97000638>.

SHOCKEY, Donald A.; MARCHAND, A. H.; SKAGGS, S. R.; CORT, G. E.; BURKETT, M. W.; PARKER, R. Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods.

International Journal of Impact Engineering, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 263–275, 1990. DOI: 10.1016/0734-743X(90)90002-D.

SIDDESH KUMAR, N. M.; DHRUTHI; PRAMOD, G. K.; SAMRAT, P.; SADASHIVA, M. A Critical Review on Heat Treatment of Aluminium Alloys. Materials Today: Proceedings, [S. l.], v. 58, p. 71–79, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.586. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785322000335>.

SILVA, Gilmar Cordeiro Da; LADEIRA, Geraldo Flávio Ximenes; NASCIMENTO JÚNIOR, Hermano; CARNEIRO, José Rubens Gonçalves. Estudo da substituição do nylon por compósito de polipropileno com fibra de vidro. Matéria (Rio de Janeiro), [S. l.], v. 24, n. 3, 2019. DOI: 10.1590/s1517-707620190003.0737. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762019000300334&tlng=pt.

SILVA, M. V. Da; STAINER, D.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. Blindagens cerâmicas para aplicações balísticas: uma revisão. Cerâmica, [S. l.], v. 60, n. 355, p. 323–331, 2014. DOI: 10.1590/S0366-69132014000300003. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132014000300003&lng=pt&tlng=pt.

SINGH, Manoj Kumar; TEWARI, Renu; ZAFAR, Sunny; RANGAPPA, Sanjay Mavinkere; SIENGCHIN, Suchart. A comprehensive review of various factors for application feasibility of natural fiber-reinforced polymer composites. Results in Materials, [S. l.], v. 17, p. 100355, 2023. DOI: 10.1016/j.rinma.2022.100355. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590048X22001030>.

SOLIS, Daphene M.; SILVA, Antonio V.; VOLPATO, Neri; BERTI, Lucas F. Reaction-bonding of aluminum oxide processed by binder jetting. Journal of Manufacturing Processes, [S. l.], v. 41, p. 267–272, 2019. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.04.008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612519300830>.

SORRENTINO, L.; BELLINI, C.; CORRADO, A.; POLINI, W.; ARICÒ, R. Ballistic Performance Evaluation of Composite Laminates in Kevlar 29. Procedia Engineering, [S. l.],

v. 88, p. 255–262, 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.048. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187770581500973X>. Acesso em: 29 out. 2023.

SUN, Shuai; ZHANG, Ruiyu; SUN, Wenxun; DING, Yifei; MENG, Linghui; BAI, Yongping. Terminal modified polyesters with improved tensile properties based on plasticization and π - π stacking effects. *Polymer*, [S. l.], v. 298, p. 126934, 2024. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.126934.

TANG, Fan *et al.* Protective performance and dynamic behavior of composite body armor with shear stiffening gel as buffer material under ballistic impact. *Composites Science and Technology*, [S. l.], v. 218, p. 109190, 2022. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.109190. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353821005467>.

TEIJIN ARAMID. Teijin Aramid. 2024. Disponível em: <https://www.teijinaramid.com>. Acesso em: 16 set. 2024.

TEIJIN ARAMID. O que é aramida? 2025. Disponível em: https://www.teijinaramid.com/en/expertise/what-is-aramid?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAtsa9BhAKEiwAUZAszf-duZvh6KwEAOxTo_GaIpjBcd5kmbU-gLI01XbAVJgFpMSVIl62FxoCVMMQAvD_BwE. Acesso em: 15 fev. 2025.

TIAN, Chao; LI, Zhipeng; DONG, Yongxiang. Ballistic performance of hybrid structure with perforated panel. *International Journal of Mechanical Sciences*, [S. l.], v. 218, p. 107031, 2022. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.107031. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740321007074>.

ÜBEYLI, Mustafa; YILDIRIM, R. Orhan; ÖGEL, Bilgehan. Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al₂O₃ laminated composites. *Journal of Materials Processing Technology*, [S. l.], v. 196, n. 1–3, p. 356–364, 2008. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.050. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013607005754>.

UMBHARATWALA, M. D.; VINOTH, P.; GOEL, M. D. Numerical model optimization of meso-scale fabric composite. *Materials Today: Proceedings*, [S. l.], v. 87, p. 122–133, 2023.

DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.323. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785323008878>.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. Composite Materials Handbook Polymer Matrix Composites Materials Usagre, Design, and Analysis. Department of Defense , [S. l.], v. 3, p. 2,1,1-2,1,2, 2004.

U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE/OFFICE OF JUSTICE PROGRAMS - NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. NIJ 0101.06 U.S. [s.l: s.n.].

VALENÇA, Silvio Leonardo; GRIZA, Sandro; DE OLIVEIRA, Vandalucia Gomes; SUSSUCHI, Eliana Midori; DE CUNHA, Frederico Guilherme Carvalho. Evaluation of the mechanical behavior of epoxy composite reinforced with Kevlar plain fabric and glass/Kevlar hybrid fabric. Composites Part B: Engineering, [S. l.], v. 70, p. 1–8, 2015. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.09.040. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836814004430>.

VARA PRASAD, Vemu; TALUPULA, Sowjanya. A Review on Reinforcement of Basalt and Aramid (Kevlar 129) fibers. Materials Today: Proceedings, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 5993–5998, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.202. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785317331905>.

