

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

**AGAR GRAZIELLE DE JESUS BENTO PRADO
TAÍSA RODRIGUES SANTOS PEDROSO**

**SOLUÇÕES PARA RECICLAGEM DO TECIDO DE FIBRA
DE CARBONO PREPREG ORIUNDOS DA PRODUÇÃO
INDUSTRIAL**

São José dos Campos
2025

**AGAR GRAZIELLE DE JESUS BENTO PRADO
TAÍSA RODRIGUES SANTOS PEDROSO**

**SOLUÇÕES PARA RECICLAGEM DO TECIDO DE FIBRA
DE CARBONO PREPREG ORIUNDOS DA PRODUÇÃO
INDUSTRIAL**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial.

**Orientador: Esp. Fabio José Santos de Oliveira
Coorientador: Esp. Diego Franco da Silva**

São José dos Campos
2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

PRADO, Agar Grazielle de Jesus Bento
PEDROSO, Taísa Rodrigues Santos
Soluções para reciclagem do tecido de fibra de carbono prepreg oriundos da produção industrial
São José dos Campos, 2025.
83f.

Trabalho de Graduação – Curso de Tecnologia em Gestão de Produção Industrial
FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal, 2025.
Orientador Interno ou Principal: Esp. Fabio José Santos de Oliveira.
Orientador Externo ou Coorientador: Esp. Diego Franco da Silva.

1. Reciclagem industrial. 2. Fibra de carbono. 3. Sustentabilidade I. Faculdade de Tecnologia.
FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. Divisão de Informação e
Documentação. II. Soluções para reciclagem de carbono oriundos da produção industrial

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PRADO, Agar Grazielle de Jesus Bento; PEDROSO, Taísa Rodrigues Santos. **Soluções para reciclagem do tecido de fibra de carbono prepreg oriundos da produção industrial**. 2025. 83f. Trabalho de Graduação - FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal.

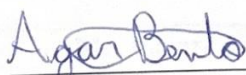
CESSÃO DE DIREITOS

NOME(S) DO(S) AUTOR(ES): Agar Grazielle de Jesus Bento Prado; Taísa Rodrigues Santos Pedroso

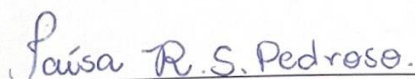
TÍTULO DO TRABALHO: Soluções para reciclagem do tecido de fibra de carbono oriundos da produção industrial

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Graduação/2025.

É concedida à FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal permissão para reproduzir cópias deste Trabalho e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Agar Grazielle de Jesus Bento Prado
01208-000, São José dos Campos - SP




Taísa Rodrigues Santos Pedroso
01208-000, São José dos Campos - SP

**AGAR GRAZIELLE DE JESUS BENTO PRADO
TAÍSA RODRIGUES SANTOS PEDROSO**

**SOLUÇÕES PARA RECICLAGEM DO TECIDO DE FIBRA
DE CARBONO PREPREG ORIUNDOS DA PRODUÇÃO
INDUSTRIAL**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial.



Esp. Fabio José Santos de Oliveira – FATEC São José dos Campos



Me. Jose Jaétis Rosário – FATEC São José dos Campos



Me. Cícero Soares da Silva- FATEC São José dos Campos

01/12/25

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, por conceder sabedoria, saúde e determinação para superar os desafios e concluir esta importante etapa de nossas vidas.

Às nossas famílias, por todo o amor, incentivo e compreensão ao longo desta jornada acadêmica. Seu apoio constante foi essencial em cada momento de esforço e aprendizado.

Aos professores da Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos – Prof. Jessen Vidal (Fatec SJC), por compartilharem seus conhecimentos, experiências e por contribuírem de maneira significativa para nossa formação pessoal e profissional.

Ao nosso orientador, Esp. Fabio José Santos de Oliveira, expressamos nossa sincera gratidão pela paciência, orientação e dedicação em cada fase deste projeto.

Estendemos nossos agradecimentos ao coorientador, Esp. Diego Franco da Silva, pelas contribuições técnicas e pelo apoio fundamental ao desenvolvimento desta pesquisa.

À empresa Rallc Usinagem e Composto, pela parceria e pela oportunidade de aplicar os conhecimentos adquiridos, fortalecendo o vínculo entre teoria e prática.

“A inovação é a ferramenta específica do empreendedor. É o meio pelo qual ele explora a mudança como uma oportunidade.”

Peter Drucker

RESUMO

Este Trabalho de Graduação analisa soluções técnicas e sustentáveis para o reaproveitamento de retalhos de tecido de fibra de carbono prepreg gerados na produção industrial, com estudo de caso na empresa RALLC Usinagem e Composto. Objetiva-se demonstrar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do reuso desses retalhos em produtos não estruturais, reduzindo custos de descarte e de matéria-prima e ampliando práticas de economia circular. O método combinou revisão bibliográfica, estudo de caso e pesquisa-ação, estruturando uma gestão de retalhos com triagem, armazenamento refrigerado e rastreabilidade (FEFO), além de diretrizes de laminação com *lay-up* descontínuo e inspeção por critérios dimensionais e visuais. A avaliação econômica contemplou custos de armazenagem, redução de compras, eliminação de despesas de descarte e estimativa de emissões evitadas (créditos de carbono), com cálculo de ROI e *payback* em cenários de baixa e alta demanda. Os resultados indicaram: (i) compatibilidade técnica dos retalhos para aplicações não estruturais quando se adota sequências de *lay-up* intercaladas; (ii) redução material de custos operacionais em escala; (iii) potencial significativo de emissões evitadas, desde que se utilizem premissas conservadoras e metodologias reconhecidas; e (iv) viabilidade operacional com uso de infraestrutura já existente. Conclui-se que integrar inovação de processo, controle de qualidade e gestão ambiental permite transformar sobras de prepreg em produtos de segunda vida com valor agregado, fortalecendo a competitividade e contribuindo para metas ESG e para a economia circular.

Palavras-chave: Fibra de carbono; Prepreg; Reaproveitamento; Economia circular; Sustentabilidade; Viabilidade técnica; ESG.

