

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

PRISCILLA SOUSA MELO

**DESEMPENHO BALÍSTICO DE TECIDO DE ARAMIDA IMPREGNADO COM
TERMOPOLIMERO DE ETILENO-PROPILENO-DIENO**

**RIO DE JANEIRO
2022**

PRISCILLA SOUSA MELO

DESEMPENHO BALÍSTICO DE TECIDO DE ARAMIDA IMPREGNADO
COM TERMOPOLIMERO DE ETILENO-PROPILENO-DIENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia,
como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre
em Ciências em Ciência dos Materiais.

Orientador(es): André Ben-Hur da Silva Figueiredo, D.C.

Rio de Janeiro

2022

©2022

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha
Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Melo, Priscilla Sousa.

DESEMPENHO BALÍSTICO DE TECIDO DE ARAMIDA IMPREGNADO
COM TERMOPOLIMERO DE ETILENO-PROPILENO-DIENO / Priscilla Sousa
Melo. – Rio de Janeiro, 2022.

52 f.

Orientador(es): André Ben-Hur da Silva Figueiredo.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Ciência dos Materiais,
2022.

1. Aramida. 2. EPDM. 3. Diluído. 4. Absorção de Energia. i. da Silva
Figueiredo, André Ben-Hur (orient.) ii. Título

PRISCILLA SOUSA MELO

**DESEMPENHO BALÍSTICO DE TECIDO DE ARAMIDA
IMPREGNADO COM TERMOPOLIMERO DE
ETILENO-PROPILENO-DIENO**

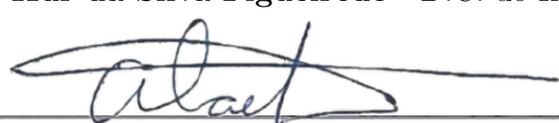
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Ciência dos Materiais.

Orientador(es): André Ben-Hur da Silva Figueiredo.

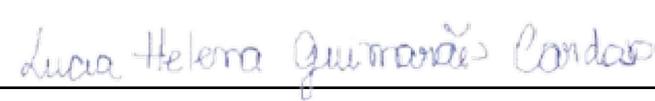
Aprovado em Rio de Janeiro, 09 de dezembro de 2022, pela seguinte banca examinadora:



Prof. **André Ben-Hur da Silva Figueiredo** - D.C. do IME - Presidente



Prof. **Alaelson Vieira Gomes** - D.C. do IME



Prof^ª. **Lucia Helena Guimarães Cardoso** - D.C. da UNESA

Rio de Janeiro
2022

*Dedico este trabalho especialmente a Deus, por todas as graças concedidas nesse caminho
e à toda minha família.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado força e sabedoria para passar por todas as dificuldades durante esta longa jornada.

A minha mãe, Ana Stela de Sousa, e ao meu falecido pai, Jonas Santos de Melo, que sempre me incentivaram a buscar crescimento, sabedoria e nunca deixaram de me apoiar e me ensinar a viver de forma justa e correta. A minha irmã, Giovanna Sousa Melo, minha companheira, que sempre esteve do meu lado seja nos momentos de dificuldades ou de alegrias. Ao meu companheiro, amigo e namorado Carlos Inácio Sermúd, por sempre acreditar no meu potencial e incentivar a não desistir dessa batalha.

Aos meus tios Jose Adriano de Sousa e Dilcimar Alves Santo por todo acolhimento, sustento e apoio dado nesses anos, abrindo as portas do seu lar me tratando como filha.

Agradeço ao Doutor André Ben-Hur da Silva Figueiredo, meu orientador, sem ele seria impossível a finalização desse projeto, esteve sempre disposto e paciente, me ensinando e dando todo o suporte que precisei, demonstrando entusiasmo e confiança durante todo esse processo.

Aos meus amigos que ajudaram na realização de algumas etapas, Pedro Henrique Poubel, Danúbia Bordim e João Gabriel (IMA). Eles foram peças essenciais que possibilitaram a realização deste trabalho.

A Talita Gama pelo auxílio com as análises de difração de raios-X.

Aos amigos dessa jornada, Daysianne Kessy, Edilainea Alves, Clicia Joana Helen Karina, Arquimedes Filho, Pablo Ataide, Luana Demosthenes, que junto comigo partilharam das mesmas experiências, sem eles esse processo se tornaria mais difícil.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro neste período.

Agradeço à coordenação e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais do IME que ajudaram a realizar esse trabalho.

“Põe um motivo sobrenatural na tua atividade profissional de cada dia, e terás santificado o trabalho.”
(São Josemaria Escrivá)

RESUMO

Neste trabalho, o comportamento do impacto de alta velocidade do tecido Kevlar impregnado com o elastômero termopolímero etileno-propileno-dieno (EPDM) diluído com tolueno foi investigado experimentalmente. Os testes experimentais de absorção de energia e de profundidade de penetração, foram realizados por um rifle de pressão Airfoce Texan, projétil de um chumbo calibre 45 com massa de aproximadamente 14,4g para amostras de 2, 3, 4 e 5 camadas, e para o teste de profundidade de penetração foram usadas amostras de 12 camadas. O elastômero foi diluído com razões de elastômero/diluyente 1/0, 1/1 e 2/1. Para estudar a viscosidade do EPDM viscosímetro DV-II Pro Viscometer, a estrutura cristalina pelo difratômetro X Pert Pro PANalytical, as características térmicas pelo DSC HITACHI DSC 7000 e por último o FTIR para análise dos grupos funcionais. A quantidade de camadas influenciou mais nos resultados balísticos do que a proporção de diluição do elastômero. Para os resultados da caracterização do elastômero mostrou a possibilidade de conter nanopartículas, um comportamento de fluido não newtoniano e a diluição pode melhorar as propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Aramida. EPDM. Diluído. Absorção de Energia.

ABSTRACT

In this work, the high-speed impact behavior of aramid fabric, impregnated with elastomer ethylene-propylene-diene thermopolymer (EPDM) diluted with toluene was investigated experimentally. The experimental tests of energy absorption and penetration depth were carried out by an Airforce Texan pressure rifle, , a 45 caliber bullet projectile with a mass of approximately 14.4g for samples of 2, 3, 4 and 5 layers, and for the penetration depth test, 12-layer samples were used. The elastomer was diluted with elastomer/diluent ratios of 1/0, 1/1 and 2/1. To analyze the crystal structure by the latest EPDM Vicosimeter DV-II, the thermal characteristics by the DSC HITACHI DSC 7000 and by the FTIR of the functional groups. The results reveal that the aramid compound with the pure or diluted EPDM elastomer can increase energy and reduce the absorption area. The number of layers influences more the ballistic results of the elastomer dilution ratio. For the results of the characterization of the polymeric product, it showed a possibility of containing nanoparticles, a non-Newtonian fluid behavior and the dilution can improve the mechanical properties.

Keywords: Aramid. EPDM. Diluted. Energy Absorption.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Forças atuantes no trajeto do projétil.	18
Figura 2.2 – Formação da trajetória do projétil	18
Figura 2.3 – Munição de armas ligeiras	20
Figura 2.4 – Diferença no comportamento durante a fiação entre polímeros flexíveis e rígidos.	22
Figura 2.5 – Estrutura da fibra de aramida	23
Figura 2.6 – TGA do Kevlar® em Ar e em Nitrogênio.	24
Figura 2.7 – Estrutura cis e trans do polipropileno.	26
Figura 2.8 – Spray selante Flex Seal	28
Figura 3.1 – Amostras preparadas para o ensaio balístico.	30
Figura 3.2 – Imagem do sistema de detecção no ensaio de energia de absorção.	31
Figura 3.3 – Resultado de um disparo. (a) Profundidade de penetração (PP) medida da superfície do anteparo até a ponta do projétil; (b) projétil; (c) anteparo de MDF; (d) disco compósito	32
Figura 4.1 – Projétil retido na amostra de 5 camadas na primeira etapa dos testes balísticos.	34
Figura 4.2 – Amostra perfurada da etapa 2 e 3, após o impacto balístico.	35
Figura 4.3 – Amostra de aramida pura, após o impacto balístico.	35
Figura 4.4 – Energia de absorção com desvio padrão das amostras de 2 camadas.	37
Figura 4.5 – Energia de absorção com desvio padrão das amostras de 3,4 e 5 camadas e aramida pura.	38
Figura 4.6 – Imagem do conjunto de amostras depois do ensaio balístico.	39
Figura 4.7 – Imagem do substrato de MDF após os disparos.	40
Figura 4.8 – Profundidade de penetração relativa.	41
Figura 4.9 – Imagem de MEV na região de impacto com 3 e 4 camadas.	42
Figura 4.10 – Imagem de MEV na região de impacto da amostra de 5 camadas com diluições de 1/1 e 2/1.	42
Figura 4.11 – Imagem de MEV da impregnação com 3 e 4 camadas.	43
Figura 4.12 – Imagem de MEV da impregnação com 5 camadas com diluições de 1/1 e 2/1.	43
Figura 4.13 – Gráfico da viscosidade do elastômero puro e diluído 1/1.	44
Figura 4.14 – Difratoograma do Elastômero EPDM	45
Figura 4.15 – Lista de picos do elastômero e das fichas indexadas.	45
Figura 4.16 – Resultados da análise de DSC.	46
Figura 4.17 – Bandas de absorção encontradas do EPDM na análise de FTIR	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Nível de ameaça balística segundo o tipo de projétil	21
Tabela 3.1 – Proporção Elastômero/Diluyente das amostras.	29
Tabela 4.1 – Ensaio de energia de absorção, amostras de 2 camadas.	36
Tabela 4.2 – Ensaio de energia de absorção, amostras de 3,4,5 camadas e aramida pura.	36
Tabela 4.3 – Análise de variância para as amostras de duas camadas.	37
Tabela 4.4 – Análise de variância para as amostras de 3,4 e 5 camadas e aramida pura.	38
Tabela 4.5 – Ensaio de profundidade de penetração.	40
Tabela 4.6 – Análise de variância do ensaio de profundidade.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C_7H_8	Tolueno
$C_{16}H_{30}CaO_4$	Valproato de Cálcio
$C_{10}H_{12}CaN_2O_8 \cdot 7H_2O$	Etilenodiaminotetra-Acetato de Cálcio Heptahidratado
Ca	Cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de Cálcio
DRX	Difração de Raio X
DSC	Diferencial Scanning Calorimetry
E_{abs}	Energia de Absorção
EPDM	Termopolimero de Etileno-Propileno-Dieno
FTIR	Infravermelho por Transformada de Fourier
MDF	Medium Density Fiberboard
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
STF	Shear Thickening Fluid
UHMWPE	Poliétileno de Ultra Alto Peso Molecular

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
NIJ	<i>National Institute of Justice</i>
NBR	<i>Norma Brasileira</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	ESTUDO DA BALÍSTICA	17
2.1.1	BALÍSTICA EXTERNA	17
2.1.2	BALÍSTICA TERMINAL OU EFEITO	18
2.1.3	ELEMENTOS BALÍSTICOS	19
2.1.3.1	MUNIÇÃO	19
2.1.3.2	PROTEÇÃO BALÍSTICA	20
2.2	TECIDO DE ARAMIDA	22
2.2.1	ESTRUTURA MOLECULAR	23
2.2.2	PROPRIEDADES TÍPICAS	23
2.2.3	IMPREGNAÇÃO DOS FIOS	24
2.3	ELASTÔMERO	25
2.3.1	BORRACHA LIQUIDA	26
2.3.2	PRODUTO FLEX SEAL™	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	MATERIAIS	29
3.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	29
3.3	ENSAIO BALÍSTICO	30
3.3.1	TESTE DE PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO	31
3.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	32
3.5	ANÁLISE DA VISCOSIDADE	32
3.6	ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	33
3.7	CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)	33
3.8	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	33
4	RESULTADOS	34
4.1	ENSAIO BALÍSTICO	34
4.1.1	TESTE DE PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO	39
4.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	41
4.3	ANÁLISE DE VISCOSIDADE	43

4.4	ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	44
4.5	CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)	45
4.6	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	46
5	CONCLUSÃO	48
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Durante toda a história humana, sempre houve busca por proteção do corpo contra ataques físicos. Isso levou a grandes evoluções de materiais de acordo com as descobertas de cada época, como peles de cordeiros ou fibras naturais feita de palhas, algodão e seda, materiais metálicos como cobre, aço e ferro usados em forma de chapa e cota de malha até as armaduras tecnologicamente complexas usadas hoje. O avanço tecnológico dos elementos de proteção balística e de blindagem está fortemente relacionado a evolução dos níveis de ameaça de armamento sofisticado que conseqüentemente aumenta a busca por novos materiais e fibras, não apenas garantindo proteção, mas também o bem-estar do seu utilizador (CAVALLARO, 2011; FERREIRA, 2015).

DAVID, GAO e ZHENG (2009) destacou que, devido à complexidade do evento balístico se torna fundamental a investigação de materiais para uso em proteção balística, salientando que todos os parâmetros afetam a resistência dos materiais. Diante dessa realidade, séries de estudos foram realizados nas últimas décadas procurando novos conceitos de tecidos balísticos para atender às novas demandas. Materiais cerâmicos e compósitos laminados têm sido extensivamente investigados, pois estão entre os principais materiais usados, com destaque aos compósitos preenchidos com nanopartículas e fibras.

As fibras de alta resistência são aplicadas em armadura corporal flexível, por possuírem ótimas propriedades de tenacidades, com alto peso molecular, alta cristalinidade e poucos defeitos. Exemplos são: Fibras de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE); Fibras de aramida; Fibras de vidro balística; Fibras de carbono. Sendo que as mais usadas em compósitos de proteção balística são a aramida e o UHMWPE (BHATNAGAR, 2016).

