

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA  
INSTITUTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM PROCESSAMENTO DE MATERIAIS

LUIZ FELIPE PERUCHI DE GODOY GUIDUGLI

Desenvolvimento de protótipo de capacetes aeronáuticos com proteção balística produzidos em compósito polimérico reforçado com fibras de para-aramida e fibra de carbono

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
2023

LUIZ FELIPE PERUCHI DE GODOY GUIDUGLI

Desenvolvimento de protótipo de capacetes aeronáuticos com proteção balística produzidos em compósito polimérico reforçado com fibras de para-aramida e fibra de carbono

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba como requisito para a obtenção do grau Mestre em Processamento de Materiais.

Profa. Dra. Erika Peterson Gonçalves

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
2023

## TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

### Ficha catalográfica

Guidugli, Luiz Felipe Peruchi de Godoy  
Desenvolvimento de protótipo de capacetes aeronáuticos com  
proteção balística produzidos em compósito polimérico reforçado  
com fibras de para-aramida e fibra de carbono / Luiz Felipe  
Peruchi de Godoy Guidugli; orientadora, Profa. Dra. Erika  
Peterson Gonçalves. - São José dos Campos, SP, 2023.  
1 CD-ROM, 78 p.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade do Vale do  
Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em  
Processamento de Materiais.

Inclui referências

1. Processamento de Materiais. 2. Capacetes. 3. Polímeros. 4.  
Fibra de Carbono. I. Gonçalves, Profa. Dra. Erika Peterson,  
orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de  
Pós-Graduação em Processamento de Materiais. III. Título.

Eu, Luiz Felipe Peruchi de Godoy Guidugli, autor(a) da obra acima  
referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em  
outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o  
usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado  
respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de  
propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e  
profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 23 de Outubro de 2023.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LUIZ FELIPE PERUCHI DE GODOY GUIDUGLI  
Data: 25/10/2023 10:48:33 -0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Autor(a) da Obra

**LUIZ FELIPE PERUCHI DE GODOY GUIDUGLI**

**“DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE CAPACETES AERONÁUTICOS COM PROTEÇÃO BALÍSTICA PRODUZIDOS EM COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRAS DE PARARAMIDA E FIBRA DE CARBONO.”**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - Univap, pela seguinte banca examinadora:

Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Andreza Ribeiro Simioni	<i>Andreza Ribeiro Simioni</i>
Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Erika Peterson Gonçalves	<i>Erika Peterson Gonçalves</i>
Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Lúcia Vieira	<i>Lucia Vieira</i>
Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago - UniFOA	<i>Roberto de Oliveira Magnago</i>
Prof. Dr. José Maria Fernandes Marlet – JMARLET Consulting	<i>José Maria Fernandes Marlet</i>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia Vieira  
Diretora do IP&D – Univap  
São José dos Campos, 25 de agosto de 2023.

## **DEDICATÓRIA**

Agradeço a minha orientadora, a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Erika Peterson Gonçalves por ter aceitado me acompanhar neste projeto. O seu empenho foi essencial para a minha motivação à medida que as dificuldades iam surgindo ao longo do percurso.

Expresso minha gratidão a todos os profissionais do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento do curso de Processamento de Materiais da Universidade do Vale do Paraíba por todo o apoio que me deram ao longo da realização do meu mestrado.

Aos professores do curso de Processamento de Materiais que me forneceram todas as bases necessárias para a realização deste trabalho, agradeço com profunda admiração pelo vosso profissionalismo.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha avó, por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Tio, por seu cuidado e dedicação foram que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada. Aos amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Com vocês, as pausas entre um parágrafo e outro de produção melhoram tudo o que produzi na vida.

A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

Agradeço ao mundo por mudar as coisas, por nunca as fazer serem da mesma forma, pois assim não teria o que pesquisar, o que descobrir e o que fazer, pois através deste consegui concluir esta dissertação.

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

- Marcel Proust.

## RESUMO

Com o aumento significativo dos investimentos globais na área militar, equipamentos e acessórios relacionados a esse setor têm adquirido grande relevância, notadamente os capacetes de proteção, com movimentações superiores aos 10 bilhões de reais por ano no mercado mundial. Em situações de voo, tanto o piloto como passageiros em zonas de risco estão continuamente expostos a diversos perigos, desde estilhaços até impactos diretos de diversos tipos de munições. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de capacetes aeronáuticos com proteção balística de nível IIIA, produzidos em compósito polimérico reforçado com fibras de para-aramida e fibra de carbono. Para isso, foram laminados inicialmente dois tipos de compósitos: sendo ambos com dez camadas de Kevlar<sup>®</sup> em sua base, o primeiro com adição de dez camadas de carbono (KC10) e o segundo com sete camadas de carbono e uma de Kevlar<sup>®</sup>. Esses materiais foram submetidos respectivamente a ensaios de tração e microscopia eletrônica de varredura, fornecendo resultados técnicos fundamentais para o desenvolvimento do protótipo. Com base nos dados obtidos nos ensaios prévios, foram elaborados modelos do protótipo para testes balísticos. O modelo mais eficiente em termos balísticos foi escolhido para criação do produto final, o qual foi submetido a testes de campo com usuários finais, a fim de validar seu desempenho. Com o desenvolvimento desse protótipo, espera-se fornecer uma solução mais avançada para a proteção dos pilotos e passageiros em cenários de risco, contribuindo para a segurança e integridade das forças aéreas.

**Palavras chaves:** protótipo, para-aramida, capacete, balístico.

## ABSTRACT

With the significant increase in global investments in the military sector, equipment and accessories related to this area have gained great relevance, notably protective helmets, with yearly market movements exceeding 10 billion Brazilian Reais worldwide. In flight situations, both pilots and passengers in high-risk zones are continuously exposed to various dangers, ranging from shrapnel to direct impacts from different types of ammunition. The present work aims to develop a prototype of aeronautical helmets with level IIIA ballistic protection, produced using a composite of polymer reinforced with para-aramid fibers and carbon fiber. To achieve this, two types of composites were initially laminated: both with ten layers of Kevlar<sup>®</sup> as their base, the first with an additional ten layers of carbon (KC10) and the second with seven layers of carbon and one layer of Kevlar<sup>®</sup>. These materials were subjected to tensile tests and scanning electron microscopy, providing fundamental technical results for the development of the prototype. Based on the data obtained from the preliminary tests, prototype models were designed for ballistic testing. The most efficient model in ballistic terms was chosen for the creation of the final product, which underwent field tests with end users to validate its performance. With the development of this prototype, it is expected to provide a more advanced solution for the protection of pilots and passengers in risky scenarios, contributing to the safety and integrity of the air forces.

**Keywords:** prototype, para-aramid, helmet, ballistic.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Imagem ilustrativa de um capacete francês da primeira guerra mundial. ....	18
<b>Figura 2</b> – Imagem do capacete após impactos de tiros em proteção balística sobre seu casco. .....	15
<b>Figura 3</b> - Imagem de uma amostra de manta de fibra de Kevlar®. ....	23
<b>Figura 4</b> – Estrutura química do Kevlar®. ....	24
<b>Figura 5</b> – Imagem de uma manta de fibra de Carbono. ....	25
<b>Figura 6</b> – Imagem do novo laboratório de balística do Senai Cimatec inaugurado em agosto de 2022. ....	26
<b>Figura 7</b> – Imagem em explosão das camadas de materiais presentes no protótipo. ....	30
<b>Figura 8</b> – Imagem das amostras KC7 e KC10 antes do teste de tração.....	28
<b>Figura 9</b> – Amostras após a pulverização do ouro e o equipamento <i>Emitech K550X</i> .....	29
<b>Figura 10</b> - Capacete 1 com dupla proteção nível IIIA de Kevlar® puro (após os tiros).....	30
<b>Figura 11</b> – Capacete 2 com dupla proteção nível IIIA de Kevlar® puro (após os tiros).....	31
<b>Figura 12</b> - Capacete 1 com dupla proteção nível IIIA de Kevlar® puro no estande de tiro...	31
<b>Figura 13</b> – Amostras KC10 (1) e KC7 (2)... ..	38
<b>Figura 14</b> - Capacete modelo mono viseira.....	45
<b>Figura 15</b> - Capacete modelo dupla viseira.....	40
<b>Figura 16</b> – Micrografia de corte transversal do compósito com 10 camadas de carbono após tração.....	44
<b>Figura 17</b> – A. Região de arrancamento de resina. B. Região de alta adesão da resina.....	45
<b>Figura 18</b> – Amostra A sendo a de menor tensão, B com tensão intermediária e amostra C de maior tensão.....	46
<b>Figura 19</b> – Amostra D sendo a de menor tensão, E com tensão intermediária e amostra F de maior tensão.....	46
<b>Figura 20</b> – Região laminada, com 7 camadas de carbono e 1 de Kevlar® .....	47
<b>Figura 21</b> - Projétil retido na lateral do capacete após disparo nos testes.....	50
<b>Figura 22</b> - Forro de isopor interior afetado pelo impacto dos disparos no teste.....	50
<b>Figura 23</b> – Novo modelo com a proteção do protótipo de compósito de carbono e Kevlar® ....	52
<b>Figura 24</b> – Piloto e copiloto em voando com os dois modelos produzidos.....	53

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> – Resultados obtidos por ensaios de Tração nos compósitos K, KC7 e KC10.....	43
<b>Gráfico 2</b> – Gráfico de opinião a respeito do peso do protótipo.....	53
<b>Gráfico 3</b> – Gráfico de opinião a respeito do tamanho do protótipo.....	53
<b>Gráfico 4</b> – Gráficos de opinião a respeito da usabilidade dos protótipos.....	54
<b>Gráfico 5</b> – Gráfico de opinião a respeito do desconforto do usuário após diferentes tempos de voo.....	56

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Tabela de requerimentos balísticos para cada nível balístico adaptado segundo a NIJ Standard 0108.01.....	24
<b>Quadro 2</b> – Primeiro disparo realizado no capacete 1.....	32
<b>Quadro 3</b> – Segundo disparo realizado no capacete 1.....	33
<b>Quadro 4</b> – Terceiro disparo realizado no capacete 1.....	33
<b>Quadro 5</b> – Quarto disparo realizado no capacete 1.....	34
<b>Quadro 6</b> – Quinto disparo realizado no capacete 2.....	34
<b>Quadro 7</b> – Sexto disparo realizado no capacete 2.....	35
<b>Quadro 8</b> – Sétimo disparo realizado no capacete 2.....	35
<b>Quadro 9</b> – Oitavo disparo realizado no capacete 2.....	36
<b>Quadro 10</b> – Nono disparo realizado no capacete 2.....	36
<b>Quadro 11</b> – Décimo disparo realizado no capacete 2.....	37
<b>Quadro 12</b> - Análise Swot do protótipo no mercado atual.....	41
<b>Quadro 13</b> – Tabela dos resultados obtidos por ensaio de tração nos compósitos K, KC7 e KC10.....	42
<b>Quadro 14</b> – Resultados dos dez disparos nas proteções iniciais.....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NIJ	National Institute of Justice
ASTM	American Society for Testing and Materials
DVBIC	Defense and Veterans Brain Injury Center
TBI	Traumatic Brain Injury
BFS	Back Face Signature
PAM	Plano de Assistência Mutua
SAE	Society of Automotive Engineers
MCOTEA	Marine Corps Operational Test and Evaluation Activity
DVBIC	Defense and Veterans Brain Injury Center
ESRA	Engenharia Serviços e Representação Aeronáutica LTDA
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
KC7	Amostra de dez camadas de Kevlar <sup>®</sup> 29 e sete camadas de carbono com uma camada de Kevlar <sup>®</sup> 29 no meio das camadas de carbono.
KC10	Amostra de dez camadas de Kevlar <sup>®</sup> 29 com adição de dez camadas de carbono
K	Amostra de dez camadas de Kevlar <sup>®</sup> 29

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	OBJETIVOS .....	16
2.1	OBJETIVO GERAL .....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
3.1	CAPACETES - UMA INTRODUÇÃO HISTÓRICA E TÉCNICA .....	17
3.2	COMPÓSITOS BALÍSTICOS .....	20
3.3	RESINA EPÓXI - MATRIZES .....	21
3.4	FIBRAS DE ARAMIDA – KEVLAR® .....	22
3.5	FIBRA DE CARBONO .....	24
3.6	ENSAIOS .....	26
3.6.1	Ensaio de Tiro .....	26
3.7	NORMAS NIJ .....	28
3.8	ANÁLISE SWOT .....	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	30
4.1	MATERIAIS .....	30
4.2	MÉTODOS .....	31
4.2.1	Laminação a frio .....	31
4.2.2	Testes de Tração .....	32
4.2.3	Testes por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	33
4.2.4	Testes Balísticos .....	35
4.2.5	Testes de Campo .....	44
4.2.6	Análise Swot .....	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
5.1	RESULTADOS DO TESTE DE TRAÇÃO .....	48
5.2	RESULTADOS DOS TESTES POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) .....	50
5.3	RESULTADOS DOS TESTES BALÍSTICOS .....	54
5.4	RESULTADOS E AVALIAÇÕES DOS TESTES DE CAMPO .....	58
6	CONCLUSÃO .....	64
7	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	66

REFERÊNCIAS.....	67
ANEXOS - EQUIPAMENTOS.....	72

## 1 INTRODUÇÃO

A segurança pública no Brasil é um tema de grande relevância, principalmente nas regiões metropolitanas, onde a violência armada é um problema constante. De acordo com o Instituto Fogo Cruzado (2022), a região metropolitana do Rio de Janeiro registrou 966 tiroteios nos primeiros 100 dias de 2022, resultando em graves consequências para os agentes de segurança pública. Desde 2016, 1.500 agentes foram mortos a tiros em todo o país, o que reforça a necessidade de equipamentos de proteção balística de alta qualidade. Nesse sentido, a Portaria Normativa N° 14, de 23 de março de 2018, publicada pelo Ministério da Defesa, determinou a obrigatoriedade do uso de capacetes balísticos com nível de proteção IIIA ou superior para todos os setores militares brasileiros, baseando-se nas normas NIJ 0106 e NIJ 0108 (Brasil, 2018).

Com o objetivo de atender a essa demanda, empresas do setor de proteção balística têm investido em tecnologias avançadas para o desenvolvimento de materiais de alta resistência e durabilidade. Nesse contexto, destaca-se a utilização de compósitos à base de fibras de carbono e para-aramida (Kevlar<sup>®</sup>), que apresentam propriedades superiores às de materiais convencionais, como aço, poliéster, poliamida e polietileno. Estudo recente, como o de Mazarim e Salerno (2018), tem demonstrado a possibilidade de substituição do aço por materiais compósitos de fibra de carbono e resina, o que abre caminho para o desenvolvimento de capacetes balísticos mais leves e eficientes.

Com base nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de capacete balístico utilizando tecnologias de processamento de compósitos, reforçados com Kevlar<sup>®</sup> e fibra de carbono. A partir de pesquisas prévias sobre a utilização desses materiais em proteções balísticas de alto nível, pretendeu-se realizar análises de viabilidade para a produção do protótipo e avaliar seu desempenho em testes de impacto, tração e microscópicos seguindo as normas estabelecidas pelas autoridades competentes. Espera-se que o resultado deste trabalho possa contribuir para a melhoria da segurança dos agentes de segurança pública no país.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como propósito o desenvolvimento, teste e análise de um protótipo de material compósito para proteção balística em capacetes aeronáuticos, utilizando fibra de para-aramida e fibra de carbono.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar seleção prévia dos materiais mais adequados para proteção de acordo com suas propriedades específicas;
- Laminar corpos de prova e conformar protótipo de capacete por técnica de laminação;
- Realizar ensaios de tração;
- Realizar ensaios por Microscopia Eletrônica de Varredura;
- Realizar ensaio balístico;
- Caracterizar qual melhor compósito dentre os testes para uso no produto final;
- Realizar pesquisa de opinião com usuários dos protótipos;
- Determinar a eficiência do produto baseado nos resultados empíricos e na opinião do usuário final.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram descritos os mais importantes assuntos para melhor entendimento sobre o desenvolvimento da dissertação, dando-se início por uma abordagem da história e evolução dos capacetes passando por sua importância e desafios como equipamento, sobre os compósitos balísticos, matrizes, resina epóxi, bem como as propriedades dos materiais Kevlar® e da fibra de carbono e seus respectivos usos comerciais e variações. Ainda foram descritos sobre os ensaios realizados, análise Swot e avaliação das principais normas sobre o tema do trabalho.