ABSTRACT

This graduation project examines technical and sustainable solutions to reuse carbon-fiber prepreg fabric scraps generated in industrial production, through a case study at RALLC Usinagem e Composto. The goal is to demonstrate the technical, economic and environmental feasibility of reusing these scraps in non-structural products, cutting disposal and raw-material costs and advancing circular-economy practices. The method combined literature review, case study and action research, structuring a scrap-management system with sorting, refrigerated storage and FEFO traceability, plus discontinuous lay-up guidelines and dimensional/visual inspection. The economic assessment covered storage costs, reduced purchases, elimination of disposal expenses and estimated avoided emissions (carbon credits), with ROI and payback under low and high-demand scenarios. Results indicate: (i) technical compatibility of scraps for non-structural applications when interleaved lay-up sequences are used; (ii) material operational cost reductions at scale; (iii) significant potential for avoided emissions provided conservative assumptions and recognized methodologies are applied; and (iv) operational feasibility leveraging existing infrastructure. We conclude that combining process innovation, quality control and environmental management can turn prepreg leftovers into second-life products with added value, strengthening competitiveness and contributing to ESG targets and the circular economy.

Keywords: Carbon fiber; Prepreg; Material reuse; Circular economy; Sustainability; Technical feasibility; ESG (Environmental, Social, and Governance).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de materiais compósitos.....	20
Figura 2 – Processo de fabricação das fibras de carbono.....	21
Figura 3 – Processo de fabricação do carbono prepreg.....	22
Figura 4 – <i>Lay-up</i> por tipo de amostra.....	39
Figura 5 – Resistência à Flexão por amostra.....	40
Figura 6 – Crescimento do mercado de Tecido de Fibra de Carbono.....	46
Figura 7 - Distribuição do prepreg de carbono no Mercado global.....	46
Figura 8 – Extrato gerador de <i>Nesting</i> – referente ao Pacote X.....	48
Figura 9 – Embalagem selada.....	61
Figura 10 – Embalagem com.....	61
Figura 11 – Caixa de papelão tratada.....	62
Figura 12 – Processo de reaproveitamento dos retalhos de tecido de carbono prepreg.....	64
Figura 13 – Junção de camadas.....	65
Figura 14 – <i>Lay-up</i>	65
Figura 15 – Ciclo PDCA do projeto.....	67
Figura 16 – Indicador ROI – Pacote 100% da Capacidade.....	70
Figura 17 - Indicador <i>Payback (dias)</i>	71
Figura 18 - Indicador redução de custo com descarte (R\$ / m ²).....	71
Figura 19 - Indicador do % redução de custo com descarte de resíduos Classe I –.....	72
Figura 20 - Indicador redução de custos de compras –.....	72
Figura 21 - Indicador emissões evitadas de GEE (kg CO _{2e}).....	73
Figura 22 - Indicador crédito de carbono pela emissão evitada (t CO _{2e}).....	74
Figura 23 - Indicador benefícios com o uso de retalhos - Pacote 100% da Capacidade.....	74
Figura 24 – Indicador Consolidado de Retorno Financeiro: Projeto + Lucro sobre Retalhos Reutilizados.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tamanho dos retalhos	37
Tabela 2 – Resistência e Modo à Flexão	39
Tabela 3 - Custos ambientais e emissões na produção de prepeg (por m ²).....	43
Tabela 4 - Retorno em Créditos de Carbono ao reutilizar retalhos (por m ²).	43
Tabela 5– Dados de consumo e dos retalhos gerados	49
Tabela 6– Custo para descarte de resíduo Classe I – Contaminados.....	50
Tabela 7– Custo para descarte de resíduo no projeto	51
Tabela 8 – Taxa de ocupação no freezer	52
Tabela 9 – Custo mês de armazenamento no Pacote 100% da capacidade –.....	52
Tabela 10 - Custo mês de armazenamento no Pacote 100% da capacidade –.....	53
Tabela 11– Crédito de carbono pela emissão evitada de GEE –	54
Tabela 12 - Benefícios quantitativos com o uso de retalhos / ano	55
Tabela 13 – Retorno sobre o investimento no cenário estudado	58
Tabela 14 – Tempo (dias) para Retorno sobre o investimento.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Requisito x Aplicação da fibra de carbono nos setores.....	23
Quadro 2 – Vantagens e desvantagens da fibra de carbono	24
Quadro 3 – Principais fluxos de resíduos de fibra de carbono	25
Quadro 4 – Classificação dos resíduos	27
Quadro 5 – Principais etapas e benefícios da logística reversa	29
Quadro 6– Vantagens e desvantagens do método de reciclagem da fibra de carbono.....	32
Quadro 7 – Propriedades Mecânicas Relevantes para Validação de Retalhos em Compósitos	36
Quadro 8 – Benefícios qualitativos com o uso de retalhos	55
Quadro 9 – Configuração da laminação	64
Quadro 10 – Características para inspeção.....	66
Quadro 11– Oportunidades de mercado para uso de retalhos	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Análise de Custo-Benefício
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CDP	Corpo de Prova
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MP	Matéria-Prima
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Act</i>
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PREPREG	Pré-impregnado
ROI	<i>Return on Investment</i>
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
FEFO	<i>First Expired, First Out</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
CCRE	Certificado de Crédito de Reciclagem

