

Gustavo Sandro Mendes Carvalho

**Fibras de Carbono a partir de Polímeros visando
Aplicação em Energia**

Rosana – SP

2025

Gustavo Sandro Mendes Carvalho

**FIBRAS DE CARBONO A PARTIR DE POLÍMEROS VISANDO APLICAÇÃO EM
ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Faculdade de Engenharia e
Ciências - Câmpus de Rosana,
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Michael Jones da
Silva

Rosana - SP

2025

C331f	Carvalho, Gustavo Sandro Mendes Fibras de Carbono a partir de Polímeros visando Aplicação em Energia / Gustavo Sandro Mendes Carvalho. -- Rosana, 2025 70 p. : fotos Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana Orientador: Michael Jones Silva 1. Engenharia. 2. Fibras de carbono. 3. Polímeros precursores. 4. Sustentabilidade. 5. Energia renovável. I. Título.
-------	---

Gustavo Sandro Mendes Carvalho

Fibras de Carbono a partir de Polímeros visando Aplicação em Energia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energia.

Rosana, 01/Julho/2025.

Componentes da Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MICHAEL JONES DA SILVA**
Data: 15/07/2025 14:14:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Michael Jones da Silva, UNESP, Câmpus Rosana

Documento assinado digitalmente
 **KLEBER ROCHA DE OLIVEIRA**
Data: 15/07/2025 00:41:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Titular: Prof. Dr. Kleber Rocha de Oliveira, UNESP, Câmpus Rosana

Documento assinado digitalmente
 **DIEGO SILVA DE MELO**
Data: 14/07/2025 20:45:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Titular: Me. Diego Silva de Melo, UNESP, Câmpus Rosana

Dedico este trabalho aos meus amados pais, ao meu incrível irmão e à meu amor.

AGRADECIMENTOS

Com a missão de me tornar Engenheiro, minha jornada começou aos 17 anos de idade quando saí de casa, Uberlândia/MG, quando fui aprovado na renomada Unesp para cursar Engenharia de Energia, em Primavera/Rosana no interior de São Paulo. Por tudo que vivi e tenho conquistado, considero minha história gigante e bonita, sendo esta conquista o começo de um grande sonho. Por isso agradeço:

À Deus por me proporcionar todas as oportunidades que tenho em vida.

Ao meu pai Julio e minha mãe Renata por terem confiado e depositado sua fé em mim, sendo minha fonte de motivação. Os honrarei sempre.

Ao meu irmão Gabriel Felipe por ser meu melhor amigo e grandiosíssimo exemplo de um bravo homem de valor.

À minha família, especialmente à minha avó Marli pelas orações.

À minha namorada Maria Carolina Pereira Finotti por ser tudo e mais do que sempre sonhei, à ela dedico todo meu amor e forças em nosso futuro juntos.

Aos meus bons amigos Felipe Cardoso (Trancado), Du (Matheus Micelli), Outdoor (Leandro Baffi), Frutinha (Matheus Moura), Fubá (José Leme), Pupusa (José Mejia), Gustavo Felix, Brisa (Guilherme Ottoni), Cemitério (Heitor Plazas), entre outros amigos/bixos/veteranos e repúblicas da faculdade pela amizade incomparável e inesquecíveis momentos de alegria, ensinamentos e aventuras de Primavera/Rosana à diversos outros lugares do Brasil. Foi um prazer compartilhar meus anos de graduação com eles.

À todos meus ex-colegas de trabalho e amigos da Empa - o renomado Swiss Federal Institute for Materials Science and Technology (ligado à Univ. ETH) - de todos os cantos do mundo. Foi uma honra integrar o departamento 312 de Building Energy Materials, trabalhar com tecnologias de ponta, morar em Zürich (Dübendorf) na Suíça, ter escalado imensos alpes, ter aprendido a andar de snowboard, aprendido o básico das línguas locais (alemão, italiano e francês), viajado pela Europa e ter deixado minha contribuição na ciência para um futuro próspero e sustentável aos meus 22 ~ 23 anos de idade.

Ao professor Michael Jones por ter aceitado ser meu orientador na escrita deste trabalho, sua disponibilidade em compartilhar conhecimento, apoio e sugestões construtivas.

Aos professores da Unesp que se dedicam honestamente para o crescimento do curso.

À Turma VI de Engenharia de Energia da Unesp - minha turma - que se iniciou em 2019. E aos seus respectivos guerreiros que atingiram a graduação.

À toda comunidade unespiana.

EPÍGRAFE

“Aqueles que sonham alto não são movidos por garantias, mas por propósitos. Caminham onde não há trilha, falam quando o mundo silencia e acreditam mesmo quando o chão parece faltar. Quem ousa sonhar alto descobre que o desconhecido não é ameaça, mas convite - e segue em direção ao invisível com a fé de que um passo basta para que o chão se forme.”

- Gustavo Carvalho, autor do trabalho

RESUMO

As fibras de carbono têm emergido como materiais de alta performance com aplicações significativas em setores como energia, transporte e infraestrutura. Este estudo investigou a produção de fibras de carbono a partir de diferentes polímeros precursores, com destaque para poliacrilonitrila (PAN), lignina e piche mesofásico, analisando suas propriedades e potenciais aplicações. O trabalho também abordou o rayon, precursor histórico relevante, ressaltando sua importância no desenvolvimento inicial de fibras de carbono. A pesquisa também explorou as vantagens e limitações de cada precursor, considerando os desafios técnicos, econômicos e ambientais envolvidos na produção e uso dessas fibras. A poliacrilonitrila demonstrou ser o precursor mais eficaz para aplicações que exigem alta resistência mecânica e estabilidade térmica, como na indústria aeroespacial e em dispositivos estruturais avançados. No entanto, seus altos custos e impactos ambientais limitam sua acessibilidade para mercados emergentes. A lignina, como alternativa sustentável e de baixo custo, apresentou potencial em aplicações menos exigentes, como compósitos para construção civil e dispositivos de energia renovável, embora ainda enfrente desafios relacionados à uniformidade e pureza química. Já o piche mesofásico mostrou-se eficiente para aplicações que requerem alta condutividade térmica e elétrica, sendo ideal para dispositivos eletrônicos e de gerenciamento de calor, embora sua resistência mecânica inferior limite seu uso em contextos estruturais. Além disso, o estudo abordou o impacto das fibras de carbono na sustentabilidade, enfatizando o papel de precursores renováveis e práticas de economia circular na redução da pegada ambiental. A integração de fibras de carbono em sistemas de energia renovável, como turbinas eólicas e dispositivos de armazenamento de energia, demonstrou contribuir significativamente para a eficiência energética e a redução das emissões de carbono. Contudo, desafios como o custo elevado de produção e a necessidade de tecnologias de reciclagem ainda limitam sua aplicação em larga escala. Por fim, o trabalho destacou a importância de alinhar a escolha do precursor às demandas específicas de cada aplicação, buscando equilíbrio entre desempenho técnico, viabilidade econômica e sustentabilidade. Como recomendação, futuros estudos devem explorar precursores híbridos e tecnologias de purificação mais avançadas, além de ampliar a análise prática do desempenho das fibras em aplicações específicas. Esses avanços são essenciais para consolidar o papel das fibras de carbono como materiais estratégicos para o futuro da engenharia de energia e sustentabilidade global.

Palavras-chave: Fibras de carbono. Polímeros precursores. Sustentabilidade. Energia.

ABSTRACT

Carbon fibers have emerged as high-performance materials with significant applications in energy, transportation, and infrastructure sectors. This study investigated the production of carbon fibers from different polymer precursors, focusing on polyacrylonitrile (PAN), lignin, and mesophase pitch, analyzing their properties and potential applications. The work also addressed rayon as a relevant historical precursor, highlighting its importance in the early development of carbon fibers. The research also explored the advantages and limitations of each precursor, considering the technical, economic, and environmental challenges involved in the production and use of these fibers. Polyacrylonitrile proved to be the most effective precursor for applications requiring high mechanical strength and thermal stability, such as in aerospace and advanced structural devices. However, its high costs and environmental impacts limit its accessibility in emerging markets. Lignin, as a sustainable and low-cost alternative, showed potential in less demanding applications, such as composites for construction and renewable energy devices, although it still faces challenges related to uniformity and chemical purity. Meanwhile, mesophase pitch was efficient for applications requiring high thermal and electrical conductivity, making it ideal for electronic and heat management devices, although its lower mechanical strength limits its use in structural contexts. Moreover, the study addressed the impact of carbon fibers on sustainability, emphasizing the role of renewable precursors and circular economy practices in reducing environmental footprints. The integration of carbon fibers into renewable energy systems, such as wind turbines and energy storage devices, significantly contributed to energy efficiency and carbon emission reductions. However, challenges such as high production costs and the need for recycling technologies still limit their large-scale application. Finally, the study highlighted the importance of aligning precursor selection with the specific demands of each application, seeking a balance between technical performance, economic viability, and sustainability. Future research should explore hybrid precursors and more advanced purification technologies, as well as expand the practical analysis of fiber performance in specific applications. These advancements are crucial to solidify the role of carbon fibers as strategic materials for the future of energy engineering and global sustainability.

Keywords: Carbon fibers. Precursor polymers. Sustainability. Energy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	11
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	11
1.3 OBJETIVO GERAL.....	11
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
1.5 JUSTIFICATIVA.....	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 DEFINIÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO.....	13
2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO.....	15
2.2.1 ETAPAS DO PROCESSO.....	18
2.2.2 TIPOS DE POLÍMEROS UTILIZADOS.....	21
2.2.3 VARIÁVEIS QUE AFETAM A QUALIDADE.....	24
2.3 PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE CARBONO.....	27
2.4 APLICAÇÕES DAS FIBRAS DE CARBONO NA ENERGIA.....	31
3 METODOLOGIA.....	35
3.1 TIPO DE PESQUISA.....	35
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	35
3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS FIBRAS.....	36
3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS.....	37
3.5 AVALIAÇÃO DAS APLICAÇÕES ENERGÉTICAS.....	37
4 RESULTADOS.....	39
4.1 PROPRIEDADES OTIMIZADAS DAS FIBRAS DE CARBONO.....	39
4.2 POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM ENERGIA.....	42
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES POLÍMEROS.....	45
5 DISCUSSÕES.....	49
5.1 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA.....	49
5.2 DESEMPENHO DAS FIBRAS.....	52
5.3 IMPACTO NA SUSTENTABILIDADE.....	55
6 CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As fibras de carbono têm se destacado nas últimas décadas como materiais de alta performance, sendo amplamente utilizadas em setores que demandam leveza, resistência e eficiência energética. Segundo Sampaio (2023), esses materiais são fundamentais para o avanço de tecnologias que buscam reduzir emissões de carbono e otimizar recursos. Contudo, a produção de fibras de carbono enfrenta desafios técnicos e ambientais, especialmente em relação à escolha do polímero precursor, que influencia diretamente suas propriedades e viabilidade econômica. Este estudo se insere nesse contexto, explorando alternativas que equilibrem desempenho e sustentabilidade.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Embora as fibras de carbono sejam reconhecidas por seu desempenho superior, a produção a partir de precursores convencionais, como a poliacrilonitrila (PAN), apresenta altos custos e impactos ambientais significativos. Além disso, há uma lacuna na literatura em relação ao uso de precursores alternativos, como lignina e piche mesofásico (Bisheh; Abdin, 2023), que poderiam oferecer soluções mais acessíveis e sustentáveis. Assim, surge a seguinte questão: como diferentes polímeros precursores impactam as propriedades das fibras de carbono e sua aplicação no setor energético?

1.3 OBJETIVO GERAL

Investigar o impacto da escolha de diferentes polímeros precursores na produção de fibras de carbono, com foco em suas propriedades físicas e mecânicas e no potencial de aplicação em sistemas energéticos.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Examinar os processos de produção de fibras de carbono a partir de precursores como PAN, lignina e piche mesofásico.
- Avaliar as propriedades mecânicas, térmicas e elétricas das fibras

produzidas a partir de cada tipo de precursor.

- Identificar aplicações energéticas específicas para as fibras de carbono, como armazenamento e geração de energia.
- Analisar os desafios e as oportunidades de integrar fibras de carbono em sistemas sustentáveis.

1.5 JUSTIFICATIVA

O estudo é relevante, pois, aborda uma demanda crescente por materiais que conciliem desempenho técnico e sustentabilidade. Souto (2015) destaca que a dependência de precursores caros e ambientalmente impactantes limita o potencial das fibras de carbono em mercados emergentes. Ao explorar precursores alternativos, este trabalho busca contribuir para a ampliação do uso das fibras de carbono em aplicações energéticas, promovendo soluções acessíveis e ecologicamente responsáveis. Além disso, a pesquisa responde à necessidade de alinhar o desenvolvimento de novos materiais às metas globais de sustentabilidade e transição energética.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DEFINIÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO

As fibras de carbono são filamentos sintéticos compostos por pelo menos 90–95 % de carbono, com diâmetros típicos entre 5–15 μm . São produzidas através da pirólise (tratamento térmico controlado) de polímeros precursores como a poli(acrilonitrila) (PAN), piche de petróleo ou rayon (celulose regenerada), como explica Bengtsson et al. (2020). Esses filamentos, formados por milhares de microfibrilas alinhadas, possuem estrutura parcialmente gráfica, conferindo-lhes resistência à tração, alto módulo de elasticidade e baixa densidade.

O processo de fabricação envolve etapas sequenciais: o spinning do precursor (wet, dry, ou melt spinning), seguido pela oxidação (estabilização) a aproximadamente 200–300 °C em atmosfera oxidante, posteriormente carbonização acima de 1000 °C em atmosfera inerte, e, opcionalmente, grafitização em temperaturas superiores a 2000–3000 °C (Bengtsson et al., 2020). Durante a estabilização, reações de desidratação, ciclização e oxidação formam ligações em degrau, tornando o material infusível e pronto para carbonização, como explica Pohlkemper et al. (2024).

O processo de fabricação de fibras de carbono (CF) pode ser dividido nas etapas de produção de precursores, estabilização, carbonização e subsequente tratamento de superfície. A estabilização do precursor é a etapa de produção mais demorada e é considerada como o gargalo tanto para a capacidade de produção das linhas de CF quanto para a redução dos custos de fabricação. Durante a estabilização, o precursor torna-se incombustível e infusível a uma temperatura gradualmente crescente de cerca de 180-300°C. A fibra resultante pode, portanto, ser convertida termicamente em um CF no processo de carbonização subsequente. A estabilização ocorre em fornos de oxidação. Dependendo da tecnologia do forno e dos perfis de temperatura utilizados, diferentes tipos de CF podem ser produzidos. Tanto a qualidade do CF como a capacidade de produção de uma linha de FC são particularmente dependentes da tecnologia do forno de oxidação (POHLKEMPER et al., 2024, p. 1-2).

De acordo com Bisheh e Abdin (2023) o precursor mais utilizado é o PAN, devido ao seu elevado teor de carbono (cerca de 68 %) e à qualidade do produto final. As fibras de PAN podem alcançar módulo elástico de ~344 GPa e resistência à tração acima de 2 GPa após grafitização. Pesquisas recentes mostram que a adição de comonômeros — por exemplo, ácido itacônico — melhora a reatividade durante estabilização, reduzindo o consumo energético (~7 %) e aumentando em até 20 % a resistência final da fibra (Thao et al., 2024).

Embora o PAN ainda seja o principal precursor utilizado na produção de fibras de carbono, a busca por alternativas de menor custo e impacto ambiental vem ganhando destaque (Bisheh; Abdin, 2023). Nos últimos anos, o uso de lignina e celulose, por serem abundantes e renováveis, tem sido estudado como alternativas aos precursores fósseis nas fibras de carbono. Segundo Ma et al. (2021), a lignina, um polímero aromático presente em grandes quantidades na biomassa (60-65 % de carbono), apresenta alta estabilidade e potencial de rendimento na carbonização. Entretanto, segundo os autores, sua heterogeneidade estrutural — com ramificações irregulares e distribuição de peso molecular ampla — dificulta a obtenção de fibras com propriedades mecânicas elevadas.

A celulose, por sua vez estudada por Bisheh e Abdin (2023), possui estrutura molecular linear e alta cristalinidade, o que facilita o processamento e favorece o alinhamento das cadeias durante a estabilização. No entanto, seu conteúdo de carbono (~44 %) é baixo, resultando em rendimento de conversão restrito (10-30 %), o que reduz sua atratividade econômica (Le; N.D et al., 2022).

Quanto à microestrutura, as fibras de PAN exibem uma estrutura turbostrática — lâminas de grafite empilhadas parcialmente alinhadas ao eixo da fibra. O grau de orientação e o tamanho de cristais são diretamente ligados às propriedades mecânicas (Yu et al., 2022). Já o pitch-based, derivado de piche, forma cristalinas gráficas mais regulares, conferindo módulo superior, mas com resistência menor e custo alto (Yu et al., 2022).

De acordo com Mano e Mendes (2013), as propriedades mecânicas de PAN e de piche mesofásico incluem resistência à tração entre 3,5–7 GPa (com casos experimentais acima), módulo entre 200–900 GPa, densidade em torno de 1,75 g/cm³ e baixa expansão térmica. Além disso, apresentam excelente estabilidade térmica e inércia química, características essenciais em ambientes adversos. Entretanto, as taxas de aquecimento, tensão aplicada durante carbonização e remoção gradual de voláteis afetam diretamente microdefeitos e tortuosidade, impactando no desempenho final.