Além do tipo do material das fibras, a quantidade de camadas do tecido fibroso também deve ser estudada, por influenciar na capacidade de proteção. Diminuir o número total de camadas eleva a profundidade do trauma e baixa a capacidade de absorção de energia do compósito (YAVAŞ et al., 2015). Por exemplo, para fornecer proteção adequada contra ameaças de armas de fogo na fabricação de coletes, são necessários aproximadamente 20 a 50 camadas de fibras de aramida, (AURORA; MAJUMDAR; BUTOLA, 2020). Essa quantidade de camada deixa a armaduras pesadas e desconfortáveis para o uso diário, portanto, na busca por maleabilidade e redução de peso, pesquisas estão desenvolvendo as armaduras líquidas, que consiste em impregnar os fios do tecido com fluido de espessamento cisalhante (STF), os quais apresentam comportamento não newtoniano e melhoram a dissipação de energia no impacto com projéteis de alta velocidade (SRIVASTAVA; MAJUMDAR; BUTOLA, 2012).

Para proteção contra grandes explosões pesquisadores têm investigado o uso de polímeros elastoméricos, como poliuretano e poliuréia, na aplicação em projetos de construção de infraestruturas críticas, devido às características atrativas e sua morfologia, como alta capacidade de alongamento, facilidade de aplicação, alta capacidade de absorção de energia, alta resistência em ambientes agressivos, capacidade de atuar como camada protetora para materiais estruturais, estabilidade térmica, resistência e sua possível contribuição para a durabilidade e sustentabilidade geral da estrutura (RAMAN, 2011; SOMARATHNA et al., 2015).

Nessa conjuntura, esta dissertação de mestrado propõe a utilização de polímero elastomérico líquido para impregnar fibras de aramida na aplicação de coletes balístico com o objetivo de melhorar seu desempenho.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a resposta ao impacto balístico de tecido de aramida impregnado com um *spray* selante líquido da marca Flex Seal™, puro e diluído, composto pelo termopolímero de etileno-propileno-dieno diluído (EPDM), muito usado no setor da construção civil como revestimento e selagem de rachaduras e buracos.

1.2 Objetivos Específicos

De modo a atingir a meta geral para esta dissertação, foi estabelecido os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a fração de elastômero diluído (1/0, 1/1 ou 2/1) que resulta no melhor desempenho balístico;
- Verificar a diferença na absorção de energia de amostras produzido com diferentes números de camada e diferentes razões de diluição do elastômero;
- Determinar a energia absorvida pelo tecido de aramida impregnada e aramida pura;
- Determinar a profundidade de penetração da aramida impregnada;
- Analisar o *pullout* e impregnação dos fios da aramida após os testes balísticos através da análise visual e ampliada pelo MEV;
- Avaliar as propriedades do material elastomérico através das análise de viscosidade e difração de raios X;
- Avaliação das propriedades térmicas utilizando DSC;
- Caracterizar o elastômero utilizando o FTIR.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Estudo da Balística

A ciência balística estuda as forças atuantes sobre um projétil e os seus movimentos desde a sua posição inicial dentro da arma até à sua penetração nos alvos, se dividindo em três áreas distintas: a balística interna, a balística externa e a balística terminal ou de efeito.

A balística interna está relacionada ao processo ocorrido ainda dentro do cano da arma, desde a ignição da carga propulsora até o projétil sair da boca do cano, em seguida tem-se a balística externa, o processo após a saída do projétil na arma, estuda também os seus movimentos na atmosfera até atingir o alvo, e finalmente a balística terminal responsável por estudar os feitos causados pelo impacto do projétil no alvo (MARQUES, 2014; FERREIRA, 2015).

2.1.1 Balística Externa

Determina as leis que regem o movimento do projétil e se subdivide em duas: a balística no vácuo que considera apenas a ação da gravidade e a balística no ar, que considera tanto a ação da gravidade quanto a resistência do ar (FERREIRA, 2015)

Ao sair da arma, o projétil tem o movimento regido pela a ação da força da gravidade, que permanece constante durante toda a sua trajetória até atingir o alvo. A quantidade de queda que o projétil sofre devido a força gravitacional é chamado de queda vertical que depende da distância percorrida e da velocidade do projétil. Quanto maior a distância percorrida maior será a queda vertical, ao passo que valores maiores de velocidade diminui a queda vertical. A resistência do ar é a força que desacelera o projétil, sendo esse fenômeno chamado de arrasto. O ar inicia atuando na ponta da projétil que em seguida é empurrado para as laterais. Para reduzir a influência da resistência do ar é necessário diminuir a área transversal na ponta do projétil (KHAN, 2017).

A resistência do ar é a força de maior relevância durante o percurso do projétil, este, em movimento, comprime as moléculas de ar com sua ponta fluindo-as para as laterais, gerando um atrito superficial que reduz ainda mais a energia cinética e a velocidade. Após passar pelo projétil, essas moléculas de ar preenchem os espaços deixado pela base do projétil formando um rastro turbulento, causando uma região de alta pressão na traseira do projétil, resistindo ao seu movimento (CLARK, 2011). A resistência do ar possui três componentes: (a) a força de compressão sobre a ponta do projétil, devido a compressão do ar; (b) a componente de fricção do ar sobre as superfícies e protuberâncias laterais do

projétil; (c) uma componente de sucção provocada pelo vácuo na base do projétil como mostrado na Figura 2.1 (PINTO, 2009).

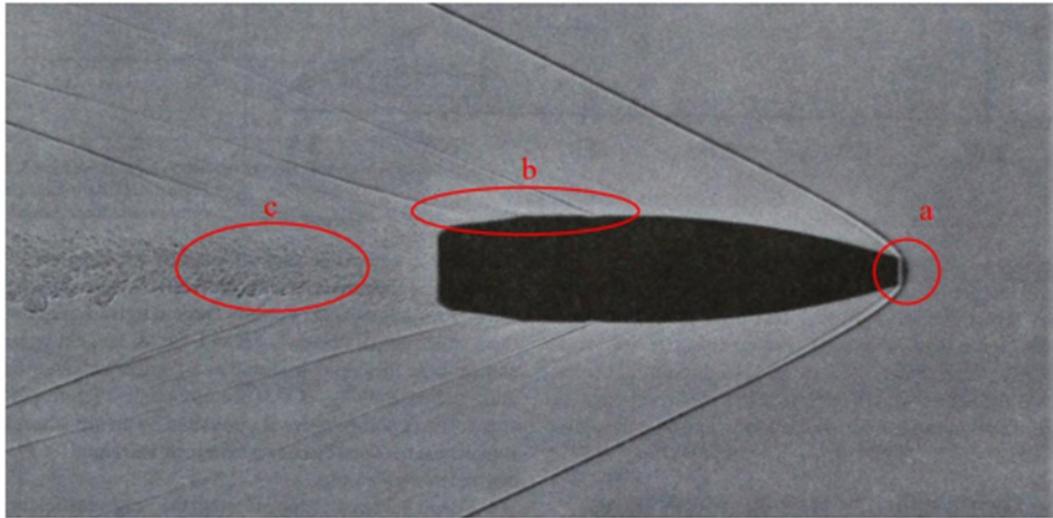


Figura 2.1 – Forças atuantes no trajeto do projétil.
(SANTOS, 2016)

A Figura 2.2 mostra os vetores da velocidade inicial e final do projétil formando uma trajetória curvilínea até o alvo. Devido a esse movimento para baixo na sua trajetória, cano da arma deve ser inclinado para uma elevação positiva em relação ao alvo, garantindo que o projétil tenha impacto em um alvo distante (BIRKETT et al., 2021).

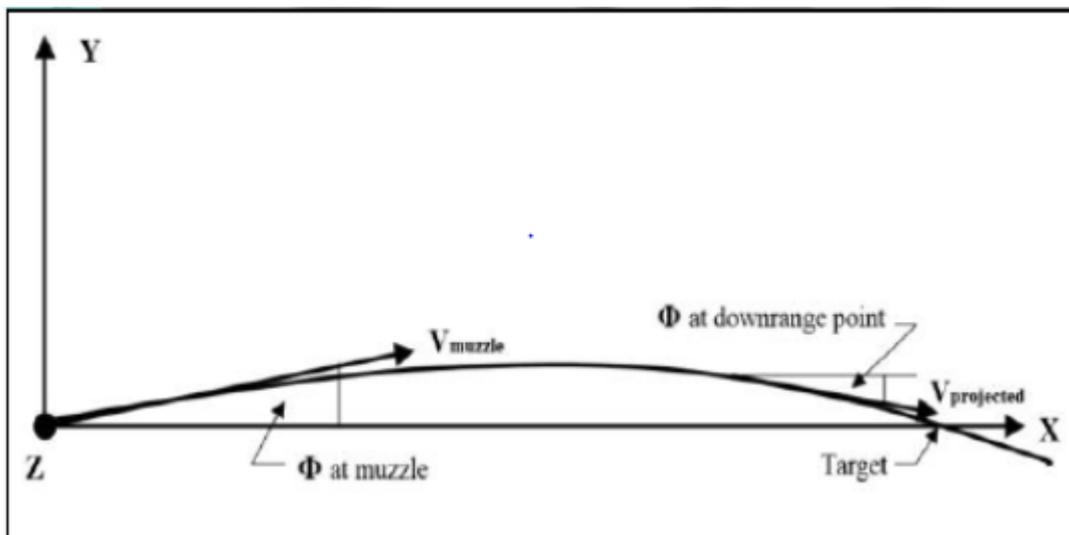


Figura 2.2 – Formação da trajetória do projétil
(KHAN, 2017)

2.1.2 Balística Terminal ou Efeito

O estudo dos efeitos provocados pelo choque entre o projétil e o alvo é de interesse da Balística Terminal (FERREIRA, 2015). Nesse ramo envolve analisar a penetração do

projétil em diferentes tipos de alvos, sejam eles sólidos ou líquidos, envolvendo também a pesquisa de materiais de resistência a essa penetração. A partir desses aspectos levantados, a balística terminal se subdivide em potencial de penetração, que é a capacidade de um projétil penetrar em vários materiais e a balística de ferimentos, que é o efeito do projétil nos tecidos vivos (BIRKETT et al., 2021; MAGALDI et al., 2021).

A penetração do projétil no material de proteção balística, pode ocorrer das seguintes formas: entrar novamente em repouso no interior do alvo; atravessar completamente o alvo continuando seu percurso; deslizar no alvo e seguir uma trajetória diferente. Esse comportamento irá depender do design e da velocidade do projétil, bem como do tipo de alvo (FERREIRA, 2015). Com isso foram fabricadas munições que maximizam a precisão na penetração do alvo e minimizam danos periféricos não intencionais. Os projéteis frangíveis são projetadas para se fragmentarem após o alcance do alvo, frequentemente usados para treinamento ou aplicação da lei em áreas densamente povoadas. Os projéteis expansíveis, expandem ou fragmentam após o impacto que causa uma rápida transferência de energia aumentando a ruptura do tecido e a probabilidade de morte. Já os projéteis perfurantes são projetados para destruir alvos difíceis como as armaduras, seu núcleo é de aço macio ou temperado, permanecendo intactos após o impacto para aumentar o poder de penetração (BIRKETT et al., 2021).

BIRKETT et al. (2021) afirma, ainda que a balística terminal abarque qualquer tipo de projétil atingindo qualquer tipo de alvo, ela geralmente se concentra nas munições de armas pequenas em um alvo vivo, humano ou animal e na capacidade do projétil de incapacitar ou matar. A chamada de Balística de Ferida, estuda a reação de cada parte do corpo humano ao impacto balístico, pois o corpo humano não é uniforme, cerca de 80% do corpo é constituído de água que não é uniformemente distribuído, em algumas regiões com ossos, veias e músculo, tudo faz com que o corpo tenha vulnerabilidade distribuída de maneira desigual.

2.1.3 Elementos Balísticos

Os elementos balísticos constituem-se de munições de armas ligeiras e elementos de proteção balísticas.

2.1.3.1 Munição

As munições de arma leves são compostas de quatro partes básicas: (1) projétil; (2) invólucro; (3) escorva e (4) carga propulsora Figura 2.3.

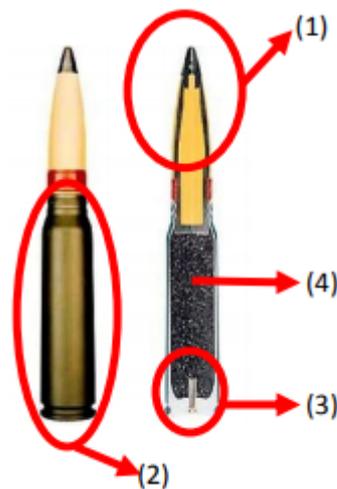


Figura 2.3 – Munição de armas ligeiras
(PINTO, 2009)

O projétil é o elemento de munição que tem o propósito de causar efeitos desejados no alvo, isso requer características como: possuir densidade elevada para adquirir altas energias; ser infusível para não fundir com o atrito na alma do cano; ser pouco deformável para manter sua integridade até o impacto no alvo. Eles são compostos por um núcleo, normalmente feito de uma liga com 90% de chumbo com 5% de estanho e 5% de antimônio, e uma camisa, normalmente feita de cobre, aço ou liga de cobre níquel (SANTOS, 2019).

O invólucro é a parte da munição que contém a carga propulsora e com isso deve conter as seguintes características: ser maleável para adaptar-se às paredes da câmara; ser resistente para que não arrebente com a ação dos gases provocada pela explosão da pólvora; boa elasticidade para voltar ao seu formato inicial facilitando a extração e ser inoxidável para facilitar a sua conservação. A escorva é um pequeno vaso metálico denominado cápsula que contém a substância explosiva, essa cápsula deve ser dúctil e resistente, para ser esmagada e não perfurada quando sofre a ação do percutor. Enquanto que a carga propulsora é a carga explosiva responsável por dar movimento ao projétil, elas podem ser substâncias explosivas podem ser gasosas, líquidas ou sólidas, no caso de armas ligeiras são usadas as sólidas (FERREIRA, 2015).

2.1.3.2 Proteção Balística

Os elementos de proteção balística evoluem juntamente com o aprimoramento dos armamentos, essa evolução se deve ao desenvolvimento de materiais e fibras aliando proteção balística com bem-estar, assim surgiram novos tipos de materiais compósitos (CHEESEMAN; BOGETTI, 2003; KARAHAN; JABBAR; KARAHAN, 2015; MAJUMDAR et al.,).