LISTA DE SÍMBOLOS

R\$	Real (moeda brasileira)
\$	Dólar (moeda norte-americana)
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
°C	Grau Celsius
m ²	Metro quadrado
mm	Milímetro
kg	Quilograma
GPa	Gigapascal
Mpa	Megapascal
kWh	Quilowatt-hora
t	Tonelada
%	Porcentagem
O(n)	Ordem de um algoritmo
dab	Distância euclidiana
≈	Aproximadamente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo do Trabalho	17
1.2 Conteúdo do Trabalho	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 Tecido de Fibra de Carbono	19
2.1.1 Material Compósito	20
2.1.2 Tecido Prépreg de Fibra de Carbono	20
2.1.3 Processo de fabricação das fibras de carbono e seus tipos	21
2.1.4 Processo de fabricação do Carbono Prepreg	22
2.1.5 Propriedades e aplicações industriais	23
2.1.6 Vantagens e desvantagens do uso da fibra de carbono	24
2.2 Geração de resíduos de fibra de carbono na indústria brasileira	24
2.2.1 Fontes Industriais e Tipificações dos Resíduos	25
2.2.2 Quantificação e Caracterização dos Resíduos de Fibra de Carbono	26
2.2.3 Diretrizes Legislativas e Normativas para a Gestão dos Resíduos.....	27
2.2.4 Logística Reversa Aplicada aos Resíduos de Fibra de Carbono	28
2.3 Métodos de reciclagem de fibra de carbono	29
2.3.1 Mecânicos	29
2.3.2 Térmicos (pirólise, solvólise térmica)	30
2.3.3 Químicos.....	31
2.3.4 Retalhos	31
2.3.5 Comparativo entre métodos	32
2.4 Aplicações da fibra de carbono reciclada	33
2.4.1 Aplicação nos setores industriais.....	33
2.4.2 Requisitos de desempenho.....	34
2.4.3 Propriedades Mecânicas Relevantes para Validação de Retalhos em Compósitos	35
2.4.4 Estratégias para reutilização de tecido de fibra de carbono em compósito	36
2.4.4.1 <i>Tamanho de resíduos</i>	37
2.4.4.2 <i>Definição de Lay-up</i>	38
2.4.4.3 <i>Propriedades mecânicas</i>	39
2.4.5 Reaproveitamento de Materiais em Ciclo Fechado	41
2.5 Crédito de Carbono.....	42
2.5.1 <i>Estruturação de projeto de redução de GEE</i>	44
2.6 Mercado global, projeções e oportunidades	45
3 DESENVOLVIMENTO.....	47
3.1 Abordagem Metodológica – Gestão de Retalhos de tecido de fibra de carbono prepreg	47
3.1.1 Análise de Custo-Benefício (ACB)	48
3.1.1.1 <i>Custos com descarte</i>	48
3.1.1.2 <i>Custos de armazenamento dos retalhos</i>	51
3.1.1.3 <i>Cálculos com ganho do uso de retalhos</i>	54
3.1.1.4 <i>Resultados do custo-benefício com o uso dos retalhos</i>	54
3.1.2 Desafios e limitações	56
3.1.3 Indicadores de viabilidade	57
3.1.3.1 Retorno sobre investimento (ROI).....	57

3.1.3.2 <i>Payback</i> estimado	58
3.1.4 Gestão de Estoques e Logística Interna	59
3.1.5 Seleção dos retalhos	60
3.1.6 Armazenamento dos retalhos	61
3.2 Considerações sobre a Gestão de retalhos	63
3.3 Fabricação com uso de retalhos	63
3.3.1 <i>Seleção dos retalhos e Laminação</i>	64
3.3.2 <i>Inspeção</i>	66
3.4 Gestão da Qualidade	66
3.5 Possibilidades de Mercado para Aplicação dos Retalhos de Prepreg	67
4. RESULTADOS	70
4.1 Indicadores Financeiros	70
4.2 Indicadores Ambientais	71
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o avanço tecnológico e a necessidade de materiais de alta performance impulsionaram o uso de compósitos de fibra de carbono em diferentes setores industriais, como o automotivo, o aeroespacial, o esportivo e o de equipamentos de precisão. Esses materiais destacam-se por sua leveza, resistência mecânica e estabilidade térmica, propriedades que os tornam ideais para aplicações que exigem elevada eficiência estrutural e redução de peso.

Contudo, o aumento no consumo e na produção desses compósitos trouxe consigo um novo desafio ambiental: o destino adequado dos resíduos gerados durante os processos produtivos, em especial os retalhos de tecido de fibra de carbono pré-impregnado (prepreg). Por serem materiais termofixos, sua reciclagem é complexa e limitada, uma vez que não podem ser facilmente fundidos ou remodelados, como ocorre com polímeros termoplásticos. Como resultado, grandes volumes de sobras são frequentemente descartados em aterros industriais, elevando os custos operacionais e agravando os impactos ambientais.

Diante desse contexto, cresce a importância de pesquisas voltadas à reciclagem e reaproveitamento de tecidos de fibra de carbono prepreg, alinhadas aos princípios da economia circular e às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A aplicação de estratégias sustentáveis na gestão de resíduos industriais pode gerar benefícios técnicos, econômicos e ambientais, transformando passivos em novos produtos e oportunidades de mercado.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma solução prática e sustentável para o reaproveitamento de retalhos de tecido de fibra de carbono prepreg, originados da linha de produção da empresa Ralle Usinagem e Composto. O objetivo é criar um processo tecnicamente viável e economicamente atrativo, capaz de reduzir o volume de resíduos descartados e agregar valor ao material reaproveitado, fortalecendo a competitividade da empresa e promovendo práticas sustentáveis.

A relevância deste estudo reside na integração entre inovação tecnológica e responsabilidade ambiental. A reutilização de sobras de fibra de carbono pode representar uma alternativa eficiente para minimizar os impactos ambientais e otimizar o uso de recursos industriais. Além disso, o projeto busca contribuir para a disseminação de práticas de economia circular na indústria brasileira, incentivando soluções replicáveis em outros segmentos produtivos.

Assim, este trabalho busca demonstrar que é possível unir tecnologia, sustentabilidade e eficiência produtiva na criação de novas soluções para o gerenciamento de resíduos industriais de alta complexidade.

1.1 Objetivo do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma solução técnica e sustentável para a reciclagem e reaproveitamento de retalhos de tecido de fibra de carbono prepreg oriundos da produção industrial, por meio de revisão bibliográfica, estudo de caso e pesquisa-ação, visando reduzir os impactos ambientais e os custos associados ao descarte, além de agregar valor ao processo produtivo da empresa parceira Rallc Usinagem e Composto.