Em termos de aplicações, as fibras de carbono são o principal componente de compostos reforçados (CFRP), utilizados em estruturas aeronáuticas, automotivas, turbinas eólicas e sistemas de armazenamento de energia (Godêz et al., 2018). Nesses contextos, seu uso está diretamente ligado ao desempenho elevado por relação força-peso.

2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO

O processo de produção de fibras de carbono é altamente técnico e envolve etapas complexas que determinam as propriedades finais do material. A seleção do precursor é o primeiro e possivelmente o mais crucial passo, pois impacta diretamente a eficiência do processo e o desempenho final das fibras. Como destacado por Kanhere (2022), a lignina — subproduto abundante da indústria de papelão e celulose — tem recebido atenção crescente como alternativa sustentável aos precursores convencionais devido ao seu baixo custo e alto teor de carbono (60–65 %). Contudo, para ser usada como precursor, a lignina geralmente precisa ser quimicamente tratada e purificada (por meio de fracionamento ou extração solvente, como em processos organosolv), garantindo maior uniformidade estrutural e melhores características térmicas e de processabilidade (Bengtsson et al., 2022).

A escolha do precursor também varia conforme a aplicação pretendida; enquanto o PAN é amplamente usado em produtos de alta performance (aeronáutica, automotivo), a lignina oferece viabilidade econômica significativa para aplicações de larga escala, como materiais compósitos em energia ou construção civil, como explica Kanhere (2022):

As fibras de carbono possuem ultra-alta resistência específica e módulo, o que as torna desejáveis para compósitos leves de alto desempenho. A grande maioria das fibras de carbono comerciais é produzida a partir de precursores de PAN (poliacrilonitrila) que são caros, o que limita o uso de fibras de carbono derivadas de PAN a aplicações aeroespaciais (por exemplo, aviões). No entanto, para aplicações sensíveis ao custo, há uma necessidade de fibras de carbono de baixo custo e desempenho moderado. A lignina é um subproduto de baixo custo dos processos de polpação e biorrefino, e tem sido explorada como precursor para fibras de carbono de baixo custo em diversos estudos anteriores (Kanhere, 2022, p. 3).

Segundo Bengtsson et al. (2022), a estabilização é a etapa inicial da conversão do precursor em fibra de carbono. Durante essa fase, o material é aquecido entre 200 °C e 300 °C, como visto anteriormente, e em atmosfera oxidante, promovendo reações de desidratação e ciclização que resultam em uma estrutura termicamente estável. Sem essa etapa, o material tenderia a fundir-se durante a carbonização. Bengtsson et al. (2020) demonstraram que, mesmo com precursores lignina–celulose de 70:30, é possível estabilizar fibras em menos de duas horas a 250 °C, evitando a fusão e obtendo módulo de cerca de 76 GPa e resistência de ~1,07 GPa.

No entanto, a estabilização é ainda mais desafiadora quando se usam precursores exclusivamente de lignina, devido à sua composição heterogênea e baixa temperatura de transição vítrea (T_g). Segundo Wang et al. (2022) mostram que ligninas não tratadas podem exigir mais de 100 h de estabilização, tornando o processo industrial inviável. Para superar isso, são empregadas técnicas como o fracionamento da lignina (que aumenta sua T_g e reduz tempos de estabilização) e a adição de catalisadores (como ácido fosfórico ou sulfato de amônio) que aceleram a formação das estruturas conjugadas essenciais para uma pirólise bem-sucedida, como feito por Shi et al. (2019). Por exemplo, os autores usaram lignina pirolítica em combinação com PAN-co-itacônico para reduzir em 13 minutos o ponto de formação de estruturas tipo grafite ($230\text{ }^{\circ}\text{C}$ em comparação a $243\text{ }^{\circ}\text{C}$).

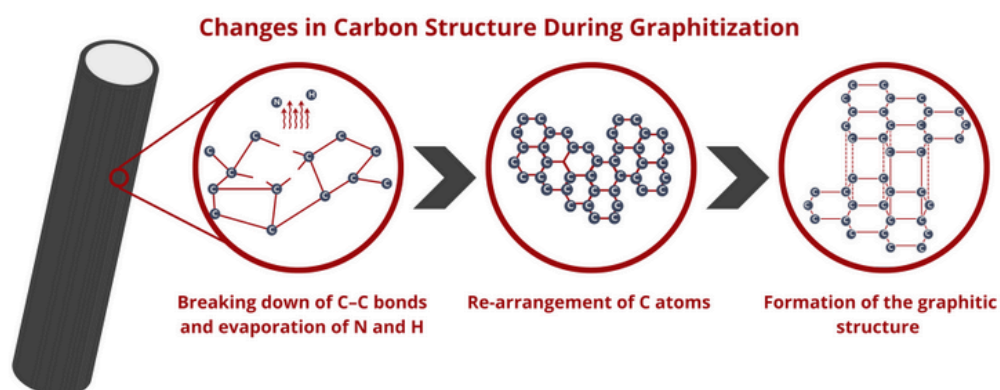
Posteriormente, no processo de carbonização se converte o precursor estabilizado em uma estrutura de carbono quase puro, geralmente entre $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, sob atmosfera inerte (nitrogênio ou argônio), segundo Vinod et al. (2023). Em tais condições, compostos voláteis como H_2O , CO , CO_2 e CH_4 são eliminados, resultando em uma matriz com até 95 % de carbono. Conforme destacado pelos autores, a carbonização de precursores lignina-celulose entre $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ mostrou ganhos no módulo elástico, de 18 a 77 GPa, em função do aumento da temperatura e formação de grafita nanocristalina.

A velocidade de aquecimento e o tempo de retenção são críticos para garantir a uniformidade da estrutura resultante. Qualquer desvio nesses parâmetros pode resultar em fibras com falhas estruturais, comprometendo suas propriedades mecânicas, como explica Bengtsson et al. (2020). Além disso, a carbonização de precursores como a lignina demanda temperaturas elevadas para alcançar qualidade comparável às fibras derivadas de PAN. Por exemplo, é comum a utilização de taxas de aquecimento entre $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ durante a carbonização de fibras de lignina, frequentemente com temperatura final em torno de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, e tempo total entre 98 e 325 min, sob risco de heterogeneidade radial e porosidade que afetam a resistência mecânica (Bengtsson et al., 2020).

Uma etapa opcional, segundo Acedera (2023), mas altamente recomendada para certas aplicações, é a grafitização. Esse processo consiste em aquecer as fibras carbonizadas a temperaturas superiores a $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (podendo chegar a $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$), reorganizando sua estrutura cristalina. A grafitização promove aumento na ordem cristalina (grau de grafitização), refletido em maior módulo de Young e

condutividade elétrica e térmica.

Figura 1. Mudança da estrutura de Carbono durante a Grafitação



Fonte: Acedera (2023)

Em aplicações que exigem elevada condutividade térmica e elétrica — como em dispositivos eletrônicos, baterias e supercapacitores —, a grafitação pode melhorar significativamente as propriedades funcionais das fibras. De acordo com Fang et al. (2017), durante a produção de fibras de carbono para supercapacitores, a grafitação aumenta a condutividade elétrica, devido ao maior alinhamento dos átomos de carbono em estruturas tipo grafite.

Nesse contexto, o tipo de precursor utilizado para obtenção das fibras exerce grande influência nas propriedades finais do material. Assim, o emprego de pitch mesofásico como precursor tem sido destacado como abordagem promissora para a produção de fibras de carbono. Segundo Bisheh e Abdin (2023), o pitch de origem petrolífera, especialmente na fase mesofásica, facilita a formação de cristais durante a carbonização devido à sua estrutura líquida cristalina e alto teor de carbono, gerando fibras com módulo elástico elevado e boa resistência térmica e elétrica. No entanto, a purificação necessária e o controle rigoroso do processo de fusão e fiação aumentam a complexidade e os custos. Essas etapas opcionais, como a fusão a cerca de 300 °C e a fiação em equipamentos especializados, são cruciais para garantir a uniformidade do diâmetro e a orientação molecular, especialmente para aplicações aeroespaciais.

Matsumoto et al. (1993) enfatizam que a fusão de pitch mesofásico deve ocorrer sob condições bem controladas para obter consistência adequada à fiação, enquanto a operação de fiação exige equipamentos que lidem com sua viscosidade variável com a temperatura. Esses processos têm impacto direto na qualidade final

das fibras estabilizadas e carbonizadas, sendo determinantes para propriedades mecânicas superiores.

Quanto à lignina, Bisheh e Abdin (2023) a reconhecem como precursor renovável de custo mais baixo. Lignina apresenta rendimento de carbono entre 60 % e 65 % após carbonização, porém suas propriedades mecânicas ainda estão abaixo dos padrões exigidos por aplicações estruturais – resistência à tração de 388 a 1060 MPa e módulo de 40 GPa. Impurezas e composição química heterogênea demandam purificação prévia e tratamentos que melhorem sua reatividade e compatibilidade com etapas subsequentes.

As propriedades mecânicas das fibras de carbono à base de lignina não são altas o suficiente para atender a alguns critérios para aplicações estruturais, como a exigência estabelecida pela indústria automotiva dos EUA. Consta-se que as fibras de carbono à base de lignina apresentaram uma resistência à tração de 388–1060 MPa e módulo elástico de 40 GPa; no entanto, eles exibiram uma mistura fraca com as matrizes poliméricas. Além disso, o longo tempo de estabilização (mais de 100 h) é problemático, bem como os desafios na fiação de fusão da lignina kraft sem plastificação de aditivos. O processo de obtenção de fibra de carbono de alta resistência da lignina é complexo e precisa de controle cuidadoso das condições de fiação de fusão, perfis de rampa e temperaturas de tratamento (Bisheh; Abdin, 2023, p.6).

Avanços tecnológicos incluem o uso de catalisadores durante estabilização e carbonização. Um trabalho recente de 2021 mostrou que precursores lignocelulósicos tratados com fosfato de fósforo (H_3PO_4) dobraram o rendimento de carbono, melhorando eficiência e qualidade das fibras resultantes (Le et al., 2022). Além disso, a modelagem computacional de comportamentos térmicos e químicos tem sido aplicada para otimização do processo, reduzindo consumo energético e promovendo sustentabilidade.

2.2.1 ETAPAS DO PROCESSO

As etapas do processo de produção de fibras de carbono são complexas e interdependentes, começando pela seleção e preparação do material precursor. Os precursores podem incluir polímeros como poliacrilonitrila (PAN), lignina ou pitch mesofásico, cada um com características específicas que influenciam as propriedades finais. A lignina, por exemplo, é um subproduto sustentável da indústria de papel e celulose, mas requer purificação para remover impurezas que podem interferir em reações químicas posteriores. Esse passo é essencial para garantir composição química uniforme, diretamente relacionada à qualidade das fibras (Denk

et al. 2024). Adicionalmente, a preparação envolve tratamentos físicos e químicos voltados a ajustar a viscosidade, reatividade e estabilidade térmica do precursor.

A estabilização térmica é a primeira etapa transformadora, aquecendo o precursor em atmosfera oxidante (geralmente entre 200 °C e 300 °C) para criar ligações cruzadas que tornam o material resistente ao calor, evitando sua fusão durante a carbonização, segundo Liu et al. (2019). Esse processo envolve reações de ciclização, desidrogenação e oxidação que convertem moléculas lineares em estruturas em loop ("ladder"), não fusíveis e capazes de suportar temperaturas mais elevadas (Liu et al., 2019). A fase de estabilização é crítica: variações no tempo, temperatura ou atmosfera podem ocasionar ciclos incompletos, resultando em fibras com propriedades mecânicas inferiores ou defeitos internos.

A carbonização, considerada a etapa central na produção de fibras de carbono, envolve aquecimento dos precursores estabilizados a temperaturas em torno de 800–1500 °C em atmosfera inerte (nitrogênio ou argônio). Segundo Huang (2009), esse processo remove hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, resultando em fibras compostas por mais de 90 % de carbono, com estrutura organizada e alta resistência mecânica. A taxa de aquecimento, o tempo de retenção e a uniformidade da temperatura são determinantes: aquecimento muito rápido pode gerar defeitos estruturais, enquanto taxas muito baixas podem levar à perda excessiva de nitrogênio, impactando negativamente a resistência. No caso de precursores heterogêneos como a lignina, utiliza-se taxas de aquecimento mais lentas e rampas graduais para garantir a remoção gradual dos elementos não carbonosos e alcançar um processo mais controlado.

A grafitação é uma etapa opcional para fibras de carbono que demanda temperaturas superiores a 2000 °C (comumente entre 2500 e 3000 °C). Nessa fase, a estrutura amorfa da fibra de carbono é transformada em um arranjo cristalino tipo grafita, promovendo maior módulo elástico e condutividade elétrica e térmica, como explicado por Acedera (2023). Embora aumente o módulo de Young e a condutividade, frequentemente há queda comercial na resistência quando ultrapassadas temperaturas ideais (~1800 °C), pois podem surgir defeitos. Por exigir fornos de alta energia e condições extremas, é restrita a aplicações que exigem desempenho superior, como baterias, supercapacitores e eletrônica avançada (Gupta et al., 2017).

A fiação é a etapa responsável por transformar o precursor em filamentos

contínuos, cuja uniformidade impacta diretamente a performance final das fibras. A qualidade dos filamentos depende do controle preciso da temperatura e viscosidade durante a extrusão (Mochida et al., 1989). No caso do pitch mesofásico, a fusão prévia é essencial: o pitch deve ser aquecido a $\sim 320\text{--}380\text{ }^{\circ}\text{C}$ até atingir viscosidade ideal (30–200 poises; onde 1 poise [P] equivale a 0,1 Pascal-segundo [Pa . s] no Sistema Internacional), permitindo extrusão estável e diâmetros constantes ($\sim 10\text{ }\mu\text{m}$). Se essas condições não forem obedecidas, surgem defeitos estruturais que comprometem etapas posteriores como estabilização e carbonização.

No caso de precursores como o pitch mesofásico, a fusão é uma etapa que antecede a fiação. Edie (1998) descreve que o pitch deve ser aquecido a temperaturas específicas para atingir uma viscosidade ideal, permitindo sua manipulação durante a fiação. Essa fusão também promove a formação de estruturas intermediárias que facilitam a carbonização posterior. No entanto, o processo exige equipamentos especializados e um controle rigoroso para evitar a formação de impurezas ou defeitos estruturais. A fusão adequada do pitch é especialmente importante para aplicações em que o desempenho mecânico das fibras é um requisito fundamental, como no setor aeroespacial.

A purificação do precursor é uma etapa que pode ser necessária dependendo do material utilizado. Baker e Rials (2013) ressaltam que a lignina, por exemplo, requer a remoção de compostos não carbônicos antes de ser submetida à estabilização e carbonização. Essa purificação garante que as reações químicas subsequentes ocorram de forma controlada, resultando em fibras de alta qualidade. Métodos de purificação incluem tratamentos químicos e térmicos que eliminam compostos indesejados, aumentando a eficiência do processo e a qualidade das fibras resultantes. Essa etapa é particularmente importante quando o objetivo é produzir fibras para aplicações de alta performance.

O uso de catalisadores durante etapas como estabilização e carbonização tem se mostrado uma estratégia eficiente para melhorar o rendimento e reduzir os tempos de processamento. Soulis et al. (2020) destacam que os catalisadores aceleram reações químicas críticas, como a formação de ligações cruzadas na estabilização e a remoção de elementos não carbônicos na carbonização.

A estabilização oxidativa e obtenção da PANOX é uma etapa bastante crítica do processo de obtenção de fibras de carbono, pois se ela não for adequada, pode resultar na formação de defeitos internos e na superfície dos filamentos durante a carbonização. Na formação de PANOX, o seja, durante a oxidação da PAN, a aplicação de tensões mecânicas de tração

aos filamentos é importante na prevenção de relaxação das cadeias e conseqüente perda de orientação durante o processo de formação de ligações cruzadas, onde ocorrem alterações físicas e químicas na estrutura das cadeias poliméricas - essas tensões são tipicamente controladas por estiramento controlado dos filamentos, impedindo seu encolhimento e promovendo a orientação das cadeias poliméricas - (Aguila, 1999, p. 41).

Além de melhorar a eficiência, o uso de catalisadores contribui para a sustentabilidade do processo ao reduzir o consumo de energia e os custos operacionais. Pesquisas recentes têm explorado o desenvolvimento de catalisadores específicos para cada tipo de precursor, aumentando a versatilidade dessa abordagem (Soulis et al., 2020).

Cada etapa do processo de produção de fibras de carbono é interdependente, e o sucesso do produto final depende de um controle rigoroso em todas as fases. Huang (2009) enfatiza que o equilíbrio entre tempo, temperatura e atmosfera de processamento em cada etapa é essencial para garantir a qualidade e as propriedades desejadas das fibras. Qualquer desvio em uma etapa pode comprometer o desempenho das fibras em aplicações finais, como dispositivos eletrônicos, estruturas leves e armazenamento de energia. Esse controle rigoroso é facilitado pelo uso de tecnologias de monitoramento em tempo real, que permitem ajustes imediatos durante o processamento (Newcomb; Chae, 2018).

Por fim, o futuro do processo de produção de fibras de carbono está intrinsicamente ligado à inovação nas etapas de produção e à adoção de precursores alternativos. Huang (2009) conclui que o desenvolvimento de métodos mais eficientes e sustentáveis pode expandir as aplicações dessas fibras em setores como transporte, energia renovável e eletrônica. A integração de tecnologias emergentes, como modelagem computacional e inteligência artificial, promete aumentar ainda mais a eficiência do processo, reduzindo custos e promovendo um uso mais amplo das fibras de carbono como um material estratégico em múltiplas indústrias.