Desses novos tipos de materiais surgiram as fibras de alto desempenho, exemplos das

mais utilizadas para proteção balística são as de vidro, aramida (Kevlar, Nomex, Twaron, Technora) e as de polietileno de alto peso molecular (Spectra, Dyneema) que estruturadas em multicamadas são usadas como armaduras corporais macias (SRIVASTAVA; MAJUMDAR; BUTOLA, 2012). Essas fibras são usadas também em couraças moldadas, capacetes e painéis balísticos moldados para blindagem de helicópteros, aviões de carga militares, cascos de navios, barcos da guarda costeira de alta velocidade, equipamentos militares e veículos terrestres (BHATNAGAR, 2016). Para armadura corporal proteções realizadas apenas por materiais compósitos poliméricos são ineficientes contra projéteis perfurantes, para isso é necessário adicionar à proteção uma placa cerâmica, o elemento cerâmico absorve a força do projétil que quebra a sua ponta enquanto que o elemento compósito polimérico mantém a cerâmica em compressão e captura os fragmentos (FERREIRA, 2015).

Os coletes balísticos são aplicados para proteger o tronco contra impactos de alta energia cinética, para seu desenvolvimento é necessário seguir as normas e especificações da National Institute of Justice NIJ, que tem por nome Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06, ela assegura a performance e a resistência balísticas desejadas, e categoriza a ameaça balística segundo o tipo de projétil, peso e velocidade, Para a norma brasileira ABNT NBR 15000 (2005) são classificados como segue a Tabela 2.1

Tabela 2.1 – Nível de ameaça balística segundo o tipo de projétil

Nível	Calibre	Massa (g)	Velocidade (m/s)
I	.22 LRHV	2,6 ± 0,1	320 ± 10
	.38 Special RN	10,2 ± 0,1	254 ± 15
	9 mm FMJ	8,0 ± 0,1	332 ± 12
IIA	.357 Magnum JSP	10,2 ± 0,1	381 ± 12
	9 mm FMJ	8,0 ± 0,1	358 ± 15
II	.357 Magnum JSP	10,2 ± 0,1	425 ± 15
	9 mm FMJ	8,0 ± 0,1	426 ± 15
IIIA	.44 Magnum SWC GC	15,6 ± 0,1	426 ± 15
III	7,62 x 51 FMJ	9,7 ± 0,1	838 ± 15
IV	.30 – 06 AP	10,8 ± 0,1	868 ± 15

Fonte: Adaptado de (ABNT NBR 15000, 2005)

O STANAG 4569 indica os procedimentos de teste e avaliação aplicados a vários sistemas-alvo, para a realização dos testes balísticos é necessário seguir os seguintes limites, a velocidade para o qual a probabilidade de penetração dos projéteis escolhidos é menor que 50% (V50) e a velocidade para a qual a probabilidade de uma penetração parcial de um determinado projétil é superior a 90% (Vprof).

2.2 Tecido de Aramida

Em 1960, a pesquisadora Stephanie Kwolek inventou o Kevlar, uma fibra ultra-forte e extremamente leve. Para tal, Kwolek encontrou um novo método para produzir uma extensão de cadeia polimérica quase perfeita. Isso foi possível ao observar que o polímero poli-p-benzamida formava uma solução cristalina líquida devido à simples repetitividade de sua estrutura molecular. Diferente dos polímeros flexíveis que quando fundido forma uma configuração aleatória mesmo aumentando a sua concentração, os polímeros líquidos cristalinos, ou polímeros rígidos, à medida que a concentração aumenta as hastes começam a se associar em alinhamento paralelo, desenvolvem-se então cadeias poliméricas altamente orientadas internamente Figura 2.4 (ALGAHTANI, 2006).

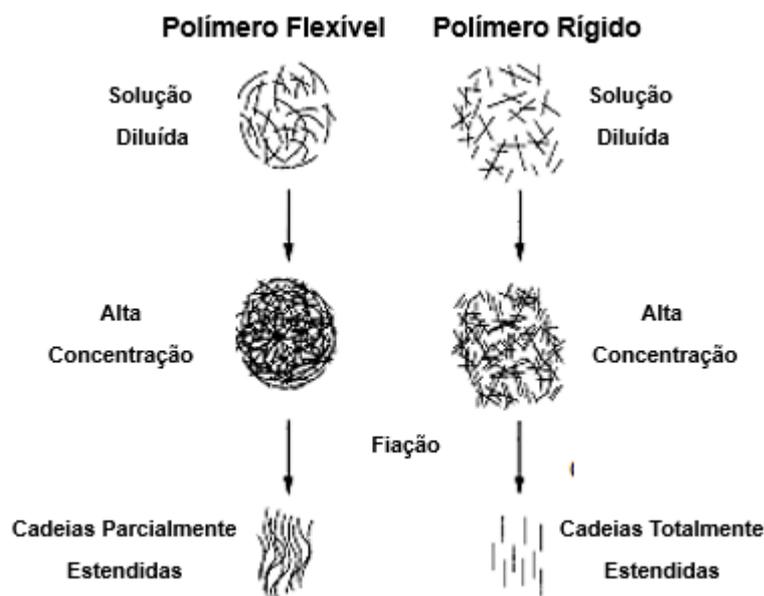


Figura 2.4 – Diferença no comportamento durante a fiação entre polímeros flexíveis e rígidos. (KLEVAR TECHNICAL GUIDE, 2017)

Sob forças de cisalhamento, as soluções de polímeros cristalinos líquidos à medida que passam por uma feira (orifício), os domínios orientados aleatoriamente tornam-se totalmente orientados na direção do cisalhamento e emergem com orientação molecular quase perfeita (ALGAHTANI, 2006). Com isso a DuPont utilizou essa tecnologia para desenvolver uma fibra de poli-parafenileno tereftalamida, que foi introduzida como fibra de aramida Kevlar[®] de alta resistência (OLIVEIRA et al., 2017). O Kevlar no início da década de 1970 foi a primeira geração de fibras resistentes a balas e ajudou a tornar prática pela primeira vez a produção de coletes flexíveis. Antes de ser usado para blindagem corporal, o Kevlar[®] era o substituto do aço na fabricação de pneus radiais. Só depois é que a DuPont começou a introduzir a segunda geração de fibra de Kevlar, conhecida como Kevlar 129, esse tecido oferecia maior capacidade de proteção balística contra projéteis de alta energia, como o FMJ de 9 mm. A mais nova adição à linha Kevlar é o Kevlar Protera, um tecido

de alto desempenho que permite menor peso, mais flexibilidade e maior proteção balística em um design de colete devido à estrutura molecular da fibra. Chegar a essas propriedades foi possível devido um novo processo de fiação (ALGAHTANI, 2006).

2.2.1 Estrutura Molecular

Em sua composição molecular possui o grupo funcional amida (CONH_2), ligadas em sua maioria por anéis benzeno como mostrado na Figura 2.5 (OLIVEIRA et al., 2017). Devido a união com os anéis aromáticos, as aramidas apresentam resistência a tração e resistência térmica melhores que as poliamidas alifáticas (náilon) (BHATNAGAR, 2016).

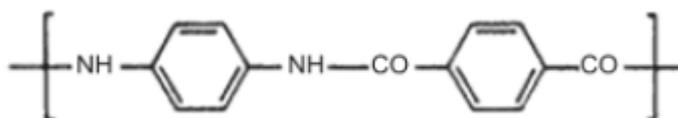


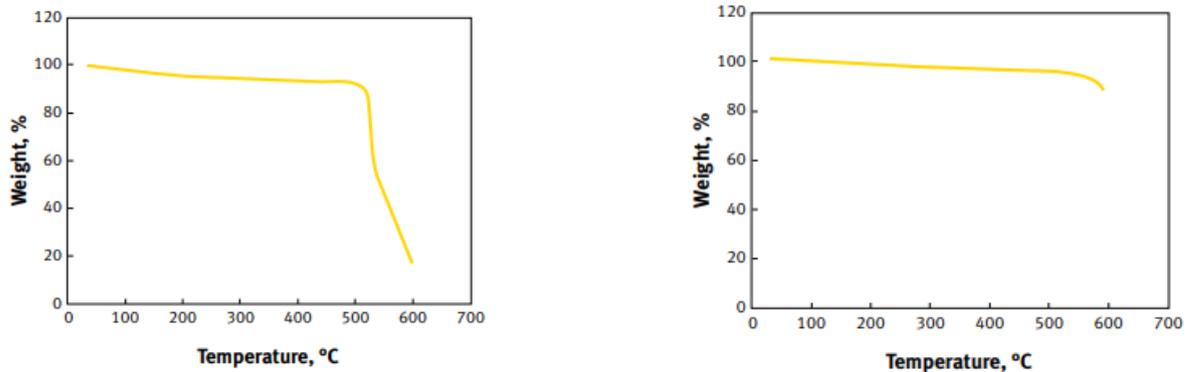
Figura 2.5 – Estrutura da fibra de aramida
(BHATNAGAR, 2016)

Ao dissolver as matérias-primas de acordo com que tipo aramida que deseja produzir, é formada uma massa polimérica, essa massa polimérica é pressionada em um equipamento com diversos orifícios, chamado fieira, com a função de formar o filamento. Depois da fieira, o filamento é exposto a jatos de ar quente, que as solidificam e vão para o processo de estiragem, que consiste em puxar e esticar o filamento por meio de cilindros, conferindo ao filamento maior resistência (OLIVEIRA et al., 2017). A matéria prima de algumas para-aramida como o Kevlar, são a parafenilenodiamina ($\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2$) e o cloreto de tereftalóilo ($\text{C}_8\text{H}_4\text{Cl}_2\text{O}_2$).

2.2.2 Propriedades Típicas

As fibras de aramida têm um alto módulo de tração e baixa densidade. Ao se comparar com o vidro, a densidade da aramida é duas vezes menor e resistência quase comparável, porém com um custo muito maior. A resistência à tração do Kevlar é mais do que o dobro de fibras convencionais como o Nylon e varia de cerca de 2,6 a 4,1 GPa. Essas fibras se comportam elasticamente a tração e sob forças compressivas apresentam um comportamento não linear com rendimento de deformação à compressão de 0,3% a 0,5. São conhecidas pela tenacidade e tolerância geral a danos e o alongamento à tração do Kevlar 29 é cerca de 4% (ALGAHTANI, 2006). A estrutura aromática confere às fibras um alto grau de estabilidade térmica, com baixa condutividade térmica. O ALGAHTANI (2006) Kevlar[®] não derrete, se decompõe em temperaturas relativamente altas entre 427°C a 482°C em ar e aproximadamente a 538°C em nitrogênio, quando testado com um aumento de temperatura

de 10°C/ minuto. As Figura 2.6 (a) e 2.6 (b) mostram análises termogravimétricas típicas (TGAs) de Kevlar® 49 em ar e nitrogênio (KLEVAR TECHNICAL GUIDE, 2017).



(a) TGA do Kevlar em Ar.

(b) TGA do Kevlar em Nitrogênio.

Figura 2.6 – TGA do Kevlar® em Ar e em Nitrogênio.

Com isso seguem as Vantagens e Desvantagens do Kevlar: As vantagens são:

- Tem a menor densidade específica.
- Tem a maior relação resistência à tração-peso.
- Somente fibra para aplicação estrutural.

As desvantagens são:

- Baixa resistência à compressão.
- Dificuldade de usinagem (Baixa usinabilidade).

2.2.3 Impregnação dos fios

Ao sofrer impacto balístico os fios de um tecido se comportam de maneira a se afastarem entre si permitindo o prosseguimento da trajetória do projétil, uma vez que arrastam os fios perdendo apenas parte de sua energia, esse processo é chamado de pullout. À medida que o processo avança a área afetada pelo impacto aumenta e conseqüentemente aumenta o número de fios em atrito. O atrito permite dissipar a energia do projétil que vai gradativamente perdendo o movimento, caso a sua velocidade seja tal que a capacidade de absorção de energia do tecido não absorva toda a energia do movimento, os fios começam a se romper não sendo possível interromper totalmente a trajetória da bala (BAZHENOV; GONCHARUK, 2012).

Outro fator importante é a espessura de penetração do projétil, é ele que determina a energia absorvida pelo tecido, isso limita a espessura do laminado, não podendo ser

simultaneamente leve e fino. Isso mostra que, as armaduras fibrosas são ineficazes contra proteção à alta velocidade, sendo necessário o reforço com materiais cerâmicos ou metálicos. Portanto, é de grande contribuição científica na área de proteção balística, a investigação de métodos que controlem bem a eficiência do pullout em tecidos como o Kevlar (BAZHENOV; GONCHARUK, 2012).

O padrão de tecelagem pode ser um fator a ser controlado para melhorar o pullout, pois tem um efeito significativo nas forças de atrito entre os fios do tecido (DONALD et al., 2002). Porém, nesse aspecto, o foco dos últimos estudos não está no padrão de tecelagem, mas na impregnação dos fios com fluido de comportamento não newtoniano (STF), estreado as armaduras corporal líquida. O STF apresenta comportamento deformável em condições normais e se torna rígido em condições de forte impacto, isso ocorre, devido à sua formulação ser de uma suspensão concentrada de partículas duras. Esse fluido, quando impregnado ao tecido de Kevlar altera o comportamento do pullout, evitando o deslizamento e a separação dos fios (KANG; KIM; HONG, 2011; EGRES R.G. J. LEE, 2004).

Estudos mostram que o tecido Kevlar/STF apresenta aumento significativo nas propriedades de resistência balísticas tal que permite ao usuário maior flexibilidade, diminui o número de camadas necessário contra impacto balístico, e apesar de manter valores de profundidade de penetração semelhantes ao Kevlar puro, seus padrões de danos são bem menores (KANG; KIM; HONG, 2011; EGRES R.G. J. LEE, 2004).