Para alcançá-lo, este trabalho estabelece os seguintes objetivos específicos:

- Investigar o atual mercado consumidor e os setores que utilizam tecido de fibra de carbono em seus processos industriais;
- Analisar o potencial de mercado e as oportunidades de reaproveitamento dos resíduos de fibra de carbono reciclada;
- Estudar métodos e tecnologias de reciclagem aplicáveis ao tecido de fibra de carbono prepreg;
- Propor soluções técnicas para a reutilização desse resíduo em novos produtos;
- Avaliar a viabilidade econômica e ambiental do reaproveitamento;
- Desenvolver um processo para aplicação das sobras de tecido de fibra de carbono na fabricação de produtos não estruturais, contribuindo para a implementação de práticas de economia circular e redução de custos de descarte na empresa parceira.

1.2 Conteúdo do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos.

No Capítulo 1, apresenta-se a introdução, contextualizando o problema ambiental associado ao descarte de tecidos de fibra de carbono e os objetivos do estudo.

O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica, descrevendo os tipos de fibras de carbono, suas propriedades, processos de fabricação, aplicações industriais, bem como as práticas de reciclagem, políticas ambientais e princípios da economia circular.

O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento metodológico da pesquisa, detalhando o estudo de caso na empresa Rallc Usinagem e Composto, os procedimentos experimentais adotados, os métodos de reaproveitamento propostos e as análises realizadas.

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a aplicação do método desenvolvido, avaliando sua viabilidade técnica e ambiental.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as considerações finais, destacando as contribuições do trabalho, os benefícios observados e as possibilidades de continuidade da pesquisa em estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tecido de Fibra de Carbono

O tecido de fibra de carbono é um material revolucionário que transformou diversas indústrias devido à sua impressionante resistência e leveza. Desde sua introdução, pesquisadores têm buscado maneiras de aprimorá-lo para que ele se torne ainda mais acessível e eficiente. De acordo com Callister e Rethwisch (2021), esse material oferece uma das melhores relações resistência/peso, sendo indispensável em aplicações estruturais críticas.

Os tecidos de fibra de carbono são amplamente utilizados na fabricação de produtos diversos, devido às suas propriedades excepcionais como alta resistência, leveza, rigidez, resistência química e condutividade elétrica. Eles são empregados em diversos setores, incluindo automobilístico, náutico, aeroespacial, esportivo e médico.

Existem diferentes tipos de tecidos de fibra de carbono, como unidirecionais e bidirecionais, além de variações nos padrões de trama. O processo de fabricação utilizando este material pode envolver técnicas como: laminação manual, infusão e *vacuum bagging*.

A trama dos tecidos de fibra de carbono refere-se à maneira como os fios de carbono são entrelaçados para formar o tecido. Existem diferentes padrões de trama, cada um com características específicas que influenciam a resistência, flexibilidade e aparência do material. Aqui estão alguns dos principais tipos:

- *Plain Weave*: Um dos padrões mais comuns, onde os fios são entrelaçados de forma simples, alternando sobre e sob os fios adjacentes. Oferece boa estabilidade e resistência;
- *Twill Weave*: Apresenta um padrão diagonal, proporcionando maior flexibilidade e resistência ao impacto em comparação com o *Plain Weave*;
- *Basket Weave*: Similar ao *Plain Weave*, mas com fios agrupados em pares, aumentando a resistência e a rigidez;
- Multidirecional: As fibras são posicionadas em diferentes ângulos, proporcionando resistência equilibrada para peças que sofrem cargas variadas.

A escolha do tipo de tecido depende da aplicação e dos requisitos mecânicos do projeto. Conforme Hull e Clyne (1996), “o design das fibras no compósito influencia diretamente o desempenho mecânico da estrutura, tornando essencial a escolha correta da orientação das fibras.”

2.1.1 Material Compósito

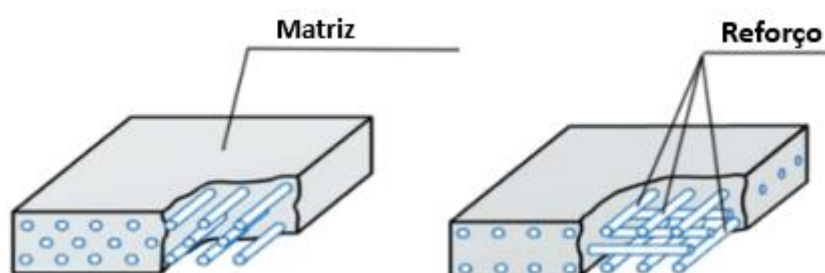
Segundo Franco (2024), “materiais compósitos são materiais constituídos por duas ou mais fases (matriz e reforço) que exibem uma proporção significativa de propriedades das fases que os constituem, cujo desempenho e propriedades, para uma dada aplicação, são superiores aos dos materiais constituintes agindo independentemente.”

De acordo com Ashby (2011), “materiais compósitos são essenciais para o avanço da engenharia, pois oferecem soluções que conciliam leveza, resistência e durabilidade.”

Os compósitos reforçados com fibra de carbono são especialmente valiosos, pois combinam a rigidez da fibra de carbono (reforço) com a versatilidade das resinas poliméricas (matriz). Essa combinação resulta em um material altamente eficiente e inovador, possibilitando aplicações em setores que exigem alto desempenho estrutural.

A Figura 1 ilustra a estrutura de materiais compósitos formados por matriz e reforço.

Figura 1 - Estrutura de materiais compósitos.



Fonte: Adaptada de EDC Tecnologia (2025)

Este trabalho buscou apresentar um panorama sobre os tecidos prepreg de fibra de carbono, seus tipos, aplicações industriais e o conceito de materiais compostos. A engenharia de materiais continua evoluindo, e os tecidos de fibra de carbono seguem como protagonistas dessa revolução.

2.1.2 Tecido Prépreg de Fibra de Carbono

Os tecidos prepreg de fibra de carbono são materiais avançados que possuem fibras de carbono pré-impregnadas com resina, garantindo controle preciso da proporção fibra-resina. Esses tecidos são amplamente utilizados em aplicações que demandam elevada resistência mecânica, baixo peso e excelente desempenho térmico.