2.2.2 TIPOS DE POLÍMEROS UTILIZADOS

A seleção do polímero precursor é a base para a produção de fibras de carbono, influenciando diretamente as propriedades físicas, mecânicas e químicas do material final. Poliacrilonitrila (PAN), lignina, piche mesofásico e rayon são os precursores mais utilizados, cada um com características distintas que atendem a demandas específicas. Edie (1998) explica que a PAN é amplamente utilizada

devido à sua capacidade de formar fibras de carbono com alta resistência mecânica e estabilidade térmica. Esse polímero, no entanto, possui um custo elevado, o que limita sua aplicação a setores de alta tecnologia. Pesquisas recentes têm buscado alternativas sustentáveis e de menor custo para ampliar o uso das fibras de carbono em diferentes indústrias, como transporte, energia e construção (Frank et al., 2014).

A lignina, um polímero natural e abundante, surge como uma alternativa viável para a produção de fibras de carbono, especialmente em aplicações que priorizam a sustentabilidade. Baker e Rials (2013) destacam que a lignina, por ser um subproduto da indústria de papel e celulose, apresenta baixo custo e potencial de redução de resíduos industriais. Entretanto, sua composição química heterogênea exige técnicas avançadas de purificação e processamento para garantir uniformidade e qualidade no material final. Esses desafios têm incentivado pesquisas voltadas à otimização do uso da lignina, que já demonstra grande potencial para substituir a PAN em aplicações menos exigentes, como estruturas leves e materiais compósitos (Norberg et al., 2013).

O piche mesofásico é outro precursor amplamente utilizado, especialmente em aplicações que requerem alta resistência à tração e módulo elástico elevado. Huang (2009) explica que o piche é derivado de petróleo ou carvão, possuindo uma estrutura rica em carbono que facilita a formação de fibras cristalinas durante a carbonização. Essa característica torna o piche uma escolha preferida para setores como aeroespacial e defesa, onde desempenho mecânico superior é indispensável. No entanto, o processamento do piche apresenta desafios, como a necessidade de purificação para remover impurezas que podem comprometer a qualidade das fibras, além de um controle rigoroso da fusão e fiação para garantir uniformidade (Edie, 1998).

O rayon, um polímero derivado da celulose, foi um dos primeiros materiais utilizados para a produção de fibras de carbono. Sua inclusão nesta análise se justifica pelo papel pioneiro que exerceu no desenvolvimento da tecnologia de fibras de carbono, além de ainda apresentar relevância em pesquisas que buscam alternativas renováveis e sustentáveis. Embora seu uso tenha diminuído com o avanço de precursores como a PAN, o rayon ainda é aplicado em situações específicas. Frank et al. (2014) observam que as fibras de carbono produzidas a partir de rayon possuem menor resistência mecânica em comparação àquelas derivadas de PAN ou piche, mas sua origem renovável e biodegradável faz do rayon

uma opção atrativa para projetos que priorizam sustentabilidade. Além disso, o rayon continua sendo explorado em pesquisas que buscam melhorar suas propriedades por meio de tratamentos químicos e térmicos inovadores (Chand, 2000).

A combinação de polímeros tradicionais com nanomateriais é uma estratégia emergente para melhorar as propriedades das fibras de carbono. Simon et al. (2022) exploram o uso de compósitos de PAN e grafeno, demonstrando que essa combinação não apenas aumenta a resistência mecânica das fibras, mas também melhora sua condutividade elétrica. Essa abordagem é particularmente relevante em aplicações que exigem multifuncionalidade, como dispositivos eletrônicos e sistemas de armazenamento de energia. Além disso, a integração de nanomateriais amplia a capacidade das fibras de carbono de atender às demandas de indústrias que buscam inovação e eficiência (Frank et al., 2014).

Os biopolímeros também têm ganhado atenção como precursores para fibras de carbono devido à sua biodegradabilidade e origem renovável. Jiang et al. (2016) ressaltam que materiais como polihidroxialcanoatos (PHA) são promissores para substituir polímeros baseados em petróleo, como a PAN. Apesar de ainda estarem em estágios iniciais de pesquisa, os biopolímeros têm demonstrado potencial para produzir fibras de carbono com propriedades adequadas para aplicações estruturais e elétricas. Essa inovação é crucial para atender às demandas crescentes por soluções sustentáveis, especialmente em um cenário global que busca reduzir a dependência de recursos fósseis (Ahmed et al., 2023).

A microestrutura das fibras de carbono é profundamente influenciada pelo tipo de polímero precursor utilizado, o que impacta diretamente suas propriedades finais. Newcomb (2018) explica que a PAN e o piche mesofásico, por exemplo, geram fibras com níveis distintos de cristalinidade, o que afeta a resistência à tração e o módulo elástico. Essas diferenças tornam cada polímero adequado para aplicações específicas, como estruturas leves em aeronaves ou componentes condutores em sistemas eletrônicos. A escolha do precursor, portanto, deve ser cuidadosamente alinhada às exigências do projeto final e às condições de produção disponíveis (Huang, 2009).

A utilização da lignina como precursor enfrenta desafios específicos relacionados à sua purificação e à uniformidade estrutural das fibras resultantes. Liu et al. (2021) destacam que avanços em tratamentos químicos e térmicos têm

permitido melhorar a qualidade das fibras derivadas de lignina, tornando-as mais competitivas em relação aos materiais tradicionais. Além disso, a lignina oferece vantagens econômicas e ambientais, especialmente quando utilizada em aplicações de menor custo, como materiais para isolamento térmico ou reforço estrutural em compósitos leves (Baker; Rials, 2013).

Os avanços em modelagem computacional têm contribuído significativamente para a escolha e otimização dos polímeros precursores. Eslami-Farsani (2015) explica que essas ferramentas permitem prever o desempenho de diferentes precursores durante o processo de carbonização, reduzindo o desperdício de material e otimizando as condições de processamento. Essa abordagem é especialmente útil para identificar combinações de polímeros e aditivos que maximizem as propriedades desejadas das fibras, como resistência mecânica, condutividade térmica e baixa densidade (Costa, 2024).

Por fim, a diversificação de precursores, como PAN, piche mesofásico, lignina, rayon (devido à sua importância histórica e aplicações renováveis específicas) e biopolímeros, representa uma estratégia para atender às demandas crescentes de diferentes setores industriais. Huang (2009) conclui que a integração de materiais renováveis e nanomateriais, combinada com avanços em técnicas de produção, expande as possibilidades de aplicação das fibras de carbono. Essa diversificação não apenas melhora o desempenho do material, mas também promove a sustentabilidade, alinhando a produção de fibras de carbono aos desafios econômicos e ambientais do futuro (Xu et al., 2020).

2.2.3 VARIÁVEIS QUE AFETAM A QUALIDADE

A qualidade das fibras de carbono é influenciada por uma série de variáveis interligadas, que abrangem desde a seleção do precursor até as condições específicas de cada etapa do processamento. A escolha do precursor, como PAN, lignina ou piche mesofásico, determina a base estrutural e química do material final. Edie (1998) destaca que precursores com alta pureza química e estruturas homogêneas, como a PAN, permitem a produção de fibras com maior resistência mecânica e estabilidade térmica. Por outro lado, precursores naturais como a lignina apresentam desafios devido à sua composição heterogênea, mas possuem vantagens econômicas e ambientais (Baker; Rials, 2013). Cada tipo de precursor

exige adaptações específicas nas condições de processamento, o que demonstra a complexidade do impacto dessa variável na qualidade final do produto.

A temperatura durante a estabilização e carbonização é outra variável crucial. O processo de estabilização, realizado entre 200 °C e 300 °C, converte o precursor em uma estrutura termicamente estável, enquanto a carbonização, que pode alcançar temperaturas superiores a 1500 °C, elimina elementos não carbônicos e promove a formação de uma matriz rica em carbono. Newcomb (2018) enfatiza que a estabilização inadequada pode resultar em deformações estruturais irreversíveis, comprometendo as propriedades finais das fibras. Na carbonização, desvios na temperatura podem causar falhas na remoção de hidrogênio e oxigênio, o que reduz a eficiência do processo e a qualidade do material. Estudos recentes têm explorado o uso de atmosferas controladas para otimizar essas etapas, ajustando a composição gasosa e a distribuição de temperatura (Hameed et al., 2016).

A taxa de aquecimento, tanto na estabilização quanto na carbonização, também exerce grande influência sobre as propriedades das fibras. Taxas de aquecimento rápidas podem criar tensões internas devido à remoção desigual de elementos não carbônicos, levando à formação de microfissuras. Por outro lado, taxas muito lentas aumentam o custo e o tempo de produção sem garantias significativas de melhoria na qualidade final. Banerjee (2022) explicam que a taxa ideal de aquecimento deve ser ajustada de acordo com o tipo de precursor e as propriedades desejadas das fibras, como resistência mecânica, cristalinidade e condutividade elétrica. A introdução de tecnologias de monitoramento térmico em tempo real tem permitido maior controle sobre essa variável, contribuindo para um processamento mais eficiente e preciso (Lee et al., 2023).

A composição e a pressão da atmosfera durante a carbonização são fatores igualmente importantes. Bittencourt e Pandolfelli (2013) apontam que atmosferas inertes, como nitrogênio ou argônio, são utilizadas para evitar oxidação, mas atmosferas reativas contendo aditivos podem ser empregadas para modificar as propriedades químicas das fibras. Por exemplo, a introdução de gases contendo nitrogênio durante a carbonização pode melhorar a resistência ao calor das fibras, enquanto atmosferas ricas em oxigênio podem ser usadas em precursores como a lignina para facilitar a remoção de impurezas. A pressão, por sua vez, deve ser cuidadosamente controlada, pois afeta diretamente a uniformidade das fibras e a formação de sua microestrutura (Huang, 2009).

O tempo de retenção durante a carbonização também desempenha um papel essencial na qualidade final. Newcomb (2018) observa que tempos de retenção insuficientes podem deixar resíduos indesejados de hidrogênio e oxigênio, enquanto tempos excessivos podem levar à degradação térmica do material. O desafio é encontrar o equilíbrio entre eficiência do processo e qualidade final. Estudos recentes têm explorado a possibilidade de reduzir o tempo de retenção por meio da introdução de catalisadores e ajustes nas taxas de aquecimento (Costa Neto et al., 2020). Além disso, precursores como o piche mesofásico exigem tempos de retenção específicos devido à sua complexidade química, destacando a necessidade de personalização para cada tipo de material (Edie, 1998).

A fiação, etapa que transforma o precursor em filamentos, é outra variável que impacta diretamente a qualidade das fibras de carbono. Frank et al. (2014) ressaltam que a uniformidade do diâmetro dos filamentos é crucial para garantir consistência nas propriedades mecânicas e elétricas do material. Pressões inadequadas durante a fiação podem causar irregularidades nos filamentos, comprometendo o desempenho do produto final. Tecnologias avançadas de controle de pressão e automação têm permitido maior precisão nessa etapa, reduzindo desperdícios e garantindo a uniformidade necessária para aplicações de alta performance, como na indústria aeroespacial e automotiva (Chand, 2000).

A composição química do precursor é um fator determinante na formação da microestrutura das fibras durante a carbonização. Rahaman et al. (2007) explicam que a presença de elementos como nitrogênio, hidrogênio e oxigênio no precursor influencia diretamente a cristalinidade e a resistência mecânica das fibras. Ajustes na composição, como a adição de aditivos químicos ou a remoção de impurezas antes da carbonização, têm permitido a personalização das fibras para atender a aplicações específicas. Por exemplo, precursores enriquecidos com nitrogênio produzem fibras mais resistentes ao calor, enquanto aqueles com menor teor de hidrogênio favorecem a formação de estruturas cristalinas.

A grafitação, etapa que transforma fibras carbonizadas em materiais altamente cristalinos, também depende de variáveis críticas como temperatura e tempo de exposição. Edie (1998) destaca que temperaturas superiores a 2000 °C são necessárias para alcançar altos níveis de cristalinidade, o que melhora significativamente a condutividade elétrica e a resistência ao desgaste das fibras. No entanto, essa etapa é cara e intensiva em energia, o que limita sua aplicação a

setores de alta tecnologia. Inovações recentes têm buscado combinar carbonização e grafitação em processos híbridos, reduzindo custos e aumentando a eficiência.

Os catalisadores têm ganhado destaque como uma solução para otimizar o processo e melhorar a qualidade das fibras de carbono. Wangxi, Jie e Gang (2003) demonstram que catalisadores podem acelerar reações críticas durante a estabilização e carbonização, permitindo um melhor controle da formação de ligações cruzadas e da remoção de elementos não carbônicos. No entanto, a escolha do catalisador deve ser cuidadosa, pois compostos inadequados podem introduzir impurezas que afetam propriedades como condutividade térmica e resistência mecânica. Pesquisas recentes têm se concentrado no desenvolvimento de catalisadores específicos para cada tipo de precursor, maximizando os benefícios e minimizando os riscos.

Por fim, tecnologias de monitoramento e automação têm transformado o controle das variáveis no processo de produção de fibras de carbono. Geier et al. (2024) discutem que sensores térmicos e sistemas de inteligência artificial permitem ajustes em tempo real, otimizando parâmetros como temperatura, pressão e composição atmosférica. Essas inovações não apenas melhoram a qualidade do produto final, mas também aumentam a eficiência energética e reduzem os custos operacionais. A integração dessas tecnologias é vista como um passo essencial para atender às demandas crescentes por materiais de alta performance em um mercado global cada vez mais competitivo e sustentável.

2.3 PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE CARBONO

As fibras de carbono são amplamente reconhecidas por suas propriedades mecânicas excepcionais, como alta resistência à tração, elevada rigidez e baixa densidade, que as tornam ideais para aplicações estruturais avançadas. Essas propriedades resultam de sua estrutura microcristalina, formada durante o processo de carbonização e grafitação. Frank et al. (2014) destacam que a organização das cadeias de carbono durante essas etapas é fundamental para alcançar altos níveis de cristalinidade, que influenciam diretamente o desempenho mecânico das fibras. Essa resistência, aliada ao peso reduzido, permite a fabricação de materiais

capazes de suportar grandes cargas em aplicações críticas, como na indústria aeroespacial e automotiva.

Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFCs) são materiais compósitos avançados conhecidos por sua alta relação resistência-peso, excelente rigidez, resistência à corrosão e estabilidade térmica. Essas propriedades tornam os PRFCs ideais para aplicações nas indústrias aeroespacial, automotiva, construção e artigos esportivos. O desempenho dos PRFCs depende em grande parte da interface fibra-matriz, onde uma forte ligação interfacial garante uma transferência de tensão eficaz e a integridade mecânica geral. Tratamentos de superfície e modificações das fibras de carbono são frequentemente empregados para aumentar a resistência ao cisalhamento interlaminar, a tenacidade à fratura e a durabilidade, tornando os PRFCs adequados para aplicações estruturais exigentes (Bisoyl et al., 2025, p. 1).

Também, a possibilidade de controlar as variáveis de processamento possibilita a personalização das propriedades mecânicas para atender às exigências de diferentes projetos industriais. Além das propriedades mecânicas, as fibras de carbono são notáveis por sua estabilidade térmica, característica que as torna resistentes a altas temperaturas sem comprometer sua integridade estrutural. Zhu et al. (2014) enfatizam que a adição de nanomateriais, como grafeno, durante o processo de produção pode melhorar ainda mais a condutividade térmica e a capacidade de dissipar calor das fibras. Isso as torna ideais para componentes em dispositivos eletrônicos e sistemas de armazenamento de energia, onde o gerenciamento térmico é essencial para o desempenho e a longevidade. Essa combinação de leveza, resistência e estabilidade térmica amplia significativamente o leque de aplicações das fibras de carbono, especialmente em setores que demandam materiais altamente eficientes, como tecnologia médica e energia renovável.

A resistência à corrosão é outra propriedade marcante das fibras de carbono, especialmente em ambientes químicos agressivos. Chung (2012) explica que essa característica se deve à inércia química do carbono, que permite que as fibras mantenham sua integridade mesmo quando expostas a substâncias altamente reativas. Compostos reforçados com fibras de carbono são amplamente utilizados em estruturas offshore, como plataformas de petróleo e turbinas eólicas, devido à sua capacidade de resistir a condições adversas, como salinidade e variações extremas de temperatura. Além disso, essa resistência prolonga a vida útil das estruturas, reduzindo custos operacionais e contribuindo para a sustentabilidade de projetos de grande escala.

As propriedades elétricas das fibras de carbono também são altamente valorizadas, especialmente em aplicações que exigem materiais condutores. Lopes (2024) ressalta que a elevada condutividade elétrica das fibras de carbono permite sua utilização em baterias, supercapacitores e sistemas de geração de energia. A integração de fibras de carbono em compósitos inteligentes tem possibilitado a criação de estruturas multifuncionais, como painéis que monitoram deformações estruturais ou geram energia, ou como pontua o autor:

Para que desempenhe com excelência a sua função, eles precisam ter: alta área superficial, porosidade, estabilidade térmica e condutividade elétrica, possuir vários sítios ativos, ser estável quimicamente, boa atividade redox e principalmente propriedades de alta adsorção e dessorção para alto desempenho do supercapacitor. O conjunto disso permite que o eletrodo acumule eficientemente as cargas elétricas durante o carregamento e libere rapidamente durante o descarregamento (Lopes, 2024, p. 52).

As fibras de carbono também possuem propriedades anisotrópicas, o que significa que suas características variam dependendo da orientação das fibras em relação à força aplicada. Clyne e Hull (2019) explicam que essa anisotropia pode ser manipulada para otimizar a resistência mecânica em direções específicas, tornando-as ideais para aplicações em que a direção da carga é bem definida, como em componentes aeroespaciais. Essa personalização permite que engenheiros criem estruturas mais eficientes, minimizando o uso de material e, consequentemente, o peso, sem sacrificar o desempenho. Essa capacidade de adaptação é um dos principais motivos para o crescente uso de fibras de carbono em projetos de engenharia de alta precisão.