#### 3.1 CAPACETES - UMA INTRODUÇÃO HISTÓRICA E TÉCNICA

Segundo Segrelles (1979), após o desenvolvimento do arco e flecha, a humanidade foi obrigada a mudar o conceito de combate e desenvolver outros equipamentos defensivos individuais, resultando no escudo e armadura, inicialmente confeccionados em couro ou fibras vegetais. Estes eram materiais resistentes o suficiente para resistir ao declínio do poder das armas de arremesso da época (3000 a.C.). Em seguida iniciou-se a confecção de ambos em bronze, apenas foram ultrapassados por volta de 1300 a.C. pelo ferro.

A descoberta da metalurgia do aço forçou grandes mudanças nas armas usadas até então, com o aparecimento das primeiras armas de fogo no século XIV as armas defensivas tornaram-se obsoletas e não conseguiram acompanhar a evolução das armas ofensivas.

O aumento das lesões na cabeça com a introdução da guerra de trincheiras levou ao desenvolvimento de uma forma especial de proteção, o capacete. O exército francês desenvolveu o *Stahlhelm* como visto na figura 1, que entrou em serviço em setembro de 1915, seguido pelo exército britânico, que introduziu o modelo Mark I em novembro do mesmo ano. A *Bundeswehr* (força armada alemã) também introduziu um capacete neste momento, este modelo oferecia melhor proteção aos soldados, mas era mais pesado que os modelos francês e britânico.

**Figura 1** - Imagem ilustrativa do capacete francês da primeira guerra mundial.



**Fonte:** 1944militaria.com (2022).

Durante a Segunda Guerra Mundial, uma solução revestida de aço foi usada para proteger o abdômen, peito e costas. Esse tipo de proteção não era amplamente aceito pelos militares, pois seu peso era considerado excessivo. Na década de 1960, a Dupont desenvolveu uma fibra de para-aramida sob o nome comercial de Kevlar<sup>®</sup>. Devido às propriedades desta fibra, foi utilizada como material à prova de balas com melhor desempenho que o Nylon<sup>®</sup> (Justo, 2005).

No Brasil, após o final da Segunda Guerra Mundial, instalou-se uma moderna Força Aérea graças a um acordo militar Brasil – Estados Unidos conhecido por PAM (Plano de Assistência Mútua) que permitia ao Brasil receber aviões e equipamentos norte-americanos quase sem ônus. Os capacetes chegaram ao país, devido a um pacote de venda de aviões, marcando a entrada, através de importação, de equipamentos de proteção individual. Nesta época, por volta do início dos anos 50, a Inglaterra e a França já fabricavam seus próprios capacetes, porém foram os modelos norte-americanos os adotados por nossa força aérea (Carter, 1992).

A partir desta década, os capacetes entraram em uma etapa contemporânea de desenvolvimento em que não somente a proteção era a propriedade principal do equipamento, mas o peso e deformação afetavam diretamente a saúde do usuário, e assim diversos estudos deram início para melhor atender essa busca revolucionária na segurança militar.

Segundo dados disponibilizados da MHS (2022) (*Military Health System*) embora a cabeça e o pescoço ocupem apenas 12% do corpo de um soldado, os ferimentos na cabeça são responsáveis por metade das mortes em combate nos campos de batalha. A lesão cerebral traumática (TBI) é uma das principais causas de morte e incapacidade entre soldados feridos e

tornou-se uma lesão característica em conflitos militares modernos. De acordo com o DVVIC (2022) (*Defense and Veterans Brain Injury Center*), havia 458.894 TBI's diagnosticados nas forças armadas dos EUA de 2000 a 2021. Por isso, tem havido uma necessidade urgente de desenvolver capacetes de combate avançados para melhor proteger os soldados de projéteis e dispositivos explosivos improvisados.

Segundo as normas NIJ para balística, o valor máximo de BFS (*Backface Signature*) de 44 mm, isso quer dizer que uma proteção segundo a norma poderia ter uma concavidade de 44 mm no casco do capacete como visto na figura 2 e assim diretamente na cabeça do piloto. Entretanto baseado em estudos e testes realizados por Rym Ferahtia (2015) da MCOTEA (*Marine Corps Operational Test and Evaluation Activity*) este valor adotado não é aceitável de forma alguma para proteções do crânio, pois embora as proteções se mostravam verificadas pela norma, o trauma sofrido pelo usuário da proteção poderia ainda ser fatal. Este estudo acabou por concluir que para capacetes militares americanos, o máximo de deformação da área frontal do capacete deveria ser de 25,4 mm e laterais de 16 mm, valores muito abaixo dos propostos da norma NIJ que valem para armaduras corporais.

**Figura 2** – Imagem do capacete após impactos de tiros em proteção balística sobre seu casco.



**Fonte:** Autor, (2022).

Para alvos móveis, o peso tem uma grande influência. Por exemplo, para veículos terrestres, quando um sistema de proteção balística leve é usado, há menos desgaste do motor e maior eficiência do veículo. Em aeronaves, o peso de cada peça é fundamental e deve ser levado em consideração. Na proteção individual onde o movimento é necessário, o fator peso é extremamente importante e devem ser usados materiais mais leves (Mansur, 2011).

Com relação aos problemas cervicais, Hämäläinen (1993) fez um estudo para investigar o efeito do peso do capacete de voo na distensão dos músculos escalenos sobre atuação de altas forças g (aceleração da gravidade). Foram comparados dois capacetes de pesos diferentes, utilizando-se gravações de dados coletadas por um sensor eletromagnético integrado que aferia as atividades musculares durante o voo. Os dados foram conflitados com os valores das contrações voluntárias máximas dos músculos obtidas no solo sem a ação de mais de 1 g. Dois pilotos de teste fizeram um total de 16 voos, em uma serie de diferentes manobras.

Os resultados indicaram que os capacetes mais leves, podem ao menos em alguns pilotos, causar menos distensão na estrutura do pescoço. O efeito do peso do capacete foi rapidamente notado apenas em altas acelerações g, mudando-se do capacete mais pesado para o mais leve, reduziu-se a distensão média do músculo de 9,5% para 8,8% e de 20,2% para 17,1% da contração máxima voluntária em + 4 g's e + 7 g's respectivamente (Hämäläinen, 1993).

A fim de reduzir o efeito do peso na musculatura dos pilotos durante o voo, conforme apresentado nos estudos precedentes, o uso de materiais mais leves imprescindível no desenvolvimento do protótipo proposto neste trabalho. Assim buscando a redução do peso dos equipamentos de proteção individual, estudos têm sido desenvolvidos no ramo de materiais compósitos e híbridos para determinar a melhor configuração que atenda aos requisitos balísticos e confira redução de peso ao capacete.

### 3.2 COMPÓSITOS BALÍSTICOS

O material é chamado de compósito quando as propriedades finais são obtidas a partir da combinação de duas fases macroestruturais imiscíveis que desempenham diferentes papéis no material: a fase de maior resistência mecânica, chamada de reforço garante a propagação, orientação e a resistência às cargas impostas à estrutura, é composta geralmente por um material orgânico ou inorgânico de variadas formas (de fibras longas e tecidos, a granulados e fibras curtas); a outra fase é a chamada de matriz e tem a função de suporte, dando resistência ao cisalhamento no conjunto, além de aglutinar e manter a posição geométrica dos reforços. Pode ser composta de materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos, porém, compósitos leves são mais comumente encontrados com matrizes poliméricas tanto termofixas quanto termoplásticas. Essas matrizes são atrativas devido ao seu baixo módulo de elasticidade e resistência mecânica adequada (Peruchi, 2019).

Em compósitos estruturais e que necessitem resistir à elevadas tensões é recomendado a utilização de resinas termofixas, que se apresentam na fase líquida, o que viabiliza a conformação do produto, como já citado é necessário a adição de um agente de reticulação de polimerização, onde o tempo de pega inicial da resina, assim como as propriedades finais da matriz serão influenciadas pelo tipo e quantidade deste acelerador. Por fim, a utilização de fibras longas, tecidas ou não, é recomendado para esta classe de compósitos (Levy Neto; Pardini, 2006).

A proteção balística passou a incorporar diferentes tipos de materiais, cada um com funções específicas dentro do conjunto. Os tipos mais recentes de equipamentos de proteção são feitos de materiais compósitos, devido à sua alta resistência, rigidez em relação ao peso e resistência a danos (Nayak; Banerjee; Sivaraman, 2013; Zhang *et al.*, 2014).

Os capacetes compósitos são modelados em diferentes sequências usando tecidos bidirecionais de Kevlar<sup>®</sup>, fibras de carbono e fibras de vidro como reforços e uma matriz epóxi (Stephen; Schoeppner; Sanborn, 2022).

Compósito baseados nestes três materiais, todos os anos são realizados estudos balísticos para tentar encontrar materiais compósitos com propriedades mais eficientes para diferentes usos neste setor. Entretanto, o alto custo dos materiais, diferentes tipos de munição, dificuldade de aquisição tornam esse tipo de pesquisa de alta complexidade, os diversos estudos acabam por deixarem grandes lacunas em seus resultados.

### 3.3 RESINA EPÓXI - MATRIZES

As resinas epóxi, também conhecidas como poliepóxidos, são um tipo de resina plástica que inicia o processo de cura quando misturada com o agente de reticulação. É um polímero termofixo que, ao contrário dos polímeros termoplásticos, não pode ser reprocessado termicamente e é moldável apenas antes do processo de cura. As resinas epóxi são infusíveis e insolúveis em solventes orgânicos comuns, como hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos. Ao final da polimerização, apresenta excelente resistência e é resistente ao calor excessivo e ácidos. Este material é comumente utilizado como adesivo para outros polímeros, compósitos, cerâmicas e até metais (Cabral *et al.*, 2018).

As resinas epóxi necessitam de agentes de reticulação de cura tais como os endurecedores combinados com a variação de temperatura, radiação e/ou pressão. A estrutura molecular deste polímero termofixo pode ser modificada com a adição de ácidos graxos específicos ou combinadas com endurecedores seletivos para formar estruturas moleculares

tridimensionais durante a polimerização. Resulta em um material sólido e rígido à temperatura ambiente (Amaral, 2014).

A produção de compósitos poliméricos reforçados por fibras é obtida a partir da junção de uma matriz polimérica, podendo esta ser termofixa ou termoplástica, dependendo da aplicação almejada e as fibras de reforço que podem ser longas, tecidas ou picadas, do mesmo modo que a matriz, a escolha é norteadada pela aplicação desejada (Portilho *et al.*, 2016).

A função das matrizes em um compósito é aglutinar as fibras a fim de obter características adesivas e coesivas, além de protegê-las do meio ambiente. Seu papel no compósito permite a distribuição adequada das cargas de acordo com a orientação das fibras, concedendo assim resistência à propagação de trincas e cisalhamento interlaminar. A seleção dos materiais para a matriz é feita de acordo com a aplicação desejada do compósito, considerando as aplicações finais esperadas. Estas ainda têm a capacidade de ajustar a orientação das fibras e sua posição de maneira a manter o ângulo das fibras da melhor forma a suportar os carregamentos teorizados (Gonçalves, 2007).

### 3.4 FIBRAS DE ARAMIDA – KEVLAR®

Os reforços fibrosos produzidos a partir de aramida, comumente são designados por seu nome comercial, Kevlar®, registrado por sua fabricante DuPont. A descoberta científica, data de 1965 em um dos laboratórios da DuPont por Stephanie Louise Kwolek, bacharel em química (Savignano, 2020).

De acordo com a Organização Internacional para Padronização (ISO), o termo aramida é uma fibra sintética feita de poliamidas de cadeia longa na qual pelo menos 85% de suas ligações amida estão diretamente ligadas a dois anéis aromáticos, cujo grupo imida é uma amida e podem ser substituídas por até um máximo de 50% do grupo (ISO 2076, 2021).

Trata-se de uma fibra polimérica que combina a alta tenacidade, alta resistência e baixo peso, tendo seu módulo específico até cinco vezes maior do que do aço. O filamento pode ser usado como matéria-prima para cabos e tecidos flexíveis e confortáveis. Sendo um material versátil, pode ainda ser adicionado a outros materiais para aumentar sua durabilidade. Kevlar® está contido em produtos capazes de resistir à mais ampla gama de ataques, desde estilhaços e facadas até ferimentos a bala. Também capaz de suportar temperaturas e pressões extremas, este material é utilizado em todos os ambientes, a Figura 3 apresenta amostra do tecido de Kevlar®.

**Figura 3** - Imagem de uma amostra de manta de fibra de kevlar®.



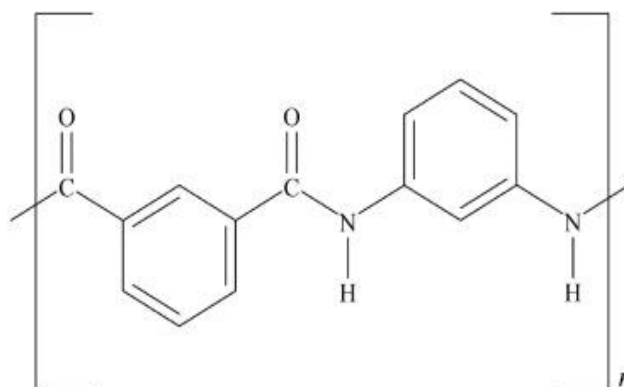
**Fonte:** Autor (2022).

As fibras de aramida com estrutura de poliamida aromática são uma das mais importantes fibras de reforço em materiais compósitos com propriedades interessantes como baixa densidade, excelente tenacidade e resistência ao impacto. Existem muitas variações de fibras de aramida, e a Dupont fabrica tipos como Kevlar® 29, Kevlar® 49, Kevlar® 129 e Kevlar® 149 (SILVA; KOEHLER; AMICO, 2019).

O Kevlar® 29 é conhecido por sua alta resistência a tração em relação ao seu leve peso, é um material adequado para aplicações em que a durabilidade é essencial, sem adicionar muito peso. Em comparação, o Kevlar® 49 é ainda mais leve visto que possui 23% menos filamentos por área mantendo a mesma densidade, este ainda apresenta resistência a tração igual ao tipo 29, entretanto a resistência a ruptura é 22% inferior, além de possuir um alto módulo de elasticidade. Em contrapartida, embora o Kevlar® 129 e Kevlar® 149 possuam propriedades térmicas, e resistências similares aos modelos 29 e 49, além de estabilidades dimensionais superiores em condições extremas; Segundo Gower, Cronin e Plumtree. (2008), o BFS dos materiais do tipo 129 e 149 sobre ação balística e impactos cortantes é inferior em comparação ao mesmo número de camadas do Kevlar® 29.

A fibra de aramida é quimicamente estável sob uma ampla variedade de condições de exposição; no entanto, certos ácidos fortes, bases e hipoclorito de sódio podem causar degradação, particularmente por longos períodos de exposição em temperaturas elevadas.

A degradação térmica de um compósito de Kevlar® acontece inicialmente entre os 100-200 °C, devido as fisicamente mais fracas moléculas de água adsorvidas na superfície do compósito além da desidratação induzida pelo grupo dos álcoois secundários. A partir dos 300 °C o segundo estágio da degradação térmica é devido majoritariamente a degradação da matriz epóxi do compósito. E por fim a última etapa acontece a partir dos 500 °C, em que as ligações de hidrogênio do material como vistas na figura 4, se quebram levando a completa decomposição das fibras de Kevlar® (Naveen *et al.*, 2019).

**Figura 4** – Estrutura química do Kevlar®.

**Fonte:** Mckeen (2021).

Um importante campo de pesquisa é o desenvolvimento e investigação de compósitos reforçados com fibra de Kevlar® para aplicações balísticas. A discussão sobre pesquisas relacionadas a compósitos reforçados com fibra de Kevlar® tem sido realizada com foco no estudo e desenvolvimento de características estruturais, mecanismos de falha após impacto balístico e métodos de análise, sendo importante para a viabilização da aplicação destes promissores materiais nos mais diversos setores de engenharia.