Segundo Callister (2007), “os compósitos reforçados com fibras apresentam resistência específica superior aos metais tradicionais, tornando-se indispensáveis em

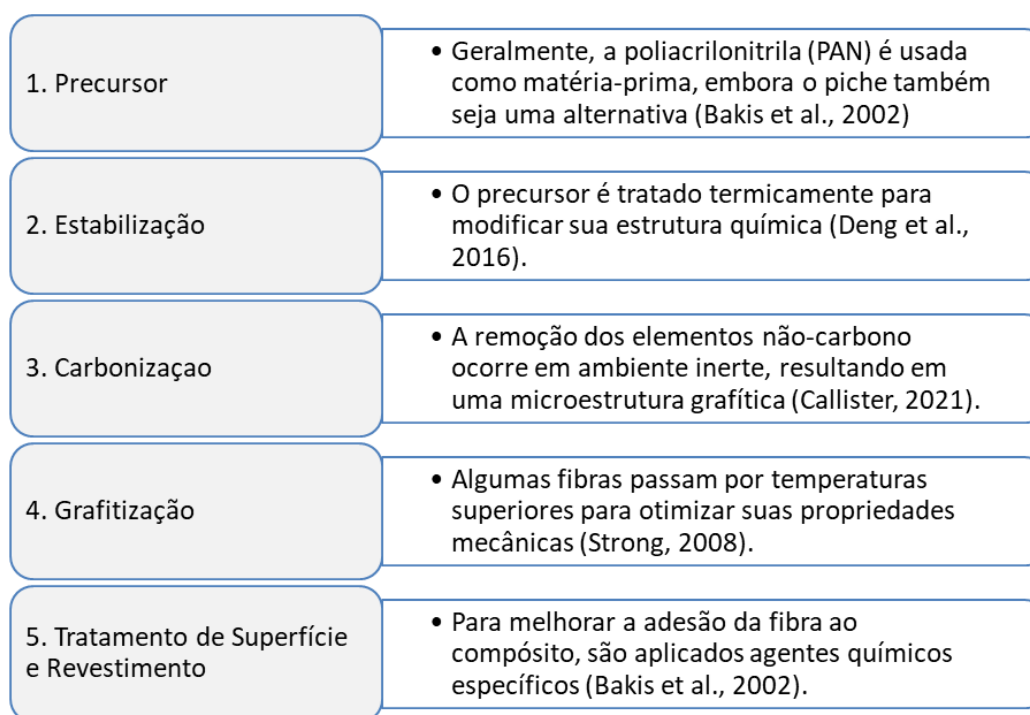
aplicações estruturais avançadas”. Esse material revoluciona diversas indústrias, pois combina leveza e rigidez sem comprometer a durabilidade.

Conforme Strong (2008), “os compósitos avançados transformaram a engenharia de materiais, permitindo inovação em projetos antes limitados pelas propriedades de metais convencionais.”

2.1.3 Processo de fabricação das fibras de carbono e seus tipos

O processo de fabricação da fibra de carbono segue etapas rigorosas para garantir suas propriedades. Conforme Strong (2008), as principais fases seguem demonstradas na Figura 2.

Figura 2 – Processo de fabricação das fibras de carbono.



Fonte: Adaptada de Strong (2008)

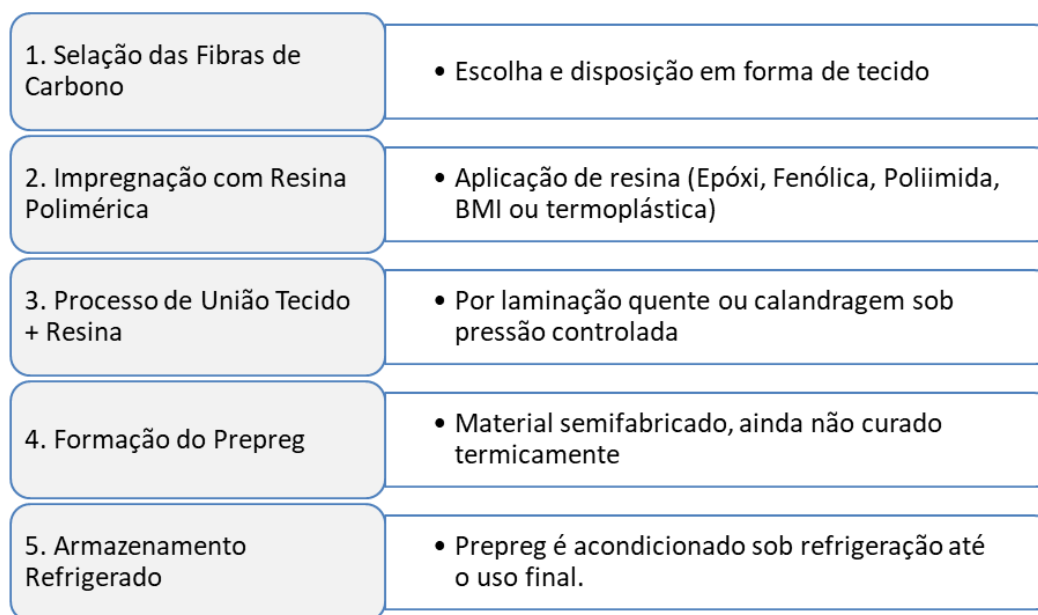
Os tipos de fibra de carbono variam conforme sua estrutura e propriedades:

- Fibra de Alto Módulo – Possui elevada rigidez, sendo ideal para aplicações aeroespaciais (Strong, 2008).
- Fibra de Alta Resistência – Maior resistência ao impacto, sendo amplamente utilizada em veículos (Deng et al., 2016).
- Fibra de Uso Geral – Combina rigidez e resistência, sendo aplicada em diversas áreas industriais (Callister, 2021).

2.1.4 Processo de fabricação do Carbono Prepreg

O tecido de fibra de carbono prepreg é um material avançado que combina leveza, resistência e alto desempenho. Seu processo de fabricação é minucioso e envolve etapas bem definidas para garantir a qualidade e a eficiência do material, conforme descrito na Figura 3:

Figura 3 – Processo de fabricação do carbono prepreg



Fonte: Adaptado de Strong (2008)

Tudo começa com a seleção das fibras de carbono, que são dispostas em forma de tecido. Essas fibras são extraordinárias: finas como um fio de cabelo, mas mais resistentes que o aço quando combinadas corretamente. Uma vez disposto, o tecido passa pelo processo de impregnação com uma resina polimérica específica (resina Epóxi, Fenólica, Poliimida, Bismaleimida - BMI ou termoplástica). Esse momento é crucial, pois a distribuição precisa da resina é um dos parâmetros que define as propriedades mecânicas finais do prepreg.