2.3 Elastômero

Os hidrocarbonetos são elementos químicos contendo em sua estrutura por átomos de hidrogênio e carbono, na qual, dependendo da maneira em que estes se organizam são classificados como: hidrocarbonetos saturados (alcanos ou parafinas); hidrocarbonetos insaturados (olefinas); hidrocarbonetos aromáticos (arenos). Os hidrocarbonetos saturados são aqueles cujos átomos de carbono são unidos por ligação simples em cadeias lineares, ramificadas ou simples. Os hidrocarbonetos insaturados são constituídos de pelo menos duas ou três ligações entre carbonos, ao passo que os hidrocarbonetos aromáticos possuem pelo menos um anel benzeno na sua cadeia (THOMAS et al., 2001).

Longas cadeias de hidrocarbonetos formam as moléculas dos materiais poliméricos, os quais são classificados quanto ao comportamento mecânico em: Elastômero, Plástico (termorrígido/termoplástico) e Fibras. Os elastômeros, também conhecidos como borrachas, possuem a capacidade de deformação reversível quando submetido a forças externas. A borracha de origem vegetal é feita de blocos de isopreno, praticamente puro do ponto de vista químico, formando-se macromoléculas estruturadas de tal maneira que é denominada de estrutura cis, ao passo que a borracha sintética é denominada estrutura trans (Figura

2.7) (RUBBER, 2007).

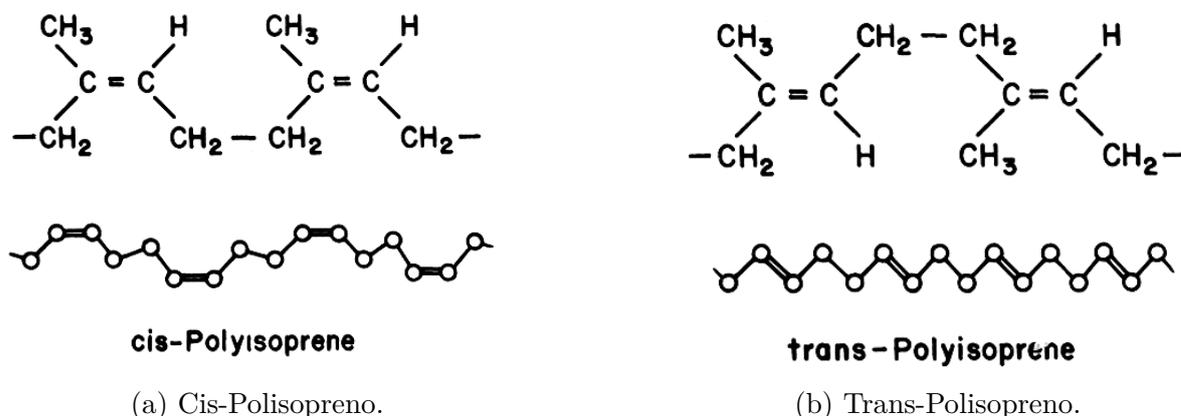


Figura 2.7 – Estrutura cis e trans do polipropileno.
(WILSON, 1978).

A estrutura trans forma uma cadeia simétrica em zigue-zague, cujo material formado é mais denso e resistente. Enquanto que na estrutura cis resulta em um material menos simétrica e mais elástico (WILSON, 1978).

Após a descoberta da vulcanização, as borrachas ganham propriedades de materiais de engenharia, uma vez que permitiu a criação de ligações cruzadas entre as macromoléculas (RUBBER, 2007). Além disso, alguns aditivos ao serem adicionados na estrutura do polímero melhoram algumas propriedades, alguns exemplos são: agentes de reticulação e antioxidantes usados para retardar o processo de envelhecimento; aditivos de redução de custos; aditivos que reforçam algumas propriedades como dureza; aditivos que alteram características de processamento do tipo temperatura de transição vítrea (T_g) e de amolecimento (T_m) (RUBBER, 2007).

Para aplicações balísticas, compósitos de elastômeros com tecido permitem características significativas de amortecimento e flexibilidade. Temos hoje na literatura, pesquisas sobre o comportamento de impacto de alta velocidade do compósito Kevlar/elastômero, onde os resultados revelam que esse material pode aumentar a absorção de energia e reduzir a área danificada (KHODADADI A., 2021; ASEMANI et al., 2021).

2.3.1 Borracha Líquida

Algumas aplicações dos elastômeros na construção civil exigem que sejam utilizados ainda na forma líquida, como por exemplo, na utilização como membrana de revestimento para proteção, aplicadas principalmente em telhados. Um dos polímeros mais utilizados é o EPDM (termopolímero de etileno-propileno-dieno) devido a sua resistência ao clima.

Com isso, um revestimento protetor externo que possa ser aplicado na forma líquida com pouco ou nenhum solvente foi desenvolvido para vedar saliências, juntas e bordas

(VISSER et al., 1985). Essa invenção permite que a composição elastomérica permaneça líquida à temperatura ambiente, cerca de 20° C a 40° C, assim é possível manipular a aplicação do material bombeando ou pulverizando sobre uma superfície receptora (VISSER et al., 1985). Nesses tipos de elastômeros são necessários alguns componentes tais como:

- a) Um polímero líquido de baixo peso molecular;
- b) Agente de reforço, exemplo o negro de fumo e a sílica;
- c) Agente de cura como peróxidos e enxofre;
- d) Ativadores de cura, o ativador a ser usado depende do tipo de agente de cura que está sendo usado;
- e) Opcionalmente, óleo
- f) Os plastificantes para ajustar propriedades físicas ou viscosidade.

O sistema pot life usado no processo de cura das tintas, que é o que ocorre nessa composição, pode variar o tempo de cura de alguns minutos a horas, no qual será finalizada à temperatura ambiente. Segue abaixo alguns sistemas de cura à temperatura ambiente com polímeros de EPDM (VISSER et al., 1985):

1. Dioximas mais um agente oxidante;
2. Peróxidos orgânicos;
3. Curas de enxofre ultraceleradas;
4. Resinas fenólicas halogenadas.

2.3.2 Produto Flex Seal™

A Flex Seal é uma marca norte americana, fundada em 2011 pela empresa familiar Swift Response em Weston, Flórida, na qual se fabrica linha de produtos de colagem adesiva baseada em borracha líquida. Os produtos são: Flex Seal original (Figura 2.8), Flex Shot, Flex Tape, Flex Glue, Flex Mini, Flex Paste e Flex Tape Adhesive. Todos com a mesma composição e objetivo, mudando apenas o modo de aplicação.



Figura 2.8 – Spray selante Flex Seal

Segundo as recomendações do fornecedor do Flex Seal original, cuja aplicação é feita por meio de pulverização, pode ser usado em superfícies verticais sem a necessidade de um solvente que, antes de ser pulverizado mantém seu estado líquido facilitando a penetração em rachaduras e buracos. Após a cura ganham resistência às intempéries, flexibilidade e impermeabilidade, podendo ser pintado em seguida, retendo água, ar e umidade, evitando ferrugem e corrosão, além disso ele sela, protege e interrompe vazamentos.

Ainda segundo as recomendações do fornecedor, para utilização desse produto, é recomendado que seja aplicado em temperaturas acima de 15°C, o local de aplicação deve estar limpo, seco e isento de graxa, óleo e sujeira. Caso seja preciso aplicar mais de uma camada, a camada interior deve estar seca antes de ser aplicada às próximas camadas.

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

Os materiais empregados nesse estudo foram:

- Tecido de aramida de 200 g/m² com área de 15x15 cm;
- Elastômero líquido (termopolímero de etileno-propileno-dieno) da marca Flex Seal;
- Hidrocarboneto aromático, tolueno (C₇H₈), fabricante e pureza;
- Placa de alumínio de liga 1100, de 15x15 cm com 2 mm de espessura.

3.2 Preparação das Amostras

A investigação de melhores métodos para impregnação do tecido de aramida foi feita, neste trabalho, através da influência da aplicação de elastômero líquido, elastômero líquido diluído e da influência do número de camadas do tecido sob estas aplicações citadas. Com isso, alternando esses fatores, foi possível produzir 12 amostras em diferentes condições, como Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Proporção Elastômero/Diluyente das amostras.

Número de camadas	Proporção Elastômero(g)/Diluyente(g)		
	1/0	1/1	2/1
2	10/0	10/10	10/5
3	10/0	10/10	10/5
4	10/0	10/10	10/5
5	10/0	10/10	10/5

Para diluir o elastômero foi escolhido um hidrocarboneto aromático, o Tolueno (C₇H₈), devido a compatibilidade estrutural e ser mais eficaz que a água e o álcool como solvente para produtos borrachosos.

Após o processo de aplicação do elastômero/elastômero diluído nas camadas de aramida, cada amostra foi envolvida com plástico filme para unir o tecido balístico a uma chapa de alumínio, este servirá para sustentar as amostras no suporte do ensaio. Segue, na Figura 3.1 as amostras preparadas.

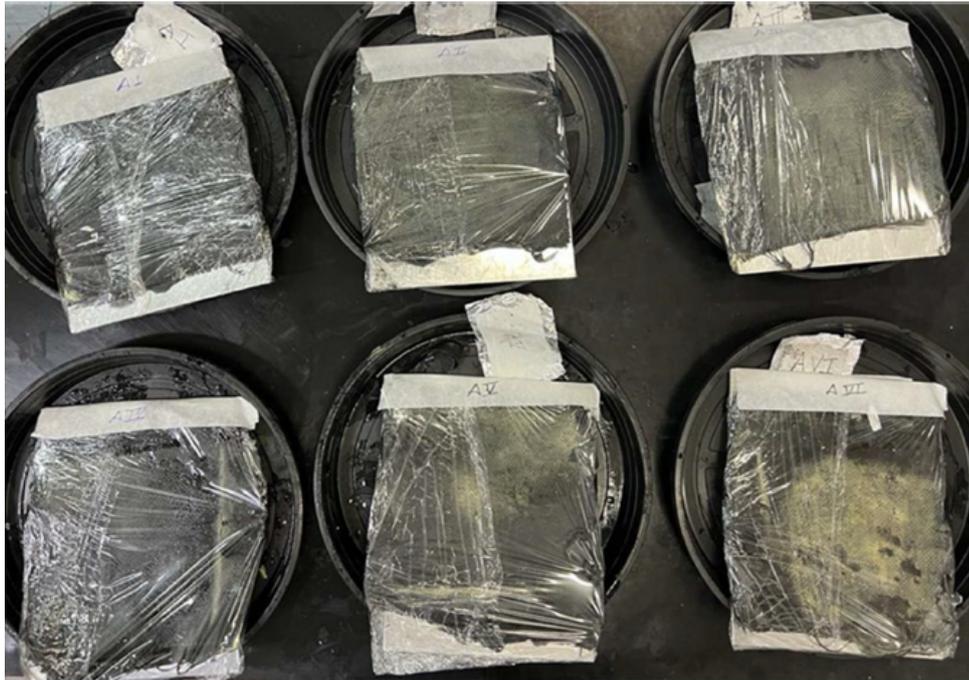


Figura 3.1 – Amostras preparadas para o ensaio balístico.

3.3 Ensaio Balístico

Os ensaios foram realizados em três etapas, a primeira com as amostras de 5 camadas e projétil com velocidade de 240 m/s, na segunda foram ensaiadas as amostras de 2 camadas com a mesma velocidade do projétil e na terceira as de 3, 4 e mais uma amostra de 5 camadas pois foram alcançadas velocidades do projétil em média de 270 m/s. Foram feitos 5 disparos em cada amostra com um rifle de pressão Airfoce Texan, projétil de um chumbo calibre 45 com massa de aproximadamente 14,4g. Para determinar a energia de absorção (E_{abs}) foram usados dois cronógrafos balísticos ProChrono modelo Pal, com precisão de 0,31 m/s, para medir a velocidade do impacto e a velocidade residual. O rifle foi colocado a 5 m de distância do alvo que estava alinhado perpendicularmente ao rifle e presa por um torno de bancada. Um cronógrafo foi posicionado a 10 cm antes do alvo e outro a 10 cm atrás do alvo. As razões de impregnação elastômero/diluyente foram de 1/0, 1/1 e 2/1 para as amostras de duas, três, quatro e cinco camadas. Para calcular a energia absorvida pelo alvo foi usada a equação 3.1 abaixo:

$$E_{abs} = m_p(v_i^2 - v_r^2) - E_{abs} \text{ (sem amostra)} \quad (3.1)$$

Onde:

- m_p é a massa do projétil;
- v_i é a velocidade inicial do projétil;

- v_r é a velocidade de impacto do projétil;
- E_{abs} é a energia absorvida pelo alvo como um todo;
- $E_{abs(sem\ amostra)}$ é a energia absorvida pelo alvo sem a amostra do material em estudo.



Figura 3.2 – Imagem do sistema de detecção no ensaio de energia de absorção.

3.3.1 Teste de Profundidade de Penetração

Para esse ensaio foram produzidas duas amostras de 12 camadas cada, uma delas foi impregnada com o elastômero puro e a outra o elastômero foi diluído com o tolueno na razão de 1/1.

Na determinação da profundidade de penetração foram realizados 5 disparos, o rifle de ar foi posicionado a 5 m de distância do alvo, consistindo em um disco do compósito preso com fita adesiva a uma placa de MDF, que foi usada como anteparo, e alinhado perpendicularmente ao rifle. O cronógrafo balístico foi colocado a 10 cm antes do alvo. A Figura 3.3 mostra o resultado de um disparo típico.

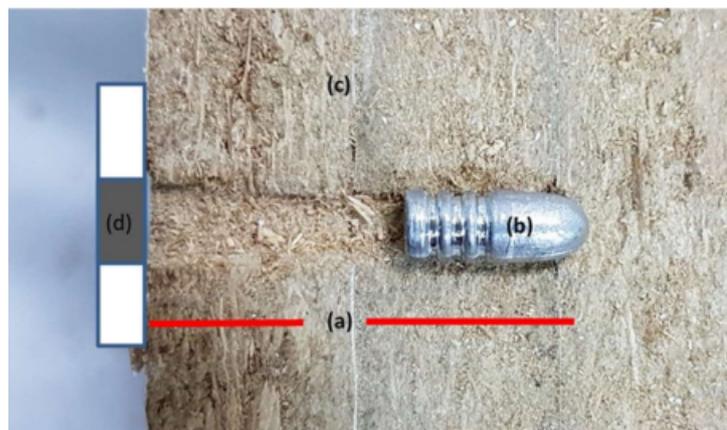


Figura 3.3 – Resultado de um disparo. (a) Profundidade de penetração (PP) medida da superfície do anteparo até a ponta do projétil; (b) projétil; (c) anteparo de MDF; (d) disco compósito

A profundidade de penetração relativa foi obtida pela média das razões entre a profundidade de penetração contendo a amostra e a profundidade de penetração sem amostra, associada ao mesmo ciclo de disparo.

