

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE FIBRA DE CURAUÁ PARA APLICAÇÃO EM COLETES BALÍSTICOS

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF CURAUÁ FIBER POLYMER COMPOSITES FOR APPLICATION IN BALLISTIC VESTS

José Carlos Ferreira Fontes¹

Universidade Augusto Motta (UNISUAM) – Brasil

Raí Felipe Pereira Junio²

Instituto Militar de Engenharia (IME) - Brasil

Lucio Fabio Cassiano Nascimento³

Universidade Augusto Motta (UNISUAM) – Brasil

RESUMO

A violência associada a movimentos políticos, religiosos e financeiros, alimentada por grupos extremistas, é uma realidade global. No Brasil, a violência urbana está frequentemente ligada aos esforços para reduzir a criminalidade, exigindo sistemas de blindagem mais eficazes para proteção pessoal e veicular. Este estudo foca na investigação das propriedades mecânicas e balísticas de compósitos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas, visando aplicações em blindagem corporal. Fibras de curauá foram usadas para produzir compósitos poliméricos com diferentes frações volumétricas: 0%, 0,50%, 1,00% e 1,25%. A caracterização mecânica dos compósitos visou avaliar suas propriedades e eficiência balística, medindo a velocidade residual e a energia absorvida após impacto por munição calibre 22. Os resultados proporcionam uma análise crítica da proteção oferecida por esses materiais, contribuindo para o desenvolvimento de blindagens inovadoras e eficazes contra ameaças balísticas.

Palavras-chave: Balística, Compósitos, Proteção, Fibras vegetais.

ABSTRACT

¹ Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Augusto Motta (UNISUAM). c.ferreirafontes@hotmail.com

² Doutorando do curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais pelo Instituto Militar de Engenharia (IME). raivsrfelipe@ime.br

³ Doutor em Ciência dos Materiais pelo Instituto Militar de Engenharia (IME). Docente e Pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Local pela Universidade Augusto Motta (UNISUAM). lucionascimento@souunisuam.com.br

Violence associated with political, religious, and financial movements, fueled by extremist armed groups, is a global reality. In Brazil, urban violence is often linked to efforts to reduce crime, necessitating more effective shielding systems for personal and vehicular protection. This study focuses on investigating the mechanical and ballistic properties of composites reinforced with natural lignocellulosic fibers for body armor applications. Curauá fibers were used to produce polymeric composites with different volumetric fractions: 0%, 0.50%, 1.00%, and 1.25%. The mechanical characterization of the composites aimed to evaluate their properties and ballistic efficiency by measuring residual velocity and energy absorbed after impact by .22 caliber ammunition. The results provide a critical analysis of the protection offered by these materials, contributing to the development of innovative and effective armor against ballistic threats.

Keywords: Ballistic, Composites, Protection, Natural fibers.

1. INTRODUÇÃO

A constante evolução da tecnologia e a crescente necessidade de aprimorar sistemas de proteção pessoal contra ameaças balísticas têm impulsionado pesquisas e desenvolvimentos inovadores em materiais e métodos de fabricação. Recentemente, a manufatura aditiva, ou impressão 3D, emergiu como uma técnica revolucionária, permitindo a produção de peças complexas e altamente customizadas. Este trabalho científico investiga a aplicação da manufatura aditiva na produção de compósitos poliméricos, submetendo-os a rigorosos testes para implementação em sistemas de blindagem de coletes balísticos.

A proteção pessoal contra ameaças balísticas é crucial tanto em contextos militares quanto civis. A demanda por materiais para coletes balísticos que sejam mais leves, eficientes e flexíveis é contínua e desafiadora.

A manufatura aditiva se apresenta como uma solução promissora para esses desafios, possibilitando a criação de estruturas complexas e customizadas, essenciais para a otimização da proteção pessoal.

Este estudo se concentra na sinergia entre a manufatura aditiva e os compósitos poliméricos avançados, com o objetivo de contribuir para o avanço na ciência e na indústria de materiais de proteção pessoal. A intersecção dessas disciplinas representa um ponto de convergência importante na busca por soluções de blindagem mais eficazes, leves e adaptáveis, assegurando a segurança em situações de risco.

Adotando uma abordagem científica rigorosa, o estudo investiga os aspectos técnicos, mecânicos e materiais envolvidos na aplicação da manufatura aditiva para a produção de compósitos poliméricos destinados à blindagem balística. Assim, visa contribuir para o desenvolvimento de soluções inovadoras e confiáveis, essenciais nessa área crítica de pesquisa e desenvolvimento.

2. OBJETIVOS

O foco deste estudo é a avaliação minuciosa da eficácia balística de um compósito produzido por manufatura aditiva, com a incorporação de fibras de curauá como reforço. Além disso, busca-se realizar uma análise detalhada e comparativa das propriedades mecânicas desse compósito, explorando especialmente as variações resultantes do uso de diferentes volumes de fibras de curauá como elemento de reforço. O objetivo primordial é aprofundar o entendimento das propriedades e do potencial de aplicação desse material em contextos relacionados à proteção balística.