A impregnação pode ser feita por meio de processos como laminação quente ou pelo método de calandragem, onde o tecido e a resina são unidos sob pressão controlada. O resultado é um material semifabricado que ainda não passou pela cura térmica definitiva, permitindo que ele seja armazenado em condições refrigeradas até seu uso final.

Quando chega o momento da aplicação, o prepreg é moldado conforme o design desejado e submetido a um processo de cura, geralmente em autoclave, onde vácuo, pressão e temperatura são ajustadas para consolidar o material. Essa etapa transforma o prepreg em um material sólido, altamente resistente e pronto para ser utilizado nas estruturas mais exigentes.

Assim, cada folha de tecido de fibra de carbono prepeg carrega consigo não apenas tecnologia e precisão, mas também a essência da inovação e da engenharia. Seu desenvolvimento reflete o equilíbrio entre ciência e design, onde cada detalhe do processo influencia diretamente o desempenho final do material.

2.1.5 Propriedades e aplicações industriais

As propriedades da fibra de carbono têm sido exaustivamente analisadas em pesquisas acadêmicas. Segundo Callister (2021), suas principais características incluem:

- Alta resistência mecânica – A resistência específica da fibra de carbono supera a do aço.
- Baixa densidade – Essencial para aplicações onde a leveza é um fator crítico (Bakis et al., 2002).
- Resistência química – Elevada estabilidade em ambientes corrosivos (Deng et al., 2016).
- Condutividade elétrica – Para aplicações eletromagnéticas (Strong, 2008).

As aplicações da fibra de carbono são amplamente documentadas na literatura científica, conforme descrito no Quadro 1.

Quadro 1 – Requisito x Aplicação da fibra de carbono nos setores.

Setor	Requisito	Aplicação x Desempenho
Aeroespacial	Estruturas aeronáuticas e espaciais devido à combinação de leveza e resistência (Callister, 2021).	fabricação de fusos, asas e carenagens, proporcionando redução de peso e melhora na eficiência dos veículos.
Automobilístico	Peças estruturais de veículos de alto desempenho, reduzindo o peso e aumentando a eficiência (Deng et al., 2016)	McLaren e Ferrari utilizam componentes de fibra de carbono para otimizar desempenho e reduzir o consumo de combustível.
Esportivo	Utilizada na fabricação de bicicletas, pranchas e raquetes (Strong, 2008).	Empresas fabricam equipamentos como quadros de bicicleta e pranchas de surf, para aumentar a resistência sem aumentar o peso
Médico	Aplicada em próteses de alta durabilidade e resistência (Bakis et al., 2002)	Melhora de conforto, mobilidade, resistência e durabilidade.
Construção civil	Reforços estruturais em edificações e pontes (Deng et al., 2016).	Aumentar a resistência.

Fonte: Autoras (2025).

2.1.6 Vantagens e desvantagens do uso da fibra de carbono

A análise das vantagens e desvantagens da fibra de carbono pode ser encontrada em estudos como os de Strong (2008) e Callister (2021), detalhados no Quadro 2.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens da fibra de carbono

Vantagens	Desvantagens
Leveza e resistência – Permite estruturas robustas sem aumento significativo de peso;	Custo elevado – A produção da fibra de carbono ainda apresenta alto custo, limitando sua aplicação em larga escala (Bakis et al., 2002);
Durabilidade – Alta resistência à corrosão, ampliando sua vida útil	Fragilidade em impacto – Embora tenha alta resistência mecânica, pode apresentar falhas abruptas sob certas condições de carga (Deng et al., 2016);
Versatilidade – Pode ser moldada em diferentes formas e aplicações industriais	Dificuldade de reciclagem – Os métodos de reutilização ainda não são amplamente viáveis (Callister, 2021).

Fonte: Adaptada de Strong (2008) e Callister (2021).

2.2 Geração de resíduos de fibra de carbono na indústria brasileira

A produção industrial baseada em compósitos de fibra de carbono tem crescido de forma acentuada no Brasil, acompanhando a demanda mundial por materiais leves, resistentes e duráveis necessários para aplicações estruturais de alto desempenho. O Painel da Geração de Resíduos no Brasil, elaborado pelo IBAMA, permite visualizar que diversas cadeias industriais nacionais já declaram a geração, segregação e manejo de resíduos sólidos contendo fibras de carbono, tanto em resíduos industriais quanto nos chamados resíduos pós-consumo (IBAMA, 2023). É nítido que, embora as indústrias aeroespacial, automotiva, de energia eólica e da construção civil concentrem os usos predominantes, outros setores vêm incorporando esses materiais em produtos esportivos, marítimos, ferroviários e eletrônicos, ampliando o espectro de geração de resíduos.

Apesar de avanços recentes no controle e reporte dessas correntes, permanece uma carência de dados públicos segmentados acerca das quantidades específicas de resíduos de fibra de carbono produzidas nacionalmente. Essa lacuna reflete, em parte, a complexidade de rastreamento desses materiais, que podem ser classificados como resíduos industriais, resíduos da construção civil ou resíduos pós-consumo, a depender do setor e da fase do ciclo de vida em que são descartados (Masuda, 2023; Shiino, 2021). Destaca-se, porém, que a

necessidade de práticas seguras de destinação e o potencial de revalorização dessas fibras vêm impulsionando a estruturação de políticas internas de sustentabilidade em grandes empresas, ampliando a adoção de métodos de segregação e tecnologias para reciclagem e reaproveitamento (FIESC, 2023).

No contexto internacional, observa-se que ainda que o volume absoluto de resíduos de compósitos de fibra de carbono seja bem menor do que os resíduos metálicos ou plásticos, seu alto valor agregado, as dificuldades técnicas de reciclagem e os riscos ambientais decorrentes da disposição inadequada – sobretudo pela presença de aditivos, resinas e eventuais contaminantes nas matrizes termorrígidas – desafiam a indústria nacional a avançar em soluções alinhadas aos princípios da economia circular e à legislação ambiental vigente (Oishi, 2021).