A estabilidade química das fibras de carbono é uma característica importante para aplicações em ambientes desafiadores. Bismarck et al. (2016) investigaram como as interfaces entre as fibras e as matrizes epóxi reagem ao envelhecimento em ambientes úmidos, demonstrando que as fibras mantêm sua integridade estrutural mesmo após longos períodos de exposição. Essa estabilidade torna as fibras de carbono ideais para projetos submarinos e outros sistemas que operam em condições extremas, onde a degradação de materiais convencionais é um problema significativo. Essa resistência química também é explorada na fabricação de equipamentos de laboratório e dispositivos médicos, que exigem alta durabilidade e resistência a agentes químicos.

Em aplicações estruturais, as fibras de carbono são amplamente utilizadas para reforçar materiais tradicionais, como concreto e epóxi. Karbhari (2023) estudou

o comportamento de compósitos fibra de carbono/epóxi submetidos a envelhecimento ambiental acelerado, demonstrando que, mesmo em condições adversas, esses compósitos mantêm suas propriedades mecânicas. Isso os torna uma solução eficaz para reforçar pontes, edifícios e outras infraestruturas críticas, especialmente em regiões sujeitas a intempéries severas. Além disso, sua durabilidade reduz significativamente os custos de manutenção, justificando o investimento inicial mais elevado em comparação com materiais convencionais.

A orientação das fibras durante a fabricação dos compósitos impacta diretamente a qualidade e o desempenho do material final. Wang et al. (2021) analisou como a orientação das fibras afeta o desgaste das ferramentas durante o corte de laminados CFRP, destacando a importância de otimizar essa variável para melhorar a eficiência da fabricação. O controle da orientação também é essencial para evitar falhas estruturais e maximizar a resistência ao impacto e à deformação. Essa propriedade é amplamente explorada na produção de componentes para aeronaves, veículos e equipamentos esportivos, onde o desempenho confiável é uma prioridade.

A capacidade de absorver impactos é outra propriedade que destaca as fibras de carbono como material de escolha em aplicações críticas. Yang et al. (2022) avaliou vigas de concreto reforçadas com compósitos híbridos (GFRP/CFRP) submetidas a impactos de baixa velocidade, demonstrando que as fibras de carbono melhoram significativamente a resistência ao impacto e a capacidade de absorção de energia. Essa propriedade as torna ideais para reforçar infraestruturas em regiões propensas a desastres naturais, como terremotos, além de melhorar a segurança em aplicações automotivas e de transporte.

Por fim, a versatilidade das fibras de carbono é evidente em estudos que comparam diferentes configurações, como unidirecionais, tecidos e híbridos. Lv et al. (2022) demonstraram que cada configuração apresenta vantagens distintas em termos de resistência ao impacto e tolerância a danos. As fibras unidirecionais oferecem maior rigidez e resistência, enquanto as configurações híbridas combinam essas propriedades com maior flexibilidade e resistência à fratura. Essa adaptabilidade permite que as fibras de carbono sejam usadas em uma ampla gama de aplicações, desde reforço estrutural em construções até componentes em sistemas avançados de transporte e energia renovável.

2.4 APLICAÇÕES DAS FIBRAS DE CARBONO NA ENERGIA

As fibras de carbono têm se destacado como materiais indispensáveis no setor energético devido à sua alta resistência mecânica, leveza e eficiência térmica. Na indústria automotiva, sua aplicação tem transformado a eficiência energética de veículos, reduzindo o peso e, conseqüentemente, o consumo de combustível. La Rosa (2016) destaca que a substituição de peças metálicas por componentes em fibra de carbono pode resultar em uma diminuição significativa nas emissões de CO₂ (até 15% em veículos convencionais e 8% em elétricos), atendendo a regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas. Além disso, a leveza das fibras melhora a dirigibilidade e o desempenho dos veículos, especialmente em modelos elétricos, onde a redução do peso contribui para maior autonomia. Essa característica coloca as fibras de carbono como protagonistas na busca por soluções sustentáveis no transporte, contribuindo para a transição global rumo a uma mobilidade mais limpa.

O uso das fibras de carbono no armazenamento de energia tem impulsionado a inovação em dispositivos como baterias e supercapacitores, essenciais para a sustentabilidade energética. Wang et al. (2018) investigou a reciclagem de fibras de carbono de compósitos estruturais para uso como eletrodos em supercapacitores, ressaltando sua alta condutividade elétrica e durabilidade química. Esses materiais permitem a criação de dispositivos de armazenamento com maior densidade energética e ciclos de vida prolongados, o que é crucial para dispositivos eletrônicos e sistemas de transporte. Além disso, a reciclagem de fibras reduz significativamente os resíduos industriais, abordando desafios de sustentabilidade e custo, uma vez que as fibras recicladas mantêm boa parte de suas propriedades originais, sendo reutilizadas em aplicações de alto valor.

No setor de energias renováveis, as fibras de carbono desempenham um papel vital no reforço de turbinas eólicas e outras estruturas de geração de energia. Thomas e Ramachandra (2018) apontam que a alta resistência mecânica e a leveza das fibras permitem a construção de pás de turbina mais longas e eficientes, maximizando a captação de energia do vento. Além disso, sua resistência à corrosão garante durabilidade mesmo em ambientes agressivos, como mares abertos. Essa característica é fundamental para reduzir os custos operacionais e de manutenção, aumentando a viabilidade econômica de projetos eólicos. O uso de

fibras de carbono em estruturas renováveis é, portanto, uma solução essencial para atender às demandas globais por energia limpa, especialmente em países com recursos limitados para infraestrutura.

Outra aplicação promissora está na criação de materiais para armazenamento de energia térmica, utilizados em sistemas de energia solar e outras tecnologias emergentes. Ali et al. (2021) explorou compósitos de fibras de carbono para uso em dispositivos térmicos, demonstrando seu potencial para aumentar a eficiência na retenção e liberação de calor. Esses materiais são ideais para dispositivos que armazenam calor em períodos de baixa demanda e o liberam durante picos de consumo, otimizando o uso de recursos energéticos. A integração de fibras de carbono em sistemas térmicos também possibilita o desenvolvimento de tecnologias mais acessíveis e eficientes, especialmente em áreas remotas, onde o acesso à energia confiável é um desafio.

O papel das fibras de carbono em dispositivos eletrônicos avançados também tem se expandido. Jiang et al. (2013) enfatiza o uso de materiais eletroativos baseados em fibras de carbono para criar dispositivos compactos e eficientes de armazenamento de energia, como baterias flexíveis e filmes condutores. Esses materiais permitem a produção de dispositivos eletrônicos que combinam leveza e alta densidade de energia, atendendo às crescentes demandas por tecnologia portátil. Essa abordagem não apenas melhora a funcionalidade de dispositivos como smartphones e wearables, mas também contribui para reduzir o impacto ambiental ao utilizar materiais mais sustentáveis e duráveis em sua fabricação.

A combinação de fibras de carbono com nanomateriais, como nanotubos de carbono e grafeno, tem ampliado suas aplicações em sistemas de armazenamento de energia de alto desempenho. Nitodas, Shah e Das (2025) investigou nanocompósitos que combinam nanotubos de carbono e fibras de carbono, resultando em materiais com condutividade elétrica excepcional (até 2.840 S/m) e resistência mecânica superior. Esses dados são particularmente úteis na fabricação de supercapacitores de última geração, que requerem materiais multifuncionais para suportar altas taxas de carga e descarga. Além disso, essa integração de tecnologias reforça o papel das fibras de carbono em aplicações que demandam alta eficiência energética, como veículos elétricos e redes de energia renovável.

As fibras de carbono também estão sendo integradas em nanogeradores triboelétricos, dispositivos inovadores que convertem energia mecânica em elétrica.

Dong et al. (2018) explica que esses dispositivos aproveitam vibrações e movimentos para gerar pequenas quantidades de energia (densidade de potência $\sim 3,13 \text{ W/m}^2$), sendo ideais para aplicações em sensores autossuficientes ou dispositivos médicos implantáveis. A utilização de fibras de carbono nesses sistemas melhora sua durabilidade e eficiência, permitindo que operem em condições extremas. Esse avanço demonstra como as fibras de carbono são centrais na criação de tecnologias que viabilizam a produção descentralizada de energia, reduzindo a dependência de redes elétricas tradicionais.

No armazenamento de energia térmica, as fibras de carbono também têm mostrado eficiência em aplicações de alta demanda. Samimi et al. (2016) estudou a integração de fibras de carbono em matrizes de materiais de mudança de fase (PCMs), utilizadas para armazenar e liberar energia térmica em edifícios e infraestrutura urbana. Esses materiais não apenas aumentam a eficiência do gerenciamento de calor (condutividade térmica aprimorada em 500%), mas também oferecem soluções sustentáveis para reduzir o consumo energético em grandes centros urbanos. Essa abordagem combina inovação tecnológica com benefícios ambientais, alinhando-se às metas globais de sustentabilidade e eficiência energética.

As fibras de carbono também têm sido exploradas em dispositivos de condução orgânica para aplicações em sistemas de geração e transmissão de energia. Wang et al. (2024) apresentou condutores orgânicos mistos que combinam propriedades elétricas e químicas únicas, projetados para suportar altas tensões em eletrônica de potência. Esses dispositivos, que utilizam fibras de carbono como elemento central, são ideais para redes elétricas inteligentes, onde a eficiência (até 97%) e a resistência a falhas são prioridades. Essa aplicação reflete o potencial das fibras de carbono de integrar funcionalidade avançada em sistemas energéticos críticos, promovendo inovações em larga escala.

Por fim, a produção de fibras de carbono a partir de materiais renováveis, como o rayon - tradicional precursor de fibras de carbono devido à sua origem renovável e ainda utilizado em pesquisas recentes -, têm demonstrado potencial significativo para ampliar sua acessibilidade e aplicações no setor de energia. Wang et al. (2021) investigou o processo de pirólise do rayon, que resulta em fibras com propriedades personalizáveis para sistemas de armazenamento de energia (capacitância específica de 152 F/g). Essa abordagem não apenas diversifica as

fontes de fibras de carbono, mas também promove práticas mais sustentáveis no setor de energia, reduzindo a dependência de materiais derivados de petróleo. Essa evolução garante que as fibras de carbono continuem a desempenhar um papel central na transição global para fontes de energia mais limpas e eficientes.

3 METODOLOGIA

3.1 TIPO DE PESQUISA

Definir o tipo de pesquisa é uma etapa essencial para estabelecer a direção e os métodos que serão empregados em um estudo científico. Lakatos e Marconi (1991) destacam que a pesquisa científica pode ser classificada em exploratória, descritiva ou explicativa, sendo a escolha determinada pelo objetivo central do trabalho. Neste estudo, a abordagem exploratória foi selecionada para investigar de forma ampla as propriedades e aplicações das fibras de carbono no setor de energia, partindo da análise de fontes bibliográficas e revisões de literatura. A natureza exploratória permite identificar lacunas no conhecimento existente, assim como mapear conceitos teóricos e técnicos relevantes. Além disso, o trabalho integra elementos da pesquisa descritiva, já que busca detalhar processos, propriedades e aplicações das fibras de carbono, fornecendo informações claras e organizadas sobre cada aspecto abordado.

A escolha pelo método de revisão bibliográfica, que é o alicerce deste trabalho, também é fundamental para sustentar a análise e interpretação dos dados. Gil (2008) aponta que a pesquisa bibliográfica permite ao pesquisador acessar uma vasta gama de informações previamente produzidas, organizando-as para gerar novos insights sobre o tema em estudo. Neste caso, a revisão bibliográfica abrange publicações acadêmicas, artigos científicos, teses e relatórios técnicos que discutem o uso das fibras de carbono. Essa abordagem oferece flexibilidade e abrangência, permitindo compreender não apenas os aspectos técnicos, mas também os impactos econômicos e ambientais dessas tecnologias. Essa base robusta possibilita uma análise profunda, conectando teoria e prática de maneira coerente.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados neste estudo incluem livros, artigos científicos, relatórios técnicos e teses publicadas principalmente entre 2017 e 2024, selecionados a partir de critérios como relevância, confiabilidade e atualidade. Severino (2017) enfatiza que a escolha de fontes adequadas é crucial para garantir a validade e a qualidade da pesquisa. O material coletado cobre desde os fundamentos teóricos das fibras de carbono até estudos experimentais que detalham

métodos de produção, propriedades e aplicações. A seleção criteriosa incluiu a busca em bases de dados confiáveis, como Scopus e Web of Science, para garantir que os conteúdos revisados tenham embasamento acadêmico sólido.

Além disso, os materiais foram organizados de maneira a refletir a interdisciplinaridade do tema. Minayo (2021) destaca que a pesquisa qualitativa exige a integração de diferentes áreas do conhecimento, como engenharia, química e energia renovável. Essa abordagem amplia a perspectiva da análise, permitindo explorar as interconexões entre os avanços tecnológicos nas fibras de carbono e seus impactos em aplicações energéticas. A diversificação das fontes também contribui para o desenvolvimento de uma visão crítica e fundamentada, essencial para avaliar a relevância e aplicabilidade dos dados coletados.

3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS FIBRAS

O processo de produção das fibras de carbono envolve etapas técnicas complexas, que incluem estabilização, carbonização e, em alguns casos, grafitação. Creswell (2021) aponta que a análise detalhada de processos técnicos exige uma abordagem sistemática, que permita avaliar cada fase individualmente, considerando suas variáveis e impactos no produto final. Este trabalho concentra-se na revisão de métodos desenvolvidos para otimizar a produção de fibras, analisando estudos que abordam desde o tipo de precursor utilizado até as condições de temperatura e tempo. Essas variáveis são cruciais para determinar a qualidade das fibras e suas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas.

O levantamento bibliográfico incluiu também estudos experimentais que descrevem inovações no processo de produção, como a integração de tecnologias avançadas de monitoramento em tempo real. Flick (2008) ressalta que a utilização de estudos empíricos em pesquisas qualitativas enriquece a análise, permitindo compreender os desafios e avanços técnicos na área. Além disso, foram explorados exemplos práticos de aplicações industriais que demonstram como as melhorias no processo de produção impactam diretamente o desempenho das fibras em setores como transporte e energia renovável. Essa abordagem detalhada fornece uma visão abrangente dos avanços tecnológicos relacionados às fibras de carbono.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS

A caracterização das fibras de carbono é uma etapa fundamental para compreender suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, permitindo avaliar seu desempenho em aplicações específicas. A caracterização quantitativa é indispensável para fornecer dados mensuráveis, como resistência à tração, condutividade térmica e densidade. É possível revisar técnicas avançadas de caracterização, como microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia Raman e ensaios mecânicos, que são amplamente utilizadas para investigar a microestrutura das fibras. Essas análises permitem identificar como variáveis como tipo de precursor e condições de carbonização influenciam o produto final.

Além disso, a integração de estudos de caso na caracterização das fibras permite relacionar os resultados laboratoriais com aplicações práticas. Martins (2014) aponta que os estudos de caso são ferramentas eficazes para conectar teoria e prática, permitindo que os resultados obtidos em laboratório sejam aplicados em contextos industriais. Este trabalho examina exemplos de fibras de carbono utilizadas em turbinas eólicas e dispositivos de armazenamento de energia, destacando como as propriedades analisadas impactam o desempenho em diferentes cenários. Essa abordagem amplia a compreensão dos desafios e possibilidades das fibras de carbono, promovendo o avanço de suas aplicações tecnológicas.

3.5 AVALIAÇÃO DAS APLICAÇÕES ENERGÉTICAS

A avaliação das aplicações energéticas das fibras de carbono baseia-se na análise de sua eficiência, viabilidade econômica e impacto ambiental em setores como transporte, energia renovável e eletrônicos. A análise das aplicações práticas é uma forma de validar hipóteses e identificar oportunidades para novos estudos, conectando os resultados da pesquisa com as demandas do mercado. Este trabalho explora casos específicos, como o uso de fibras de carbono em turbinas eólicas, onde sua leveza e resistência aumentam a eficiência de captura de energia. Além disso, são avaliadas as vantagens das fibras em dispositivos de armazenamento de energia, como supercapacitores e baterias.

Os desafios associados à implementação das fibras de carbono no setor energético também são considerados, incluindo os altos custos de produção e as

questões de sustentabilidade. Cervo, Bervian e Silva (2007) enfatizam a importância de integrar análises econômicas e técnicas para garantir a viabilidade das soluções propostas. Este estudo examina como a inovação tecnológica, como a reciclagem de fibras e a integração com nanomateriais, pode superar esses desafios. Essa abordagem multidisciplinar destaca o potencial das fibras de carbono para transformar o setor energético, alinhando eficiência tecnológica, sustentabilidade ambiental e economia circular.

4 RESULTADOS

4.1 PROPRIEDADES OTIMIZADAS DAS FIBRAS DE CARBONO

As fibras de carbono, amplamente reconhecidas por sua leveza e resistência, são materiais essenciais em aplicações avançadas devido às suas propriedades únicas. A otimização das etapas de produção tem sido o foco de inúmeros estudos, que buscam aprimorar características como resistência mecânica, condutividade térmica e estabilidade química. Jena et al. (2016) destaca que a uniformidade da estrutura cristalina é fundamental para garantir alta resistência à tração e estabilidade térmica. Essas propriedades são críticas em setores como aeroespacial, onde os materiais precisam suportar cargas extremas sem aumentar significativamente o peso da estrutura. Além disso, a uniformidade estrutural reduz falhas e melhora a durabilidade, garantindo maior confiabilidade em aplicações críticas. Essa melhoria pode ser alcançada por meio de avanços tecnológicos no controle de variáveis durante a produção, como temperatura e pressão.