Este estudo visa conduzir uma série de ensaios, incluindo análise de densidade, ensaios de tração, microscopia eletrônica de varredura e ensaio de velocidade residual. Esses ensaios foram planejados para obter uma compreensão mais completa e profunda das características e propriedades do material em questão.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Fibra de curauá

A obtenção da fibra de curauá (*Ananas erectifolius*) compreende um processo desde a colheita da planta até o tratamento necessário para sua transformação em uma manta utilizável. Esse processo segue geralmente as seguintes etapas:

- **Colheita:** O curauá é cultivado em regiões tropicais, sendo nativo da região amazônica. Após seu crescimento, as folhas maduras são colhidas no momento adequado, quando as fibras estão em ótimas condições de desenvolvimento.
- **Extração das fibras:** As folhas são lavadas e os tecidos moles são removidos, expondo as fibras resistentes presentes na superfície da folha. A extração pode ser feita manualmente ou com o auxílio de ferramentas adequadas.

- **Limpeza:** As fibras passam por um processo de limpeza para remover impurezas como resíduos vegetais e poeira, por meio de lavagem e enxágue cuidadosos.
- **Secagem:** As fibras são secas para eliminar a umidade, podendo ocorrer naturalmente ao ar livre ou em estufas controladas, assegurando sua completa secagem.
- **Tratamento:** Após a secagem, as fibras são tratadas para melhorar suas propriedades físicas, incluindo processos como branqueamento para remover impurezas e melhorar a aparência visual, e condicionamento para aumentar sua flexibilidade e resistência.
- **Formação da manta:** As fibras tratadas são unidas para formar uma manta, utilizando técnicas de tecelagem.

O resultado é uma manta de fibras de curauá, utilizada como reforço em compósitos poliméricos para a fabricação de diversos produtos.

No presente estudo, as fibras de curauá foram adquiridas em formato de manta, apresentando-se aglomeradas umas às outras. Por isso, foi necessário extrair e cortar as fibras para sua utilização no processo de manufatura aditiva. A Figura 1 ilustra a manta de curauá recebida.

Figura 1. Manta de curauá.



Fonte: os autores, 2023.

3.2. Resina fotopolimerizável

A resina 3D da Fila é um material desenvolvido para uso na impressão 3D através da tecnologia de estereolitografia (SLA), apresentando características específicas adaptadas a esse processo. Trata-se de uma resina fotossensível líquida que se solidifica sob a exposição à luz ultravioleta durante o processo de impressão.

Esta resina foi formulada para proporcionar elevada precisão e detalhamento nas peças impressas, resultando em objetos com superfícies suaves e acabamento de alta qualidade. Além disso, destaca-se pela sua boa resistência mecânica, garantindo a produção de peças duráveis e funcionais (Figura 2).

Outro aspecto relevante da resina 3D da Fila é sua disponibilidade em diversas cores, possibilitando a impressão de peças com um visual esteticamente atraente. Adicionalmente, a fórmula da resina foi desenvolvida para minimizar o odor, proporcionando uma experiência de impressão mais agradável.



Figura 2. Resina 3D.

Fonte: Adaptado de 3D Fila.

A utilização da resina 3D da Fila requer o uso de uma impressora 3D compatível com a tecnologia SLA, que utiliza um laser ou uma fonte de luz ultravioleta para solidificar a resina camada por camada, formando a peça desejada.

Em resumo, a resina 3D da Fila é um material projetado para proporcionar alta qualidade de impressão em tecnologia SLA. Com suas propriedades específicas, ela permite a criação de peças com detalhes precisos, resistência mecânica e acabamento de alta qualidade. Algumas informações gerais sobre a resina utilizada estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Informações técnicas da Resina 3D.

Características Gerais		
Nome do produto	—	Substância FS Resina Acrilada
Aparência	—	Líquido azulado
Monômeros Acrilador	—	>90%
Fotoiniciadores	—	<5%
Pigmentação	—	<2%
Odor	—	Suave, como um éster

Cor	–	Azul
pH	–	6,8 – 7,3
Ponto de Fusão	–	<0°C
Ponto de Ebulição	–	>200°C
Ponto de Fulgor	–	150°C
Pressão de vapor	–	<0,01 kPa a 25°C
Densidade relativa	–	1,08 ~ 1,14g/cm ³
Viscosidade	–	190 ~ 500cps a 25°C
Massa específica a 20°C	–	1122,2km/m ³
Faixa de luz/polimerização	–	405nm

Fonte: Adaptado de 3D Fila.

3.3. Impressora 3d

Para realizar o processo de fabricação das peças de compósitos, optou-se pela utilização de uma impressora 3D devido à valorização da tecnologia DLP AM por profissionais da área. Esta escolha se baseia na simplicidade de uso, velocidade de impressão reduzida e capacidade de produzir peças com detalhamento refinado. Muitos pesquisadores empregam este método especificamente para a produção de estruturas em relevo devido a tais características, conforme ilustrado pelo equipamento na Figura 3.



Figura 3. Crealty Halot-One CL-60.