3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para analisar e visualizar o pullout e a eficiência da impregnação, usou-se o microscópio eletrônico de varredura do Instituto Militar de Engenharia, da marca FEI, modelo QUANTA FEG 250 na região de impacto após os testes balísticos e nas regiões que se mantiveram intactas, com diferentes aumentos.

Para serem visualizadas, as superfícies da amostra passam pelo processo de recobrimento de ouro ou platina, este procedimento foi realizado pelo equipamento de deposição de filme de alto vácuo da marca LEICA, modelo EM ACE600.

3.5 Análise da Viscosidade

A viscosidade é uma medida da resistência de um fluido ao fluxo. Com o objetivo de traçar as curvas de viscosidade do material selante sem a diluição e com diluição de 1/1, foi utilizado o viscosímetro DV-II Pro Viscometer, da marca Brookfield, que mede a viscosidade do fluido em taxas de cisalhamento dadas.

Este aparelho tem como princípio de operação acionar um “spindle” (que está imerso no fluido de teste) por meio de uma mola calibrada. A deflexão dessa mola mede, através de um transdutor rotativo, o arrasto viscoso do fluido contra o spindle. A faixa de medição é determinada pela velocidade de rotação do spindle, seu tamanho e forma.

3.6 Análise de Difração de Raio X (DRX)

A análise de difração de raios X foi realizada no spray selante para investigar se há alguns picos de cristalinidade neste produto, composto pelo termopolímero de etileno-propileno-dieno (EPDM). O ensaio foi realizado em um difratômetro X Pert Pro PANalytical® com alvo de cobre ($\lambda = 0,154$ nm), com tensão da fonte 40 kV, corrente da fonte 40 mA, ângulo de varredura de 10° a 90°

3.7 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O DSC mede o fluxo de calor de uma amostra à medida que ela é aquecida, resfriada e/ou mantida isotermicamente, que fornece informações valiosas sobre temperaturas de amolecimento (ou Tg), temperaturas de fusão, calores de fusão, cristalinidades percentuais e recristalização (temperaturas e calores).

Para estudar as propriedades térmicas do elastômero, usou-se uma amostra do tecido de aramida impregnada com o produto sem diluição e diluído com razão de 1/1. Foram realizadas em um equipamento HITACHI DSC 7000 do IMA, Instituto de Macromolécula, com um aquecimento de 10° C/min de -40° C a 60° C em atmosfera de nitrogênio.

3.8 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

O FTIR caracteriza e identifica grupos químicos de materiais orgânicos e inorgânicos. As análises foram feitas para o EPDM puro, realizadas no IPqM, Instituto de Pesquisa da Marinha, utilizando-se o espectrômetro da Thermo Scientific Nicolet 6700, no comprimento de 4000 cm^{-1} a 600 cm^{-1} por meio de técnicas de reflexão ATR.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaio Balístico

A integridade das amostras após os ensaios balísticos é mostrada nas Figura 4.1 para uma amostra da primeira etapa, na Figura 4.2 para as segunda e terceira etapas e FIG 4.3 para a amostra sem a impregnação dos fios. Na primeira etapa dos ensaios balísticos, toda a energia cinética do projétil é absorvida pelas camadas da blindagem como mostrada na Figura 4.3. É possível observar a parte de trás do painel que se deformou com uma alta profundidade devido a energia transmitida do projétil para os fios do tecido.



Figura 4.1 – Projétil retido na amostra de 5 camadas na primeira etapa dos testes balísticos.

Na segunda e terceira etapas todos os disparos atravessaram as amostras, na Figura 4.2 é mostrada as regiões perfuradas de uma das amostras, com pouca deformação da trama do tecido, fios rompidos e sem *pullout*, esse comportamento descrito aconteceu em todas as amostras que foram perfuradas.

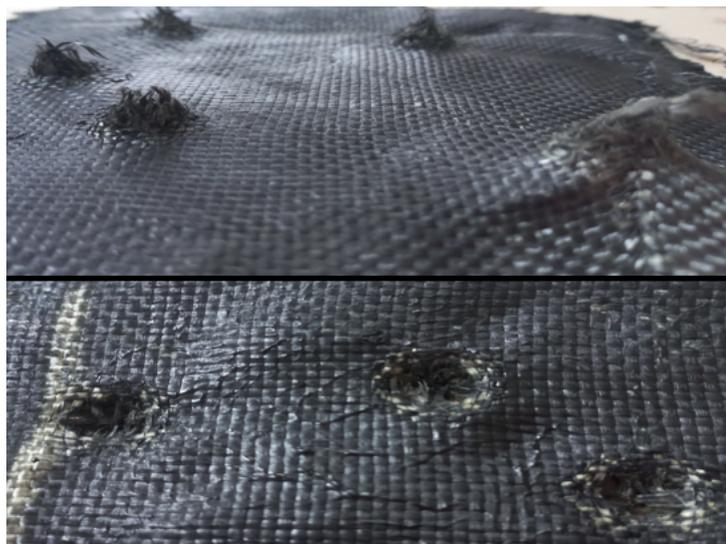


Figura 4.2 – Amostra perfurada da etapa 2 e 3, após o impacto balístico.

Na Figura 4.3 temos a amostra que não foi impregnada, após o impacto balístico, é visto que foi totalmente desfigurada, com rompimento dos fios e o afastamento destes, desfazendo quase 100% da trama. Comparando com a amostra impregnada é possível perceber que com o elastômero a trama desformou-se apenas na região de contato com o projétil.

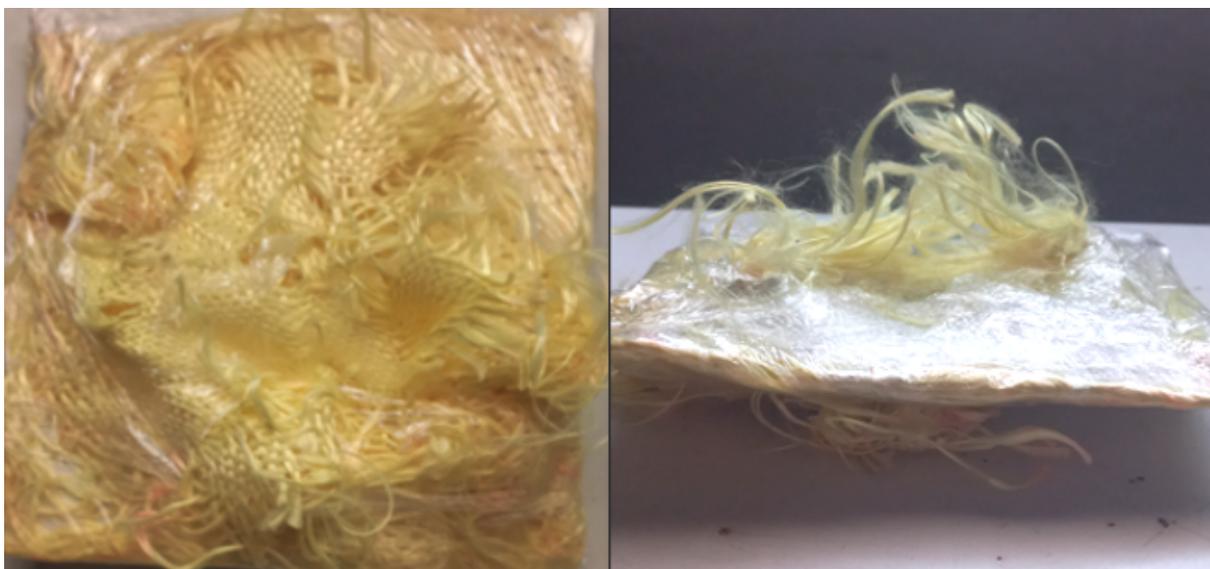


Figura 4.3 – Amostra de aramida pura, após o impacto balístico.

As Tabela 4.1 e Tabela 4.2, contém os resultados de absorção de energia das amostras da segunda e terceira etapa, com valores da massa do compósito (M_c), massa do projétil (m_p), velocidade média de impacto (v_i), velocidade residual média (v_r) e a energia de absorção (E_{abs}) de cada composição.

Na Tabela 4.1 tem-se os valores das amostras de duas camadas em que SA são os

valores para os disparos sem amostra, A1 amostra com razão elastômero/diluyente 1/0, A2 amostra com razão elastômero/diluyente 1/1 e A3 amostras com razão 2/1.

Tabela 4.1 – Ensaio de energia de absorção, amostras de 2 camadas.

AMOSTRA	MC (g)	mp (g)	Vi (m/s)
SA	-	14,65 ± 0,11	238,39 ± 28,30
Alumínio	168,68 ± 0,21	14,57 ± 0,13	233,80 ± 6,57
A1	16,03 ± 0,18	14,62 ± 0,15	235,53 ± 7,38
A2	13,14 ± 0,32	14,69 ± 0,07	235,30 ± 6,21
A3	14,85 ± 0,43	14,60 ± 0,09	237,00 ± 5,82
AMOSTRA	Vr (m/s)	Eabs (J)	VL (m/s)
SA	234,60 ± 20,50	17,95 ± 13,34	46,39 ± 17,68
Alumínio	203,00 ± 7,87	87,66 ± 5,06	109,66 ± 3,27
A1	197,60 ± 11,65	16,87 ± 9,82	46,55 ± 13,21
A2	196,75 ± 4,49	22,57 ± 8,14	54,58 ± 10,87
A3	196,20 ± 7,82	30,98 ± 12,31	64,10 ± 12,84

Na TAB 4.2 tem-se os resultados das amostras com 3, 4 e 5 camadas onde A1 é a amostra com 3 camadas e razão E/D de 1/0, A2 com 3 camadas e razão E/D de 2/1, A3 é a amostra q possui 3 camadas com razão E/D de 2/1, A4 amostra de 4 camadas e razão E/D de 1/0, A5 com 4 camadas e razão E/D de 1/1, A6 a amostra com 4 camadas e razão E/D de 2/1, a amostra P5 tem cinco camadas com razão E/D de 1/0 e AP é a aramida de 5 camadas pura.

Tabela 4.2 – Ensaio de energia de absorção, amostras de 3,4,5 camadas e aramida pura.

AMOSTRA	MC (g)	mp (g)	Vi (m/s)
SA	-	14,65 ± 0,11	238,39 ± 21,61
Aumínio	168,68 ± 0,35	14,56 ± 0,14	268,98 ± 27,83
A1	62,16 ± 0,65	14,64 ± 0,05	275,58 ± 7,25
A2	25,96 ± 0,39	14,67 ± 0,05	275,00 ± 6,69
A3	36,32 ± 0,44	14,60 ± 0,05	275,50 ± 6,36
A4	62,57 ± 0,27	14,66 ± 0,06	277,34 ± 9,00
A5	43,67 ± 0,49	14,60 ± 0,07	273,38 ± 16,92
A6	37,94 ± 0,56	14,59 ± 0,08	278,14 ± 8,18
P5	31,22 ± 0,43	14,65 ± 0,06	294,46 ± 3,22
AP	26,95 ± 0,58	14,63 ± 0,20	265,10 ± 10,86
AMOSTRA	Vr (m/s)	Eabs (J)	VL (m/s)
SA	234,60 ± 15,66	40,33 ± 31,35	67,84 ± 30,89
Alumínio	229,40 ± 21,87	92,89 ± 11,92	112,75 ± 7,36
A1	225,60 ± 9,21	22,31 ± 10,82	53,90 ± 13,33
A2	224,20 ± 8,70	33,14 ± 4,74	67,08 ± 4,79
A3	225,60 ± 7,23	29,91 ± 6,65	63,68 ± 7,11
A4	220,60 ± 9,07	46,34 ± 6,09	79,36 ± 5,30
A5	211,60 ± 27,63	55,09 ± 19,89	85,89 ± 14,88
A6	220,80 ± 12,48	47,40 ± 18,65	79,42 ± 15,17
P5	232,20 ± 4,87	62,03 ± 12,88	91,60 ± 9,91
AP	208,29 ± 20,64	62,17 ± 4,02	92,14 ± 2,99

A Figura 4.4 apresenta a energia de absorção em relação a concentração de elastômero para as amostras de 2 camadas. Pode ser observado que a amostra A3 apresentou a maior energia de absorção, porém ao fazer a análise de variância aceita-se a hipótese de que as médias são iguais com nível de significância de 5%, pois como segue a Tabela 4.3 pela estatística, têm-se: F calculado (2,407) < F crítico (3,885).

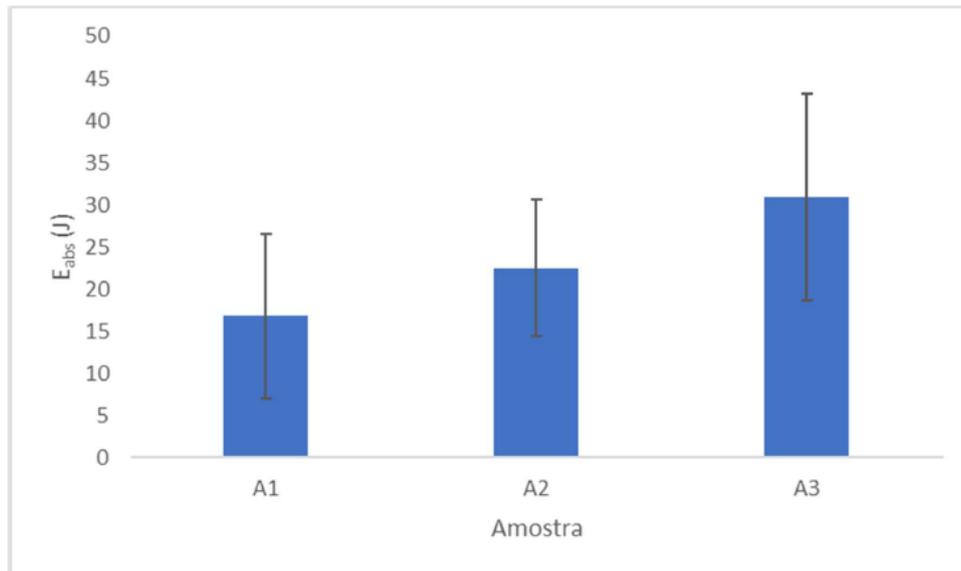


Figura 4.4 – Energia de absorção com desvio padrão das amostras de 2 camadas.