A integração de nanomateriais durante a produção é outra estratégia que tem mostrado resultados promissores na melhoria das propriedades das fibras de carbono. Rajabpour (2021) destaca que a incorporação de grafeno às fibras não apenas aumenta sua condutividade térmica e elétrica, mas também melhora significativamente sua resistência ao desgaste e deformação. Essas fibras multifuncionais são especialmente adequadas para aplicações em dispositivos de armazenamento de energia, como supercapacitores, onde tanto a resistência quanto a eficiência elétrica são necessárias. Além disso, a introdução de nanomateriais expande as possibilidades de personalização das fibras, permitindo que sejam projetadas para atender a demandas específicas, como maior resistência em ambientes corrosivos ou melhor desempenho em temperaturas extremas.

O controle da carbonização é uma das etapas mais críticas na produção de fibras de carbono de alta qualidade. Durante essa fase, elementos não carbônicos são eliminados, resultando em uma matriz rica em carbono com elevada cristalinidade. Mao et al. (2020) argumenta que a temperatura e a composição da atmosfera durante a carbonização são determinantes para alcançar o equilíbrio ideal entre resistência mecânica e flexibilidade. Altas temperaturas, por exemplo, favorecem a formação de ligações cruzadas entre as cadeias de carbono,

aumentando a rigidez da fibra. No entanto, desvios nesse processo podem levar a falhas estruturais ou perda de condutividade elétrica, o que evidencia a necessidade de um controle rigoroso dos parâmetros durante essa etapa.

A etapa de estabilização também é essencial para definir as propriedades finais das fibras de carbono, especialmente no que diz respeito à sua resistência térmica. Frank et al. (2014) destacam que, durante a estabilização, as cadeias poliméricas são modificadas para resistir ao calor, garantindo que não se deformem ou rompam durante a carbonização. Ajustes precisos na temperatura e no tempo de estabilização podem melhorar a resistência das fibras, tornando-as ideais para aplicações em ambientes agressivos, como turbinas eólicas offshore ou componentes em reatores nucleares. Esses avanços permitem o desenvolvimento de fibras de carbono com propriedades específicas para cada aplicação, maximizando sua eficiência e durabilidade em condições extremas.

A utilização de precursores alternativos, como lignina e piche mesofásico, apresenta novas possibilidades para a produção de fibras de carbono com propriedades otimizadas. Hermansson, Janssen e Svanström (2019) observam que esses materiais oferecem vantagens econômicas e sustentáveis, pois são derivados de fontes renováveis ou subprodutos industriais. Apesar das limitações iniciais, como a heterogeneidade química, avanços em processos de purificação e estabilização têm permitido a obtenção de fibras de alta qualidade. Essa abordagem não apenas reduz os custos de produção, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental, alinhando-se às demandas globais por soluções tecnológicas mais responsáveis.

A etapa de grafitação, realizada em temperaturas superiores a 2000 °C, é essencial para alcançar propriedades mecânicas e elétricas superiores nas fibras de carbono. Ramos (2013) explicam que esse processo organiza os átomos de carbono em estruturas cristalinas mais densas, o que melhora significativamente a condutividade térmica e elétrica, além de aumentar a resistência ao desgaste. No entanto, a grafitação é um processo intensivo em energia, o que tem impulsionado pesquisas voltadas para a redução de custos e o aumento da eficiência energética. Dubey e Dube (2024) destacam que tecnologias como reciclagem de calor e fornos de alta eficiência estão entre as inovações que visam tornar a grafitação mais acessível, ampliando suas aplicações industriais.

A modificação química das fibras de carbono tem se mostrado uma estratégia

eficaz para melhorar sua interação com matrizes em compósitos, expandindo seu uso em aplicações estruturais. Liu et al. (2015) observam que tratamentos químicos específicos podem aumentar a adesão entre as fibras e as resinas utilizadas na fabricação de compósitos, resultando em materiais com maior resistência à tração e ao impacto. Essa inovação é particularmente relevante para a construção de pontes, edifícios e aeronaves, onde a integridade estrutural é crítica. Além disso, a personalização das superfícies das fibras permite criar compósitos multifuncionais que combinam leveza, resistência e propriedades específicas, como condutividade térmica.

A resistência ao desgaste e a estabilidade dimensional das fibras de carbono podem ser significativamente melhoradas por meio do controle rigoroso das variáveis de produção. Haamed (2016) aponta que a taxa de aquecimento durante a carbonização influencia diretamente a formação de microestruturas homogêneas, reduzindo defeitos que comprometem a durabilidade das fibras. Essas propriedades são cruciais em componentes automotivos e industriais, que enfrentam condições de alta carga e atrito constante. A otimização desse processo não apenas aumenta a vida útil dos produtos, mas também reduz os custos associados à substituição e manutenção, tornando as fibras de carbono ainda mais competitivas no mercado.

Avanços recentes em tecnologias de monitoramento e automação têm transformado a maneira como as fibras de carbono são produzidas, permitindo ajustes em tempo real que resultam em propriedades otimizadas. Mao et al. (2020) destacam que a modelagem computacional tem sido fundamental para prever os impactos de diferentes parâmetros de produção, como temperatura e tempo de processamento, antes mesmo do início da fabricação. Essa abordagem não apenas melhora a eficiência do processo, mas também reduz desperdícios e custos operacionais, tornando a produção mais sustentável. Além disso, o uso de inteligência artificial na análise de dados de produção tem permitido identificar padrões e otimizar ainda mais o desempenho das fibras.

As fibras de carbono continuam a evoluir como materiais de alta performance, atendendo a demandas específicas em setores que exigem soluções tecnológicas avançadas. A pesquisa contínua e a inovação em processos de produção garantem que suas propriedades sejam continuamente aprimoradas, permitindo sua aplicação em um espectro ainda maior de indústrias. Seja em dispositivos eletrônicos, sistemas de transporte ou infraestrutura, as fibras de carbono representam um

marco na engenharia de materiais, combinando eficiência, durabilidade e sustentabilidade em um único produto.

4.2 POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM ENERGIA

As fibras de carbono têm se consolidado como materiais indispensáveis no setor energético devido às suas propriedades excepcionais, como leveza, alta resistência mecânica e excelente condutividade térmica e elétrica. No campo das energias renováveis, elas desempenham um papel fundamental na melhoria da eficiência de turbinas eólicas. Mishnaevsky et al. (2017) ressaltam que a leveza das fibras permite a construção de pás mais longas, capazes de captar uma quantidade maior de energia do vento. Isso resulta em um aumento significativo na eficiência energética das turbinas. Além disso, sua resistência à corrosão garante um desempenho consistente, mesmo em condições adversas, como mares abertos, onde as turbinas enfrentam salinidade e mudanças extremas de temperatura. Essa durabilidade reduz custos de manutenção, aumentando a viabilidade econômica de projetos em regiões com altos potenciais eólicos, como litorais e áreas marítimas.

No armazenamento de energia, as fibras de carbono têm mostrado grande potencial em dispositivos como supercapacitores e baterias avançadas, graças à sua condutividade elétrica superior e estabilidade química. Rajabpour (2021) aponta que a incorporação de grafeno às fibras melhora ainda mais a capacidade de armazenamento de carga, tornando-as ideais para sistemas que exigem alta densidade de energia e ciclos de vida prolongados.

Esses dispositivos são essenciais para atender à crescente demanda por eletrônicos portáteis e veículos elétricos, que exigem soluções leves e eficientes. A integração das fibras de carbono nesses sistemas também contribui para a sustentabilidade, ao reduzir a dependência de materiais menos duráveis e ambientalmente agressivos, promovendo o avanço de tecnologias de energia limpa (Wu et al., 2020; Ma et al., 2021; Vinod et al., 2023).

Outra aplicação promissora das fibras de carbono é sua utilização em nanogeradores triboelétricos, dispositivos que convertem energia mecânica em energia elétrica. Wu (2019) explica que esses sistemas podem capturar energia gerada por movimentos, vibrações ou impactos, tornando-os ideais para alimentar sensores autossuficientes e dispositivos médicos implantáveis. A inclusão de fibras

de carbono melhora a eficiência desses dispositivos, devido à sua leveza e durabilidade, permitindo que operem em condições extremas sem comprometer sua funcionalidade. Esses nanogeradores estão alinhados com a tendência global de descentralização da geração de energia, possibilitando soluções independentes de fontes externas, especialmente em áreas remotas ou em equipamentos de difícil acesso.

O uso de fibras de carbono em dispositivos de armazenamento e gerenciamento de energia térmica também tem ganhado destaque, especialmente em sistemas de energia solar. Macias et al. (2019) destacam que, quando combinadas com nanomateriais, como nanocelulose, as fibras de carbono permitem a criação de dispositivos de alta eficiência térmica, como esferas mesoporosas. Essas estruturas são capazes de armazenar grandes quantidades de energia térmica e liberá-la de forma controlada, sendo especialmente úteis em edifícios e infraestrutura urbana. Essa tecnologia não apenas reduz o consumo de energia, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental, ao aproveitar melhor os recursos disponíveis e minimizar desperdícios.

Além das aplicações em dispositivos de armazenamento e gerenciamento de energia, outro setor em que as fibras de carbono têm promovido avanços significativos é o de transporte. Nesse contexto, as fibras de carbono têm transformado a eficiência energética dos veículos ao substituir materiais convencionais, como aço e alumínio. Liu et al. (2013) observa que essa substituição resulta em uma redução significativa no peso dos veículos, o que melhora a eficiência no consumo de combustível e reduz as emissões de gases de efeito estufa. Essa aplicação é particularmente relevante para veículos elétricos, onde a redução do peso contribui diretamente para aumentar a autonomia das baterias. Além disso, a leveza das fibras de carbono melhora a dirigibilidade e o desempenho geral dos veículos, tornando-os mais competitivos no mercado global, especialmente à medida que cresce a demanda por transportes mais sustentáveis.

A aplicação de fibras de carbono em compósitos estruturais tem permitido sua utilização em projetos inovadores, como turbinas hidroelétricas e dispositivos de captura de energia das ondas do mar. Rubino et al. (2020) apontam que sua resistência mecânica e durabilidade as tornam ideais para essas aplicações, especialmente em ambientes agressivos, como zonas costeiras. Essas fibras garantem maior vida útil às estruturas, reduzindo os custos associados à

manutenção e substituição de componentes. Além disso, a utilização de fibras de carbono nesses sistemas permite a exploração de fontes de energia antes consideradas inviáveis, promovendo a expansão de tecnologias renováveis em larga escala.

Soluções híbridas que combinam geração e armazenamento de energia também têm sido possíveis graças às propriedades multifuncionais das fibras de carbono. Adam et al. (2018) destacam que a integração de nanotubos de carbono e nanocelulose com fibras de carbono cria dispositivos de alta eficiência energética e resistência mecânica. Esses sistemas híbridos são projetados para atender às demandas crescentes de um mundo interconectado, oferecendo desde a geração de energia em locais remotos até o armazenamento eficiente em ambientes urbanos. A versatilidade desses sistemas híbridos reflete o potencial das fibras de carbono em superar os desafios energéticos do futuro.

Na construção civil, as fibras de carbono têm sido usadas para reforçar estruturas que integram sistemas de energia renovável, como edifícios autossuficientes em energia. Zhu et al. (2025) observam que essas fibras permitem a instalação de sistemas solares e eólicos em edifícios, otimizando a eficiência sem comprometer a integridade estrutural. Essa aplicação é especialmente importante em áreas urbanas densamente povoadas, onde o espaço é limitado e a eficiência energética é uma prioridade. Além disso, a resistência das fibras de carbono às intempéries garante sua durabilidade, reduzindo os custos de manutenção e aumentando a vida útil das instalações.

Outra aplicação estratégica das fibras de carbono está em sistemas de armazenamento de hidrogênio, uma tecnologia emergente com grande potencial no setor energético. Lin et al. (2020) destaca que tanques de armazenamento de hidrogênio feitos com fibras de carbono são leves, seguros e capazes de suportar altas pressões. Essa aplicação é essencial para o desenvolvimento de veículos movidos a hidrogênio, que prometem ser uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis. Além disso, o uso de fibras de carbono nesses sistemas melhora a eficiência e reduz os custos operacionais, facilitando a adoção do hidrogênio como uma fonte viável de energia limpa.

Por fim, as fibras de carbono continuam a expandir seu papel no setor de energia, graças à sua versatilidade e às inovações constantes em seu processo de produção. Tang (2019) enfatiza que avanços na integração de fibras de carbono em

dispositivos energéticos, desde pequenos equipamentos portáteis até grandes infraestruturas, estão transformando a forma como a energia é gerada, armazenada e utilizada. Essa evolução reflete não apenas o potencial tecnológico das fibras de carbono, mas também seu alinhamento com os princípios de sustentabilidade, oferecendo soluções para os desafios energéticos globais e contribuindo para um futuro mais eficiente e sustentável.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES POLÍMEROS

Os polímeros utilizados como precursores para a produção de fibras de carbono são cruciais para determinar suas propriedades finais, como resistência, condutividade térmica e elétrica, além de estabilidade química. A poliacrilonitrila (PAN) é considerada o precursor padrão devido à sua composição química favorável, que facilita a formação de fibras altamente cristalinas durante a carbonização. Mao et al. (2020) explica que a PAN possui uma estrutura molecular linear e uniforme, permitindo a criação de ligações cruzadas estáveis durante a estabilização, o que resulta em fibras de alta rigidez e resistência à tração. Contudo, o alto custo de produção e a necessidade de processos químicos complexos tornam a PAN menos viável em aplicações que buscam sustentabilidade econômica e ambiental. A escolha da PAN, portanto, deve ser justificada pela necessidade de materiais de alto desempenho em setores como aeroespacial e militar.

A lignina, por sua vez, é um polímero natural abundante que tem despertado interesse como uma alternativa sustentável à PAN. Por ser um subproduto da indústria de papel e celulose, a lignina apresenta uma pegada ecológica reduzida e custos significativamente menores, tornando-a uma opção atrativa em projetos que priorizam a sustentabilidade. Yang et al. (2021) aponta, no entanto, que sua composição química heterogênea e a presença de impurezas limitam suas propriedades mecânicas e térmicas, exigindo processos de purificação e estabilização mais avançados. Apesar dessas limitações, estudos recentes têm demonstrado que fibras de carbono derivadas de lignina podem ser adequadas para aplicações em energia renovável e construção civil, onde propriedades de alta resistência não são o principal requisito.

O piche mesofásico é outro precursor importante, especialmente em aplicações que demandam alta condutividade térmica e elétrica. Lin et al. (2020)

observa que o piche mesofásico possui uma composição química rica em carbono aromático, o que favorece a formação de estruturas gráficas altamente ordenadas durante a grafitação. Isso resulta em fibras com excelente desempenho térmico, ideais para aplicações em eletrônicos e dispositivos de gerenciamento de calor. No entanto, sua resistência mecânica inferior em comparação à PAN limita sua aplicação em projetos estruturais. Além disso, o custo inicial do piche e sua disponibilidade restrita são desafios que impactam sua adoção em larga escala, tornando-o mais apropriado para nichos específicos.

A combinação de diferentes polímeros tem emergido como uma estratégia promissora para superar as limitações individuais de cada precursor. Rajabpour (2021) destaca que misturas de PAN e grafeno têm mostrado resultados impressionantes, combinando a resistência mecânica da PAN com as propriedades condutivas do grafeno. Essa abordagem híbrida permite a personalização das fibras de carbono para atender a requisitos específicos, como maior resistência ao impacto ou melhor desempenho em dispositivos de armazenamento de energia. A combinação de precursores também abre caminho para inovações em materiais multifuncionais, ampliando seu uso em indústrias que exigem versatilidade e alta performance, como transporte e eletrônicos avançados.

O impacto ambiental é outro fator essencial na comparação entre os diferentes precursores. Creighton et al. (2023) enfatizam que a lignina, por ser um recurso renovável e derivado de resíduos industriais, apresenta vantagens significativas em termos de sustentabilidade. Por outro lado, a produção de fibras de carbono a partir da PAN envolve processos químicos intensivos, que geram resíduos tóxicos e aumentam os custos ambientais do material. Essa realidade tem incentivado a pesquisa por métodos mais ecológicos de produção, como a reutilização de lignina purificada ou a integração de processos de economia circular na fabricação de fibras. Essas iniciativas são especialmente importantes para alinhar a produção de fibras de carbono às crescentes demandas globais por sustentabilidade.

A eficiência no processo de produção também varia consideravelmente entre os diferentes polímeros. Soulis et al. (2020) explicam que a PAN exige temperaturas mais altas e tempos de processamento mais longos durante a carbonização, enquanto o piche mesofásico, devido à sua composição naturalmente rica em carbono, requer menos energia e tempo para atingir propriedades ótimas. Essa

eficiência energética torna o piche mais competitivo em aplicações que priorizam a redução de custos operacionais, embora seu desempenho mecânico inferior seja uma limitação. A escolha do precursor, portanto, deve ser equilibrada entre as propriedades desejadas e a viabilidade econômica do processo, considerando o contexto específico de aplicação.