Fonte: Crealty.

Foram empregados dois conjuntos de parâmetros de impressão utilizando a impressora 3D do fabricante Crealty, mais precisamente o modelo Halot-One CL-60. Os detalhes desses parâmetros estão listados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Parâmetros de impressão das amostras de tração.

Parâmetros	Tradução	Valores
<i>Bottom exposure time</i>	Tempo de exposição da camada inferior	40s
<i>Light off delay</i>	Atraso na tela	4s
<i>Exposure time</i>	Tempo de exposição	4.0s
<i>Bottom lifting distance</i>	Espessura da camada inferior	6mm
<i>Motor speed</i>	Velocidade do motor	2mm/s

Fonte: os autores, 2023.

Tabela 3. Parâmetros de impressão das amostras balísticas.

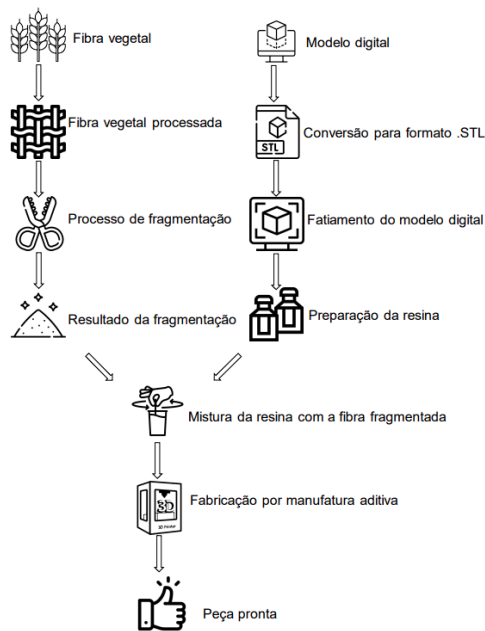
Parâmetros	Tradução	Valores
<i>Bottom exposure time</i>	Tempo de exposição da camada inferior	58s
<i>Light off delay</i>	Atraso na tela	5s
<i>Exposure time</i>	Tempo de exposição	5.0s
<i>Bottom lifting distance</i>	Espessura da camada inferior	6mm
<i>Motor speed</i>	Velocidade do motor	4mm/s

Fonte: os autores, 2023.

3.4. Metodologia

A metodologia de manufatura aditiva, empregando compósito de resina com fibra de curauá, abarca os procedimentos delineados na Figura 4.

Figura 4. Método de fabricação.



Fonte: os autores, 2023.

4. RESULTADOS

4.1. Determinação da densidade

Para a avaliação pelo princípio de Arquimedes foram utilizadas com fibras com cerca de 50 mm de comprimento, balança hidrostática Gehaka – BK300, béquer de 250 ml e 200 ml de água.

Figura 5. Preparo das peças para o teste de densidade.



Fonte: os autores, 2023.

4.2. Teste de densidade experimental e densidade teórica

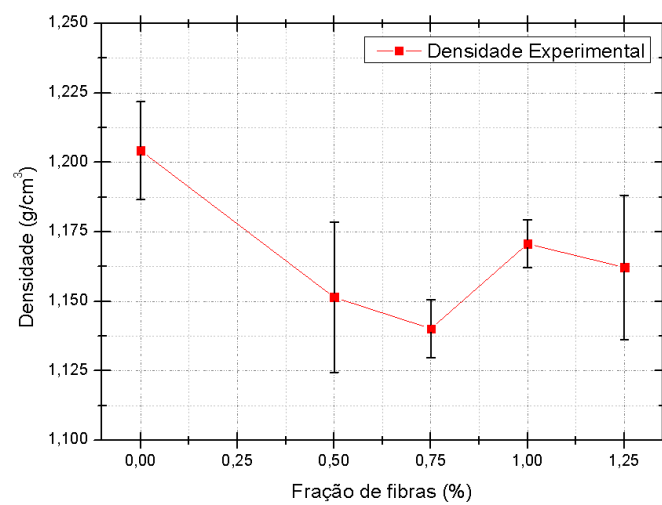
O teste de densidade experimental, aplicado em compósitos poliméricos, é um procedimento de caracterização que envolve a quantificação da razão entre a massa e o volume de uma amostra do material em estudo. Matematicamente, a densidade é calculada pela fórmula:

$$\rho = m/V$$

Onde:
 ρ = Densidade
 m = Massa
 V = Volume

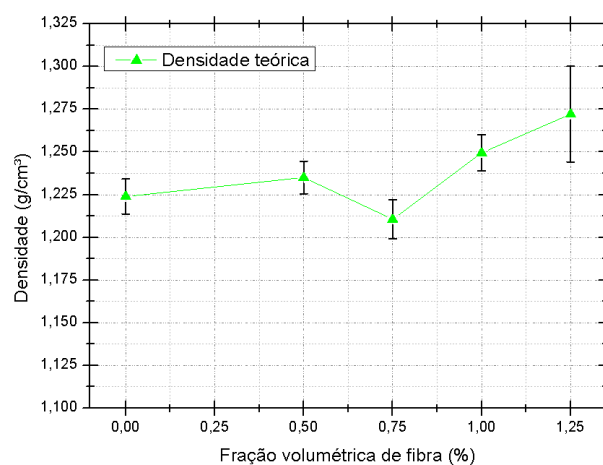
As unidades típicas para a densidade são quilogramas por metro cúbico (kg/m^3), embora outras unidades, como gramas por centímetro cúbico (g/cm^3), também possam ser empregadas.