Tabela 4.3 – Análise de variância para as amostras de duas camadas.

Fonte de Variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	504,28	2	252,14	2,4071	0,1321	3,88529
Dentro dos grupos	1256,9	12	104,74			
Total	1761,2	14				

A Figura 4.5 apresenta a energia de absorção em relação a concentração de elastômero para as amostras da terceira etapa de ensaios balísticos.

Nota-se que os resultados obtidos para Eabs dos compósitos acompanhou um crescimento proporcional ao aumento de camadas, além de que as amostras tanto de 3 quanto de 4 camadas apresentaram maior Eabs na razão de 1/1. As amostras de 5 camadas obtiveram resultados semelhantes seja pura ou impregnada.

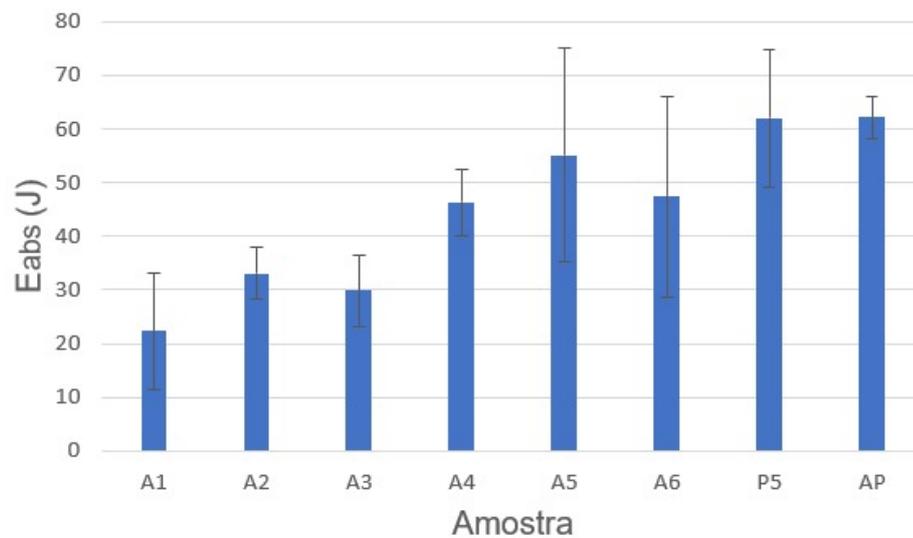


Figura 4.5 – Energia de absorção com desvio padrão das amostras de 3,4 e 5 camadas e aramida pura.

Nesse caso, a análise de variância aceita-se a hipótese de que as médias são diferente com nível de significância de 5%, observa-se na Tabela 4.4 que F calculado (7,862) > F crítico (2,3127), portanto foi necessário realizar o teste de Turkey. O resultado é $A1 \approx A2 \approx A3$, sendo:

$A1 \neq A5, A6, P5, \text{Aramida Pura}$

$A2 \neq P5, \text{Aramida Pura}$

$A3 \neq A5, P5, \text{Aramida Pura}$

Tabela 4.4 – Análise de variância para as amostras de 3,4 e 5 camadas e aramida pura.

Fonte de Variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7886,94	7	1126,71	7,862	1,54E-05	2,3127
Dentro dos grupos	4585,93	32	143,31			
Total	12472,9	39				

Segundo KHODADADI A. (2021), a matriz de borracha nesse compósito provoca uma leve queda na flexibilidade do tecido, restringindo o movimento dos fios. Por outro lado, a borracha com altas propriedades de amortecimento contribui positivamente para dissipar a energia do projétil. O compósito Kevlar/elastômero possui uma alta capacidade de absorção de energia, pois o elastômero contribui no processo de transmissão de energia cinética do projétil impedindo que o tecido se deforme (ASEMANI et al., 2021). Porém, nos resultados balísticos mostrados acima são visto que a amostra P5, de 5 camadas impregnadas, teve resultados de absorção de energia semelhante ao da aramida pura, também com 5 camadas, evidenciando uma narrativa contrária ao esperado neste trabalho e ao que a literatura tem encontrado, isso pode ter acontecido devido à grande variedade

de parâmetros que influenciam os resultados do ensaio, como a velocidade e massa do projétil, pressão do cilindro da arma entre outros, seria então necessário realizar novos ensaios. Contudo, os resultados confirmam que o elastômero ajuda na transmissão de energia cinética do projétil, evitando a deformação do tecido, isso é visto na integridade das amostras impregnadas, que se deformou apenas na região de impacto, em comparação com a amostra pura, que teve sua trama deformada.

4.1.1 Teste de Profundidade de Penetração

A Figura 4.6 mostra o resultado da integridade das amostras depois do ensaio balístico. Na Figura 4.7 tem-se o resultado do anteparo do MDF após os disparos, onde AE é a amostra com o elastômero puro e AET a amostra com o elastômero diluído com razão 1/1 e SA sem amostra.



Figura 4.6 – Imagem do conjunto de amostras depois do ensaio balístico.



Figura 4.7 – Imagem do substrato de MDF após os disparos.

A Tabela 4.5 apresenta os valores médios da massa do compósito (M_c), massa do projétil (m_p), velocidade média de impacto (v_i) e profundidade de penetração relativa de cada composição.

Tabela 4.5 – Ensaio de profundidade de penetração.

AMOSTRA	M_c (g)	M_p (g)	V_i (m/s)	PPr
AE	$183,44 \pm 2,05$	$14,58 \pm 0,12$	$260,22 \pm 1,00$	$0,30 \pm 0,13$
AET	$116,05 \pm 1,50$	$14,59 \pm 0,07$	$260,72 \pm 1,14$	$0,25 \pm 0,07$

Para apresentar a profundidade de penetração relativa, temo na Figura 4.8 representando o gráfico da média dos valores de casa amostra, em que AE é a amostra com o elastômero puro e AET a amostra com o elastômero diluído com razão 1/1. As barras de erro na Figura 4.8 foram determinadas pelo erro médio da média.

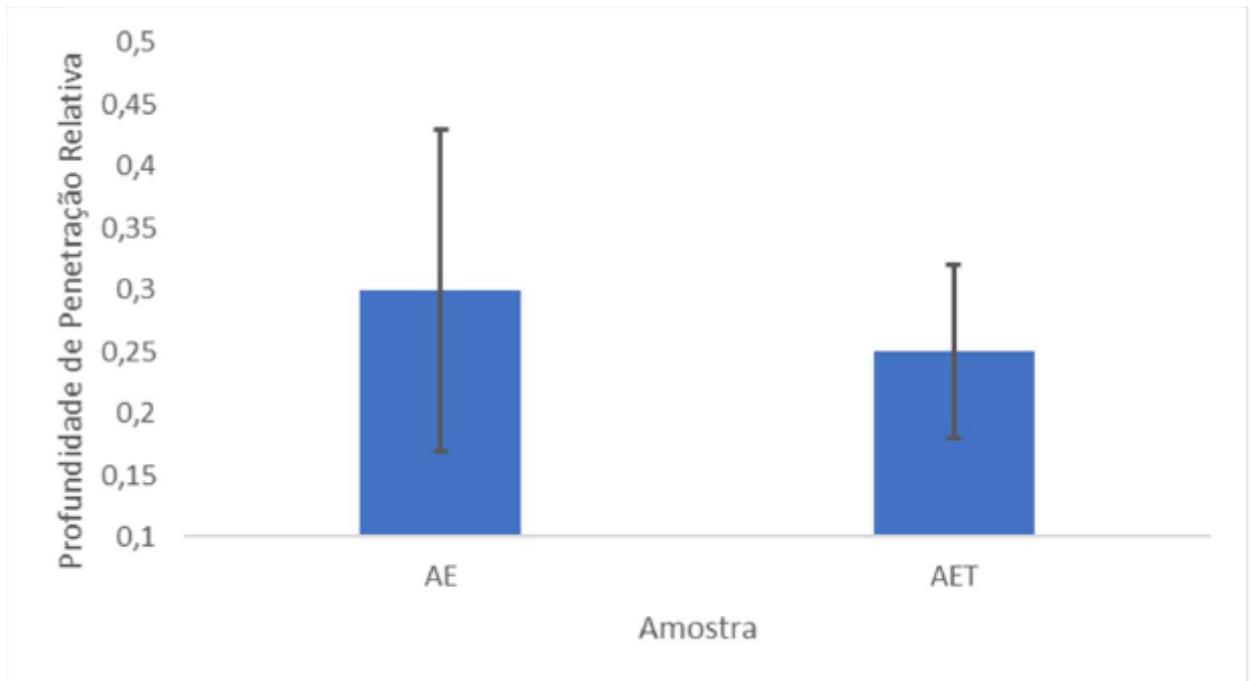


Figura 4.8 – Profundidade de penetração relativa.

Segue os resultados na da análise de variância na Tabela 4.6. Sendo, F calculado ($0,423835$) $<$ F crítico ($5,317655$), aceita-se a hipótese de que as médias são iguais com nível de significância de 5%.

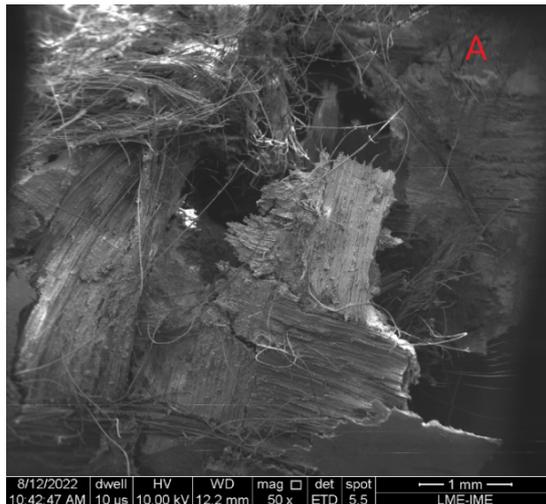
Tabela 4.6 – Análise de variância do ensaio de profundidade.

Fonte de Variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00441	1	0,00441	0,423835	0.533279	5,317655
Dentro dos grupos	0,08324	8	0.010405			
Total	0,08765	9				

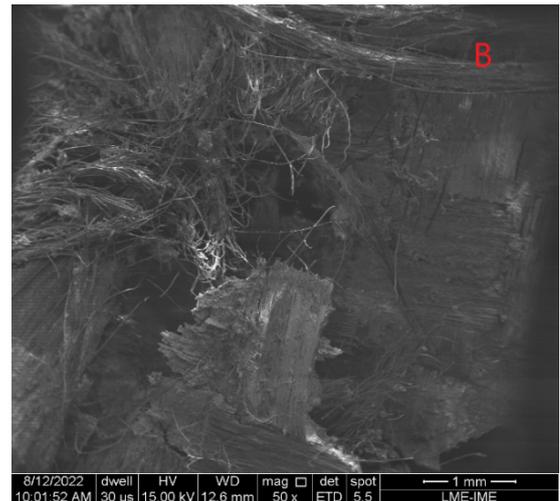
4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Apresenta-se a seguir as micrografias das amostras de 3 e 5 camadas realizadas no microscópio eletrônico de varredura, após o impacto balístico.

A Figura 4.9 (A) apresenta imagem do MEV da amostra de 3 e a Figura 4.9 (B) apresenta a amostra de 4 camadas, ambas na região de impacto mostrando que não houve pullout, apenas o rompimento dos fios. Nessas duas amostras o projétil atravessou.



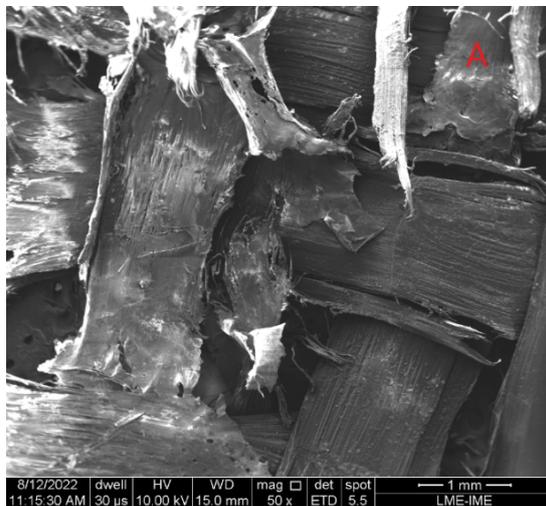
(a) 3 Camadas.



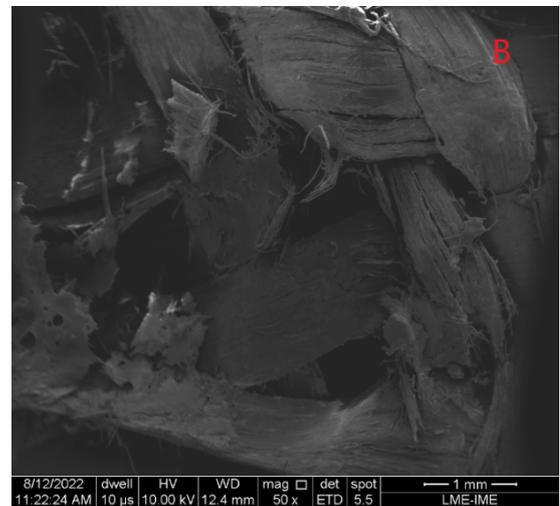
(b) 4 Camadas.