2.2.1 Fontes Industriais e Tipificações dos Resíduos

Os principais fluxos de resíduos de fibra de carbono na indústria brasileira podem ser agrupados em quatro categorias principais, conforme apresentado no Quadro 3:

Quadro 3 – Principais fluxos de resíduos de fibra de carbono

Fonte de Geração	Exemplos	Comentários Técnicos
Desperdícios na fabricação	Sobras de cortes, aparas, erros de laminação, limpeza de máquinas	Geralmente resíduos de baixo tamanho e alta pureza da fibra
Prepreg vencidos	Materiais estocados além da vida útil	Podem conter resinas ativas, riscos de reação exo-térmica
Peças rejeitadas/do ciclo produtivo	Itens fora de especificação, defeitos de produção	Com frequência, resíduos volumosos e com grande teor de compósito
Materiais pós-uso/pós-consumo	Pás eólicas, carcaças de veículos, componentes estruturais	Logística de retorno e desmontagem complexa

Fonte: Autoras (2025).

A geração de resíduos de fibra de carbono inicia-se ainda nas etapas iniciais dos processos produtivos. O corte de tecidos, a conformação e a impregnação de fibras resultam inevitavelmente em aparas, retalhos e sobras processuais, consideradas resíduos industriais imediatos. Em várias empresas, a etapa de corte de prepregs é uma das principais responsáveis pelo acúmulo de resíduos, devido às limitações nos padrões de corte e à vida útil relativamente curta desse tipo de insumo (Shiino, 2021).

Além disso, materiais prepregs armazenados além do prazo de validade representam um tipo de resíduo de alto risco, pois além de perderem as características técnicas desejadas,

podem gerar resíduos perigosos por conta das propriedades químicas das resinas ainda reativas, tornando-se potenciais fontes de calor, vapores tóxicos e até mesmo combustão acidental (ABNT NBR 10004, 2004).

Peças rejeitadas por não conformidade e produtos finais com defeitos também são fontes relevantes, uma vez que podem envolver grandes volumes de material. Nesses casos, a destinação pode ser dificultada pela presença de heterogeneidades – por exemplo, presença de materiais metálicos, tintas ou outros componentes associados (Masuda, 2023).

Por fim, o desafio mais complexo recai sobre os materiais pós-uso e pós-consumo – como pás eólicas desativadas, carrocerias automotivas e estruturas pré-moldadas da construção civil. A logística para desmontagem, fragmentação e transporte desses elementos é onerosa e pouco desenvolvida no Brasil, de modo que o descarte atualmente é, em sua maior parte, realizado em aterros industriais ou pela incineração controlada, com poucas iniciativas de reciclagem de alto valor agregado implementadas nacionalmente (Fibrav, 2021; Masuda, 2023).

A fragmentação, identificação e caracterização adequadas dessas várias classes de resíduos são essenciais tanto para o correto enquadramento legal quanto para a definição de estratégias viáveis de reciclagem ou reuso industrial.

2.2.2 Quantificação e Caracterização dos Resíduos de Fibra de Carbono

Atualmente, há consenso entre os pesquisadores de que a quantificação nacional dos resíduos de fibra de carbono é desafiadora, principalmente pelo baixo volume relativo à produção mundial e pela ausência de um sistema padronizado de reporte setorizado no Brasil (IBAMA, 2023; Masuda, 2023). Estima-se, com base em estudos em mercados mais maduros, que o segmento industrial brasileiro gere anualmente algumas dezenas de milhares de toneladas de resíduos de compósitos de polímero reforçado com fibra de carbono, englobando tanto os fluxos industriais imediatos quanto os resíduos de peças em fim de vida útil.

A caracterização desses resíduos envolve avaliar características como estado físico, cor, odor, composição química e grau de heterogeneidade. Com base nessas análises, os resíduos são classificados segundo a norma ABNT NBR 10004:2004, que os categoriza conforme Quadro 4.

Quadro 4 – Classificação dos resíduos

Classe	Grau de Risco	Tipo de Resíduo
I	Perigosos	Substâncias inflamáveis, corrosivas, tóxicas ou reativas.
II A	Não Inertes	Resíduos que não são perigosos, mas podem apresentar biodegradabilidade.
II B	Inertes	Materiais quimicamente estáveis que não apresentam riscos ao meio ambiente.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 10004 (2004).

A correta classificação orienta tanto o tipo de tratamento a ser aplicado quanto a forma mais segura de destinação final.

2.2.3 Diretrizes Legislativas e Normativas para a Gestão dos Resíduos

A gestão dos resíduos de fibra de carbono no Brasil está diretamente subordinada a um arcabouço legal consolidado, que enfatiza tanto a prevenção da poluição quanto a responsabilidade compartilhada e a valorização dos resíduos como insumos para a economia circular.

- **Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010):** Estabelece princípios para a gestão integrada de resíduos, como a responsabilidade compartilhada e a implementação da logística reversa;
- **Resolução CONAMA nº 237/1997:** Define os procedimentos para o licenciamento ambiental de atividades que possam causar poluição, incluindo aquelas que lidam com compósitos;
- **Lei Complementar nº 140/2011:** Regula a atuação conjunta dos entes federativos no controle ambiental, inclusive em processos de licenciamento e fiscalização;
- **Convenção da Basileia (1989):** Acordo internacional do qual o Brasil é signatário, voltado ao controle e à redução de movimentações transfronteiriças de resíduos perigosos;
- **Instrução Normativa IBAMA nº 13/2012:** Organiza a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos e estabelece critérios para classificação e tratamento conforme a origem e o risco potencial.

2.2.4 Logística Reversa Aplicada aos Resíduos de Fibra de Carbono

A logística reversa, consagrada pela Lei nº 12.305/2010, refere-se a um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados à coleta e reintegração dos resíduos sólidos ao setor empresarial, potencializando sua reaplicação em seu próprio ciclo produtivo ou em ciclos alternativos, ou direcionando à disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2010; Marca Ambiental, 2025). Trata-se, portanto, de um instrumento essencial tanto para a redução do impacto ambiental quanto para a geração de valor econômico na chamada economia circular.