Figura 6. Gráfico relacionando a densidade experimental com a fração de fibras e o desvio padrão.



Fonte: os autores, 2023.

Figura 7. Gráfico relacionando a densidade teórica com a fração de fibras e o desvio padrão.



Fonte: os autores, 2023.

4.3. Teste de densidade pelo princípio de Arquimedes

O Princípio de Arquimedes é um conceito fundamental na física que descreve como um corpo imerso em um fluido experimenta uma força de empuxo igual ao peso do fluido deslocado. Este princípio é frequentemente usado para determinar a densidade de um objeto através de um método conhecido como o Ensaio de Densidade de Arquimedes. No ensaio, um objeto é primeiro pesado no ar e depois pesado novamente enquanto está completamente imerso em um fluido. A diferença entre as duas massas é igual ao empuxo, e está diretamente relacionada ao volume do objeto. Ao dividir a massa do objeto pelo volume deslocado, obtém-se a densidade. Este método é particularmente útil para determinar a densidade de objetos irregulares ou porosos, e é amplamente empregado em laboratórios e na indústria para análise de materiais. Com isso foi utilizado água como líquido de imersão (densidade 1,0 g/cm³). O método de Arquimedes se baseia na seguinte equação:

$$\rho_{ARQ} = \frac{P_{AS}}{(P_{AM} + P_{AI})\rho_{liq}}$$

Onde:

ρ_{Arq} : densidade da amostra;

P_{AS} : peso da amostra seca;

P_{AM} : peso da amostra úmida;

P_{AI} : Peso da amostra imersa;

ρ_{liq} : densidade do líquido utilizado.

A metodologia adotada na determinação da densidade das amostras é ilustrada na Figura abaixo.

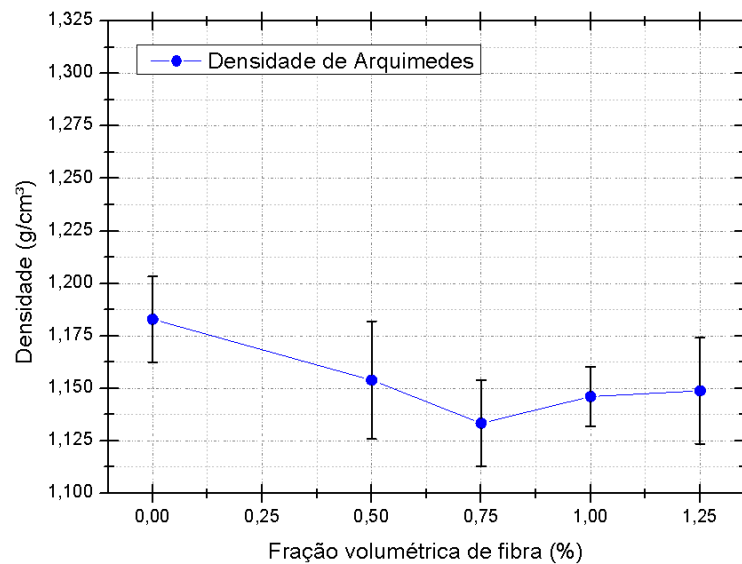
Figura 8. Balança hidrostática utilizada para a determinação da densidade pelo princípio de Arquimedes.



Fonte: os autores, 2023.

Foram avaliadas as densidades de amostras produzidas por manufatura aditiva pelo Princípio de Arquimedes, os resultados obtidos estão apresentados nos gráficos abaixo:

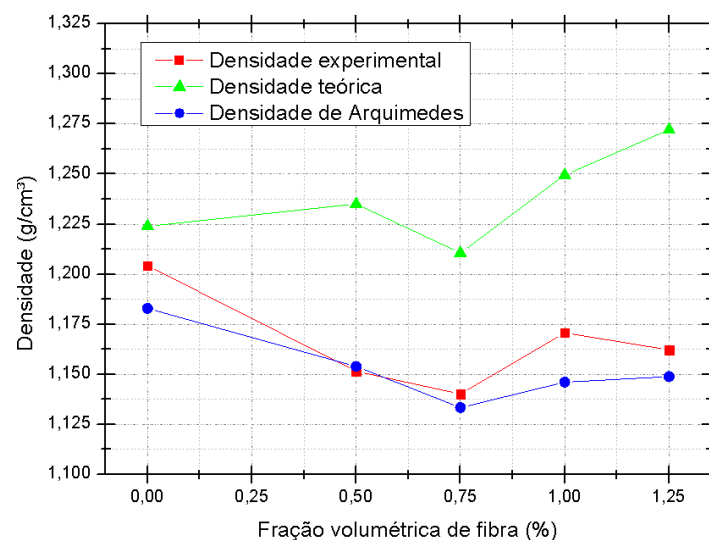
Figura 9. Gráfico relacionando a densidade de Arquimedes com a fração de fibras e o desvio padrão.