Estudos experimentais foram realizados inicialmente, mas os avanços nos métodos computacionais levaram ao desenvolvimento de simulações de softwares, juntamente com caracterizações usando técnicas de nanoindentação e no microscópio eletrônico de varredura. O comportamento das fibras balísticas é ainda representado matematicamente na forma de modelos matemáticos e analíticos, micro e macromecânica e usando outras técnicas constitutivas. Assim verificou-se a necessidade de desenvolver um modelo generalizado para prever as propriedades de materiais anisotrópicos altamente complexos pós-impacto (Naik, 2020).

Embora Naik (2020) reforce a ideia da necessidade do desenvolvimento de modelos e softwares para futuros estudos com o material em questão, a limitação dos softwares e modelos para uso balístico atuais acarretam em grande parte dos artigos e estudos do tema utilizarem ainda somente ensaios empíricos em suas análises.

### 3.5 FIBRA DE CARBONO

Nas aplicações industriais, as fibras de carbono são frequentemente utilizadas como reforço ou para adicionar funcionalidade a materiais compósitos, que possuem uma matriz de

plástico, cerâmica, metal, entre outros. As fibras de carbono exibem propriedades mecânicas superiores, como alta resistência específica e alto módulo específico. Além disso, apresentam características como baixa densidade, baixa expansão térmica, resistência ao calor e estabilidade química (Saito *et al.*, 2011).

De coloração escura e brilhante, como visto na Figura 5, a fibra de carbono geralmente se refere a uma grande variedade de materiais fibrosos constituídos por mais de 90% de carbono gerado a partir da pirólise de poliacrilonitrila (PAN) e os restantes 10% de piche ou rayon. Uma propriedade associada a este elemento químico é que quanto maior o teor de carbono, mais dura e durável será a peça fabricada, dependendo de sua aplicação. Os tratamentos de superfície que podem ser utilizados na superfície da fibra de carbono são divididos em agentes oxidantes e não oxidantes. Esses tratamentos visam melhorar a adesão entre as superfícies através da formação de centros ativos, alterações na rugosidade da superfície ou outras modificações (Portilho, 2016).

A composição exata de cada precursor varia de uma empresa para outra e geralmente é considerada um segredo industrial. Durante o processo de fabricação, uma variedade de gases e líquidos são usados. Alguns desses materiais são projetados para reagir com a fibra para obter um efeito específico. Outros materiais são projetados para não reagir ou evitar certas reações com a fibra. Assim como os precursores, as composições exatas de muitos desses materiais de processo são consideradas segredos industriais (Bhatt; Goe, 2017).

**Figura 5** – Imagem de uma manta de fibra de Carbono.



**Fonte:** Autor (2022).

As classificações mais comuns da fibra são 3k, 6k, 12k e 15k. O “k” refere-se a mil, então um cabo de 3k é feito de 3.000 filamentos de carbono. Uma fibra padrão de 3k geralmente tem 0,318 cm de largura, de modo que esta é muita compactada em um espaço pequeno. Este grande número de fibras agrupadas é o que torna a fibra de carbono um material tão resistente (Latteier, 2019).

A fibra de carbono possui propriedades únicas e é um objeto de estudo que combina arte, ciência e tecnologia. Uma de suas aplicações mais interessantes é no fortalecimento de compósitos de matriz termofixa no setor aeroespacial. A pesquisa para melhorar a adesão entre

as superfícies, pois é onde ocorre a maioria das falhas estruturais, entre o reforço e a matriz, é um passo importante para a área de materiais compósitos (Guimarães, 2018).

De acordo com Batista *et al.* (2017), podemos descrever as principais vantagens em se utilizar fibras de carbono em materiais compósitos como: alta resistência mecânica específica e alta rigidez específica, elevada resistência a diversos tipos de agentes químicos o que torna promissora para a aplicação em ambientes corrosivos, leve, com peso específico da ordem de  $1,6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a  $1,9\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , cerca de 5 vezes menor do que o do aço.

O mais recente desenvolvimento na tecnologia do carbono são os nanotubos. Esses tubos ocos, alguns tão pequenos quanto  $1\ \mu\text{m}$  de diâmetro, têm propriedades mecânicas únicas que podem ser úteis na fabricação de novas fibras de alta resistência, tubos submicroscópicos ou possivelmente novos materiais semicondutores (Bhatt; Goe, 2017).

## 3.6 ENSAIOS

### 3.6.1 Ensaio de Tiro

Para realização correta dos ensaios, deve haver acreditação do laboratório de realização do teste de tiro de acordo para cada teste da norma que o laboratório realiza; mais uma vez, como garantia de que a competência foi demonstrada e avaliada de forma válida. Essas creditações independentes demonstram que o laboratório de testes balísticos pode cumprir seus objetivos de fornecer condições de teste que sejam justas, reproduzíveis, relatáveis e auditáveis. A Figura 6 apresenta a configuração de um laboratório de ensaios balísticos acreditado aqui no Brasil.

**Figura 6** – Imagem do novo laboratório de balística do Senai Cimatec inaugurado em agosto de 2022.



Fonte: Nalini Vasconcelos (2022)

O uso de projéteis de acordo com os padrões de teste é obrigatório. Quase todos os padrões de teste balístico especificam uma gama de níveis de proteção e as amostras correspondentes que devem ser usadas. Usar munição sobressalente ou reserva é uma prática inaceitável em laboratórios de balística. Um sistema de blindagem é projetado para proteger contra uma ameaça específica, e nenhuma garantia de conformidade pode ser dada a menos que a blindagem tenha sido testada contra essa ameaça. Por exemplo, para o padrão NIJ (*National Institute of Justice*) 0101.04 requer um calibre de 7,62 mm Bala M80. O padrão NIJ 0101.06 vai além e especifica o fabricante da bala e o número real da peça. (Crouch; Eu, 2017).

O controle de velocidade da bala, medido por um cronógrafo, em um inventário de balas de teste é outra área de funcionalidade necessária para operadores de campo de laboratório. O desempenho confiável da munição carregada na fábrica pode ser afetado por fatores como idade, exposição ambiental e qualidade de fabricação, todos os quais afetam a obtenção da velocidade de teste necessária ou a tolerância de propagação de velocidade correta. Para superar isso, alguns laboratórios termo regulam a munição carregada de fábrica para controlar a velocidade (Crouch; Eu, 2017).

Para a maioria dos usuários, a principal medida é a velocidade na qual nenhuma bala penetrará na blindagem. A medição da velocidade de penetração zero ( $v_0$ ) deve levar em consideração a variabilidade no desempenho da blindagem e a variabilidade do teste. O ensaio balístico tem várias fontes de variabilidade: a blindagem, os materiais de apoio do teste, a bala, o invólucro, a pólvora, o primer e o cano da arma, para citar alguns (Sturgill, 2022).

Apenas um único disparo penetrante de baixa velocidade é necessário para reduzir o valor de  $v_0$ . Em termos estatísticos, a velocidade de penetração zero é o final da curva de distribuição. Se a variabilidade for conhecida e o desvio padrão puder ser calculado, pode-se definir rigorosamente o  $v_0$  em um intervalo de confiança. Os Padrões de Teste agora definem quantos tiros devem ser usados para estimar um  $v_0$  para a certificação de armadura.  $v_0$  é difícil de medir, então um segundo conceito foi desenvolvido em testes balísticos chamado limite balístico ( $v_{50}$ ). Esta é a velocidade na qual 50 por cento dos tiros passam e 50 por cento são parados pela armadura (Sturgill, 2022).

Conhecer o  $v_{50}$  das soluções balísticas significa ter um conhecimento quantitativo e mais nobre que salva vidas. Portanto, dentre as soluções qualificadas qualitativamente pela ABNT NBR 15.000, podemos conhecer não apenas aquelas que resistem a tiros balísticos sem perfuração, mas também aquelas que resistem à perfuração. Isso significa que menos produto é necessário e uma proteção mais segura da vida é garantida (Dupont, 2018).

A importância de tal ensaio é de apoiar a pesquisa por meio da concepção, do projeto e estabelecendo especificações de dispositivos, de equipamentos, de sistemas e de instalações que visem apoiar a realização de ensaios de itens bélicos (FAB/DCTA/LET, 2022).

### 3.7 NORMAS NIJ

#### 1. Norma NIJ 0106.01: Norma para Capacetes Balísticos.

Existe um padrão oficial de capacetes da NIJ, mas o documento padrão 0106.0, foi publicado em 1981 e é considerado lamentavelmente desatualizado. Além disso, 0106.01 consiste apenas em três níveis, níveis I, IIA e II e, portanto, não há nível IIIA associado a um padrão NIJ para capacetes.

#### 2. Padrão NIJ 0101.06: Resistência balística de armadura corporal.

Por enquanto, os coletes são testados de acordo com o padrão NIJ 0101.06, *Ballistic Resistance of Body Armor*, publicado em 2008. O protocolo de teste deste padrão identifica cinco níveis de proteção balística determinados pelo calibre e velocidade que permitem que uma bala perfure material balístico ou cause trauma contuso ao usuário.

#### 3. Norma NIJ 0108.01: Materiais de Proteção Resistentes à Balística.

Os níveis de proteção descritos pela norma NIJ 0108.01, Quadro 1, podem ser aplicados a uma variedade de itens. Esses níveis definem a resistência balística de qualquer equipamento, incluindo capacetes. Esta norma possui uma tabela de referência balística, imutável desde a década de 80, para realização dos testes, especificando cada tipo de munição, massa da bala, tamanho do cano de disparo, velocidade da bala, quantidade de impactos válidos na proteção e quantidade de penetrações permitidas. É possível visualizar esta tabela a seguir:

**Quadro 1** – Tabela de requerimentos balísticos para cada nível balístico adaptado segundo a NIJ Standard 0108.01.

Nível de Proteção	Munição do Teste	Massa Nominal do Projétil	Tamanho Sugerido do Barril	Velocidade Requerida da bala	Acertos Requeridos Pela Proteção	Penetrações Permitidas
I	22LRHV Chumbo	2.6g	15-16.5cm	320±12m/s	5	0
	38 Special Chumbo	10.2g	15-16.5cm	259±15m/s	5	0
II-A	357 Magnum JSP	10.2 g	10-12cm	381±15m/s	5	0
	9mm FMJ	8g	10-12cm	332±12m/s	5	0
II	357 Magnum JSP	10.2 g	15-16.5cm	425±15m/s	5	0
	9mm FMJ	8g	10-12cm	358±12m/s	5	0
III-A	44 Magnum SWC	15.55g	14-16cm	426±15m/s	5	0
	Chumbo 9mm FMJ	8g	24-26cm	426±15m/s	5	0
III	7.62 mm 308 Winchester FMJ	9.7g	56cm	838±15m/s	5	0
IV	30-06 AP	10.8g	56cm	868±15m/s	1	0

**Fonte:** Adaptado de NIJ Standard 0108.01 (1985).

### 3.8 ANÁLISE SWOT

Desenvolvida pelos professores da *Harvard Business School*; Kenneth Andrews e Roland Cristensen e posteriormente adotada por muitos acadêmicos, a análise SWOT examina a competitividade de uma organização por meio de quatro variáveis: pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças. Essas variáveis podem ser utilizadas para avaliar os pontos fortes e fracos da empresa, nas oportunidades e ameaças do ambiente em que atua. Uma empresa pode permanecer competitiva a longo prazo se equilibrar os pontos fortes organizacionais com os principais fatores de sucesso para aproveitar as oportunidades de mercado (Silva, 2011).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais utilizados no desenvolvimento do protótipo balístico, assim como os métodos para sua fabricação e conseguinte uma breve análise prévia sobre os testes e como foram realizados.

### 4.1 MATERIAIS

O protótipo foi conformado por laminação a frio utilizou-se, mantas de Kevlar<sup>®</sup> de tipo 29 e 49 com 0,09 mm de espessura, tecidos de fibra de carbono 3k bidirecional matriz polimérica de resina epóxi RK-137, endurecedor HL-301, desmoldante LD-18N e cera desmoldante LD-11.

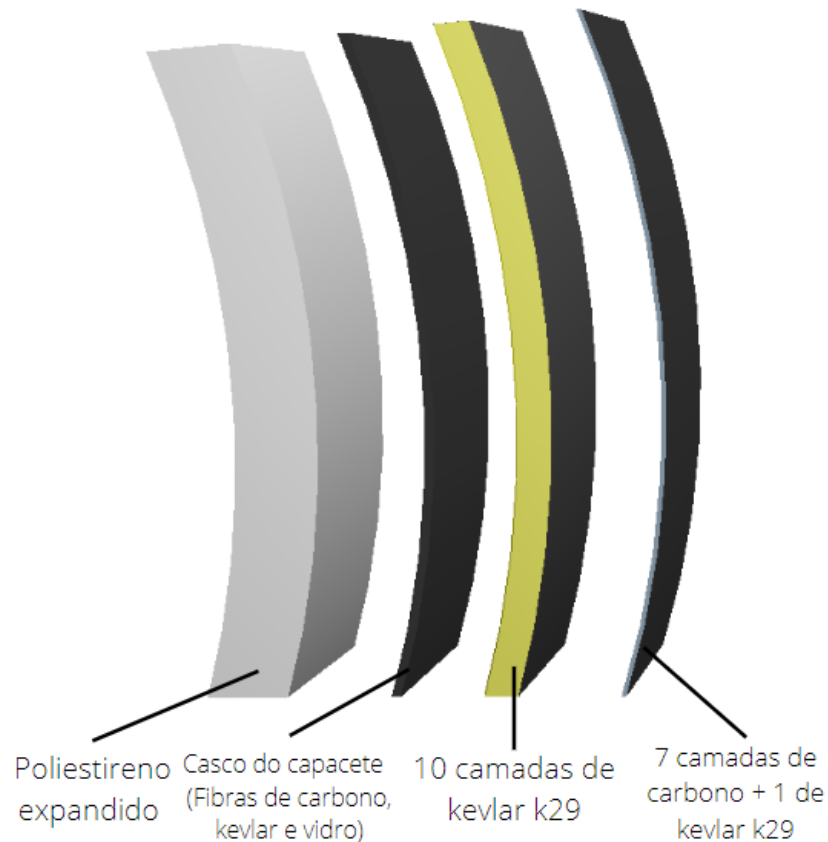
Durante os ensaios de tração foi utilizado o sistema de teste universal *Instron 5900 series*, adjunto a este foram utilizados também o sistema de pesagem *Mettely Toledo AG135* além dos aparatos de ensaio de laboratório para medição, manuseio e análise de dados fornecidos pela universidade. O software utilizado para este ensaio foi o LCF3.

Para os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), o equipamento disponível foi o *EVO MA10* da fabricante *ZEISS*, enquanto para o *sputtering* de ouro foi realizado na máquina *Emitech K550X*.

Para os testes balísticos foram utilizados também, tecido de fibra de vidro WR 180 de classe *S-glass*, poliestireno expandido (isopor P3 conforme imagem no anexo 8) com aproximadamente 13 mm de espessura para proteção interna do casco do capacete, além das já utilizados tecidos de Kevlar<sup>®</sup> e fibra de carbono para o casco e proteção internos do protótipo, cronógrafo balístico; os projéteis dos testes foram 44 Magnum SWC Chumbo e 9mm FMJ de 15,5 gramas e 8 gramas respectivamente. A imagem da figura 7 consegue de maneira mais clara mostrar as camadas de proteção do usuário com relação a impactos externos, considerando o poliestireno a camada mais interna da proteção e as 8 camadas compostas a mais externa.

Para os disparos foram utilizados os seguintes modelos de armas de fogo: Fuzil Taurus T4, Imbel 1911, Imbel GC MD2, Glock G22 e Taurus Tracker (as imagens destas armas podem ser encontradas no capítulo anexos).

**Figura 7** – Imagem em explosão das camadas de materiais presentes no protótipo.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

## 4.2 MÉTODOS

Os métodos e testes aplicados para o desenvolvimento do protótipo de material de compósito leve a base de para-aramida e fibra de carbono descritos anteriormente na revisão bibliográfica, serão apresentados nos subcapítulos seguintes.