Figura 4.9 – Imagem de MEV na região de impacto com 3 e 4 camadas.

Na Figura 4.10 apresenta imagem do MEV da amostra de 5 camadas da primeira etapa dos ensaios balísticos, a Figura 4.10 (A) com diluição de 1/1 e a Figura 4.10 (B) com diluição de 2/1, ambas na região de impacto. Mostra o comportamento dos fios quando há pullout, com poucos fios rompidos e o afastamento deles.



(a) Diluição de 1/1.

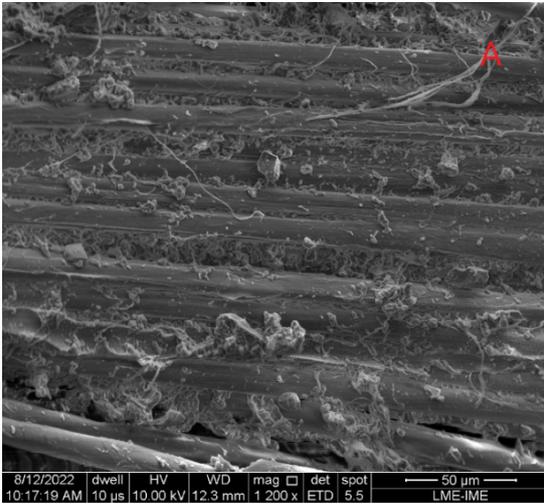


(b) Diluição de 2/1.

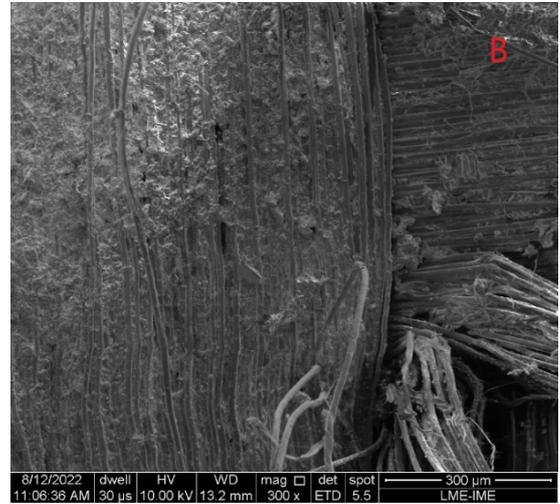
Figura 4.10 – Imagem de MEV na região de impacto da amostra de 5 camadas com diluições de 1/1 e 2/1.

A impregnação das amostras é mostrada nas Figura 4.11 e Figura 4.12 Na Figura 4.11 (A) é apresentado a amostra com 3 camadas e na Figura 4.11 (B) a amostra de 4 camadas. Já na Figura 4.12 é apresentado as amostras de 5 camadas da primeira etapa do ensaio balístico, na (A) com diluição de 1/1 e na (B) com diluição de 2/1. Em todas as imagens é percebido a homogeneização da impregnação, o elastômero preenche os espaços

entre os fios do tecido, com diferença nas imagens de 5 camadas que é percebido o excesso do elastômero, em algumas partes são encobertos os fios.

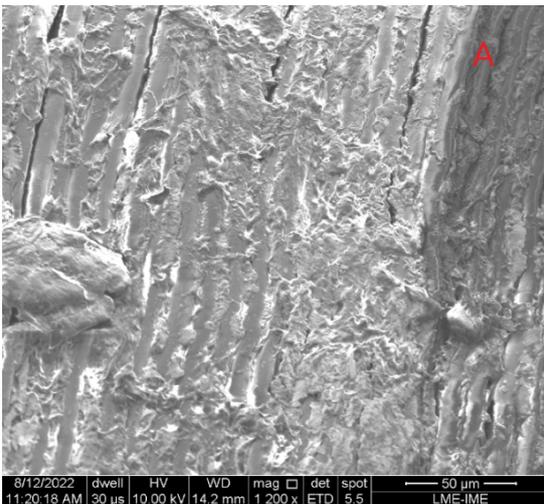


(a) Impregnação com 3 camadas.

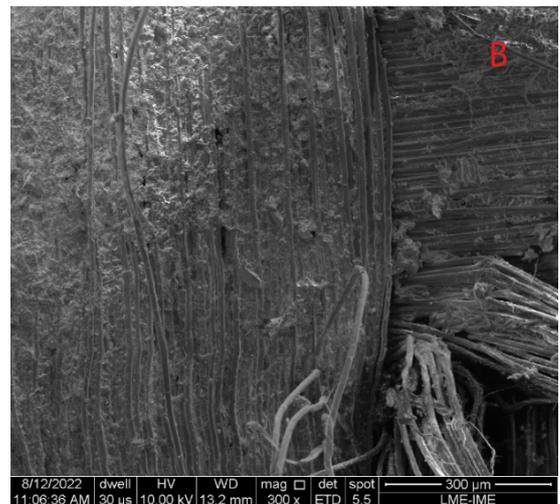


(b) Impregnação com 4 camadas.

Figura 4.11 – Imagem de mev da impregnação com 3 e 4 camadas.



(a) Impregnação com 5 camadas razão 1/1.



(b) Impregnação com 5 camadas razão 2/1.

Figura 4.12 – Imagem de MEV da impregnação com 5 camadas com diluições de 1/1 e 2/1.

4.3 Análise de Viscosidade

Figura 4.13 mostra o gráfico das curvas de viscosidade do produto Flex Seal™ puro e diluído com o tolueno de razão 1/1.

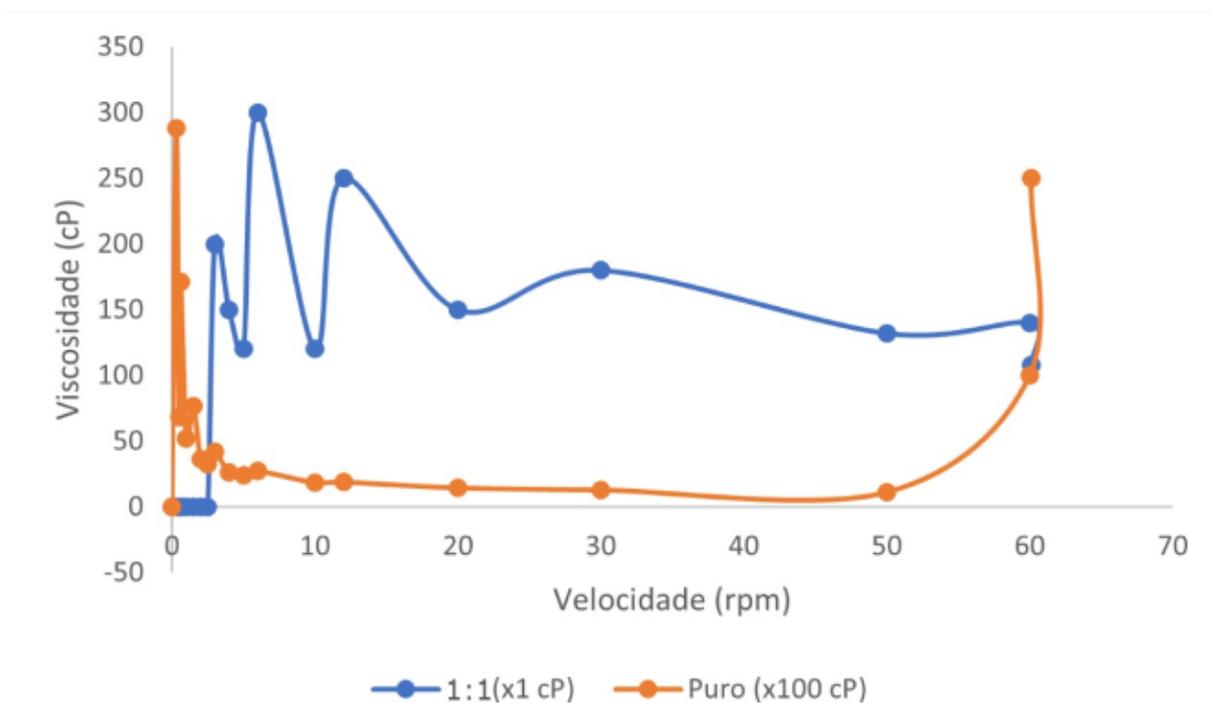


Figura 4.13 – Gráfico da viscosidade do elastômero puro e diluído 1/1.

Pode ser observado na curva do produto puro uma tendência não linear, característico do comportamento de fluido não newtoniano, onde há região que ocorre diminuição da viscosidade, devido à uma redução na tensão de cisalhamento dos materiais, por outro lado a região em que se observa aumento da viscosidade, ocorre o comportamento inverso, ou seja, um aumento da tensão de cisalhamento. Ao diluir essa propriedade é perdida.

4.4 Análise de Difração de Raios X (DRX)

Na Figura 4.14 temos o difratograma do material elastômero, onde os dados experimentais estão representados pela linha vermelha e os ajustes feitos no software, representados pela linha azul. O ajuste teórico, é baseado em fichas cristalográficas do banco de dados ICSD, com isso foi possível supor algumas fases presentes, mesmo sendo um material amorfo.

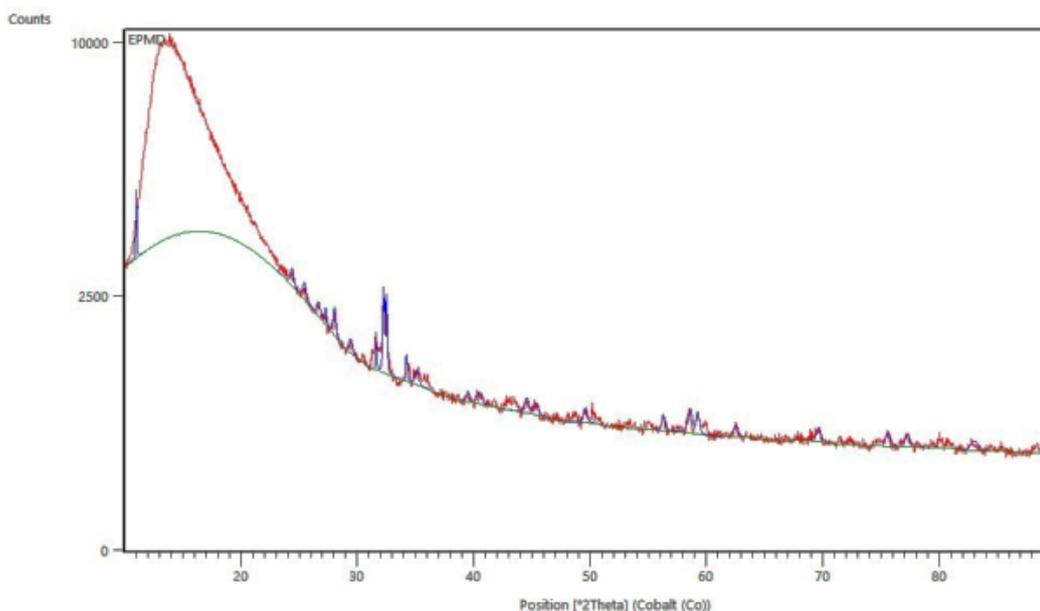


Figura 4.14 – Difratograma do Elastômero EPDM

Temos na Figura 4.14 como primeiro pico a fase amorfa, característico de um difratograma de material não cristalino. Segundo o ajuste teórico, foram identificados alguns picos, na Figura 4.15 é observado a lista desses picos seguida dos picos das fichas que mais se assemelham ao do resultado experimental.

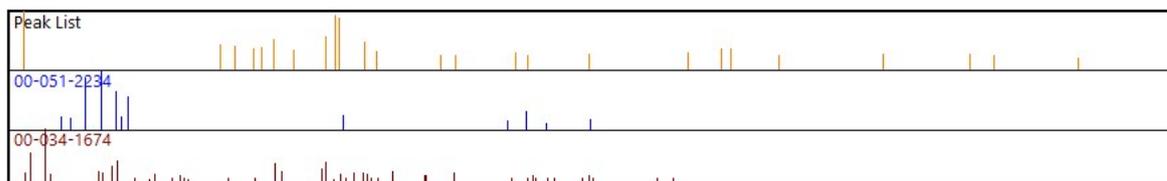


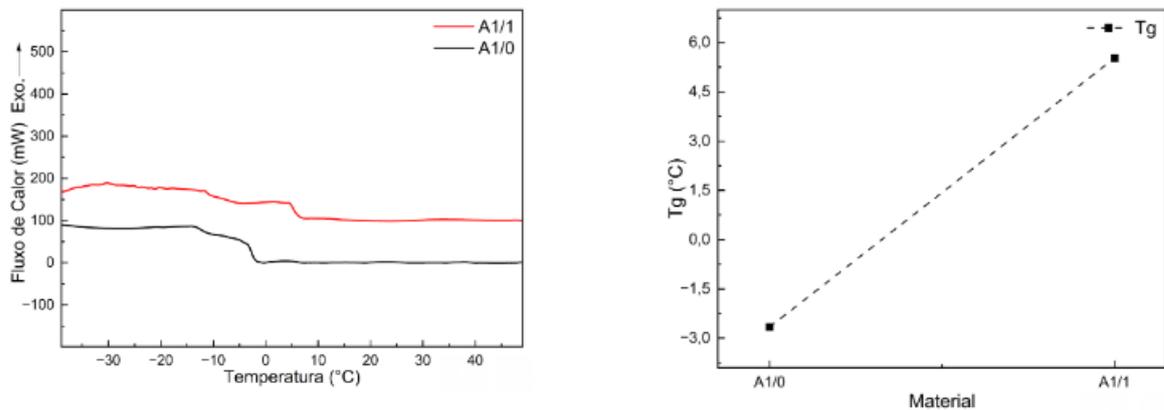
Figura 4.15 – Lista de picos do elastômero e das fichas indexadas.

Os picos amarelos se referem ao polímero caracterizado, os picos azuis correspondem a ficha da composição do Valproato de Cálcio ($C_{16}H_{30}CaO_4$). Nos picos vermelhos a ficha de outro padrão, que correspondente ao Etilenodiaminotetra-Acetato de Cálcio Heptahidratado ($C_{10}H_{12}Ca_2N_2O_8 \cdot 7H_2O$). Essa semelhança com fichas contendo o Cálcio (Ca) é justificado, pois no rótulo do produto é apresentado o Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$) em sua composição.