Fonte: os autores, 2023.

Em relação ao teste de densidade, notou-se uma correspondência entre os resultados obtidos nos testes experimentais e nos testes de densidade de Arquimedes, especialmente quando a fração de fibra no compósito se situa entre 0,5% e 0,75%, conforme ilustrado na figura.

Figura 9. Gráfico análise das densidades.



Fonte: os autores, 2023.

4.4. Ensaio de tração

O ensaio de tração desempenha um papel fundamental na caracterização de compósitos poliméricos, sendo uma ferramenta essencial na engenharia para obtenção de suas propriedades mecânicas. As amostras foram produzidas através do processo de fotopolimerização em cuba, com uso de processamento digital por luz (DLP), com dimensões conforme a norma ASTM D638-14, nas seguintes frações massicas de reforço de fibra: 0,50; 0,75; 1,00; 1,25%.

Figura 10. Modelo impresso para teste tração com 0,5% de fibra de curauá.



Fonte: os autores, 2023.

As propriedades mecânicas dos compósitos foram obtidas através do ensaio de tração, realizado em máquina universal INSTRON (3365), com célula de carga de 2 kN e taxa de carregamento de 2 mm/min.

O presente ensaio teve como objetivo a obtenção dos parâmetros tensão máxima (σ_{\max}), módulo de elasticidade longitudinal (E) e deformação máxima percentual (ε), como também a plotagem das curvas tensão-deformação para as amostras ensaiadas. As variáveis acima descritas são relacionadas através das equações abaixo:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Onde:

σ_{\max} : Tensão máxima de engenharia;

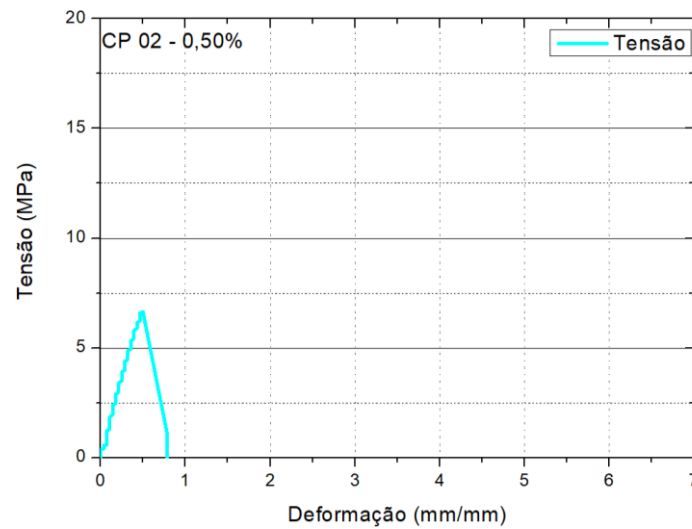
F_{\max} : Carga máxima;

A_0 : Área inicial da seção reta do corpo de prova;

E: Módulo de elasticidade;
 σ , ϵ : Tensão e deformação associada na região elástica.

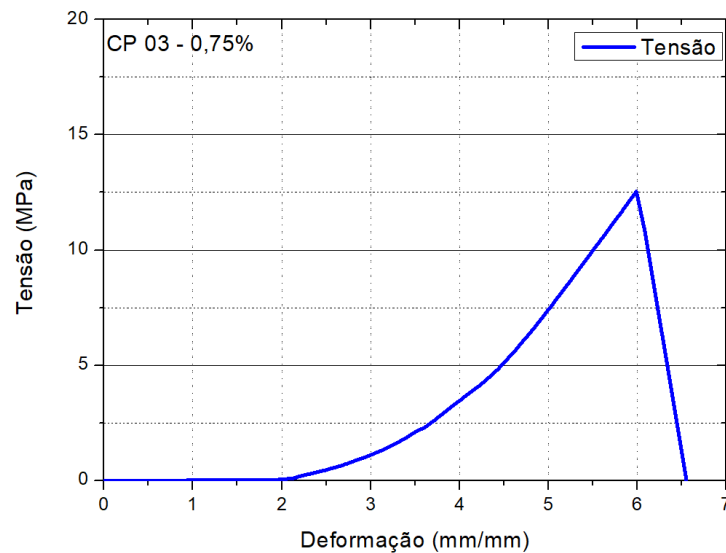
Melhores resultado obtidos em cada fração volumétrica de fibra no ensaio de tração:

Figura 11. Ensaio de tração com 0,50% de reforço de fibra de curauá.