### 4.2.1 Laminação a frio

O processo de laminação a frio de compósitos é um método de fabricação que envolve a aplicação de camadas de resina e material de reforço sobre um molde e a compressão das camadas em um processo de cura em temperatura ambiente ou com temperatura moderada. Esse processo é amplamente utilizado na produção de peças de compósitos com superfícies suaves e acabamento de alta qualidade (Nutt, 2015).

O Kevlar<sup>®</sup> é um material de fibra de aramida de alta resistência e rigidez, que é frequentemente usado como material de reforço em compósitos. O processo de laminação a frio

com Kevlar<sup>®</sup> envolve a sobreposição de camadas de fibra de Kevlar<sup>®</sup> e resina epóxi em um molde. A aplicação de resina epóxi em camadas de fibra de Kevlar<sup>®</sup> cria uma matriz polimérica que é responsável por transferir a carga através do compósito. A fibra de Kevlar<sup>®</sup> oferece alta resistência à tração, enquanto a resina epóxi proporciona alta resistência à compressão e alta rigidez. Juntos, esses materiais criam um compósito leve, forte e resistente ao impacto.

Todo o processo de criação das amostras foi realizado por uma empresa externa parceira a mais de 30 anos da empresa ESRA a qual preferiu não se identificar no decorrer dos trabalhos. Os dados encaminhados para a empresa foram que as amostras precisavam ser sobrepostas em um ângulo de 45 graus e com o posicionamento das fibras de acordo com cada modelo citado adiante nos testes balísticos. A resina utilizada foi a RK-137, específica para materiais compósitos como fibra de carbono, Kevlar<sup>®</sup> e similares. O procedimento segundo a empresa foi de laminação manual a frio, utilizando de ferramentais previamente fornecidos pela empresa contratante para criar as amostras e novos ferramentais caso necessárias adaptações.

Preparadas as fibras e a resina, ainda é passada uma camada de desmoldante para facilitar remoção futura do compósito do ferramental. Aplicados os materiais no ferramental, esses sobre grande pressão do equipamento são postos em uma estufa industrial para secagem a temperatura ambiente por aproximadamente um dia.

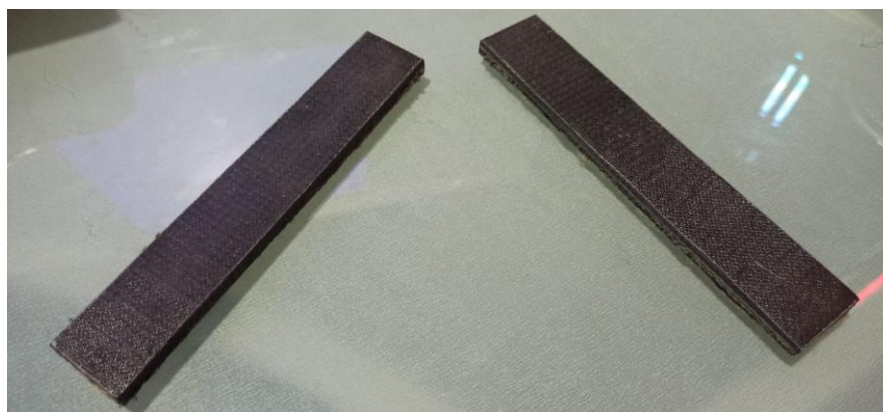
As peças após período de secagem, foram cuidadosamente tratadas removendo os excessos manualmente com equipamentos de corte de precisão como tesouras adequadas para este tipo de material, onde assim são devolvidas ao cliente contratante para testes ou encaminhadas para equipe de pintura em outra empresa.

#### **4.2.2 Testes de Tração**

Na realização do teste de tração, a escolha da norma adequada para o teste é fundamental, especialmente ao lidar com materiais de alta complexidade como compósitos a base de Kevlar<sup>®</sup>. De acordo com Perechesova e Soloveva (2016), que conduziram um estudo sobre as normas mais amplamente utilizadas internacionalmente pelas organizações como a ISO (*International Organization for Standardization*); BSI (*British Standards Institution*); ASTM (*American Society for Testing and Materials*) entre outras, e determina como melhor padrão para o Kevlar<sup>®</sup> a ASTM. Consequente foi decidida a utilização da norma ASTM-D5035-11 (*Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics*), na qual as amostras foram laminadas, foi realizado com base no modelo 4.2.1.3 1C da mesma norma.

Foram produzidas amostras em triplicata, de dimensões de 15 cm de comprimento por 2,5 cm de largura, como vistas na figura 8, sendo estas divididas em três grupos amostrais, sendo o primeiro composto por dez camadas de Kevlar<sup>®</sup> 29, será referenciado utilizando a abreviação K, o segundo com dez camadas de Kevlar<sup>®</sup> 29 com adição de dez camadas de carbono, referenciado como KC10, e por fim o último grupo composto por dez camadas de Kevlar<sup>®</sup> 29 e sete camadas de carbono com uma camada de Kevlar<sup>®</sup> 29 no meio das camadas de carbono, referenciado como KC7. As amostras foram cortadas no sentido urdume do rolo do material, separando-as em camadas individuais de fibras em tamanho superior ao exigido pela norma, tendo em vista que o processo de laminação e tratamento das peças resulta em diminuição e desgaste do material, afetando suas dimensões.

**Figura 8** – Imagem das amostras KC7 e KC10 antes do teste de tração.



**Fonte:** Autor (2022).

Em sequência, as amostras laminadas foram enviadas ao laboratório da instituição para medição de tamanho e peso. A partir destes dados, foi realizada configuração do software LCF3 do sistema da *Instron 5900 series*, no qual as medidas individuais de cada amostra influenciam nos cálculos gerados por este. As configurações de tração para o teste foram de 2 mm/minuto, aplicadas igualmente a todas as amostras. A interrupção completa do equipamento somente foi realizada manualmente após atingido o limite de ruptura da amostra em ensaio.

#### **4.2.3 Testes por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

O princípio da microscopia eletrônica de varredura é baseado na emissão de um feixe de elétrons a partir de um filamento de tungstênio. Esse feixe é concentrado, controlado e reduzido por um sistema de lentes eletromagnéticas, diafragmas e bobinas, e assim direcionado

para incidir sobre a amostra. A interação entre o feixe de elétrons incidente e a amostra resulta em uma série de emissões de sinais relacionados. Esses sinais são detectados e convertidos em imagens e informações quantitativas sobre a amostra (Herman, 2000).

Para o teste de microscopia eletrônica de varredura, foram utilizadas as mesmas amostras que foram previamente submetidas aos testes de tração. As novas amostras, com dimensões de 2,5 cm de largura por 2 cm de comprimento, foram retiradas da região central das amostras previamente tracionadas. Além de terem sido afetadas pelo teste anterior, essas amostras foram cortadas manualmente usando um método de corte mecânico com lâmina.

Foram selecionadas amostras dos grupos amostrais KC7 e KC10, contendo amostras de menor tensão, de maior tensão e amostras intermediárias. Assim com as amostras, o procedimento a seguir foi o de *sputtering* de ouro na *Emitech K550X*, ambos podem ser vistos na figura 9 a seguir. O objetivo desse revestimento é a melhoria na condutividade elétrica das amostras. Isto é importante porque, durante a análise com o feixe de elétrons, pode ocorrer acúmulo de carga na superfície das amostras, esta acarreta em distorções das imagens e interferência na resolução. Portanto o revestimento de ouro ajuda a dissipar essa carga, evitando quaisquer distorções indesejadas, e aumentando o contraste devido ao material ser altamente reflexivo para elétrons.

Por fim as amostras foram colocadas no microscópio *EVO MA10* em grupos de três. Com auxílio da especialista no equipamento foram realizadas dezenas de capturas das amostras com objetivo de observar possíveis problemas estruturais do material ou no processo de laminação. As imagens obtidas foram registradas com ampliação de 15x a 2000x, permitindo uma observação clara dos filamentos de cada material e seu comportamento após ruptura.

**Figura 9** – Amostras após a pulverização do ouro e o equipamento *Emitech K550X*.



**Fonte:** Autor, 2022.

#### 4.2.4 Testes Balísticos

Neste capítulo, é importante destacar que não há normas nacionais ou internacionais específicas para a fabricação ou teste de capacetes de voo com proteção balística nível IIIA. Dessa forma, para os ensaios deste estudo, foram consideradas as normas NIJ 01.06, utilizada para fabricação de capacetes, e NIJ 01.08, relativa às armaduras de veículos blindados. Os resultados desses testes serão apresentados e discutidos em um capítulo posterior.

Para a realização dos testes balísticos, foram adquiridas da empresa ProSafety duas mantas pré-fabricadas balísticas homologadas com 10 camadas de Kevlar® k29 (K), comumente utilizadas em proteção balística para veículos e que supostamente fornecem proteção de nível IIIA. Essas mantas foram cortadas no formato apropriado e aplicadas em duas camadas, uma interna e outra externa ao capacete aeronáutico EPH (ESRA *Protective Helmet*), resultando em dois modelos iniciais como podem ser vistos nas figuras 10 e 11 a seguir, para os testes balísticos subsequentes.

**Figura 10** - Capacete 1 com dupla proteção nível IIIA de Kevlar® puro (após os tiros).



**Fonte:** Autor, 2022.

**Figura 11** – Capacete 2 com dupla proteção nível IIIA de Kevlar® puro (após os tiros).



**Fonte:** Autor, 2022.

Os dois modelos de capacetes foram submetidos aos primeiros testes balísticos no estande de tiro da Só Armas®, estande credenciado em São José dos Campos - SP. Para garantir a oficialidade dos testes, a equipe técnica da empresa ESRA e membros do GAM-RJ estavam presentes como visto ao fundo de acordo com a figura 12, a fim de verificar se todos os equipamentos e armamentos utilizados estavam de acordo com as normas estabelecidas pelas

forças militares. Somente após a aprovação dessas normas, os testes puderam ser realizados com sucesso.

**Figura 12** - Capacete 1 com dupla proteção nível IIIA de Kevlar<sup>®</sup> puro no estande de tiro.



**Fonte:** Autor, 2022.

Neste ensaio foram utilizados um manequim de cabeça específico para ensaios balísticos, cronógrafo balístico da marca *competition electronics ProChrono digital* (Imagem do equipamento no anexo 6) para mensurar a velocidade dos disparos e as seguintes armas e calibres respectivamente para os testes, ao todo foram realizados 10 disparos. As imagens das armas utilizadas neste ensaio podem ser encontradas no capítulo anexo deste documento.

A seguir serão mostrados os quadros de número 2 ao 11, os quais representam os dez tiros efetuados nos dois modelos de capacete apresentados anteriormente, nestes são informados o número do disparo e suas características respectivas em relação ao calibre da arma utilizada, seu fabricante, tipo de munição do projétil, modelo da arma, peso total da munição, comprimento do cano da arma, velocidade registrada pelo projétil respectivo aquele disparo e por fim o local do impacto no capacete correspondente.

**Quadro 2** – Primeiro disparo realizado no capacete 1.

<b>1º DISPARO</b>	
Calibre: 9X19 mm / 9 mm Luger	Fabricante: CBC Projétil: FMJ
Arma: IMBEL GC MD2	Peso: 124 gramas
Tamanho do cano: 5 polegadas	Velocidade: 351.4 m/s
	
Posição do Impacto: Parte frontal esquerda.	

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Quadro 3** – Segundo disparo realizado no capacete 1.

<b>2º DISPARO</b>	
Calibre: .45 ACP	Fabricante: CBC Projétil: FMJ
Arma: IMBEL 1911	Peso: 230 gramas
Tamanho do cano: 5 polegadas	Velocidade: 245.6 m/s
	
Posição do Impacto: Parte frontal direita.	


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Quadro 4** – Terceiro disparo realizado no capacete 1.

<b>3º DISPARO</b>	
Calibre: 9X19 mm / 9 mm Luger	Fabricante: CBC Projétil: FMJ
Arma: IMBEL GC MD2	Peso: 124 gramas
Tamanho do cano: 5 polegadas	Velocidade: 350.5 m/s
	
Posição do Impacto: Lateral Esquerda.	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Quadro 5** – Quarto disparo realizado no capacete 1.

<b>4º DISPARO</b>	
Calibre: .357 MAGNUM	Fabricante: FEDERAL Projétil: SOFT POINT
Arma: TAURUS TRACKER	Peso: 158 gramas
Tamanho do cano: 4 polegadas	Velocidade: 245.6 m/s
	
Posição do Impacto: Lateral Direita.	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Quadro 6** – Quinto disparo realizado no capacete 2.

<b>5º DISPARO</b>	
Calibre: 9X19 mm / 9 mm Luger	Fabricante: CBC Projétil: FMJ
Arma: IMBEL GC MD2	Peso: 124 gramas
Tamanho do cano: 5 polegadas	Velocidade: 349.6 m/s
	
Posição do Impacto: Parte Frontal Esquerda.	

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Quadro 7** – Sexto disparo realizado no capacete 2.

<b>6º DISPARO</b>	
Calibre: .357 MAGNUM	Fabricante: FEDERAL Projétil: SOFT POINT
Arma: TAURUS TRACKER	Peso: 158 gramas
Tamanho do cano: 4 polegadas	Velocidade: 245.6 m/s
	
Posição do Impacto: Parte Frontal Direita.	

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Quadro 8** – Sétimo disparo realizado no capacete 2.

<b>7º DISPARO</b>	
Calibre: 9X19 mm / 9 mm Luger	Fabricante: CBC Projétil: FMJ
Arma: IMBEL GC MD2	Peso: 124 gramas
Tamanho do cano: 5 polegadas	Velocidade: 352 m/s
	
Posição do Impacto: Parte Traseira Esquerda.	

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Quadro 9** – Oitavo disparo realizado no capacete 2.

<b>8º DISPARO</b>	
Calibre: .45 ACP	Fabricante: CBC Projétil: FMJ
Arma: IMBEL 1911	Peso: 230 gramas
Tamanho do cano: 5 polegadas	Velocidade: 242.6 m/s
	
Posição do Impacto: Parte Traseira Direita.	


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Quadro 10** – Nono disparo realizado no capacete 2.

<b>9º DISPARO</b>	
Calibre: .40 S&W	Fabricante: CBC Projétil: FMJ
Arma: Glock G22	Peso: 180 gramas
Tamanho do cano: 4,5 polegadas	Velocidade: 276.4 m/s
	
Posição do Impacto: Parte Lateral Direita.	

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

**Quadro 11** – Décimo disparo realizado no capacete 2.

<b>10º DISPARO</b>	
Calibre: 5,56x45mm	Fabricante: CBC Projétil: FMJ
Arma: Fuzil Taurus T4	Peso: 62 gramas
Tamanho do cano: 10,5 polegadas	Velocidade: 815.9 m/s
	
Posição do Impacto: Parte Central, encaixe de visão noturna de aço.	

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Realizados os testes com proteções puramente de Kevlar<sup>®</sup>, foram criados dois corpos de prova balísticos para o segundo teste de tiro como podem ser vistos de acordo com a figura 13, ambos com dez camadas de Kevlar<sup>®</sup> k29 e proteção de borracha contra intempéries, o diferencial das peças foi a camada de fibra de carbono em sua superfície. Na primeira amostra foi adicionada uma proteção com dez camadas de fibra de carbono 3k bidirecional diretamente acima da borracha do Kevlar<sup>®</sup> (KC10), enquanto na segunda proteção foram utilizadas sete camadas de fibra de carbono com uma camada de Kevlar<sup>®</sup> entre a terceira e quarta camada de carbono em sua superfície (KC7), a ideia de tal compósito seria similar da construção do compósito de vidro balístico, onde as camadas de carbono teriam como função achatam o projétil sendo a parte dura do compósito enquanto a camada de Kevlar<sup>®</sup> com alta resistência a tração e as resinas adjuntas ajudariam na dissipação de energia entre as camadas além de diminuir o peso e o número de camadas no total.

Tais amostras foram criadas baseadas nos estudos e resultados de Salerno (2018) os quais afirmam que uma amostra de 3,5 mm com 5 camadas de fibra de carbono, inferior a utilizada nos corpos de prova, em uma configuração de 45° entre as camadas teria um desempenho para absorção de energia superior ao de 1,5 mm de aço SAE 1010, aço comumente utilizado em veículos, assim seria possível criar uma proteção extra semelhante ao impacto em um automóvel mas muito mais leve para o usuário final.