A integração de nanomateriais em polímeros precursores tradicionais também tem sido investigada como forma de ampliar suas propriedades finais. Hamedi et al. (2014) sugere que a adição de nanotubos de carbono ou nanocelulose à PAN ou à lignina pode melhorar significativamente sua resistência mecânica e condutividade elétrica. Essa abordagem híbrida oferece um enorme potencial para expandir as aplicações das fibras de carbono, tornando-as mais competitivas em setores como energia renovável e transporte. No entanto, os desafios associados à compatibilidade entre os materiais e ao aumento dos custos de produção ainda precisam ser superados para que essas tecnologias sejam adotadas em escala industrial.

Além das propriedades técnicas, os custos associados a cada polímero precursor desempenham um papel determinante na escolha do material. Santos (2011) observa que a lignina, devido à sua abundância e baixo custo, é mais acessível do que a PAN, tornando-se uma escolha atraente para aplicações em que o orçamento é um fator crítico. No entanto, em setores que exigem materiais de alto desempenho, como o aeroespacial, o custo elevado da PAN é justificado por suas propriedades superiores. Essa dicotomia entre custo e desempenho reforça a importância de avaliar as demandas específicas de cada projeto antes de selecionar o polímero mais adequado.

A sustentabilidade dos diferentes polímeros também tem sido amplamente discutida. Rocha (2025) argumenta que o uso de materiais renováveis, como lignina, e práticas de reciclagem de fibras de carbono são estratégias que podem reduzir significativamente o impacto ambiental da produção. Além disso, avanços na tecnologia de purificação têm tornado possível utilizar a lignina em aplicações mais exigentes, como sistemas de armazenamento de energia. Essas iniciativas são cruciais para garantir que as fibras de carbono não apenas atendam às demandas técnicas, mas também se alinhem aos objetivos de sustentabilidade ambiental e eficiência econômica.

Finalmente, a escolha do polímero precursor deve considerar uma análise

integrada de fatores técnicos, econômicos e ambientais. Tang (2019) conclui que, embora a PAN continue sendo a referência para fibras de alta performance, o desenvolvimento de precursores alternativos, como lignina e piche mesofásico, representa uma oportunidade para diversificar as aplicações das fibras de carbono. Essa diversidade de opções permite que as fibras de carbono se adaptem a uma ampla gama de requisitos industriais, garantindo sua relevância em um mercado em constante evolução e oferecendo soluções inovadoras para os desafios energéticos e tecnológicos do futuro.

5 DISCUSSÕES

5.1 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

A comparação com a literatura reforça a relevância dos achados deste estudo ao destacar as inovações e os desafios associados à produção de fibras de carbono a partir de diferentes polímeros. A poliacrilonitrila (PAN) continua sendo amplamente reconhecida como o principal precursor para a produção de fibras de alto desempenho, devido à sua estrutura química favorável para a formação de materiais altamente cristalinos. Mao et al. (2020) explica que a PAN permite a criação de ligações cruzadas estáveis durante o processo de estabilização, resultando em fibras com elevada resistência à tração e durabilidade. Este estudo corroborou essas observações, evidenciando que as fibras baseadas em PAN são amplamente utilizadas em setores críticos como aeroespacial e militar. Contudo, os desafios associados aos altos custos de produção e ao impacto ambiental continuam sendo uma barreira significativa para sua aplicação em larga escala, especialmente em indústrias mais sensíveis ao custo.

A lignina, um polímero natural derivado da indústria de papel e celulose, desponta como uma alternativa promissora à PAN, particularmente em aplicações que exigem maior sustentabilidade. Santos (2011) ressalta que a lignina apresenta vantagens ambientais e econômicas, pois é um subproduto abundante e de baixo custo. Este estudo identificou resultados consistentes, destacando que as fibras de carbono produzidas a partir de lignina têm potencial para aplicações em energia renovável e construção civil. No entanto, a literatura e os resultados obtidos convergem ao apontar que a composição química heterogênea da lignina dificulta a obtenção de fibras com propriedades uniformes. A melhoria de processos de purificação e estabilização é essencial para explorar plenamente seu potencial, especialmente em setores que requerem maior desempenho técnico.

O piche mesofásico, conhecido por sua composição rica em carbono aromático, tem demonstrado ser uma opção eficiente para a produção de fibras de carbono com alta condutividade térmica e elétrica. Lin et al. (2020) explica que, durante o processo de grafitação, o piche promove a formação de estruturas altamente ordenadas, tornando-o ideal para dispositivos eletrônicos e sistemas de gerenciamento de calor. Este estudo confirmou essas observações, destacando que

o piche mesofásico é particularmente eficiente em aplicações que priorizam propriedades térmicas, como dissipadores de calor e componentes eletrônicos. No entanto, sua menor resistência mecânica, em comparação com a PAN, limita seu uso em aplicações estruturais. A literatura reforça que sua aplicação deve ser direcionada a nichos específicos onde suas propriedades sejam plenamente aproveitadas.

A integração de nanomateriais, como o grafeno, em polímeros tradicionais tem sido amplamente discutida na literatura e é consistente com os achados deste estudo. Rajabpour (2021) aponta que a combinação de grafeno com PAN resulta em fibras de carbono com propriedades multifuncionais, incluindo maior resistência ao impacto, condutividade elétrica aprimorada e leveza. Este estudo observou que essas fibras híbridas são particularmente úteis em setores como transporte e energia renovável, onde a eficiência e a versatilidade são fundamentais. No entanto, tanto a literatura quanto os dados obtidos destacam os desafios associados à escalabilidade desses processos, devido aos altos custos e à complexidade técnica de integrar nanomateriais com polímeros convencionais.

A eficiência energética dos processos de produção de fibras de carbono também foi amplamente discutida e validada pela literatura. Soulis et al. (2020) argumenta que o piche mesofásico, por sua composição naturalmente rica em carbono, requer menos energia durante a carbonização, enquanto a PAN demanda temperaturas mais altas e tempos mais longos de processamento. Este estudo confirma essas diferenças, destacando que os custos operacionais e a eficiência energética são fatores determinantes na escolha do precursor. A literatura reforça que a eficiência do piche em termos de energia o torna mais competitivo em aplicações de grande escala, enquanto a PAN permanece indispensável em projetos que exigem materiais de alto desempenho, mesmo com maior consumo energético.

A sustentabilidade ambiental tem sido um tema recorrente na literatura e nos resultados deste estudo, especialmente em relação ao impacto dos diferentes precursores. Obasa et al. (2022) enfatizam que o uso de lignina e práticas de reciclagem, como a reutilização de resíduos industriais, são fundamentais para reduzir a pegada ambiental da produção de fibras de carbono. Este estudo confirma que a lignina é uma opção viável para aplicações menos exigentes, alinhando-se às tendências globais de sustentabilidade. No entanto, a PAN continua apresentando desafios ambientais significativos, devido aos resíduos gerados durante seu

processamento. A literatura sugere que avanços em tecnologias de reciclagem podem mitigar esses impactos, tornando os processos mais alinhados às demandas ambientais.

Os custos associados aos diferentes precursores também desempenham um papel central na comparação com a literatura. Rocha (2025) argumenta que, embora a PAN ofereça o melhor desempenho técnico, seu custo elevado limita sua acessibilidade para aplicações em larga escala. Este estudo reforça essa análise, destacando que a lignina, devido ao seu baixo custo e abundância, é mais adequada para projetos que priorizam sustentabilidade econômica. No entanto, a literatura também aponta que o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para o processamento da lignina pode reduzir ainda mais os custos, ampliando seu uso em setores que atualmente dependem da PAN.

A personalização das fibras de carbono para atender a demandas específicas é outro aspecto que tem sido amplamente explorado na literatura. Hamedi (2014) discute que a integração de nanotubos de carbono e nanocelulose em polímeros precursores permite a criação de fibras com propriedades customizadas, como maior resistência à tração ou condutividade aprimorada. Este estudo confirmou que a personalização é uma tendência crescente, especialmente em setores como energia renovável e transporte, onde a adaptação às necessidades específicas dos projetos é essencial. Contudo, tanto os dados obtidos quanto a literatura destacam os desafios técnicos e econômicos associados a esses processos inovadores.

A literatura também valida os achados sobre a influência das propriedades térmicas e mecânicas dos diferentes precursores. Tang (2019) conclui que o piche mesofásico se destaca em propriedades térmicas, enquanto a PAN lidera em resistência mecânica. Este estudo reforça essas observações, evidenciando que a escolha do precursor deve ser guiada pelas necessidades específicas de cada aplicação. Portanto, esses resultados reforçam a importância de alinhar a escolha do precursor ao perfil de aplicação desejado, considerando as propriedades mecânicas e térmicas características de cada material, como já discutido anteriormente neste trabalho.

Por fim, a comparação com a literatura destaca uma convergência significativa entre as tendências de pesquisa e as demandas do mercado. Souto, Calado e Pereira (2015) argumentam que a diversificação dos precursores, aliada a práticas de sustentabilidade, é crucial para ampliar a aplicação das fibras de carbono

em setores emergentes. Este estudo confirma que, enquanto a PAN continua sendo o principal material para aplicações de alta performance, alternativas como lignina e piche mesofásico representam uma oportunidade crescente para atender às demandas por soluções mais acessíveis e ecológicas. Essa evolução demonstra como as fibras de carbono estão se adaptando às exigências de um mundo em rápida transformação tecnológica e ambiental.

5.2 DESEMPENHO DAS FIBRAS

O desempenho das fibras de carbono é definido por uma combinação de propriedades intrínsecas dos polímeros precursores, condições do processo de produção e requisitos específicos das aplicações. A poliacrilonitrila (PAN) é amplamente reconhecida como o precursor padrão devido à sua capacidade de formar estruturas cristalinas durante a estabilização e carbonização. Mao et al. (2020) destaca que a PAN permite alcançar resistência mecânica e rigidez excepcionais, tornando-a indispensável em setores como aeroespacial e transporte, onde o desempenho estrutural é essencial. Contudo, a obtenção dessas propriedades depende de um controle rigoroso das etapas de produção, incluindo a temperatura de carbonização e o tempo de estabilização. Pequenas variações nesses parâmetros podem afetar significativamente a qualidade final das fibras, o que ressalta a necessidade de processos industriais bem calibrados e investimentos em tecnologia de produção.

As fibras de carbono derivadas de lignina têm se mostrado promissoras em aplicações que exigem custo reduzido e sustentabilidade, embora ainda enfrentem desafios relacionados ao desempenho mecânico. Quinino (2015) aponta que, apesar de apresentarem resistência inferior à PAN, as fibras de lignina destacam-se por sua leveza e viabilidade econômica. Sua natureza renovável e disponibilidade abundante oferecem uma vantagem considerável em termos de sustentabilidade, especialmente em aplicações como construção civil e dispositivos de energia renovável. Entretanto, a heterogeneidade química da lignina resulta em propriedades menos uniformes, limitando sua aplicação em setores que demandam alta confiabilidade estrutural. Para superar essas barreiras, pesquisas estão focadas no desenvolvimento de processos de purificação mais eficazes, capazes de melhorar as características mecânicas e químicas das fibras derivadas de lignina.

O piche mesofásico também é amplamente utilizado na produção de fibras de carbono, especialmente para aplicações que demandam alta condutividade térmica e elétrica. Lin et al. (2020) observa que, durante a grafitação, o piche mesofásico promove a formação de estruturas cristalinas altamente ordenadas, tornando-o ideal para dispositivos eletrônicos e sistemas de gerenciamento de calor. Além disso, as fibras de piche possuem uma eficiência energética superior em comparação às de PAN, devido à sua composição rica em carbono aromático, que requer menos energia no processo de carbonização. Contudo, a menor resistência mecânica dessas fibras limita sua aplicabilidade em setores estruturais, como transporte e infraestrutura. Essa característica ressalta a importância de selecionar o precursor mais adequado com base nas demandas específicas de cada aplicação.

A integração de nanomateriais, como grafeno e nanotubos de carbono, tem se destacado como uma estratégia para melhorar o desempenho das fibras de carbono, permitindo o desenvolvimento de materiais multifuncionais. Rajabpour (2021) explica que a adição de grafeno aumenta significativamente a resistência mecânica e a condutividade elétrica das fibras, enquanto os nanotubos ampliam a estabilidade térmica e a resistência ao impacto. Essas fibras híbridas são particularmente úteis em setores como transporte e energia renovável, onde a combinação de leveza e alta eficiência é essencial. Contudo, a literatura e os dados obtidos neste estudo indicam que os custos elevados e os desafios técnicos relacionados à compatibilidade dos materiais continuam sendo barreiras significativas para a escalabilidade dessas inovações. Avanços em técnicas de produção são necessários para viabilizar a ampla adoção dessas tecnologias.

O desempenho das fibras de carbono também está intimamente ligado ao processo de carbonização, que influencia sua cristalinidade, resistência química e estabilidade estrutural. Mao et al. (2020) ressalta que temperaturas elevadas durante a carbonização promovem a formação de estruturas altamente cristalinas, o que aumenta a resistência à tração e a estabilidade térmica das fibras. Contudo, temperaturas muito altas podem elevar os custos de produção, tornando o processo menos viável em aplicações de larga escala. Este equilíbrio entre desempenho e custos é particularmente importante em setores como construção civil e energia renovável, onde a eficiência econômica é uma prioridade. Além disso, melhorias no controle das condições de carbonização, como a atmosfera e o tempo de reação, podem otimizar ainda mais o desempenho das fibras para atender a requisitos

específicos.

As propriedades térmicas e elétricas desempenham um papel crucial no desempenho das fibras de carbono em dispositivos de armazenamento e gerenciamento de energia. Lopes (2024) argumenta que fibras com alta condutividade térmica são fundamentais para a eficiência de dispositivos eletrônicos e sistemas de energia renovável, como supercapacitores e baterias avançadas. Esses sistemas dependem de materiais capazes de dissipar calor rapidamente, garantindo maior durabilidade e desempenho sob condições de alta carga. A literatura também indica que a otimização da grafitação pode melhorar ainda mais essas propriedades, ampliando o potencial das fibras de carbono para aplicações em setores emergentes, como eletrônica portátil e infraestrutura urbana sustentável.

A resistência ao impacto e ao desgaste também são indicadores críticos do desempenho das fibras de carbono em aplicações industriais. Tang (2019) destaca que fibras de PAN são particularmente eficazes em aplicações que exigem alta resistência ao impacto, como componentes automotivos e aeroespaciais. Por outro lado, as fibras de piche, embora menos resistentes ao impacto, demonstram excelente desempenho em ambientes estáticos, como dissipadores de calor e dispositivos de armazenamento de energia. Essa dicotomia ressalta a importância de alinhar as propriedades das fibras às demandas específicas de cada setor. Além disso, estudos recentes mostram que a adição de nanomateriais pode melhorar significativamente a resistência ao desgaste, tornando as fibras de carbono mais competitivas em aplicações que exigem durabilidade prolongada.

A sustentabilidade das fibras de carbono também está diretamente relacionada ao seu desempenho em aplicações de longo prazo. Wu et al. (2020) observam que fibras derivadas de lignina oferecem uma alternativa sustentável para projetos que priorizam o custo-benefício e a redução do impacto ambiental. Embora essas fibras apresentem limitações em termos de resistência mecânica, elas têm se mostrado eficazes em compósitos estruturais para aplicações como turbinas eólicas e dispositivos de energia renovável. Além disso, avanços na integração de fibras de lignina com resinas poliméricas têm ampliado suas possibilidades de uso, permitindo que elas desempenhem um papel mais relevante em projetos de grande escala.

A durabilidade é outro aspecto central na avaliação do desempenho das fibras de carbono, especialmente em aplicações industriais e energéticas. Hamedi (2014) ressalta que a resistência à corrosão e à fadiga é essencial para materiais utilizados

em ambientes extremos, como turbinas eólicas offshore e veículos de transporte pesado. Fibras de PAN continuam sendo a referência nesses quesitos, enquanto as de lignina e piche mesofásico ainda exigem melhorias significativas para alcançar níveis comparáveis de desempenho. Essas limitações têm incentivado investimentos em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a durabilidade desses materiais, tornando-os mais competitivos em mercados exigentes.

Finalmente, o desempenho das fibras de carbono é maximizado quando integrado a sistemas híbridos e multifuncionais. Martins (2014) argumenta que a combinação de fibras de carbono com outras tecnologias avançadas, como nanocompósitos e sistemas de armazenamento híbrido, pode ampliar significativamente suas aplicações. Essas integrações, contudo, exigem uma abordagem interdisciplinar que inclua avanços em design, engenharia de materiais e processos de produção. Apesar dos desafios, o potencial dessas combinações para revolucionar setores como energia e transporte é inegável, destacando as fibras de carbono como materiais estratégicos para atender às demandas de um mercado global em rápida transformação.

5.3 IMPACTO NA SUSTENTABILIDADE

As fibras de carbono têm desempenhado um papel crescente em soluções tecnológicas que buscam aliar eficiência e sustentabilidade, especialmente em setores como energia renovável, transporte e construção. Seu impacto na sustentabilidade está relacionado tanto ao processo de produção quanto às aplicações que promovem a redução do consumo de recursos e emissões. Bisheh e Abdin (2023) destacam que as fibras de carbono derivadas de lignina representam uma alternativa ambientalmente sustentável, devido à origem renovável desse precursor e à sua abundância como subproduto da indústria de papel e celulose. Contudo, o impacto ambiental positivo dessas fibras depende do desenvolvimento de processos industriais que minimizem o uso de químicos tóxicos e energia, o que ainda é um desafio em larga escala.