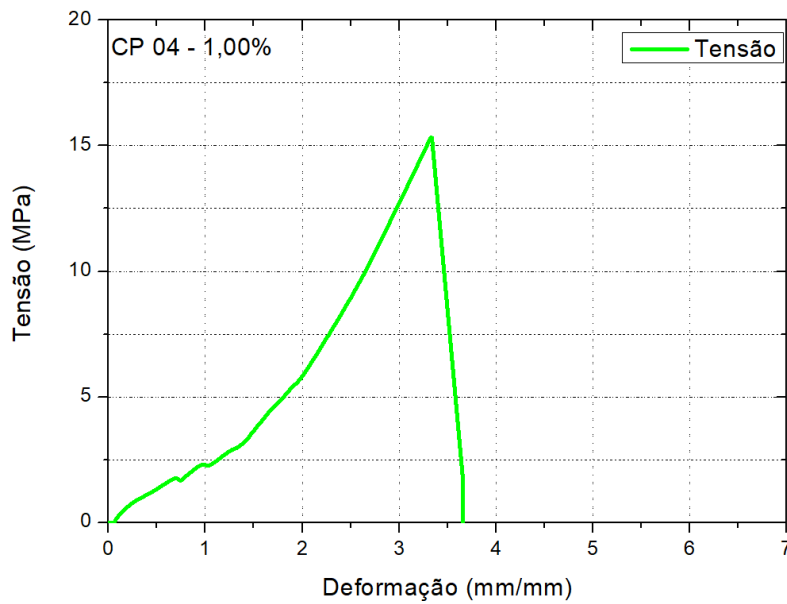
Fonte: os autores, 2023.

Figura 12. Ensaio de tração com 0,75% de reforço de fibra de curauá.



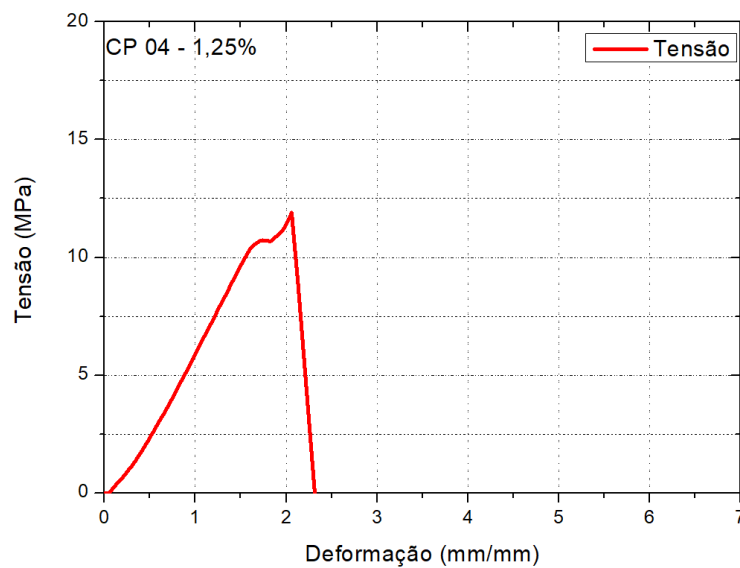
Fonte: os autores, 2023.

Figura 13. Ensaio de tração com 1,00% de reforço de fibra de curauá.



Fonte: os autores, 2023.

Figura 14. Ensaio de tração com 1,25% de reforço de fibra de curauá.

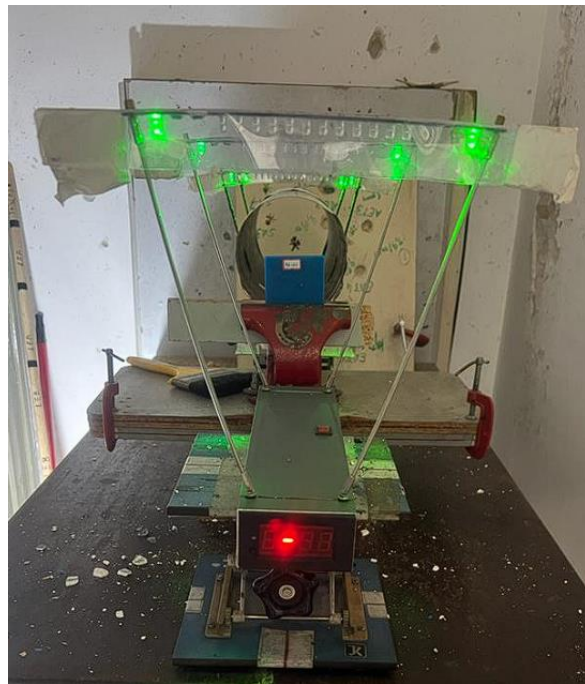


Fonte: os autores, 2023.