4.5 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A Figura 4.16 (A) mostra a curva de fluxo de calor em função da temperatura para as amostras do compósito com o elastômero puro (A1/0) e diluído com razão de 1/1

(A1/0). Pode-se observar o ponto de transição vítrea em que a amostra A1/0 acontece em temperatura abaixo de 0° , enquanto que a amostra A1/1. A transição vítrea é mais alta.



(a) Fluxo de Calor (mW) X Temperatura ($^{\circ}$ C).

(b) Tg ($^{\circ}$ C) X Material.

Figura 4.16 – Resultados da análise de DSC.

No gráfico da Figura 4.16 (B) que mostra a tendência da transição vítrea Tg em função do tipo de material, mostra que a diluição do elastômero favoreceu o aumento da Tg, provavelmente está melhorando as propriedades mecânicas com a diluição de 1/1.

4.6 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 4.17 é mostrado os picos encontrados da análise do FTIR para o Termopolímero de Etileno-Propileno-Dieno. As bandas que caracterizam a EPDM em 2962 cm^{-1} são referentes ao grupo dos C-H alifáticos, especificamente o CH_2 e o CH_3 , na região entre 1259 a 785 é associada a vibrações de diversas ligações como C-O, C-N e C-C etc. As três primeiras bandas dessa região, 1259 cm^{-1} , 1086 cm^{-1} e 1015 cm^{-1} , se refere as ligações C-O dos ácidos carboxílicos (COOH) e dos ésteres ($\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_2$), já os picos de $863\text{-}796\text{ cm}^{-1}$ relacionada aos grupos etila (C-C) e propila ($\text{R-C}_3\text{H}_7$).

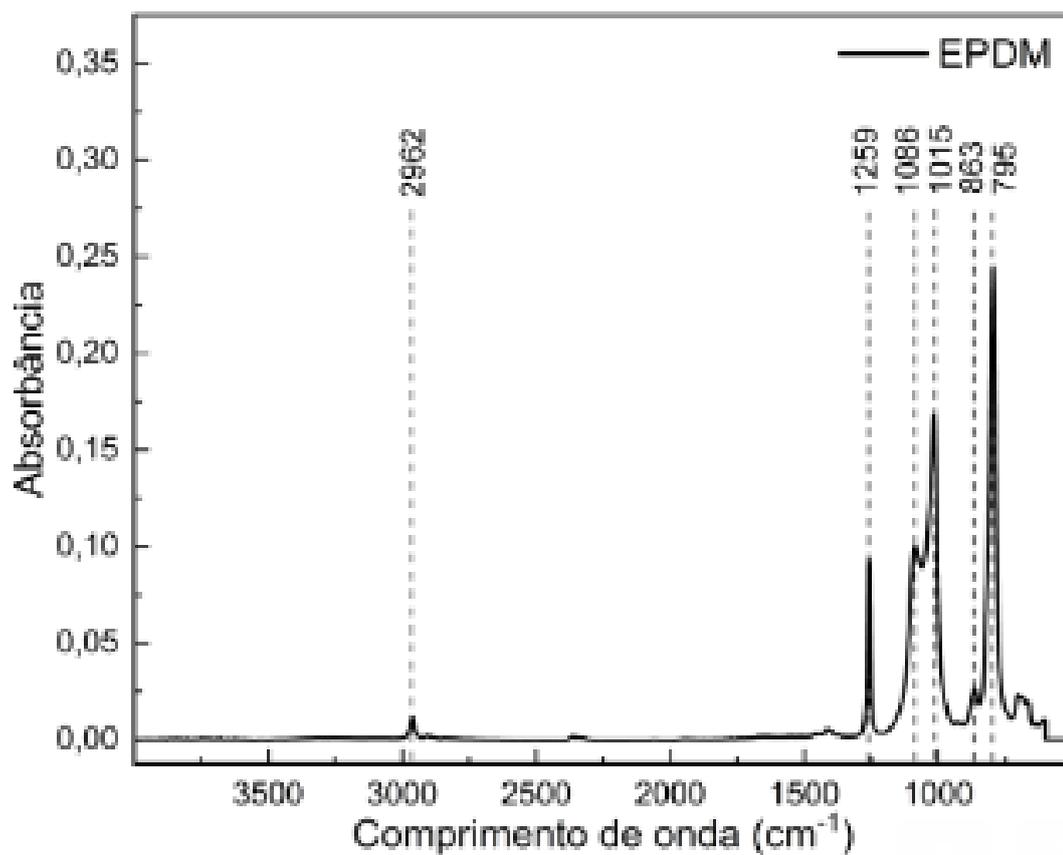


Figura 4.17 – Bandas de absorção encontradas do EPDM na análise de FTIR

Todos esses grupos funcionais são amplamente encontrados nos hidrocarbonetos extraídos do petróleo, que são a matéria-prima do elastômero EPDM, como o Tolueno, a Nafta, gás liquefeito de petróleo e solventes de petróleo.

5 CONCLUSÃO

O selante da marca Flex Seal™, um elastômero que tem por base o Termopolimero Etileno-Propileno-Dieno (EPDM), impregnado nos fios do tecido de aramida, tanto puro quanto diluído com o Tolueno (C_7H_8), contribuiu para diminuir a deformação do tecido após sofrer o impacto do projétil, deformando apenas a região impactada, devido a alta flexibilidade e elasticidade do elastômero que elevou a capacidade do compósito de absorver a energia cinética do projétil.

As diferentes razões de diluição do elastômero usadas neste projeto não permitiram detectar diferenças significativas nos resultados, tanto nos testes balísticos quanto nas imagens do MEV, enquanto que, o número de camada do tecido se mostrou ter maior influência nos resultados. Contudo, pode se supor que a diluição 1/1 tenha sido a razão que teve a melhor tendência no desempenho, pois na terceira etapa dos ensaios balísticos, quando comparadas as médias das diferentes diluições ao número de camadas iguais, elas tiveram números maiores de absorção, além do que, no ensaio de profundidade penetração a média da diluição 1/1 repetiu uma maior tendência apesar de não apresentar uma diferença estatística constatada na análise de variância ANOVA.

Na análise de DSC observa-se uma tendência a melhorar as propriedades mecânicas com a diluição do EPDM, e na análise de FTIR a presença de grupos funcionais característicos dos derivados do petróleo, que confirmam a matéria-prima do material usado na impregnação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como continuidade deste estudo, as seguintes temáticas:

1. Realizar um novo estudo com foco apenas na comparação do compósito com camadas puras e impregnadas e identificar o desempenho balístico de cada uma;
2. Testar, utilizando mais réplicas, o desempenho da diluição de razão elastômero/dilueno 1/1 na impregnação do tecido de aramida;
3. Realizar teste com maiores números de camadas de aramida impregnado com o elastômero usado neste estudo;
4. Fazer mais caracterizações do produto Flex Seal, para identificar detalhes na cristalografia, composição e propriedades desse material.

REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR 15000: Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação*. Rio de Janeiro, 2005.
- ALGAHTANI, A. *Manufacturing of high strength kevlar fibers* — Science, Journal of King Kalid University, v. 2, 2006.
- ASEMANI, S. S.; LIAGHAT, G.; AHMADI, H.; ANANI, Y.; KHODADADI, A.; CHARANDABI, S. C. *The experimental and numerical analysis of the ballistic performance of elastomer matrix Kevlar composites* — Polymer Testing, 102, 107311, 2021.
- AURORA, S.; MAJUMDAR, A.; BUTOLA, B. S. *Soft armour design by angular stacking of shear thickening fluid impregnated high-performance fabrics for quasi-isotropic ballistic response* — Composite Structures, Bhupendra Singh, v. 233, 2020.
- BAZHENOV, S. L.; GONCHARUK, G. P. *A study of yarn friction in aramid fabrics* — Polymer Science Series A, v. 54, n. 10, p. 803–808, 2012.
- BHATNAGAR, A. E. *Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications*, Woodhead Publishing, 2016.
- BIRKETT, J. W.; BRADELY, D.; CLEWS, J.; GOLDSTONE, C.; HUMPHREYS, C.; MULVHILL, D.; UNSWORTH, I. *Understanding ballistics a primer for courts*, 2021.
- CAVALLARO, P. V. *Soft body armor an overview of materials, manufacturing, testing and ballistic impact dynamic*, NUWC-NPT Technical Report, NUWC Division Newport Assignmente Number TD0207, p. 1–35, 2011.
- CHEESEMAN, B. A.; BOGETTI, T. A. *Soft body armor an overview of materials, manufacturing, testing and ballistic impact dynamic. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates*, Compos Struct, 61 (1–2), p. 161–173, 2003.
- CLARK, B. L. *Effect of barrel length on the muzzle velocity and report from a Mosin-Nagant 7.62 x54R rifle*, 2011.
- DAVID, N. V.; GAO, X.-L.; ZHENG, J. Q. *Ballistic Resistant Body Armor: Contemporary and Prospective Materials and Related Protection Mechanisms*, Applied Mechanics Reviews, v. 62, n. 5, 2009.
- DONALD, A. S.; DAVID, C. A.; JEFFEREY, W. S.; HYUNG-SEO, P. *Improved Barriers to Turbine Engine Fragments: Interim Report IV*, National Technical Information Service (NTIS), Springfield, Virginia, 2002.
- EGRES R.G. J. LEE, Y. K. J. K.-K. W. E. W. N. *Liquid Armor: Protective Fabrics Utilizing Shear Thickening Fluids*, Proceedings of the International Conference on Safety and Protective Fabrics, 2004.
- FERREIRA, J. *Proteção Balística do Soldado de Infantaria*, Tese de Doutorado. Academia Militar. Direção de Ensino, 2015.

- KANG, T. J.; KIM, C. Y.; HONG, K. H. *Rheological behavior of concentrated silica suspension and its application to soft armor*, Journal of Applied Polymer Science, v. 14, n. 2, p. 1534–1541, 2011.
- KARAHAN, M.; JABBAR, A.; KARAHAN, N. *Ballistic impact behavior of the aramid and ultra-high molecular weight polyethylene composites*, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 34(1), p. 37–48, 2015.
- KHAN, I. *Study of Internal External Ballistics for. 177 cal . 22 cal Projectiles*, BE Students, Department of Mechanical Engineering. International Journal for Scientific Research Development, v. 5, n. 07, 2017.
- KHODADADI A., L. G. T.-F. A. S.-G. D. *Impact characteristics of soft composites using shear thickening fluid and natural rubber—a review of current status*, Composite Structures, 271, 114092, 2021.
- KLEVAR TECHNICAL GUIDE. VA 23234: Dupont advanced fibers systems. [S.l.], 2017.
- MAGALDI, G. P.; SILVA, R. G. da; COSTA, R. S.; FUMAGALI, T. R. M. *Shunt temporário em trauma vascular: relato de caso Temporary shunt in vascular trauma: case report*, Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 11, p. 109125–109132, 2021.
- MAJUMDAR, A.; BUTOLA, B. S.; SRIVASTAVA, A.; BHATTACHARJEE, D.; BISWAS, I.; LAHA, A.; GHOSH, A. *Improving the impact resistance of p-aramid fabrics by sequential impregnation with shear thickening fluid*, Fibers and Polymers, v. 17, n. 2, p. 199–204.
- MARQUES, D. F. F. *Estudo de balística interna*. Tese (Doutorado), 2014.
- OLIVEIRA, E. V. G. D.; ANDRADE, L. G. S. D.; S., M. L. H.; SILVA, M. G. O.; AZEVEDO, U. E. D. *RELATÓRIO DE PESQUISA: Fibra de Aramida — Trabalho de pesquisa*, Curso Técnico em Têxtil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2017.
- PINTO, J. M. G. T. *Avaliação do comportamento mecânico de blindagens balísticas*. Tese (Doutorado), 2009.
- RAMAN, S. N. *Polymeric coatings for enhanced protection of reinforced concrete structures from the effects of blast*. Tese (Doutorado) — University of Melbourne, 2011.
- RUBBER, M. *Rubber chemistry*. Tese (Doutorado) — Education and culture Leonardo da Vinci, 2007.
- SANTOS, J. A. da S. *Métodos de Análise de Impactos Balísticos*, 2016.
- SANTOS, V. E. *Desempenho balístico de compósito de cobre com perlita expandida*. Dissertação (Proposta) — Instituto Militar de Engenharia. Departamento de ciência e tecnologia, Rio de Janeiro, 2019.
- SOMARATHNA, H. M. C. C.; RAMAN, S. N.; MUTALIB, A. A.; BADRI, K. H. *Elastomeric polymers for blast and ballistic retrofitting of structures*, Jurnal Teknologi, 2015.
- SRIVASTAVA, A.; MAJUMDAR, A.; BUTOLA, B. S. *Improving the Impact Resistance of Textile Structures by using Shear Thickening Fluids: A Review*, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, v. 37, n. 2, p. 115–129, 2012.

THOMAS, J. E.; TRIGGIA, A. A.; CORREIA, C. A.; FILHO, C.; XAVIER, J. A. D.; MACHADO, J. C. V.; FILHO, J. E. S.; PAULA, J. L. D.; ROSSI, N. C. M. D.; PITOMBO, N. E. S.; GOUVEU, P. C. V. M.; CARVALHO, R. S.; BARRAGEM, R. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, Interciência, Petrobrás, 2001.

VISSER, H. D.; MILLER, R.; MERIJANIAN, A. V.; SIGWORTH, W. D. *Liquid rubber composition*, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, n. 18, 1985.

WILSON, A. *Rubber, its historys, properties, and application*, Distribution unlimited, 1978.

YAVAŞ, M. O.; AHMET, A. V. C. I.; ŞİMŞİR, M.; AKDEMİR, A. *Ballistic performance of Kevlar49/UHMW-PEHB26 hybrid layered-composite*, International Journal of Engineering Research and Development, v. 7, n. 4, p. 21–27, 2015.