**Figura 13** - Amostras KC10 (1) e KC7 (2).



**Fonte:** Autor, 2022.

Ambas as amostras foram levadas até um estante de tiro acreditado e submetidas a disparos diretamente em sua superfície segundo as normas NIJ citadas anteriormente, utilizando assim munição e armas respectivas ao nível IIIA de armamentos segundo a norma utilizada. A munição utilizada neste teste foi a 44 Magnum SWC Chumbo. As amostras foram parafusadas diretamente sobre o casco do capacete aeronáutico EPH de mesmo modelo do teste anterior para fim de verificar o BFS em comparação com os modelos anteriores que utilizavam somente a proteção de Kevlar®.

#### 4.2.5 Testes de Campo

O teste do produto em campo é o processo antes que o produto seja lançado oficialmente no mercado. O principal objetivo é chegar a um conceito ligado às necessidades dos consumidores que fazem parte do público-alvo. Além disso, por meio de testes de produtos, você pode oferecer diferentes versões deles para ver qual versão seu público-alvo mais gosta e obter *feedback* sobre cada uma delas (Salgado, 2022).

Os testes diretamente com o usuário, foram realizados no Grupamento Aeromóvel da Polícia Militar do Rio de Janeiro (GAM, PMERJ), com modelos do protótipo em estado final, de acordo com os pedidos realizados pelos grupamentos alvos dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Esses testes têm como objetivo obter avaliações do usuário final na utilização do equipamento em testes de voo cotidianos, para obter dados de suma importância e utilização do mesmo em todas as condições necessárias de suas funções.

Para realização destes testes foram utilizados dois modelos de capacetes, o primeiro iremos nomear como modelo mono viseira como pode ser visto na figura 14, por possuir somente uma viseira em sua estrutura e sendo mais leve, enquanto o segundo iremos nomear como modelo dupla viseira como visto na figura 15, mais pesado considerando a adição de um sistema extra de fibra de carbono na traseira do capacete e maior altura na cobertura frontal devido ao espaço extra necessário para adição da nova viseira. Reforçando que ambos os modelos possuem, em toda a sua estrutura acima do casco, uma proteção com o protótipo balístico de dez camadas de Kevlar® mais sete camadas de fibra de carbono intercaladas com uma camada de fibra de Kevlar® e a camada pintada com tinta aeronáutica preta.

**Figura 14** – Capacete modelo mono viseira.



**Fonte:** Autor, 2022.

**Figura 15** - Capacete modelo dupla viseira.



**Fonte:** Autor, 2022.

Os testes de campo tiveram duração de aproximadamente um mês de uso por dois grupos de quatro militares cada, revezando a utilização dos capacetes. No período, foi pedido para que estes usuários avaliassem uma série de informações, as quais é possível citar: peso, uma das maiores prioridades do protótipo visto que era uma exigência que fosse leve; tamanho, por possuir um novo dimensionamento devido a adição de novos materiais este modelo poderia causar problemas no interior da aeronave; usabilidade, devido ao novo posicionamento dos trilhos da viseira que tiveram que ser modificados por causa da proteção, além de outros

componentes de volume e comunicação, seria necessário verificar a adaptação do usuário; conforto, por fim uma avaliação de como os tripulantes se sentiam após diferentes períodos de voo em relação a incômodos musculares na região do pescoço e nas cervicais próximas.

Durante os ensaios em voo, foram executadas manobras típicas realizadas em operações aéreas padrões, incluindo voo parado dentro e fora do efeito-solo, voo nivelado em velocidade cruzeiro (185,2 km/h), manobras próximas ao solo, simulação de *McGuire* (onde o tripulante fica pendurado por cordas ou auxilia na área externa da aeronave) e voo visual noturno.

#### 4.2.6 Análise Swot

Na criação de um produto é interessante verificar o meio em que ele está inserido para que o planejamento do futuro da organização possa ocorrer estrategicamente. A Análise Swot é uma ótima ferramenta para estabelecer uma metodologia que influenciará o funcionamento com informações úteis e precisas sobre qual ponto devemos focar na gestão do produto (Paula, 2015). De acordo com Philip Kotler (2006) em seu livro “Administração de Marketing” a Análise Swot é uma avaliação global dos cenários interno e externo. No quadro 12 foi realizado uma análise Swot dos ambientes interno e externo em que se encontra o desenvolvimento do protótipo com base na situação da empresa parceira.

**Quadro 12** - Análise Swot do protótipo no mercado atual.

<b>Análise Swot</b>	
<b>Ambiente Interno</b>	
<b>Forças</b>	<b>Fraquezas</b>
Infraestrutura interna preparada e pré-estabelecida;	Alto custo de variações do protótipo;
Tecnologia base pré-existente;	Possível dependência de peças internacionais;
Facilidade de criar e testar protótipos;	Baixo capital inicial de investimento;
Domínio técnico do produto;	Disponibilidade de estoque limitada.
Conhecimento prévio de normas e regulamentos.	
<b>Ambiente Externo</b>	
<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>

Nenhuma concorrência Nacional;	Acordos internacionais, permitindo maior entrada da área de proteção do exterior;
Dificuldade de concorrentes na aquisição de materiais por barreiras militares;	Crise no sistema financeiro público militar;
Demanda futura de mercado.	Falta de funcionários capacitados no mercado;

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões sobre os testes e ensaios explicados previamente serão apresentados nas etapas a seguir:

### 5.1 RESULTADOS DO TESTE DE TRAÇÃO

Durante os testes de tração, quaisquer erros experimentais, tanto instrumentais quanto manuais, foram cuidadosamente excluídos das amostras consideradas, garantindo assim que não influenciassem nos resultados obtidos a seguir.

Ao longo dos testes, foi observada a delaminação das camadas de Kevlar<sup>®</sup> entre si e em relação as camadas de carbono em praticamente todas as amostras, enquanto as camadas de carbono não apresentaram quaisquer sinais de delaminação. Essa observação pode significar possíveis falhas no processo de laminação das camadas de Kevlar<sup>®</sup> ou na escolha da resina utilizada. A razão desta delaminação será investigada mais detalhadamente durante os testes de microscopia eletrônica de varredura, nos quais a falta de resina nas microfibras indicará uma falha no processo de fabricação.

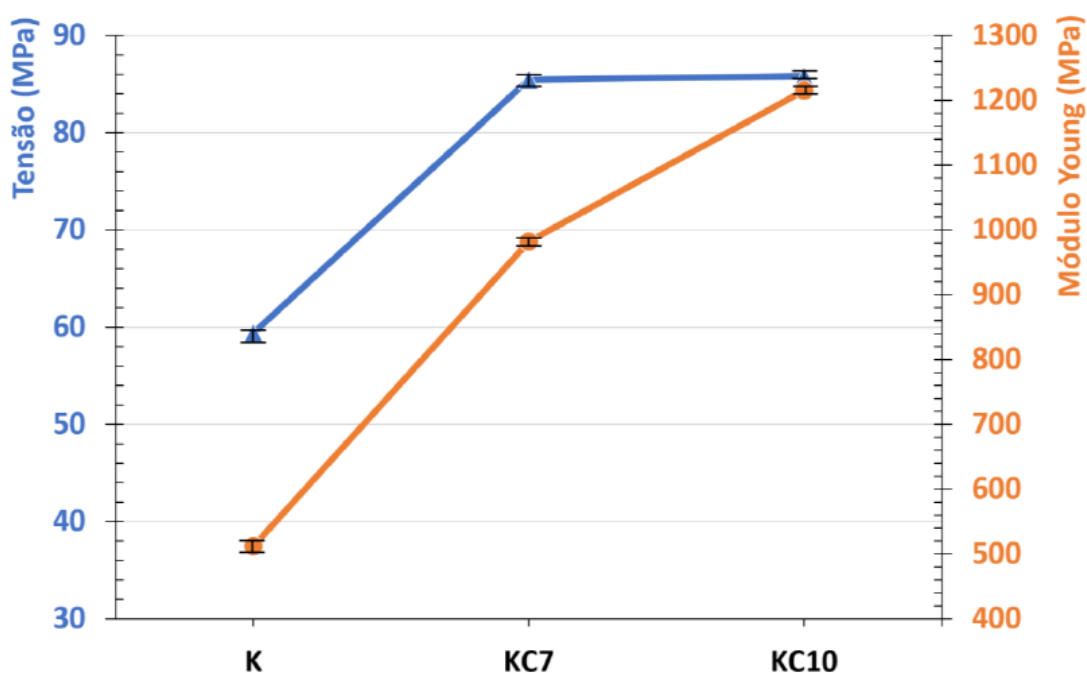
Após a realização dos testes de tração, com base nos dados obtidos no software LCF3, não foi possível verificar uma relação clara de proporcionalidade entre a elasticidade e a tensão analisada nas amostras, devido ao fato de que o material apresenta um comportamento não-linear e ortogonal em sua curva de elasticidade (SINGH; SAMANTA, 2015).

Apesar do comportamento não-linear do material, os dados presentes no quadro 13 e no gráfico 1 fornecem informações sobre a média das tensões e os módulos de Young de cada um dos conjuntos amostrais dos compósitos. Observa-se que o compósito de dez camadas de carbono (KC10) apresentou uma média de tensão das amostras numericamente similar à das amostras de sete camadas (KC7) e ambos aproximadamente 44% superiores a amostra com somente tecidos de Kevlar<sup>®</sup> (K). Entretanto a média de seu módulo de Young foi 23,97% maior que o conjunto amostral KC7 e ainda um acréscimo da ordem de 140% em comparação com o conjunto K. Essa informação indica que, embora ambas as amostras tenham obtido uma tensão média próxima nos testes, o compósito de sete camadas possui uma elasticidade maior dentre os dois tipos.

**Quadro 13** – Tabela dos resultados obtidos por ensaio de tração nos compósitos K, KC7 e KC10.

Tipo	Conjunto Amostral	Tensão (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)
Média	K	59,34	516,80
Média	KC7	85,45	981,93
Média	KC10	85,78	1217,28

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Gráfico 1** – Resultados obtidos por ensaios de Tração nos compósitos K, KC7 e KC10.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Ao buscar um material ideal para aplicações balísticas, um material com um módulo de Young menor é mais flexível e elástico, pois requer uma força menor para ser deformado. Esses materiais têm uma maior capacidade de absorver e dissipar a energia do impacto, sendo vantajoso favorecer uma dissipação em área em vez de uma deformação em profundidade em uma pequena área. Será observado o tipo de comportamento na deformação do material por meio dos ensaios balísticos em ambos os tipos de amostra, nos quais, caso o BFS da amostra de sete camadas seja menor, a dissipação de energia em área dessa amostra será confirmada como melhor dentre as amostras.

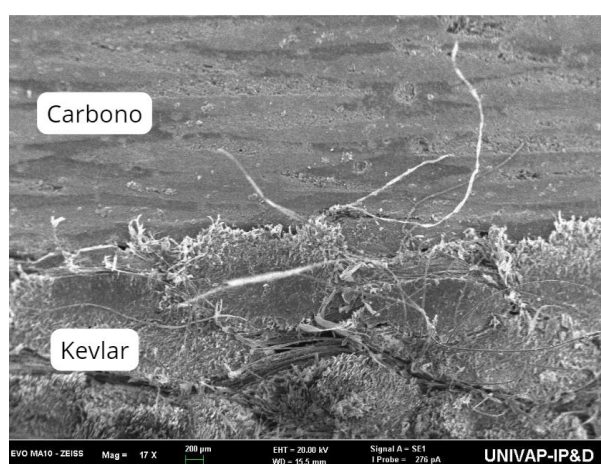
## 5.2 RESULTADOS DOS TESTES POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após os testes de tração é um fundamental para a compreensão da resposta mecânica dos compósitos e para identificar possíveis problemas ou limitações em sua estrutura, fabricação e desempenho. As informações obtidas por meio deste ensaio são de suma importância para aprimorar o protótipo em diversas etapas do projeto.

Após realização dos testes por MEV, foram constatadas notáveis diferenças entre as três amostras de cada um dos seis tipos avaliados. Serão citadas amostras de acordo com os conjuntos amostrais do quadro 13, apresentados anteriormente. As amostras KC10 com menor, intermediária e maior tensão foram identificadas como amostras “A”, “B” e “C”, respectivamente. No compósito KC7, as amostras correspondentes foram identificadas como “D”, “E” e “F”, seguindo a mesma sequência.

Ao analisar individualmente os grupos amostrais, fica clara a distinção entre os materiais carbono e Kevlar®, mesmo em ampliações menores. É importante ressaltar que a quantidade de filamentos da fibra de carbono normalmente é superior à do Kevlar®. Na figura 16, é possível observar que a quantidade de filamentos de carbono é maior, com uma densidade de filamentos mais elevada.

**Figura 16** – Micrografia de corte transversal do compósito com 10 camadas de carbono após tração.

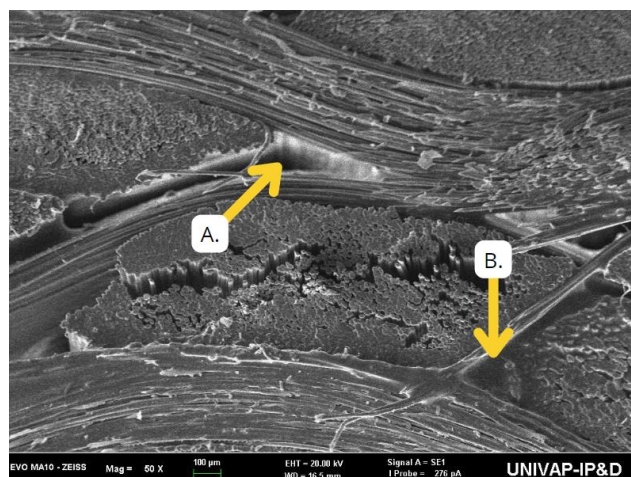


**Fonte:** Autor, 2022.

Além dos materiais principais das amostras, é fundamental destacar que a matriz do compósito desempenha um papel tão crucial quanto os reforços. A resina epóxi presente no compósito tem a função de transmitir a carga adequadamente. Portanto, observou-se que regiões

com baixa adesão de resina ou ausência da mesma estão associadas a resultados menos satisfatórios nos testes de tração. A figura 17 ilustra essas regiões, mostrando uma área em que a resina apresentou alto preenchimento e adesão após os ensaios mecânicos, contrastando com outra região que exibe resíduos de resina nos filamentos e, ainda assim, uma lacuna na mesma área.

**Figura 17** – A. Região de arrancamento de resina. B. Região de alta adesão da resina.

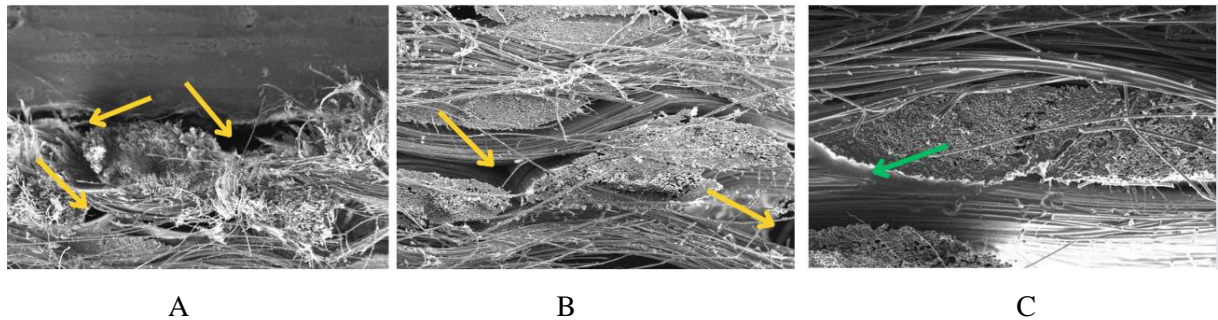


**Fonte:** Autor, 2022.

Na figura 18, foi realizado a comparação direta entre os três tipos de amostras escolhidas do grupo amostral KC10. As linhas amarelas na imagem indicam as falhas mencionadas no texto e as verdes condições positivas observadas na amostra. A amostra “A”, com menor valor de tensão dentre as amostras, apresentou um descolamento das fibras na região entre as dez fibras de Kevlar® e as fibras de carbono, além de filamentos com menor adesão de resina. Nesta amostra, também foi observado a presença de áreas com falta de resina na região das fibras de Kevlar®, evidenciando uma falha presente na fabricação da placa de Kevlar® comprada para o protótipo e não da laminação realizada ao longo do projeto.