A substituição de materiais convencionais, como aço e alumínio, por fibras de carbono tem contribuído para a sustentabilidade em indústrias que buscam reduzir o peso e o consumo de energia de seus produtos. Witik et al. (2013) apontam que a leveza das fibras de carbono permite a fabricação de veículos mais eficientes,

resultando em menor consumo de combustível e redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a produção de fibras de carbono, especialmente a partir de PAN, ainda apresenta desafios ambientais, como a geração de resíduos químicos e o alto consumo energético durante a carbonização. Isso reforça a necessidade de investir em precursores alternativos, como lignina e piche mesofásico, para tornar o processo mais sustentável.

Outro aspecto crítico do impacto sustentável das fibras de carbono está relacionado à sua durabilidade e vida útil. Yang et al. (2021) explicam que a longa durabilidade das fibras reduz a necessidade de substituições frequentes, diminuindo o desperdício de materiais e os custos associados à manutenção de infraestrutura. Em aplicações como turbinas eólicas e dispositivos de armazenamento de energia, essa característica é essencial para aumentar a viabilidade econômica e ambiental de projetos de grande escala. Contudo, o desafio da reciclagem de fibras de carbono após o fim de sua vida útil ainda limita seu potencial sustentável, exigindo avanços em tecnologias de recuperação e reuso.

O uso de fibras de carbono em sistemas de energia renovável, como turbinas eólicas e estruturas de captura de energia das ondas do mar, tem gerado impactos positivos significativos na sustentabilidade energética. Mishnaevsky et al. (2017) destacam que essas fibras permitem a construção de estruturas mais leves e eficientes, aumentando a captação de energia sem comprometer a resistência mecânica. Essa combinação de desempenho e sustentabilidade é essencial para atender às metas globais de redução de carbono. No entanto, a literatura sugere que o impacto ambiental total dessas aplicações deve considerar o ciclo de vida completo das fibras, incluindo a extração de matérias-primas e o descarte.

Apesar dos desafios associados à reciclagem de fibras de carbono, pesquisas recentes têm buscado estratégias para promover avanços na economia circular, especialmente por meio do reaproveitamento de resíduos industriais na produção de novos materiais. Lin et al. (2020) observa que a reutilização de fibras de carbono provenientes de estruturas desativadas, como aeronaves e turbinas, pode reduzir significativamente o impacto ambiental do setor. Além disso, o desenvolvimento de precursores recicláveis, como o piche mesofásico, contribui para minimizar a geração de resíduos e promover uma abordagem mais sustentável na fabricação de fibras. Contudo, a implementação de processos industriais para reciclagem em larga escala ainda enfrenta barreiras econômicas e técnicas que precisam ser superadas.

O impacto positivo das fibras de carbono na sustentabilidade também se reflete na eficiência energética que proporcionam em sistemas de transporte e construção. Tang et al. (2019) destaca que materiais reforçados com fibras de carbono permitem a construção de estruturas mais leves e resistentes, resultando em economia de energia e redução de emissões ao longo de sua vida útil. Essa aplicação é particularmente importante em áreas urbanas densamente povoadas, onde a otimização de recursos é essencial. Contudo, o custo elevado das fibras de carbono ainda limita sua adoção em projetos de infraestrutura pública, destacando a necessidade de políticas que incentivem a pesquisa e o desenvolvimento de alternativas mais acessíveis.

Em termos de redução do impacto ambiental, o uso de lignina como precursor para a produção de fibras de carbono oferece benefícios significativos. Souto (2015) ressalta que, além de ser um recurso renovável, a lignina é um subproduto abundante que, de outra forma, seria descartado ou queimado, contribuindo para emissões de carbono. Transformar esse material em fibras de carbono não apenas reduz o desperdício, mas também oferece uma alternativa sustentável à PAN, que exige processos químicos intensivos e ambientalmente prejudiciais. No entanto, os desafios técnicos associados à purificação e estabilização da lignina ainda limitam sua ampla adoção, evidenciando a necessidade de mais pesquisas nessa área.

O uso de fibras de carbono em dispositivos de armazenamento de energia, como supercapacitores e baterias avançadas, tem contribuído para a sustentabilidade ao aumentar a eficiência desses sistemas. Rajabpour et al (2021) explica que as fibras de carbono melhoram a densidade energética e a durabilidade dos dispositivos, reduzindo a dependência de recursos naturais não renováveis e prolongando a vida útil dos produtos. Contudo, a literatura aponta que o impacto ambiental positivo dessas inovações depende da origem sustentável dos precursores utilizados na fabricação das fibras, reforçando a importância de alternativas como lignina e piche mesofásico.

As fibras de carbono também têm demonstrado potencial para reduzir os impactos ambientais na construção civil, especialmente em projetos de infraestrutura sustentável. Hamedi et al (2014) destaca que a incorporação de fibras de carbono em compósitos estruturais permite a construção de edifícios mais leves e resistentes, reduzindo o consumo de materiais e energia durante a construção e a operação. Além disso, esses compósitos podem ser projetados para integrar

sistemas de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas, maximizando o impacto positivo na sustentabilidade urbana. Contudo, o custo elevado das fibras ainda é uma barreira que limita sua adoção em larga escala, especialmente em países em desenvolvimento.

Por fim, o impacto das fibras de carbono na sustentabilidade reflete um equilíbrio entre desempenho técnico, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental. Souto (2015) conclui que, embora a PAN continue a ser o principal precursor para fibras de alto desempenho, alternativas como lignina e piche mesofásico oferecem oportunidades para diversificar a produção e reduzir impactos ambientais. O desenvolvimento de tecnologias de reciclagem e a integração de fibras de carbono em sistemas de economia circular são passos essenciais para maximizar seu impacto sustentável. Essas iniciativas garantem que as fibras de carbono continuem a ser um material estratégico na transição para um futuro mais eficiente e ecologicamente responsável.

6 CONCLUSÃO

A conclusão sintetiza os principais achados da pesquisa, destaca as contribuições do estudo para o avanço da engenharia de energia e reflete sobre as limitações e perspectivas para investigações futuras no campo das fibras de carbono.

Este estudo explorou a produção de fibras de carbono a partir de diferentes polímeros precursores, como poliacrilonitrila (PAN), lignina e piche mesofásico, destacando suas propriedades, desafios de produção e potenciais aplicações. As fibras de PAN demonstraram desempenho superior em termos de resistência mecânica e estabilidade térmica, sendo ideais para setores que exigem materiais de alta performance. A lignina, por sua vez, mostrou-se uma alternativa promissora para aplicações menos exigentes, devido ao seu baixo custo e impacto ambiental reduzido. Já o piche mesofásico destacou-se pela eficiência energética no processo de produção e pelas propriedades térmicas, embora sua resistência mecânica seja limitada. Essas análises reforçam a importância de alinhar a escolha do precursor às necessidades específicas de cada aplicação.

O estudo contribui significativamente para a engenharia de energia ao ampliar o entendimento sobre o uso de fibras de carbono em sistemas energéticos. A integração dessas fibras em turbinas eólicas, dispositivos de armazenamento de energia e materiais compósitos para infraestrutura sustentável representa um avanço no desenvolvimento de tecnologias leves, eficientes e duráveis. Além disso, ao abordar precursores alternativos, como lignina e piche, a pesquisa abre novas possibilidades para reduzir custos e promover a sustentabilidade no setor energético. Essas descobertas fornecem uma base sólida para a implementação de materiais avançados em soluções energéticas inovadoras, alinhadas às metas globais de eficiência e sustentabilidade.

Apesar dos avanços apresentados, este estudo enfrentou limitações relacionadas à disponibilidade de dados experimentais para comparar, em condições controladas, as propriedades das fibras derivadas de diferentes precursores. Estudos futuros devem focar na análise prática de desempenho em aplicações específicas, como supercapacitores, combinação de precursores, sistemas híbridos de geração e armazenamento de energia. Além disso, há uma necessidade de explorar tecnologias mais eficientes para a purificação da lignina e a

compatibilização de nanomateriais com polímeros precursores. Pesquisas adicionais podem também investigar a viabilidade de novos precursores, integrando técnicas de economia circular para maximizar o impacto sustentável das fibras de carbono. Esses esforços são fundamentais para garantir que as inovações discutidas neste trabalho se convertam em soluções práticas e escaláveis para o mercado global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEDERA, Rose Anne. **How does graphitization affect the structure and properties of carbon fiber papers?** 2023. Disponível em: <https://blog.caplinq.com/how-does-graphitization-affect-the-structure-and-properties-of-carbon-fiber-papers_4869/?utm_source=chatgpt.com> Acesso em: 12 jun. 2025.

ADAM, T. J.; LIAO, G.; PETERSEN, J.; GEIER, S.; FINKE, B.; WIERACH, P.; KWADE, A.; WIEDEMANN, M. Multifunctional composites for future energy storage in aerospace structures. **Energies**, v. 11, n. 2, p. 335, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en11020335>> Acesso em: 25 ago. 2025.

AGUILA, Z.J. **Formulação de compósitos reforçados com fibras de PANOX e polpa de aramida utilizados em materiais de fricção**. Campinas: FEQ, UNICAMP, Dissertação (Mestrado)—Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1999. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/296824577.pdf>> Acesso em: 12 jun. 2025.

AHMED et al. A Comprehensive Review on Recent Developments of Natural Fiber Composites Synthesis, Processing, Properties, And Characterization. **Engineering research express**, v. 5, n. 3, p. 032001–032001, 4 ago. 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/372714336_A_Comprehensive_Review_o_n_Recent_Developments_of_Natural_Fiber_Composites_Synthesis_Processing_Properties_And_Characterization> Acesso em: 12 jun. 2025.

ALI, Zulfiqar et al. Preparation, properties and mechanisms of carbon fiber/polymer composites for thermal management applications. **Polymers**, v. 13, n. 1, p. 169, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/13/1/169>> Acesso em: 12 jun. 2025.

BAKER, Darren A.; RIALS, Timothy G. Recent advances in low-cost carbon fiber manufacture from lignin. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 130, n. 2, p. 713–728, 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.39273>> Acesso em: 12 jun. 2025.

BANERJEE, Debjoyti. **Thermal Stability and Degradation of Bio-Additive Modified Fibers**. North Carolina State University, 2022. Disponível em: Disponível em: <<https://www.proquest.com/openview/2563d520090a0536e845ac62eee34b64/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>> Acesso em: 12 jun. 2025.

BENGTSSON, A. et al. **Carbon Fibers from Lignin–Cellulose Precursors**: Effect of Carbonization Conditions. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 17, p. 6826–6833, 15 abr. 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/340669995_Carbon_Fibers_from_Lignin-Cellulose_Precursors_Effect_of_Carbonization_Conditions> Acesso em: 12 jun. 2025.

BENGTSSON, A. et al. Continuous Stabilization and Carbonization of a Lignin–Cellulose Precursor to Carbon Fiber. **ACS Omega**, v. 7, n. 19, p.

16793–16802, 5 maio 2022. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c01806>> Acesso em: 12 jun. 2025.

BISHEH, H.; ABDIN, Y. Carbon fibers: from PAN to asphaltene precursors; a state-of-art review. **C**, v. 9, n. 1, p. 19, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2311-5629/9/1/19>> Acesso em: 12 jun. 2025.

BISMARCK, A. et al. Development of novel composites through fibre and interface/interphase modification. In: IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2016. p. 012001. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/139/1/012001>> Acesso em: 12 jun. 2025.

BISOYI, S.; SALINS, S. S.; SACHIDANANDA, H. K. Enhancing mechanical properties of carbon fiber-reinforced composites via acid activation. **Discover Applied Sciences**, v. 7, n. 5, 2 maio 2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/391401024_Enhancing_mechanical_properties_of_carbon_fiber-reinforced_composites_via_acid_activation> Acesso em: 12 jun. 2025.

BITENCOURT, C. S.; PANDOLFELLI, V. C. Resinas termofixas e a produção de refratários contendo carbono: base teórica e insights para futuros desenvolvimentos. **Cerâmica**, v. 59, p. 1-26, 2013. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/YrWxtCw4zR6sM5VstLwh4tQ/?lang=pt>> Acesso em: 12 jun. 2025.

CERVO, A.L.; BERVIAN, P.A. Metodologia científica. In: **Metodologia científica**. 2007. 6a edição, cap. 7, p. 126. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/341/pdf/0?code=jmPgTJxb2CosQlq9HBMdGtEAwc2Sh5IkKnozO4Ar9H2b19V2LHs+Tun8UYjoWMPtwYrlxLJUXzBHtNGJBblWMQ==>>> Acesso em: 12 jun. 2025.

CHAND, S. Review carbon fibers for composites. **Journal of materials science**, v. 35, p. 1303-1313, 2000. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1004780301489>> Acesso em: 12 jun. 2025.

CHUNG, Deborah Duen Ling. Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing. **Carbon**, v. 50, n. 9, p. 3342-3353, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622312000620?via%3Dihub>> Acesso em: 12 jun. 2025..

CLYNE, T.W.; HULL, D. **An introduction to composite materials**. Cambridge university press, 2019. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/highereducation/books/an-introduction-to-composite-materials/402C0AAFF04754C676E22D2B1F9080DB#overview>> Acesso em: 12 jun. 2025.

COSTA NETO, D.S. et al. **Reutilização de lodo de esgoto para produção de catalisadores e aplicação no processo Fenton heterogêneo**. 2020. Disponível em: <<http://tede2.uefs.br:8080/handle/tede/1221>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

COSTA, M.C. **Desenvolvimento de Filamento Cimentício Utilizando Óxido de Grafeno e Grafite no Processo de Manufatura Aditiva Visando Contribuição na Redução de Impactos Ambientais na Construção Civil**. 2024. Disponível em: <<https://www.up.edu.br/wp-content/uploads/2025/04/TESE-MARLA-CORSO.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

CREIGHTON, Claudia et al. An introduction to lignin-based carbon fibre. **BioProducts**, c. 7, p. 87, 2023. Disponível em: <<https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/9783110791228-007/html>> Acesso em: 12 jun. 2025.

CRESWELL, J.W.; CRESWELL, J. David. **Projeto de pesquisa: Métodos qualitativo, quantitativo e misto**. Penso Editora, 2021. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/Projeto-pesquisa-M%C3%A9todos-qualitativo-quantitativo-ebook/dp/B08ZNQ9VH1>> Acesso em: 12 jun. 2025.

DENK, J. et al. Novel multifibrillar carbon and oxidation-stable carbon/ceramic hybrid fibers consisting of thousands of individual nanofibers with high tensile strength. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 5 ago. 2024. Disponível em: <<https://assets-eu.researchsquare.com/files/rs-4423316/v1/ae14d6fc-f657-4166-abc8-830c46b7fb80.pdf?c=1723479458>> Acesso em: 12 jun. 2025.

DONG, K. et al. Versatile core–sheath yarn for sustainable biomechanical energy harvesting and real-time human-interactive sensing. **Advanced Energy Materials**, v. 8, n. 23, p. 1801114, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/325781855_Versatile_Core-Sheath_Yarn_for_Sustainable_Biomechanical_Energy_Harvesting_and_Real-Time_Human-Interactive_Sensing> Acesso em: 12 jun. 2025.

DUBEY, Ashutosh; DUBE, Charu Lata. Microwave processing of carbon-based materials: A review. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 38, p. 101136, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352507X24000477>> Acesso em: 12 jun. 2025.

EDIE, D. D. The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers. **Carbon**, v. 36, n. 4, p. 345-362, 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622397001851?via%3Dihub>> Acesso em: 12 jun. 2025.

ESLAMI-FARSANI, Reza. Modeling and optimization of carbon fiber processing: A RSM-FCCC experimental design approach. **Journal of Macromolecular Science, Part A**, v. 52, n. 1, p. 69-75, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268884644_Modeling_and_Optimization_of_Carbon_Fiber_Processing_A_RSM-FCCC_Experimental_Design_Approach> Acesso em: 12 jun. 2025.

FANG, K. et al. Carbon footprints of urban transition: Tracking circular economy promotions in Guiyang, China. **Ecological Modelling**, v. 365, p. 30-44, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380017302958>> Acesso em: 12 jun. 2025.

FRANK, Erik; HERMANUTZ, Frank; BUCHMEISER, Michael. Carbon fibers: precursor systems, processing, structure, and properties. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 53, n. 21, p. 5262-5298, 2014. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201306129>> Acesso em: 12 jun. 2025.

FLICK, U. **Introdução à pesquisa qualitativa-3**. Artmed editora, 2008. Disponível em: <https://books.google.com.br/books/about/Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_Pesquisa_Qualitativa_3_e.html?hl=pt-BR&id=dKmQDAAQBAJ&redir_esc=y> Acesso em: 12 jun. 2025.

GEIER, Norbert et al. Carbon fibre detection in polymer composites reinforced by chopped carbon fibres through digital image processing and machine learning. **Journal of Composite Materials**, v. 58, n. 21, p. 2379-2395, 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/382727953_Carbon_fibre_detection_in_polymer_composites_reinforced_by_chopped_carbon_fibres_through_digital_image_processing_and_machine_learning> Acesso em: 12 jun. 2025.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008. Disponível em: <<https://ayanrafael.com/wp-content/uploads/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9nicas-de-pesquisa-social.pdf>> Acesso em: 12 jun. 2025.

GODÊZ, Y.L. et al. **Análise da influência de carregamentos térmicos e mecânicos na falha de materiais compósitos laminados reforçados por fibras unidirecionais**. 2018. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/3686/1/An%C3%A1lise%20da%20influ%C3%Aancia%20de%20carregamentos%20t%C3%A9rmicos%20e%20mec%C3%A2nicos%20na%20falha%20de%20materiais%20comp%C3%B3sitos%20laminados%20refor%C3%A7ados%20por%20fibras%20unidirecionais.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

GUPTA, A. et al. Effect of graphitization temperature on structure and electrical conductivity of poly-acrylonitrile based carbon fibers. **Diamond and Related Materials**, v. 78, p. 31-38, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925963517300195?via%3Dihub>> Acesso em: 12 jun. 2025.