4.5. Ensaio balístico de velocidade residual

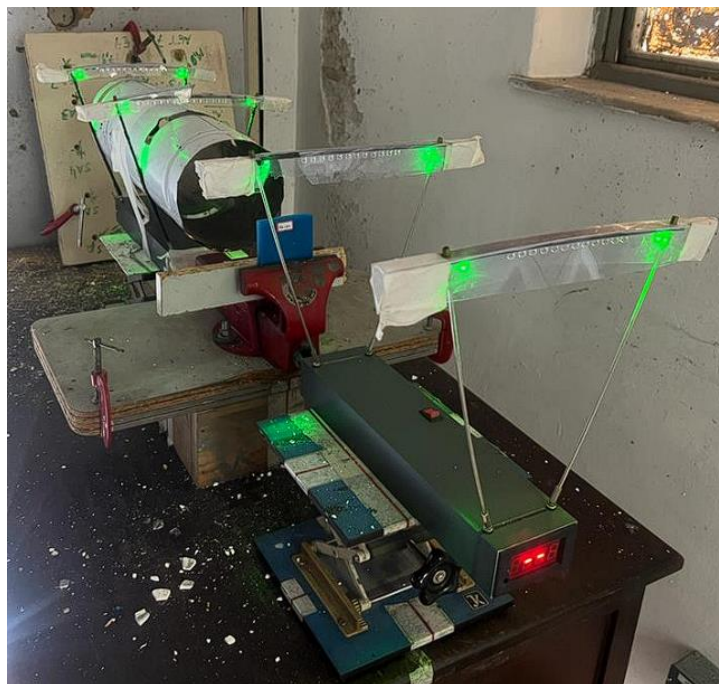
As figuras apresentadas a seguir ilustram o sistema de detecção empregado durante a realização do ensaio de energia de absorção:

Figura 15. Imagem frontal do sistema de detecção no ensaio de energia de absorção.



Fonte: os autores, 2023.

Figura 16. Imagem diagonal do sistema de detecção no ensaio de energia de absorção.



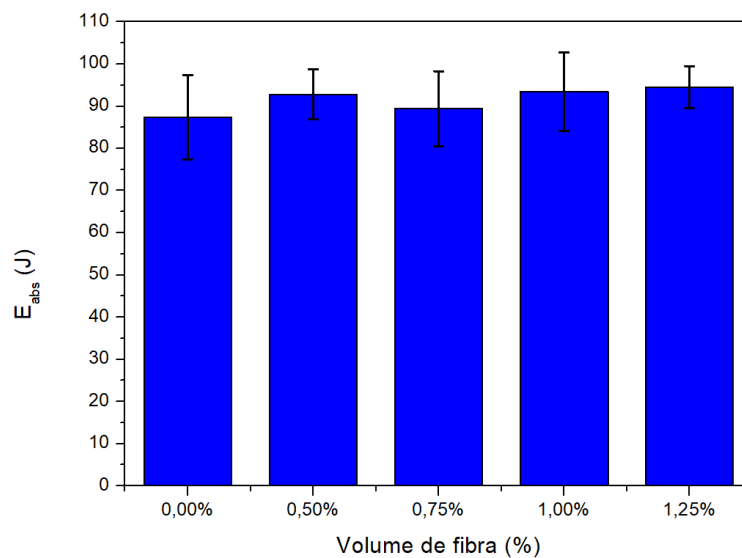
Fonte: os autores, 2023.

Figura 17. Amostras antes do ensaio.



Fonte: os autores, 2023.

Figura 18. Relação entre energia absorvida e volume de fibra.



Fonte: os autores, 2023.

As superfícies das amostras produzidas por DLP exibiram camadas sobrepostas, enquanto, de maneira geral, as amostras apresentaram poucos defeitos superficiais decorrentes do processo de MA. Após o impacto balístico, as amostras demonstraram fragmentação parcial de sua geometria, com valores de velocidade limite (VL) variando entre 228,34 e 238,58 m/s, e energia absorvida (Eabs) entre 87,39 e 94,47 J. As amostras de resina pura (0% em peso) evidenciaram os menores parâmetros de ensaio, com VL de $228,34 \pm 13,50$ J e Eabs de $87,39 \pm 9,95$ m/s. A adição de FNL (fibra de curauá) ao compósito resultou em um leve aumento nessas propriedades, destacando-se o compósito com 1,25% em peso, que apresentou os parâmetros VL de $238,58 \pm 6,21$ J e Eabs de $94,47 \pm 5,01$ m/s.

Os resultados preliminares sugerem a viabilidade da aplicação desses materiais em sistemas de blindagem. No entanto, é necessária uma investigação mais aprofundada sobre o comportamento dessas amostras para confirmar sua eficácia em situações de impacto balístico.

5. CONCLUSÃO

Em relação à resistência mecânica à tração, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

Validade dos Testes: A confirmação da validade dos testes de ruptura completa das amostras sugere que os procedimentos foram executados corretamente, gerando resultados confiáveis.

Qualidade das Superfícies: A observação de que os Compósitos Poliméricos (CPs) fabricados exibiram superfícies de alta qualidade indica que o processo de impressão utilizado é preciso e eficaz na produção das amostras.

Propriedades Mecânicas Variadas: A ampla variação nos valores de propriedades mecânicas, incluindo resistência à tração, módulo de elasticidade e taxa de alongação, sugere a capacidade de ajustar as propriedades do material com base nas proporções de reforço.

Efeito do Reforço: Um achado significativo é o aumento considerável na resistência à tração com a adição de 1,00% de reforço, sendo 300% maior em comparação com o compósito com 0,50% de reforço. Isso sugere que o aumento na proporção de reforço tem um impacto positivo na resistência mecânica do material.