Para a amostra “B”, é perceptível que a molhabilidade da resina na amostra é maior que em comparação a anterior. A resina se espalha mais facilmente entre os filamentos, embora ainda pode-se encontrar falhas estruturais na imagem como vazios, similares aos da amostra “A”, foram gerados durante o teste de tração e ainda apresentam resquícios de resina na região. Em sequência na amostra “C”, as regiões de arrancamento de resina ou vazios são ínfimas, enquanto a presença de resina ao longo dos filamentos é mais esparsa e densa gerando uma melhor adesão ao longo da amostra. Na seta verde em questão é possível verificar uma bolsa de resina preenchendo a conexão das fibras de urdume e trama da região.

**Figura 18** – Amostra A sendo a de menor tensão, B com tensão intermediária e amostra C de maior tensão.

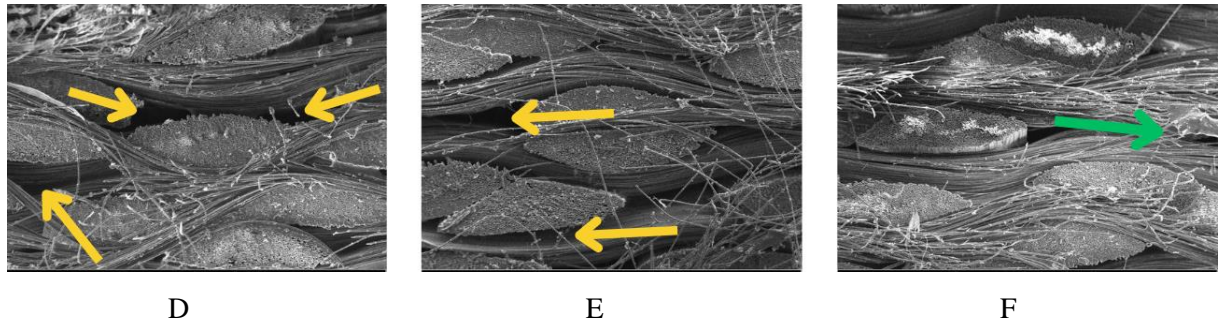


**Fonte:** Autor, 2022.

Passando para o grupo amostral KC7, na figura 19, percebe-se padrões semelhantes ao comparar as amostras com resultados de tração mais fracos e mais fortes. A amostra “D”, com menor tensão, apresentou regiões vazias semelhantes às da amostra “A”, sem preenchimento de resina entre os filamentos e com quantidade menor de resina ao longo da extensão observada, dificultando a transmissão da carga durante o teste de tração.

Na sequência a amostra “E”, apesar de exibir maior porosidade na imagem, ainda possui resina em suas regiões vazias, indicando que a integridade da amostra foi comprometida somente durante o teste de tração. Por fim, a amostra “F”, apresenta a melhor integridade entre todas as amostras, além de visivelmente ter uma alta adesão entre os filamentos repletos por resina, a presença de bolsas de resina nesta também é evidente na imagem. Essa amostra, com a maior tensão registrada, não apresentou fraturas, delaminações, inclusões externas de materiais estranhos, microfissuras, arrancamento ou problemas de orientação nas fibras, corroborando com os resultados obtidos.

**Figura 19** – Amostra D sendo a de menor tensão, E com tensão intermediária e amostra F de maior tensão.

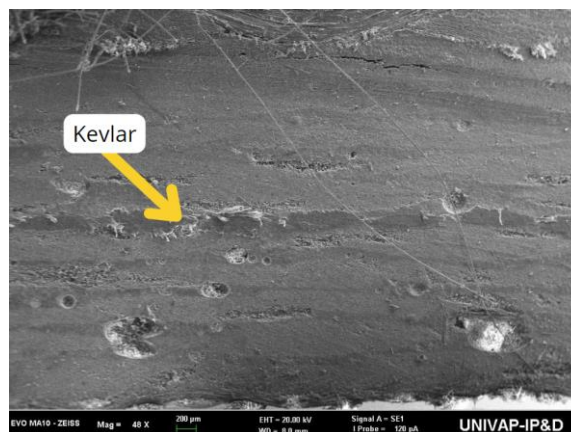


**Fonte:** Autor, 2022.

Os resultados em questão do MEV, proporcionaram com que a percepção sobre quais eram os problemas que afetavam diretamente as características de cada amostra ficassem claros, permitindo a abertura de melhores adaptações e mudanças futuras no projeto do protótipo. Enquanto as camadas de carbono e Kevlar<sup>®</sup> fabricadas segundo a orientação do autor pela empresa terceirizada apresentaram somente trincamentos leves no carbono e nenhum problema na camada de Kevlar<sup>®</sup> (quando presente), foram identificados diversos problemas nas dez camadas de Kevlar<sup>®</sup> compradas já prontas.

Isto pode ser visto na figura 20 a seguir, em comparação com a figura 15, a qualidade do processo de fabricação dos fibras individuais da área de Kevlar<sup>®</sup> puro com resina em comparação com as fibras de carbono e Kevlar<sup>®</sup> são incompatíveis com a nível de qualidade desejado para o projeto de alta tecnologia, indicando uma possibilidade de futura troca de fabricante ou laminação completa das camadas de Kevlar<sup>®</sup>.

**Figura 20** – Região laminada, com 7 camadas de carbono e 1 de Kevlar<sup>®</sup>.



**Fonte:** Autor, 2022.

### 5.3 RESULTADOS DOS TESTES BALÍSTICOS

A utilização de proteções balísticas é amplamente difundida no mercado de equipamentos de segurança. Dentre os materiais disponíveis, destacam-se as fibras de Kevlar®, tais como os modelos K29, K49, K129 e K149, que são comumente utilizados em proteções veiculares e outros equipamentos balísticos de maneira pura, sem a adição de outros materiais. No entanto, embora o BFS (*Backface Signature*) da utilização do Kevlar® puro seja suficiente para a maioria das proteções, em casos em que a deformação da proteção possa acarretar em impactos na saúde do usuário, tais como na região do crânio, é necessário avaliar a efetividade do material.

Com base em dados previamente apresentados sobre BFS de acordo com as normas NIJ e pelo MCOTEA, foi possível avaliar os resultados dos testes balísticos realizados. Nos dez primeiros tiros realizados nas primeiras duas proteções (K), os primeiros nove tiros foram condizentes com a norma e objetivos deste trabalho, onde a munição utilizada e as condições presentes foram de acordo com o nível IIIA de proteção balística. No entanto, o último disparo foi feito por um rifle de calibre 5.56 com munição condizente a nível III, superior ao objetivo da proteção. Os resultados específicos de cada disparo podem ser vistos no quadro 14, que apresenta informações fundamentais para compreendermos os resultados dos testes balísticos e as especificidades de cada disparo.

**Quadro 14** – Resultados dos dez disparos nas proteções iniciais.

Disparos / Calibre	Velocidade	Posição	Resultados
9X19 mm / 9 mm Luger	351.4 m/s	Frontal	Projétil retido na proteção balística sem perfuração.
.45 ACP	245.6 m/s	Frontal Direita	Projétil retido na proteção balística sem perfuração.
9X19 mm / 9 mm Luger	350.5 m/s	Lateral Esquerda	Projétil retido na proteção balística sem perfuração.
.357 Magnum	245.6 m/s	Frontal Esquerda	Projétil retido na proteção balística sem perfuração.
9X19 mm / 9 mm Luger	349.6 m/s	Frontal Esquerda	Projétil retido na proteção balística sem perfuração.

.357 Magnum	245.6 m/s	Lateral Direita	Projétil retido na proteção balística sem perfuração.
9X19 mm / 9 mm Luger	352 m/s	Frontal Direita	Projétil retido na proteção balística sem perfuração.
.45 ACP	242.6 m/s	Traseira Esquerda	Projétil retido na proteção balística sem perfuração.
.40 S&W	276.4 m/s	Lateral Direita	Projétil retido na proteção balística sem perfuração.
5,56x45mm	815.9 m/s	Central	Projétil perfurou o suporte de visão noturna de aço, atravessou a proteção de Kevlar® frontal, atravessou o suporte que segurava o capacete e ficou retido no fundo do capacete.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

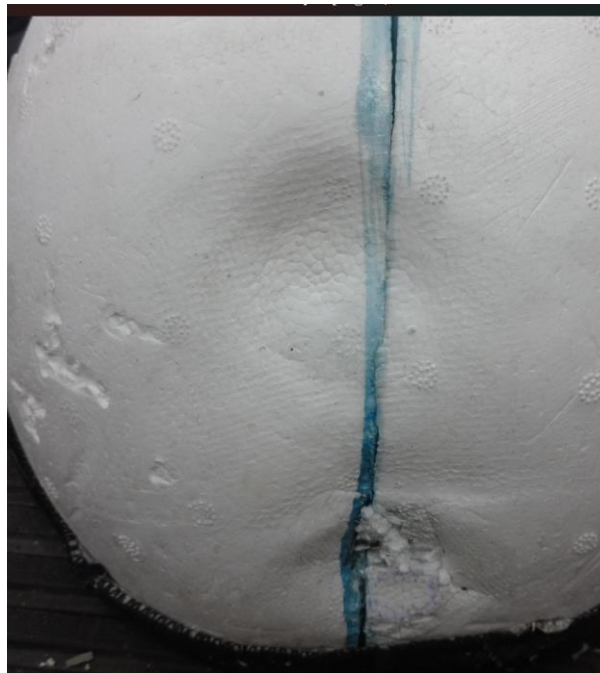
Embora os nove primeiros disparos tenham ficado retidos na proteção (K) como pode ser verificado na figura 21, e portanto, sido aprovados pela equipe técnica presente (aprovação técnica contida no anexo 9), o grau de deformação presente no interior do capacete mostrou que boa parte da energia do impacto foi dissipada nas proteções interiores, como o isopor de amortecimento (na figura 22 é possível ver os impactos causados pela energia dissipada no isopor interno) e o casco interno. No caso em questão, ambas as proteções internas são fabricadas para aguentar impactos de acidentes aéreos, mas ficaram visivelmente afetadas. Diante disso, foi decidido em conjunto pela empresa e autor para a criação de um novo compósito para melhor dissipação da energia externa ao casco do piloto.

**Figura 21** - Projétil retido na lateral do capacete após disparo nos testes.



**Fonte:** Autor, 2022.

**Figura 22** - Forro de isopor afetado pelo impacto dos disparos no teste.



**Fonte:** Autor, 2022.

A pesquisa balística apresentou dois novos modelos de proteção testados com armamento de nível IIIA, ambos compósitos por uma combinação de fibras de carbono e Kevlar®. O primeiro modelo consistiu em dez camadas extras de fibra de carbono 3k bidirecional diretamente acima da borracha do Kevlar®, enquanto o segundo modelo utilizou

uma amostra de sete camadas extras de fibra de carbono com uma camada de Kevlar®. Ambos os modelos foram capazes de reter todos os tiros, indicando sua eficácia como proteção balística.

Entre os dois modelos fabricados para o teste, foi avaliado também por meio de instrumentação que o modelo com sete camadas de carbono e uma de Kevlar® teve uma variação de deformação entre 3,5 mm até 4 mm na camada externa de carbono enquanto o modelo com dez camadas de carbono teve uma deformação máxima chegando aos 8 mm de profundidade, confirmando a observação feita durante os testes de tração. Além desta, foram também medidos em balança de precisão os pesos somente das proteções adicionais, observando que houve uma variação, sendo o compósito composto por Kevlar® e carbono 18,5% mais leve que a camada puramente de carbono.

Com base nos resultados obtidos, o compósito de Kevlar® e fibra de carbono apresentou um melhor comportamento, com uma BFS até 100% menor e peso inferior, proporcionando uma grande vantagem para o objetivo geral. Embora tenham sido observadas rachaduras na tinta do casco, semelhantes aos disparos nos capacetes do teste prévio sem as proteções extras, as deformações na proteção interna de isopor e no casco foram praticamente imperceptíveis, validando a utilização da nova proteção. Em resumo, os resultados apontam que a combinação de Kevlar® e fibra de carbono é uma opção eficaz e mais leve para a proteção balística.

Com a amostra escolhida, foi feito um novo modelo de proteção dessa vez protegendo toda a área do casco do capacete, este modelo foi criado para que fosse possível entender as possíveis novas dificuldades que iriam surgir, como novos posicionamentos de equipamento de comunicação, furação de parafusos, novo tamanho de borracha, entre outros problemas que iriam surgir em sua fabricação. Este modelo, como visto na figura 23, não foi pintado, somente foram laminadas e modeladas as camadas em sequência anexadas ao casco do capacete comum onde pôr fim foram adicionados os equipamentos básicos de comunicação para criar o novo processo de fabricação em série do novo modelo.

**Figura 23** – Novo modelo com a proteção do protótipo de compósito de carbono e Kevlar®.



**Fonte:** Autor, 2022.

Após o desenvolvimento dos modelos de proteção balística descritos anteriormente, foram fabricados dois capacetes completos, contendo o protótipo de proteção já pintado e equipados com as borrachas e viseiras adequadas para os testes finais com usuários em campo, ambos os modelos podem ser vistos na figura 14 e 15 anteriores.

#### 5.4 RESULTADOS E AVALIAÇÕES DOS TESTES DE CAMPO

Após quatro semanas de uso de ambos os modelos produzidos em fase final, foi encaminhado por e-mail um questionário para avaliação dos pilotos e demais usuários que utilizaram os protótipos durante as quatro semanas de teste de campo. Baseado nas respostas obtidas pelo Grupamento Aeromóvel (amostra de 44% da população total de pilotos) foi possível obter alguns gráficos os quais permitiram gerar importantes dados para melhorias futuras do equipamento analisado. Para fins de melhorar futuramente o protótipo, as informações coletadas de maior importância eram: peso, tamanho, usabilidade e ergonomia.

Os seguintes parágrafos apresentam relatos sobre os resultados obtidos em relação à opinião dos pilotos que utilizaram o protótipo de capacete de voo como visto na figura 24 durante o período especificado, considerando a adição da proteção balística em relação ao capacete convencional utilizado no cotidiano.

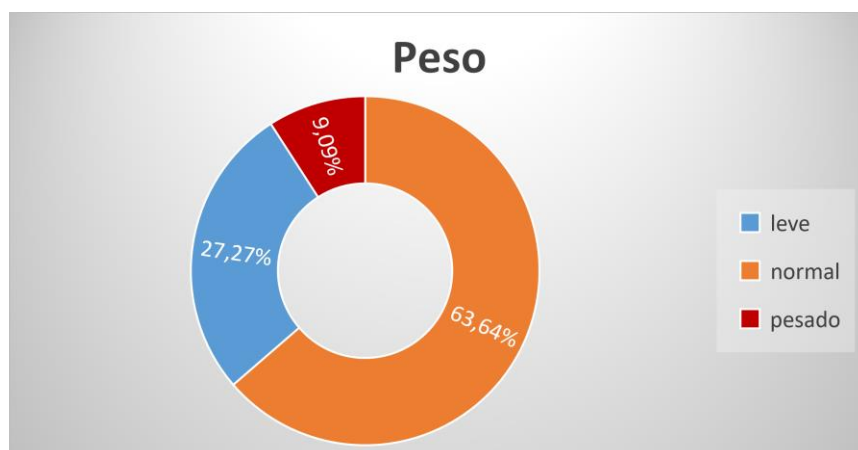
**Figura 24** – Piloto e copiloto em voando com os dois modelos produzidos.