HAMEDI, Mahiar M. et al. Highly conducting, strong nanocomposites based on nanocellulose-assisted aqueous dispersions of single-wall carbon nanotubes. **ACS nano**, v. 8, n. 3, p. 2467-2476, 2014. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nn4060368>> Acesso em: 12 jun. 2025.

HAMEED, N. et al. Structural transformation of polyacrylonitrile fibers during stabilization and low temperature carbonization. **Polymer Degradation and Stability**, v. 128, p. 39-45, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391016300520>> Acesso em: 12 jun. 2025.

HERMANSSON, Frida; JANSSEN, Matty; SVANSTRÖM, Magdalena. Prospective study of lignin-based and recycled carbon fibers in composites through meta-analysis of life cycle assessments. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 946-956, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261930705X?via%3Dihub>> Acesso em: 12 jun. 2025.

HUANG, X. Fabrication and properties of carbon fibers. **Materials**, v. 2, n. 4, p. 2369-2403, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/40755389_Fabrication_and_Properties_of_Carbon_Fibers> Acesso em: 12 jun. 2025.

JENA, B. et al. Experimental Study on Effect of Fiber Orientation on the Tensile Properties of Fabricated Plate Using Carbon Fiber. **International Journal of Civil Engineering (IJCE)**, v. 5, n. 4, p. 9-16, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/329522792_EXPERIMENTAL_STUDY_ON_EFFECT_OF_FIBER_ORIENTATION_ON_THE_TENSILE_PROPERTIES_OF_FABRICATED_PLATE_USING_CARBON_FIBER> Acesso em: 12 jun. 2025.

JIANG, G. et al. Carbon Sources for Polyhydroxyalkanoates and an Integrated Biorefinery. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 17, n. 7, p. 1157, 19 jul. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/305452133_Carbon_Sources_for_Polyhydroxyalkanoates_and_an_Integrated_Biorefinery> Acesso em: 12 jun. 2025.

JIANG, Y. et al. Flexible energy storage devices based on carbon nanotube forests with built-in metal electrodes. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 195, p. 224-230, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424712004463>> Acesso em: 12 jun. 2025.

KANHERE, S. **Carbon Fibers From Bio-Based Precursors Derived From Renewable Sources**. 2022. Disponível em: <https://open.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4199&context=all_dissertation_s>. Acesso em: 12 jun. 2025..

KARBHARI, Vistasp M. Durability of FRP Composites for Use in Civil Infrastructure—From Materials to Application. In: **Fiber Reinforced Polymeric Materials and Sustainable Structures**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. p. 33-45. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/368955956_Durability_of_FRP_Composites_for_Use_in_Civil_Infrastructure-From_Materials_to_Application> Acesso em: 12 jun. 2025.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. **Metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 1991. Disponível em: <<https://soniaa-arq.prof.ufsc.br/arq1001metodologiacinetificaaplicada/2013/grupo3/06.pdf>> Acesso em: 12 jun. 2025.

LA ROSA, A. D. et al. Recycling treatment of carbon fibre/epoxy composites: Materials recovery and characterization and environmental impacts through life cycle assessment. **Composites Part B: Engineering**, v. 104, p. 17-25, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836816306898>> Acesso em: 12 jun. 2025.

LEE, In Yong et al. Real-time in-depth damage identification and health index system for carbon fiber-reinforced composites using electromechanical behavior and data processing tools. **Composites Science and Technology**, v. 236, p. 109951, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353823000441?via%3Dihub>> Acesso em: 12 jun. 2025.

LE, N.D. et al. Chemically Accelerated Stabilization of a Cellulose–Lignin Precursor as a Route to High Yield Carbon Fiber Production. **Biomacromolecules**, v. 23, n. 3, p. 839–846, 18 jan. 2022. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.biomac.1c01226>> Acesso em: 12 jun. 2025.

LIN, J. et al. Effect of atmospheric pressure plasma treatment on surface physicochemical properties of carbon fiber reinforced polymer and its interfacial bonding strength with adhesive. **Composites Part B: Engineering**, v. 199, p. 108237, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135983682033287X?via%3Dihub>> Acesso em: 12 jun. 2025.

LIU, H. et al. Preparation, Stabilization and Carbonization of a Novel Polyacrylonitrile-Based Carbon Fiber Precursor. **Polymers**, v. 11, n. 7, p. 1150–1150, 4 jul. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/11/7/1150>> Acesso em: 12 jun. 2025.

LIU, L. et al. Interfacial characterization, control and modification of carbon fiber reinforced polymer composites. **Composites Science and Technology**, v. 121, p. 56-72, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353815300506?via%3Dihub>> Acesso em: 12 jun. 2025.

LIU, Q. et al. Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle. **Composite Structures**, v. 97, p. 231-238, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822312005119?via%3Dihub>> Acesso em: 12 jun. 2025.

LIU, Y. et al. Recent advances in lignin-based porous materials for pollutants removal from wastewater. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 187, p. 880-891, 2021. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813021016020>> Acesso em: 12 jun. 2025.

LOPES, Caio Matheus de Souza et al. **Produção de fibras de carbono por solution blow spinning usando poliacrilonitrila (PAN) como precursor**. 2024. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/33431>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

LV, Q. et al. From materials to components: 3D-printed architected honeycombs toward high-performance and tunable electromagnetic interference shielding. **Composites Part B: Engineering**, v. 230, p. 109500, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836821008672>> Acesso em: 12 jun. 2025.

MA, C. et al. Multifunctional Lignin-Based Composite Materials for Emerging Applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 9, 2 jul. 2021. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2021.708976/full>> Acesso em: 12 jun. 2025.

MACIAS, J. D. et al. Thermal characterization of carbon fiber-reinforced carbon composites. **Applied Composite Materials**, v. 26, p. 321-337, 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10443-018-9694-0>> Acesso em: 12 jun. 2025.

MANO, E.B.; MENDES, L.C. **A natureza e os polímeros: meio ambiente, geopolímeros, fitopolímeros e zoopolímeros**. Editora Blucher, 2013. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Y0ivDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA9&dq=MANO,E.B.%3B+MENDES,+L.C.+A+natureza+e+os+pol%C3%ADmeros:+meio+ambiente,+geopol%C3%ADmeros,+fitopol%C3%ADmeros+e+zoopol%C3%ADmeros.+Editora+Blucher,+2013&ots=JgqZ81z6lr&sig=8wi7VClaP6uWzdz2AEIMO-c5GJc&redir_esc=y#v=onepage&q=MANO%2CE.B.%3B%20MENDES%2C%20L.C.%20A%20natureza%20e%20os%20pol%C3%ADmeros%3A%20meio%20ambiente%2C%20geopol%C3%ADmeros%2C%20fitopol%C3%ADmeros%20e%20zoopol%C3%ADmeros.%20Editora%20Blucher%2C%202013&f=false> Acesso em: 12 jun. 2025.

MAO, Q. et al. Predicting cost-effective carbon fiber precursors: Unraveling the functionalities of oxygen and nitrogen-containing groups during carbonization from ReaxFF simulations. **Carbon**, v. 159, p. 25-36, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622319312436>> Acesso em: 12 jun. 2025.

MARTINS, F. Romeo et al. **Caracterização do fresamento de chapas de compósito polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)**. Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=471659&tipoMidia=0>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

MATSUMOTO, M. et al. Effect of spinning conditions on structures of pitch-based carbon fiber. **Carbon**, v. 31, n. 5, p. 715-720, 1993. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/000862239390008X>> Acesso em: 12 jun. 2025.

MINAYO, M.C. Ética das pesquisas qualitativas segundo suas características. **Revista Pesquisa Qualitativa**, v. 9, n. 22, p. 521-539, 2021. Disponível em: <<https://editora.sepq.org.br/rpq/article/view/506>> Acesso em: 12 jun. 2025.

MISHNAEVSKY JR, Leon et al. Materials for wind turbine blades: An overview. **Materials**, v. 10, n. 11, p. 1285, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/10/11/1285>> Acesso em: 12 jun. 2025.

MOCHIDA, I. et al. Control of molecular orientations in mesophase pitch-based carbon fibre by blending PVC pitch. **Journal of Materials Science**, v. 24, n. 1, p. 57-62, 1 jan. 1989. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00660932>> Acesso em: 12 jun. 2025.

NEWCOMB, Bradley A.; CHAE, Han G. The properties of carbon fibers. In: **Handbook of properties of textile and technical fibres**. Woodhead Publishing, 2018. p. 841-871. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081012727000213>> Acesso em: 12 jun. 2025.

NITODAS, S.; SHAH, R.; DAS, M. Research Advancements in the Mechanical Performance and Functional Properties of Nanocomposites Reinforced with Surface-Modified Carbon Nanotubes: A Review. **Applied Sciences**, v. 15, n. 1, p. 374, 2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/15/1/374>> Acesso em: 12 jun. 2025.

NORBERG, Ida et al. A new method for stabilizing softwood kraft lignin fibers for carbon fiber production. **Journal of applied polymer science**, v. 128, n. 6, p. 3824-3830, 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/APP.38588>> Acesso em: 12 jun. 2025.

OBASA, Victoria Dumebi et al. A review on lignin-based carbon fibres for carbon footprint reduction. **Atmosphere**, v. 13, n. 10, p. 1605, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4433/13/10/1605>> Acesso em: 12 jun. 2025.

POHLKEMPER, F. et al. Market analysis of carbon fiber production with reference to the oxidation ovens used. **Applied Research**, v. 3, n. 4, p. e202200119, 2024. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/appl.202200119>> Acesso em: 12 jun. 2025.

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/118825>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

RAHAMAN, Muhammad Syukri Abdul; ISMAIL, Ahmad Fauzi; MUSTAFA, Azeman. A review of heat treatment on polyacrylonitrile fiber. **Polymer degradation and Stability**, v. 92, n. 8, p. 1421-1432, 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391007001279>> Acesso em: 12 jun. 2025.

RAJABPOUR, Siavash et al. Low-temperature carbonization of polyacrylonitrile/graphene carbon fibers: A combined ReaxFF molecular dynamics and experimental study. **Carbon**, v. 174, p. 345-356, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000862232031215X>> Acesso em: 12 jun. 2025.

RAMOS, A.; CAMEÁN, I.; GARCÍA, A.B. Graphitization thermal treatment of carbon nanofibers. **Carbon**, v. 59, p. 2-32, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622313002509>> Acesso em: 12 jun. 2025.

ROCHA, Eliane Alves da. **Modelo de negócio inovador para blocos intertravados agregados com resíduos agrícolas de coco verde: uma abordagem sustentável**. 2025. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/63435>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

RUBINO, F. et al. Marine application of fiber reinforced composites: a review. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 26, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2077-1312/8/1/26>> Acesso em: 12 jun. 2025.

SAMIMI, F. et al. Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers. **Energy**, v. 96, p. 355-371, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215017090>> Acesso em: 12 jun. 2025.

SAMPAIO, Isabela Silva. **Desenvolvimento de um não tecido à base de fibra kapok e poliacetato de vinila**. 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/bitstreams/07271f49-5de4-4c45-bea-19fda30135f5/download>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SANTOS, MFRF dos. **Elaboração do Technology Roadmap para biorrefinaria de produtos da lignina no Brasil**. 2011. 307 f. 2011. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos)-Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ. Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/technology-roadmap-para-biorrefinaria.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SEVERINO, A.J. **Metodologia do trabalho científico**. Cortez editora, 2017. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=uBUpDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=SEVERINO,+A.J.+Metodologia+do+trabalho+cient%C3%ADfico.+Cortez+editora,+2017.&ots=aJtXiw4WXX&sig=6Suu9z25XNICgto7tLdPX1hOWK0&redir_esc=>

y#v=onepage&q=SEVERINO%2C%20A.J.%20Metodologia%20do%20trabalho%20cient%3%ADfco.%20Cortez%20editora%2C%202017.&f=false> Acesso em: 12 jun. 2025.

SHI, H. et al. Accelerating Thermal Stabilization by Pyrolytic Lignin for Partially Bio-Based Carbon Fiber Precursor. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 305, n. 1, 12 dez. 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mame.201900618>> Acesso em: 12 jun. 2025.

SIMON, Lucas et al. **Desenvolvimento de nanocompósito eletrofiado de poli (fluoreto de vinilideno) com nanoplacas de grafeno funcionalizadas com líquido iônico por método não-covalente para aplicação em sensores de compressão piezoresistivos.** 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/244453>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SOULIS, S. et al. Impact of alternative stabilization strategies for the production of PAN-based carbon fibers with high performance. **Fibers**, v. 8, n. 6, p. 33, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-6439/8/6/33>> Acesso em: 12 jun. 2025.

SOUTO, Felipe; CALADO, Veronica; PEREIRA, Nei. Fibras de carbono a partir de lignina: uma revisão da literatura. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 1, p. 100-114, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/X66YP4kQfcJsQh6vPPbD4hf/>> Acesso em: 12 jun. 2025.

TANG, B. et al. Preparation and properties of lightweight carbon/carbon fiber composite thermal field insulation materials for high-temperature furnace. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 14, p. 1558925019884691, 2019. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1558925019884691>> Acesso em: 12 jun. 2025.

THAO, L. et al. PAN-Precursor to Carbon Fibre: An investigation of manufacture and material properties for varying comonomer composition. **Polymer Degradation and Stability**, v. 227, p. 110835–110835, 1 set. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391024001794>> Acesso em: 12 jun. 2025.

THOMAS, L.; RAMACHANDRA, M. Advanced materials for wind turbine blade-A Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 1, p. 2635-2640, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221478531830049X>> Acesso em: 12 jun. 2025.

VINOD, A. et al. Recent advancements in lignocellulose biomass-based carbon fiber: Synthesis, properties, and applications. **Heliyon**, v. 9, n. 3, p. e13614, fev. 2023. Disponível em: <[https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)00821-6](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)00821-6)> Acesso em: 12 jun. 2025.

WANG, F. et al. Recent progress on general wearable electrical heating textiles enabled by functional fibers. **Nano Energy**, p. 109497, 2024. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211285524002453>> Acesso em: 12 jun. 2025.

WANG, S. et al. Lignin-based carbon fibers: Formation, modification and potential applications. **Green Energy & Environment**, v. 7, n. 4, p. 578-605, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468025721000686>> Acesso em: 12 jun. 2025.

WANG, T. et al. Load-dependent path planning method for 3D printing of continuous fiber reinforced plastics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 140, p. 106181, jan. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X2030419X>> Acesso em: 12 jun. 2025.

WANG, X. et al. Recycled carbon fiber-supported polyaniline/manganese dioxide prepared via one-step electrodeposition for flexible supercapacitor integrated electrodes. **Polymers**, v. 10, n. 10, p. 1152, 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/10/10/1152>> Acesso em: 12 jun. 2025.

WANG, Y. et al. Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes: a review. **Journal of Materials Science**, v. 56, p. 173-200, 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/S10853-020-05157-6>> Acesso em: 12 jun. 2025.

WANGXI, Z.; JIE, L.; GANG, W. Evolution of structure and properties of PAN precursors during their conversion to carbon fibers. **Carbon**, v. 41, n. 14, p. 2805-2812, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622303003919>> Acesso em: 12 jun. 2025.

WITIK, Robert A. et al. Carbon fibre reinforced composite waste: An environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 49, p. 89-99, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X1300064X>> Acesso em: 12 jun. 2025.

WU, D. et al. Non-destructive testing for carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP) using a novel eddy current probe. **Composites Part B: Engineering**, v. 177, p. 107460, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836819318670>> Acesso em: 12 jun. 2025.

WU, X. et al. Lignin-derived electrochemical energy materials and systems. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, n. 3, p. 650-672, 2020. Disponível em: <<https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bbb.2083>> Acesso em: 12 jun. 2025.

XU, Y. et al. Current overview of carbon fiber: Toward green sustainable raw materials. **BioResources**, v. 15, n. 3, p. 7234, 2020. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2020/06/BioRes_15_3_Review>

w_Xu_LCN_Current_Overview_Carbon_Fiber_Low_Cost_Green_Raw_Material_16947.pdf> Acesso em: 12 jun. 2025.

YANG, Y. et al. Determination of fracture toughness of an adhesive in civil engineering and interfacial damage analysis of carbon fiber reinforced polymer–steel structure bonded joints. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, v. 235, n. 11, p. 2423-2440, 2021. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/14644207211021385>> Acesso em: 12 jun. 2025.

YANG, Y. et al. Study on axial compression performance of double steel plate-concrete composite walls with stiffening ribs and tie plates. **Engineering Structures**, v. 274, p. 115182, 2 nov. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029622012585>> Acesso em: 12 jun. 2025.

YU, J. et al. Evolution of electrical properties and microstructure of polyacrylonitrile-based carbon fibers during carbonization. **Carbon Letters**, v. 32, n. 7, p. 1771–1779, 25 ago. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s42823-022-00393-z>> Acesso em: 12 jun. 2025.

ZHU, J. et al. Advanced Industrial-Grade Carbon-Fiber-Reinforced Geopolymer Cement Supercapacitors for Building-Integrated Energy Storage Solutions. **Cement and Concrete Composites**, p. 106106, 2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095894652500188X>> Acesso em: 12 jun. 2025.

ZHU, J. et al. Graphene and graphene-based materials for energy storage applications. **Small**, v. 10, n. 17, p. 3480-3498, 2014. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/smll.201303202>> Acesso em: 12 jun. 2025.