VELEZ, M.; BRAISTED, WR; FRANK, GJ; PHILLIPS, PL; DAY, DE; MCLAUGHLIN, MD. Impact strength of optically transparent glass ribbon composites. Journal of Composite Materials, [S. l.], v. 46, n. 14, p. 1677–1695, 2012. DOI: 10.1177/0021998311422601.

WANG, Hongxu; HAZELL, Paul J.; SHANKAR, Krishna; MOROZOV, Evgeny V.; ESCOBEDO, Juan P. Impact behaviour of Dyneema® fabric-reinforced composites with different resin matrices. Polymer Testing, [S. l.], v. 61, p. 17–26, 2017. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.04.026. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941817303367>. Acesso em: 6 mar. 2025.

WANG, Yuanlong; YU, Yi; WANG, Chunyan; ZHOU, Guan; KARAMOOZIAN, Aminreza; ZHAO, Wanzhong. On the out-of-plane ballistic performances of hexagonal, reentrant, square,

triangular and circular honeycomb panels. *International Journal of Mechanical Sciences*, [S. l.], v. 173, p. 105402, 2020. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105402. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740319319800>.

WAQAR, Muhammad; MEMON, Azhar M.; SABIH, Muhammad; ALHEMS, Luai M. Composite pipelines: Analyzing defects and advancements in non-destructive testing techniques. *Engineering Failure Analysis*, [S. l.], v. 157, p. 107914, 2024. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107914. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630723008683>.

WILKINS, Mark L. Mechanics of penetration and perforation. *International Journal of Engineering Science*, [S. l.], v. 16, n. 11, p. 793–807, 1978. DOI: 10.1016/0020-7225(78)90066-6. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0020722578900666>.

XU, Dongfang; HUANG, Zhixin; CHEN, Ganchao; REN, Xianben; LI, Danyang; ZHANG, Yan; LI, Ying. Experimental investigation on the ballistic performance of B4C/Aramid/UHMWPE composite armors against API projectile under different temperatures. *Thin-Walled Structures*, [S. l.], v. 196, p. 111553, 2024. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111553. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823123010303>.

YOSHIMURA, H. N.; MOLISANI, A. L.; SIQUEIRA, G. R.; CAMARGO, A. C. De; NARITA, N. E.; CESAR, P. F.; GOLDENSTEIN, H. Efeito da porosidade nas propriedades mecânicas de uma alumina de elevada pureza. *Cerâmica*, [S. l.], v. 51, n. 319, p. 239–251, 2005. DOI: 10.1590/S0366-69132005000300011.

ZAERA, R.; SÁNCHEZ-SÁEZ, S.; PÉREZ-CASTELLANOS, J. L.; NAVARRO, C. Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, [S. l.], v. 31, n. 8, p. 823–833, 2000. DOI: 10.1016/S1359-835X(00)00027-0. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X00000270>.

ZHAO, Chunyu; WANG, Yunpeng; CAO, Saisai; XUAN, Shouhu; JIANG, Wanquan; GONG, Xinglong. Conductive shear thickening gel/Kevlar wearable fabrics: A flexible body armor

with mechano-electric coupling ballistic performance. *Composites Science and Technology*, [S. l.], v. 182, p. 107782, 2019. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107782. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353819309583>.

ZHAO, Heng; XU, Shuangshuang; GUO, Anru; LI, Jie; LIU, Dong. The Curing Kinetics Analysis of Four Epoxy Resins Using a Diamine Terminated Polyether as Curing Agent. *Thermochimica Acta*, [S. l.], v. 702, p. 178987, 2021. a. DOI: 10.1016/j.tca.2021.178987. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040603121001283>.

ZHAO, Wenjuan; LIU, Bin; WANG, Yu; PENG, Xiangfei; FENG, Li; FAN, Haotian; HE, Weizhen. Design of shock wave attenuation effects on multi-impedance-matched laminated composites. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 23, p. 5846–5860, 2023. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.143. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785423003770>.

ZHAO, Zhong-Nan; HAN, Bin; ZHANG, Rui; ZHANG, Qi; ZHANG, Qian-Cheng; NI, Chang-Ye; LU, Tian Jian. Enhancement of UHMWPE encapsulation on the ballistic performance of bi-layer mosaic armors. *Composites Part B: Engineering*, [S. l.], v. 221, p. 109023, 2021. b. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836821004091>.

ZHOU, Junyi; HEISSERER, Ulrich; DUKE, Phillip W.; CURTIS, Paul T.; MORTON, John; TAGARIELLI, Vito L. The sensitivity of the tensile properties of PMMA, Kevlar® and Dyneema® to temperature and strain rate. *Polymer*, [S. l.], v. 225, p. 123781, 2021. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123781.

ZHU, Deju; MOBASHER, Barzin; RAJAN, Subramaniam D. Dynamic Tensile Testing of Kevlar 49 Fabrics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [S. l.], v. 23, n. 3, p. 230–239, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000156. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000156>.

ZHU, Yihui; MA, Jie; FAN, Zhuangqing; WEN, Yaoke; XU, Cheng; XIA, Min. Ballistic impact performance and blunt injury assessment of ceramic/UHMWPE laminate composite body armor. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 29, p. 1703–1728, 2024.

DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.01.140. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785424001406>.