**Fonte:** Autor, 2022.

Para apresentar esses resultados, foi confeccionado um gráfico em explosão solar, representado no gráfico 2, onde foram utilizadas três alternativas: leve, normal e pesado, para avaliar a percepção dos pilotos em relação ao peso do protótipo de capacete de voo. A alternativa "leve" representa os pilotos que consideraram o protótipo leve, apesar do peso adicional da proteção balística; a alternativa "normal" representa os pilotos que assimilaram o peso adicional do protótipo como justo em relação às novas propriedades; e a alternativa "pesado" representa os pilotos que acreditaram que o peso adicional fosse elevado demais, apesar dos benefícios adicionais da proteção. Dos onze pilotos que responderam à pesquisa, dez deles consideraram positivamente a adição do peso extra providenciado pela proteção balística, justificando sua opinião nas alternativas "leve" e "normal".

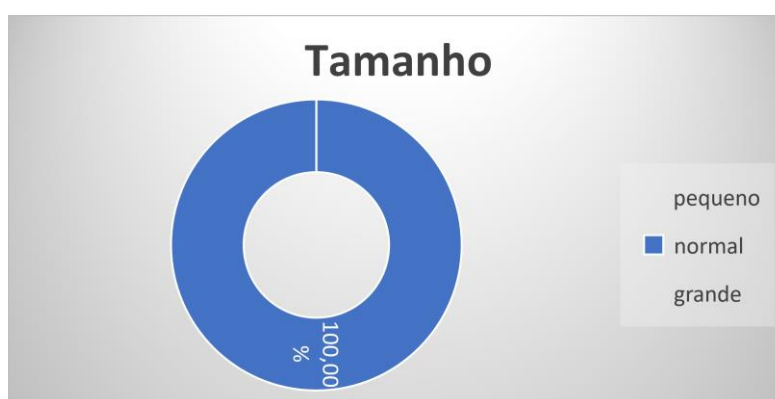
**Gráfico 2** – Gráfico de opinião a respeito do peso do protótipo.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022

No que se refere ao tamanho do protótipo, foram definidas três alternativas no gráfico do gráfico 3: "pequeno", no qual o protótipo teria dimensões menores em comparação aos capacetes convencionais; "normal", em que o novo modelo teria dimensões aparentemente similares ao modelo atualmente utilizado; e "grande", em que o protótipo teria dimensões significativamente maiores que o modelo anteriormente empregado. Observou-se que todas as respostas concordaram entre si, indicando que o protótipo apresentava um tamanho semelhante ao dos capacetes convencionais utilizados pelos pilotos.

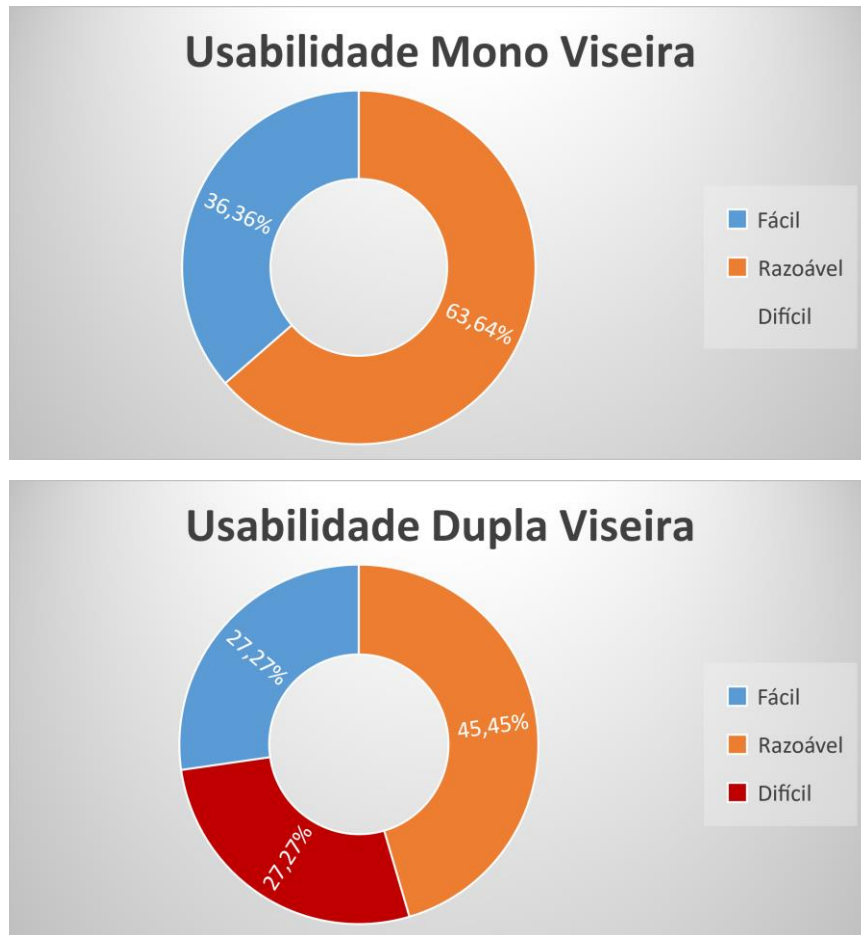
**Gráfico 3** – Gráfico de opinião a respeito do tamanho do protótipo.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022

No gráfico 4, apresentada por meio de um gráfico em explosão solar, foi realizado um estudo para avaliar a usabilidade do protótipo dupla viseira em comparação com o modelo convencional. Ainda no gráfico 4, foi realizado um estudo semelhante, mas agora em relação ao protótipo mono viseira. Esse método de avaliação separado se deve à grande diferença de usabilidade do modelo dupla viseira em relação ao modelo padrão. Isso porque o trilho de movimentação da viseira fica em posição totalmente nova, semelhante aos capacetes utilizados por outras forças internacionais, mas não pelos militares brasileiros. Para isso, foram estabelecidas as seguintes alternativas: "fácil", em que o protótipo teria uma usabilidade melhor do que o modelo atualmente em uso; "razoável", em que o modelo teria uma usabilidade semelhante, apesar das diferenças no posicionamento de botões e trilhos; e "difícil", em que o capacete de voo balístico apresentava dificuldades claras e maior tempo de adaptação em relação ao modelo comum.

**Gráfico 4** – Gráficos de opinião a respeito da usabilidade dos protótipos.



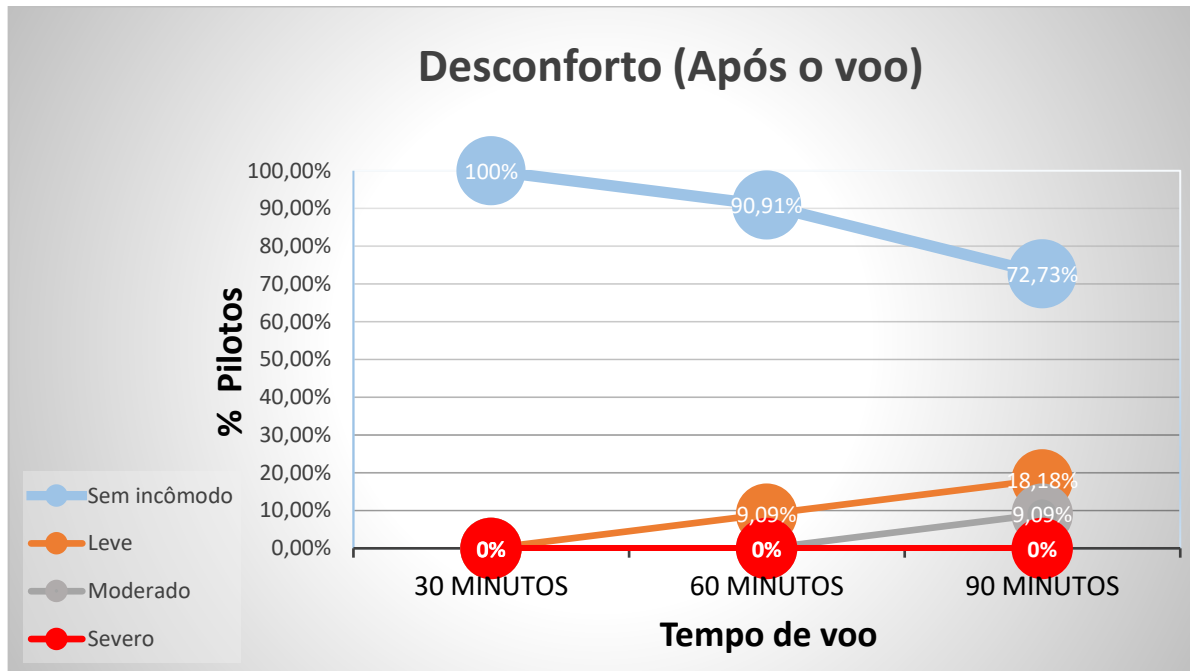
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022

A análise dos dados coletados nos dois gráficos permitiu constatar que a adaptação dos pilotos ao modelo dupla viseira foi mais desafiadora do que ao modelo mono viseira. Isso porque, no modelo dupla viseira, 27% dos pilotos relataram dificuldade, enquanto no modelo mono viseira, nenhum piloto informou ter tido dificuldades em suas respostas. O questionário aplicado nessa pesquisa também abordou opiniões extras sobre o uso de ambos os modelos, e o fator do posicionamento dos trilhos foi mencionado diversas vezes. Embora não sejam opiniões totalmente negativas, os pilotos relataram dificuldades em se acostumar com o novo posicionamento após anos utilizando o mesmo sistema. É possível que a memória muscular tenha um grande impacto na adaptação ao sistema de dupla viseira e que novos pilotos não enfrentariam problemas semelhantes.

O gráfico de linhas do gráfico 5 apresentou uma análise ergonômica do desconforto dos tripulantes após o uso do protótipo em diferentes tempos de voo, classificados em intervalos de 30 minutos, que variam desde um voo curto de 30 minutos até um voo mais longo de 90 minutos, considerando a autonomia do helicóptero Bell UH-1H de aproximadamente 180 minutos.

minutos em condições normais de voo. Os resultados indicaram que, à medida que aumentava o tempo de voo, aumentavam também as chances de surgimento de algum tipo de incômodo no usuário do protótipo. Embora a primeira hora de voo não tenha apresentado desconforto moderado nos tripulantes e somente 9% das respostas relataram um desconforto leve, o aparecimento de dados sobre desconforto moderado em períodos mais longos de tempo, mesmo que em uma porcentagem pequena, indica a necessidade de acompanhamento médico da equipe após sequências de voos mais longos ou o uso do equipamento balístico em geral apenas para voos de curta duração sobre áreas de risco.

**Gráfico 5** – Gráfico de opinião a respeito do desconforto do usuário após diferentes tempos de voo.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022

Com base nos dados coletados durante as pesquisas de campo, foi possível compreender as dificuldades de adaptação dos modelos de capacete criados. Foi observado que o modelo com dupla viseira apresentou maior dificuldade de usabilidade em comparação ao modelo convencional e mono viseira, apesar de ser mais completo para o usuário. No entanto, em relação ao peso e tamanho, as respostas foram bastante positivas, visto que o novo modelo de capacete foi considerado normal em comparação ao modelo atual. Isso justifica as alterações realizadas com base nas novas propriedades do protótipo.

Além disso, o estudo ergonômico comprovou a eficácia do protótipo em voos curtos, que atendem às necessidades iniciais de voos de curta duração sobre áreas de risco. Após

avaliação completa de todas as informações coletadas, constatou-se a viabilidade do protótipo, sendo um sucesso prático em campo. Também foram identificadas possibilidades de alterações na usabilidade do produto para facilitar a adaptação de usuários já acostumados com modelos antigos não balísticos.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como proposta, o desenvolvimento e análise de um protótipo de material compósito leve utilizando a base de para-aramida e fibra de carbono para proteção balística em capacetes aeronáuticos, esperando este servir como uma proteção viável visto esta necessária aos pilotos em campo hoje em dia.

Com a visão de cumprir todos os objetivos específicos propostos no início deste trabalho, a seleção prévia de materiais para a proteção desejada permitiu uma economia na aquisição de materiais e testes, assim foi utilizado diretamente do Kevlar® 29 e fibra de carbono 3k para realização dos testes dos compósitos visto suas propriedades mais próximas com as metas propostas.

Para realizar a junção dos materiais foi utilizada a técnica de laminação a frio devido a maior experiência da empresa com esta técnica além de ser a mais comumente utilizada nestes materiais, dessa maneira as amostras obtidas ficaram de acordo com o planejamento realizado visto as teorias base para as camadas.

A realização do ensaio de tração confirmou a proximidade das tensões nos conjuntos amostrais em relação com os dados teóricos do fabricante. Com base nas diferenças no módulo de Young dos compósitos e na busca de um material balístico de maior elasticidade, foi verificado a possibilidade do compósito do conjunto KC7 ser mais vantajoso nos testes balísticos.

Com base nas análises por MEV, foi possível obter uma percepção detalhada dos problemas que afetavam diretamente as características das amostras KC7 e KC10. Esses resultados revelaram que os problemas identificados em ambos os conjuntos amostrais eram comuns nas camadas de Kevlar® adquiridas diretamente do fabricante, e não nas laminadas durante o desenvolvimento do projeto. Essa análise proporcionou um entendimento mais claro da qualidade dos materiais utilizados e destacou a importância de avaliar cuidadosamente as suas fontes.

Os testes mais importantes para adequação às principais normas do produto final foram o balístico e o de campo. Desde os primeiros testes, os resultados se mostraram válidos às normas e foram aprovados pelos especialistas desde as versões primordiais do protótipo nas análises após os disparos, onde nenhum dos projéteis penetraram a proteção, até os testes de campo, os quais não resultaram em nenhum problema.

Ao longo das análises dos testes, foi possível escolher a melhor amostra com base em seu peso total e seu BFS após os disparos. A amostra de sete camadas de carbono e uma de

Kevlar<sup>®</sup> se mostrou superior, possuindo peso e profundidade de deformação dos disparos inferiores à amostra com dez camadas de carbono.

Com a escolha da melhor amostra, foi possível colocar em produção o compósito para o produto final ser levado aos testes de campo com diferentes usuários. Estes, por fim, não informaram quaisquer problemas sérios de desconforto ou desempenho com o uso do equipamento e avaliaram positivamente o uso do mesmo, tornando o desenvolvimento deste trabalho um sucesso prático e possibilitando a viabilização de patente do protótipo em questão.

## **7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS**

Embora todos os resultados se mostraram viáveis para a viabilização do protótipo, o alto custo dos materiais limitou a quantidade de testes e amostras ao longo do trabalho, dessa forma deixo aqui como sugestão para trabalhos futuros, a utilização de diferentes tipos de matrizes, visto que estas podem obter melhores resultados nos procedimentos utilizando dos mesmos materiais de reforço.

Ao longo do trabalho foi possível verificar falhas no processo de laminação nas camadas de Kevlar<sup>®</sup> pré-fabricadas e da junção destas com as camadas de carbono, dessa forma um estudo futuro sobre possíveis processos de fabricação utilizando os mesmos materiais ou similares pode ser fundamental na busca por melhorar a proteção balística dos agentes de proteção em nosso país.