Necessidade de Investigação Adicional: Apesar do aumento na resistência à tração, é fundamental conduzir uma investigação mais profunda para avaliar outras propriedades do

material, como resistência à compressão, resistência ao impacto, durabilidade a longo prazo e análises microestruturais, a fim de compreender completamente seu desempenho em diferentes condições e aplicações.

Os resultados apontam para um potencial promissor dos Compósitos Poliméricos (CPs) fabricados, especialmente quando se aumenta a proporção de reforço em 1%. No entanto, pesquisas futuras são necessárias para compreender plenamente o escopo das aplicações e propriedades desse material.

Para a utilização em blindagem, algumas considerações importantes são:

Qualidade das Superfícies das Amostras Produzidas por DLP: Embora o processo de Manufatura Aditiva (MA) resulte em camadas sobrepostas, as amostras apresentaram poucos defeitos superficiais, sugerindo uma boa qualidade na produção.

Comportamento após Impacto Balístico: Após o teste de impacto balístico, as amostras exibiram fragmentação parcial de sua geometria, indicando certa resistência a impactos, porém não são totalmente imunes a danos.

Valores de Velocidade Limite (VL) e Energia Absorvida (Eabs): Os valores de VL variaram entre 228,34 e 238,58 m/s, e os valores de Eabs entre 87,39 e 94,47 J. A adição de FNL (curauá) resultou em um leve aumento desses parâmetros.

Potencial para Aplicações em Blindagem: Os resultados preliminares sugerem que esses materiais podem ter potencial de aplicação em sistemas de blindagem, devido à resistência a impactos balísticos observada. No entanto, pesquisas adicionais são necessárias para entender completamente o comportamento dessas amostras e determinar sua eficácia em aplicações específicas de blindagem.

Consequentemente, os materiais produzidos apresentam características promissoras para aplicações de blindagem, mas são necessários mais pesquisas e testes para entender seu comportamento sob diferentes condições e otimizar suas propriedades para atender aos requisitos específicos de sistemas de proteção balística.

6. REFERÊNCIAS

3D Fila. Ficha de dados de segurança. 2022. Disponível em: https://3dfila.com.br/wp-content/uploads/2021/04/FISPQ-Resina-3D_v1.pdf. Acesso em: 17 mai. 2023.

3D Fila. Impressão 3d com resina: entenda como funciona. 2022. Disponível em: <https://3dfila.com.br/blog/impressao-3d-com-resina-entenda-comofunciona/>. Acesso em: 17 mai. 2023.

ATTARAM, M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*. 677-688. 2017.

COSTA, U. O. Comportamento balístico de blindagem multicamada com cerâmica frontal e compósito de matriz epóxi reforçada com fibras de curauá funcionalizadas com óxido de grafeno. Dissertação de mestrado do curso de Pós-Graduação em Ciência dos materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2019.

CURY, S. E. N.; MULINARI, D. R. Alternativas promissoras de novos materiais na ortodontia. *Cadernos UniFOA*, Volta Redonda, v.7, n. 2 (Esp.), p. 11-21, 2017. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/1151>. Acesso em: 17 mai. 2023.

DA CRUZ, R. B. Avaliação do comportamento balístico de blindagem multicamada com compósitos de epóxi reforçados com fibras de bambu. Dissertação de mestrado do curso de Pós-Graduação em Ciência dos materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.

EAGHARI, A.; JIN, J. Photopolymerization in 3D printing. *ACS Appl. Polym. Mater.* 593-611. 2019.

FACCIO, M.; CATAFESTA, J.; ZORZI, J. E. Aditivos para a fabricação por manufatura aditiva de pós-cerâmicos pela técnica de filamento fundido: uma breve revisão. *Revista REVTEC*. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/11960>. Acesso em: 8 de abril. 2023.

JUNIO, R. F. P. Comportamento balístico e simulação computacional de estruturas poliméricas produzidas por manufatura aditiva. Dissertação de mestrado do curso de Pós-Graduação em Ciência dos materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2022.

LEITE, J. L. Processamento e caracterização de compósitos formados por resina fenólica e fibras de bagaço de cana como reforço. Dissertação de mestrado do curso de Pós-Graduação em Ciências dos materiais na Universidade Federal de Santa Catarina. 2022.

LIGON, S. C.; LISKA R.; STAMPFL, J.; GURR, M.; MÜLHAUPT, R. Polymers for 3d printing and customized additive manufacturing. *Chem.Rev.*,10212–10290,2017.

LUZ, F. S. D. Avaliação do comportamento balístico de blindagem multicamada com compósito de epóxi reforçado com fibra de juta. Dissertação de mestrado do curso de Pós-Graduação em Ciência dos materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.

MARAGNO, L. G. Otimização do sistema de manufatura aditiva via deposição direta de pasta para a obtenção de miniaturas de produtos sanitários. Dissertação de mestrado do curso de Pós-Graduação em Engenharia metalúrgica e de materiais na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2022.