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, I. L. **Desenvolvimento de compósitos a partir de fibras de juta e matriz de poliuretana para uso em aplicações estruturais**. 2014. Tese (Doutorado) Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes. Disponível em: [https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-de-Doutorado\\_Isabela-Leao.pdf](https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-de-Doutorado_Isabela-Leao.pdf). Acesso em: fev. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15000: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASTM-D5035-11. **Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019. Disponível em: <https://www.astm.org/d5035-11r19.html>. Acesso em: jun. 2023
- BATISTA, Juliana Teófilo Monteiro; SILVA, Vitório Arruda; REZENDE, Emanuela Carvalho Lobo; MONTEIRO, Eliana Cristina B. Reforço com compósito de fibras de carbono: alternativa moderna no cotidiano das obras. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS, 2017, Recife. **Anais eletrônicos** [...]. Disponível em: <file:///C:/Users/Ana%20J%C3%BAlia/Downloads/593-Texto%20do%20artigo-1524-1-10-20170815.pdf>. Acesso em: 8 out. 2022.
- BHATT, P.; GOE, A. Carbon fibres: production, properties and potential use. **Mater. Sci. Res. India**, v. 14, n. 1, p. 52-57, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13005/msri/140109>. 2022
- BRASIL. Controladoria-Geral da União. Portaria Normativa nº 14, de 23 de agosto de 2018. Regulamenta a atividade correcional no âmbito das entidades e órgãos do Poder Executivo Federal, no que se refere à instauração e tramitação do Processo Administrativo de Responsabilização. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 ago. 2018. Disponível em: [http://www.dac.unb.br/images/NORMATIVOSeCIRCULARES/PDD\\_Inst\\_Nor\\_CGU\\_14-2018\\_-\\_Regulamenta\\_a\\_Atividade\\_Correcional\\_do\\_decreto.pdf](http://www.dac.unb.br/images/NORMATIVOSeCIRCULARES/PDD_Inst_Nor_CGU_14-2018_-_Regulamenta_a_Atividade_Correcional_do_decreto.pdf). 2018.
- CABRAL, R. F.; CICCHELLI, P. P. M.; ALVARENGA, C. F. A.; ARAÚJO, F. A.; ROSA, V. V. S.; LEITE, B. F Estudo da resistência mecânica e análise térmica da resina epóxi. **Revista Eletrônica TECCEN**, v. 11, n. 2, p. 32-39, 2018.
- CARTER, R. M. A new generation of US Army flight helmets. **Aviation, space, and environmental medicine**, v. 63, n. 7, p. 629-633, 1992.
- CROUCH, I. G.; EU, Ben. Ballistic testing methodologies. In: CROUCH, I. G. (ed.). **The science of armour materials**. Amsterdam: Elsevier, 2017. p. 639-673. (Woodhead Publishing in Materials). Doi:10.1016/b978-0-08-100704-4.00011-6. 2017.
- DUPONT. **Kevlar® aramid fiber technical guide**. Richmond, VA: Dupont, 2018. Disponível em: [https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar\\_Technical\\_Guide\\_0319.pdf](https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar_Technical_Guide_0319.pdf). Acesso em: jul. 2023.

DVBIC. **DOD Numbers for Traumatic Brain Injury Worldwide – Totals. 2000-2022.** Defense Medical Surveillance System (DMSS), Theater Medical Data Store (TMDS) provided by the Armed Forces Health Surveillance Division (AFHSD); 2022. Disponível em: <https://health.mil/Reference-Center/Reports/2022/08/24/2000-Q1-2022-DOD-Worldwide-Numbers-for-TBI>. Acesso em: jun. 2023.

FERAHTIA, A. **Enhanced Combat Helmet Test Protocol.** [S.l.]: International Test and Evaluation Association, 2015. Disponível em: [http://itea.org/images/pdf/conferences/2015\\_Symposium/Presentations/Ferahtia%20Track%2003.pdf](http://itea.org/images/pdf/conferences/2015_Symposium/Presentations/Ferahtia%20Track%2003.pdf). Acesso em: jul. 2023.

FOGO CRUZADO. Rio supera a marca de 1.500 agentes de segurança baleados. **Fogo Cruzado**, Rio de Janeiro, 15 jun. 2022. Disponível em: <https://fogocruzado.org.br/1500-agentes-baleados>. Acesso em: jun. 2023.

GONÇALVES, E. P. **Obtenção do Compósito SiCF/Ti por infiltração da pré-forma de caboto de silício com titânio via suspensão de TiH<sub>2</sub>.** 2007. Dissertação (Mestrado) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2007.

GOWER, H. L.; CRONIN, D. S.; PLUMTREE, A. Ballistic impact response of laminated composite panels. **International Journal of Impact Engineering**, v. 35, n. 9, p. 1000-1008, 2008.

GRAND VIEW RESEARCH. **Safety Helmet Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Industrial, Fire Service, Construction, Others), By Material (Thermoplastic, FRP, Metal), By Region, And Segment Forecasts, 2021 - 2028.** Grand View Research. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/safety-helmet-market>. 2021.

GUIMARÃES, B. S. S. **Estudo do Tratamento Superficial de Fibras de Carbono ara Aplicação no Setor Aeronáutico.** 2018. 59 p. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia de Materiais – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2018. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12208/1/LD\\_COEMA\\_2018\\_1\\_01.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12208/1/LD_COEMA_2018_1_01.pdf). Acesso em: jun. 2023.

HERMAN S. M. **Técnicas de Caracterização de Materiais.** Curitiba: Editoração Eletrônica: MCT Produções Gráficas, 2000.

HÄMÄLÄINEN, O. Flight helmet weight, + Gz forces, and neck muscle strain. **Aviation, space, and environmental medicine**, v. 64, n. 1, p. 55-57, 1993.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2076:2021 Textiles - Man-made fibres - Generic names. 7th ed. Geneva: ISO, 2021.

JUSTO, J.M.C.F. **Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto, 2005.

KOTLER, P.; Keller, K. L. **Administração de marketing.** 12 ed. São Paulo: Pearson, 2006.

LATTEIER, Peter. Carbon Fiber Weaves: What They Are and Why to Use Them. **Elevated Materials**, 2019. Disponível em: <https://www.elevatedmaterials.com/carbon-fiber-weaves-what-they-are-and-why-to-use-them/>. Acesso em: jun. 2023.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia**. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2006.

MANSUR, A. **Modeling of Mechanical Properties of Ceramic-Metal Composites for Armor Applications**. 2011. Dissertação (Mestrado em Mechanical and Aerospace Engineering) Institute for Mechanical and Aerospace Engineering, Universidade de Ottawa, Ottawa, 2011.

MAZARIM, G., C.; SALERNO, G. Resistência ao impacto de compósitos de fibra de carbono e resina epóxi em comparação ao aço SAE 1010. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 4, n. 1, p. 0127-0142, 2018.

MCKEEN, Laurence W. **The effect of long term thermal exposure on plastics and elastomers**. Oxford, UK: Elsevier, 2021.

MHS. DOD TBI Worldwide Numbers. **Health.Mil**, 2022. Disponível em: <https://health.mil/Military-Health-Topics/Centers-of-Excellence/Traumatic-Brain-Injury-Center-of-Excellence/DOD-TBI-Worldwide-Numbers>. Acesso em: jun. 2023.

NAIK, S. Recent advances in aramid fiber-reinforced polymer composites. **Materials Today Communications**, v. 25, p. 101571, 2020. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101571.

NAVEEN, J., JAWAID, M., ZAINUDIN, E. S., SULTAN, M. T. H., YAHAYA, R., ABDUL MAJID, M. S. Thermal degradation and viscoelastic properties of Kevlar/Cocos nucifera sheath reinforced epoxy hybrid composites. **Composite Structures**, v. 219, p. 194-202, 2019.

NAYAK, Nityananda; BANERJEE, Arkadeb; SIVARAMAN, P. Ballistic impact response of ceramic-faced aramid laminated composites against 7.62 mm armour piercing projectiles. **Defence Science Journal**, v. 63, n. 4, p. 369-375, 2013.

NUTT, Steven R. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

PAULA, Gilles B. Matriz SWOT ou Matriz FOFA: utilizando a Análise SWOT para conhecer as cartas do jogo e aumfogo cruzadoentar as chances de vitória de sua empresa! **Treasy**, 17 ago. 2015. Disponível em: <https://www.treasy.com.br/blog/matriz-swtot-analise-swtot-matriz-fofa/>. Acesso em: jun. 2023.

PERECHESOVA, A. D.; SOLOVEVA, G.A. GOST 6611.2-73 and ASTM D7269/D7269M-11 for Tensile Testing of Aramid Yarns: Features of Testing. **Industrial laboratory. Diagnostics of materials**, v. 82, n. 10, p. 66-70, 2016.

PERUCHI, S. P. G. **Homologação do Capacete EPH (Esra Protective Helmet)**. São José dos Campos: [S.n.], 2019.

PORTILHO, J. R. S.; DIAS, M. R. P.; GOMES, C. B.; MORALES, L. L. D. Polímeros/Fibra de Carbono: Propriedades Mecânicas, Químicas, Processo de Fabricação e as Dificuldades de Aplicação em Larga Escala. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA

MECÂNICA, 2016, Fortaleza. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABCM, 2016. Disponível em: [https://www.academia.edu/34578599/Polímeros\\_Fibra\\_de\\_Carbono\\_Propriedades\\_mecânicas\\_químicas\\_processo\\_de\\_fabricação\\_e\\_as\\_dificuldades\\_de\\_aplicação\\_em\\_larga\\_escal](https://www.academia.edu/34578599/Polímeros_Fibra_de_Carbono_Propriedades_mecânicas_químicas_processo_de_fabricação_e_as_dificuldades_de_aplicação_em_larga_escal).

SAITO, N., AOKI, K., USUI, Y., SHIMIZU, M., HARA, K., NARITA, N., OGIHARA, N.; NAKAMURA, K.; ISHIGAKI, N.; KATO, H.; HANIU, H.; TARUTA, S.; KIM, Y. A.; ENDO, M. Application of carbon fibers to biomaterials: A new era of nano-level control of carbon fibers after 30-years of development. **Chemical Society Reviews**, v. 40, n. 7, p. 3824-3834, 2011.

SALERNO, G. Viabilidade econômica da implantação de microcentral hidrelétrica. In: Anais do XIX Congresso Brasileiro de Energia. Florianópolis. Anais eletrônicos. Disponível em: <http://ocs.ifsp.edu.br/index.php/conict/xiconict/paper/viewFile/6866/2176>. 2018.

SALGADO, D. **Teste de Produto:** Como fazer pesquisa de mercado para lançar um produto novo? *Opinion.Box*, 5 set. 2022. Disponível em: <https://blog.opinionbox.com/teste-de-produto/>. Acesso em: jun. 2023.

SAVIGNANO, V. **Da ideia à inovação: Kevlar®, a força de uma descoberta científica. Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais**. 2020. Disponível em: <https://www.sbpmat.org.br/pt/da-ideia-a-inovacao-kevlar-a-forca-de-uma-descoberta-cientifica/>. Acesso em: jun. 2023.

SEGRELLES, V. **História Universal das Armas em Mil Imagens**. [S.l.]: Publicit Editora. 1979.

SILVA, A. A.; SILVA, N. SA.; BARBOSA, V. A.; HENRIQUE, M. R.; BAPTISTA, J. A. A utilização da matriz SWOT como ferramenta estratégica – um estudo de caso em uma escola de idioma de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 8., 2011. **Anais [...]**. Resende: SEGET, p. 1-11. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos11/26714255.pdf>. Acesso em: jun. 2023.

SILVA, Amanda Albertin Xavier da; KOEHLER, Bruna Oliveira; AMICO, Sandro Campos. Propriedades mecânicas de compósitos aramida/epóxi e aramida/políéster produzidos por infusão a vácuo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS; 15., 2019, Bento Gonçalves, RS). **Anais [...]**. Bento Gonçalves: ABPol, 2019. Disponível em:

SINGH, Thingujam Jackson; SAMANTA, Sutanu. Characterization of Kevlar fiber and its composites: a review. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 4-5, p. 1381-1387, 2015.

STEPHEN, C.; SCHOEPNER, G. A.; SANBORN, G. Fiber-reinforced polymer composites for civil infrastructure: A review. **Materials Today Communications**, v.33, p.101263, 2022. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.101263

STURGILL, E. Ballistic Testing: V50 and V0 Standards. **ATEK Defense Systems**. 2022. Disponível em: <https://atekdefense.com/ballistic-testing-v50-and-v0-standards/>. Acesso em: 13 abr. 2023

VASCONCELOS, Nalini (fotografo). Primeiro Laboratório de Ensaio Balísticos do Norte-Nordeste será inaugurado em Salvador. **DEFESANET**, 4 ago. 2022. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/tecdi/noticia/45104/Primeiro-Laboratorio-de-Ensaio-Balisticos-do-Norte-Nordeste-sera-inaugurado-em-Salvador/> Acesso em: jun. 2023.

ZHANG, D.; SUN, Y.; CHEN, L.; ZHANG, S.; PAN, N. Influence of fabric structure and thickness on the ballistic impact behavior of Ultrahigh molecular weight polyethylene composite laminate. **Materials & Design**, v. 54, p. 315-322, 2014.

## ANEXOS - EQUIPAMENTOS

**Anexo 1:** Arma Imbel GC MD2.



**Fonte:** Imbel.gov.br, 2022.

**Anexo 2:** Arma Imbel 1911.



**Fonte:** Imbel.gov.br, 2022.

**Anexo 3:** Arma Taurus Tracker.



**Fonte:** beartac.com.br, 2022.

**Anexo 4:** Glock G22.



**Fonte:** artgun.com.br, 2022.

**Anexo 4:** Fuzil Taurus T4.



**Fonte:** taurusarmas.com.br, 2022.

**Anexo 5:** Capacete Simples EPH.



**Fonte:** Autor, 2022.

**Anexo 6:** Cronógrafo balístico.



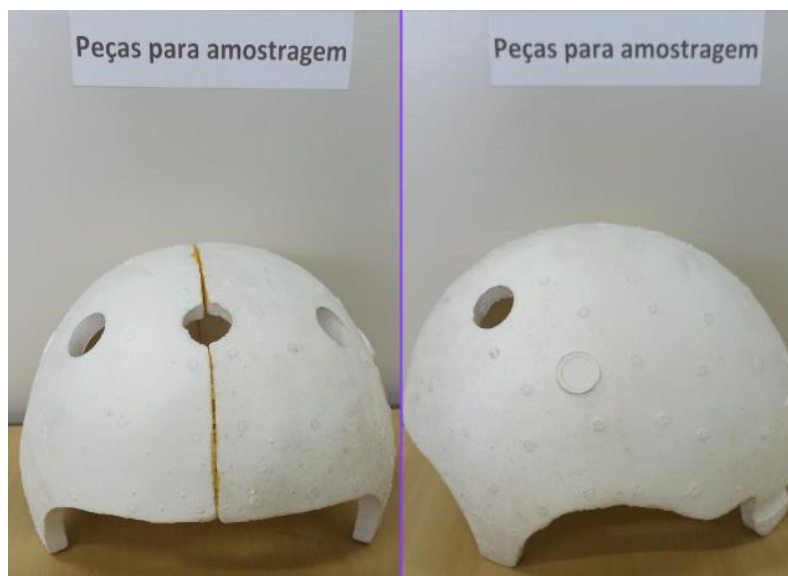
**Fonte:** Autor, 2022.

**Anexo 7:** Imagens do dia do primeiro teste balístico com o GAM-RJ.



**Fonte:** Autor, 2022.

**Anexo 8:** Poliestireno expandido de proteção interna do casco do capacete.



**Fonte:** Autor, 2022.

**Anexo 9:** Aprovação técnica dos primeiros testes de tiro pelo GAM.



**SECRETARIA DE ESTADO DE POLÍCIA MILITAR  
POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO DIRETORIA  
DE LICITAÇÕES E PROJETOS**

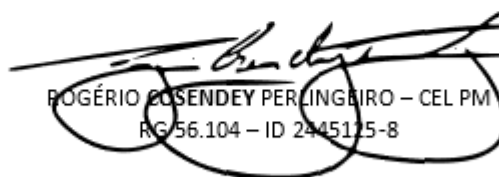
**ANÁLISE DA DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA**

No que tange ao Pregão Eletrônico nº 01/2020 R1, Processo E-35/192/29/2019, foi convocado o sr. CEL PM RG 56.104 Rogério Cosendey Perlingeiro, do Grupamento Aeromóvel (GAM) da SEPM, para análise de amostra e documentação de habilitação técnica no dia 08/06/2020, tendo como fundamento o art. 30 da Lei Federal nº 8666/1993.

EMPRESA: DELTA INDUSTRIA COMÉRCIO IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA (CNPJ: 10.843.754/0001-67) – Item nº 01.

Qualificação técnica	Atende	Não Atende
A Empresa contratada deverá comprovar capacitação técnica, por meio de Atestados de Capacidade Técnica, fornecidos por Pessoas Jurídicas de Direito Público ou Privado, que demonstrem haver prestado, a contratada, serviços compatíveis em características, quantidades e prazos congêneres ao objeto desta licitação.	X	
<b>Obs:</b> A amostra apresentada <b>atende</b> às especificações estabelecidas no Termo de Referência.		

Rio de Janeiro, 16 de julho de 2020.

  
 ROGÉRIO COSENDEY PERLINGEIRO – CEL PM  
 RG 56.104 – ID 2445125-8