No contexto dos resíduos de fibra de carbono, a logística reversa apresenta desafios singulares, principalmente pela necessidade de segregação eficiente, transporte especializado e reprocessamento técnico adequado. As etapas típicas da logística reversa abrangem:

1. **Coleta e triagem:** identificando e classificando resíduos de diferentes origens (sobras industriais, peças defeituosas, componentes pós-uso e retalhos de preregs vencidos).
2. **Armazenamento temporário:** em condições controladas, devido ao risco de reatividade química dos materiais contendo resina ainda não curada.
3. **Transporte seguro até as plantas de processamento:** seguido da documentação e rastreamento obrigatório, conforme a legislação de movimentação de resíduos perigosos.
4. **Desmanche, trituração e preparação dos materiais:** para reciclagem mecânica, térmica ou química.
5. **Reentrada na cadeia produtiva:** mediante o uso das fibras recuperadas para aplicações de valor agregado compatível com a qualidade das fibras recicladas.

Estudos acadêmicos apontam que práticas de logística reversa bem implementadas podem reduzir significativamente os custos operacionais e o impacto ambiental das empresas, além de criar oportunidades de geração de emprego, fortalecimento da imagem corporativa e aumento da adesão a padrões *Environmental, Social and Governance* (ESG) no setor industrial (Saber Q Transforma, 2025; Ecobraz, 2025).

No contexto prático brasileiro, progressos têm sido observados especialmente em parcerias entre grandes indústrias, recicladoras especializadas (como a Ecobraz), cooperativas de catadores e consultorias ambientais, que oferecem serviços completos, desde

o diagnóstico personalizado até a emissão de certificados ambientais reconhecidos para comprovação regulatória e valorização de ativos ambientais (Ecobraz, 2025).

Segue um resumo das principais etapas e benefícios da logística reversa para resíduos de fibra de carbono no Quadro 5.

Quadro 5 – Principais etapas e benefícios da logística reversa

Etapa	Descrição	Benefícios
Coleta/triagem	Recolhimento segregado	Redução de contaminação cruzada
Transporte/rastreamento	Logística dedicada	Rastreabilidade e segurança legal
Processamento/reciclagem	Reciclagem mecânica/térmica/química	Redução de aterramento e emissões
Certificação	Relatório e certificação ambientais	Conformidade regulatória, ESG e competitividade comercial

Fonte: Autoras (2025).

Práticas de logística reversa inseridas em sistemas de certificação ambiental (como CCRE – Certificado de Crédito de Reciclagem) proporcionam diferenciação mercadológica, fomentando maior engajamento corporativo e integração dos elos da cadeia produtiva em prol da economia circular.

2.3 Métodos de reciclagem de fibra de carbono

A evolução das tecnologias para reciclagem de resíduos de fibra de carbono tem avançado consideravelmente nos últimos cinco anos, impulsionada tanto pela intensificação das obrigações legais quanto pelas demandas de mercados por soluções inovadoras e sustentáveis (Masuda, 2023; Shiino, 2021; Supreemcarbon, 2025). As principais rotas de reciclagem podem ser classificadas em:

2.3.1 Mecânicos

Os métodos mecânicos de redução de tamanho, como trituração e moagem, são amplamente utilizados na indústria para o processamento de materiais sólidos. Segundo Callister e Rethwisch (2021), esses processos são fundamentais para aumentar a área superficial dos materiais, melhorar a reatividade e facilitar operações subsequentes.

- Trituração: É um processo de fragmentação grosseira de materiais sólidos por meio de forças compressivas ou de impacto. É frequentemente aplicada na

reciclagem de plásticos, metais e concreto. Conforme Díaz et al. (2019), trituradores industriais podem ser de mandíbulas, martelos ou rolos, dependendo da dureza do material a ser processado.

- Moagem: É uma etapa mais refinada de redução de tamanho, gerando partículas menores e mais homogêneas. De acordo com Park et al. (2020), existem diferentes tipos de moinhos, como:
 - Moinho de bolas: Usado na indústria cerâmica e na produção de pós metálicos.
 - Moinho de impacto: Utilizado na moagem de minérios.
 - Moinho vibratório: Adequado para materiais de alta dureza.

Os métodos mecânicos são vantajosos por sua eficiência energética e simplicidade operacional, porém podem gerar desgaste excessivo dos equipamentos e demanda elevada de manutenção (Jones, 2017).

2.3.2 Térmicos (pirólise, solvólise térmica)

Os métodos térmicos são amplamente aplicados na conversão de materiais, especialmente na reciclagem de polímeros e no tratamento de resíduos industriais. Segundo Baker et al. (2018), esses processos envolvem a decomposição térmica controlada, permitindo a recuperação de produtos úteis.

A Pirólise é um processo de decomposição térmica na ausência de oxigênio, transformando materiais orgânicos em produtos gasosos, líquidos e sólidos carbonáceos. De acordo com Deng et al. (2016), esse método é amplamente utilizado na reciclagem de plásticos e na produção de bio-óleo e carvão ativado.

Principais aplicações da pirólise:

- Conversão de resíduos plásticos em combustíveis líquidos;
- Produção de biochar para melhoria do solo agrícola;
- Geração de gás de síntese para processos industriais (Jones, 2017);

A Solvólise Térmica é um processo químico assistido por calor, no qual solventes específicos são utilizados para quebrar ligações poliméricas. Conforme Díaz et al. (2019), esse método é eficaz na reciclagem de materiais compósitos, como fibra de carbono e resinas termoendurecíveis.

Benefícios da solvólise térmica:

- Redução do consumo energético comparado à pirólise;
- Possibilidade de recuperação seletiva de materiais;

- Aplicação na reciclagem de eletrônicos e polímeros complexos (Park et al., 2020).

Embora esses métodos apresentem alto potencial de reaproveitamento de materiais, desafios como controle de emissões gasosas e custo operacional ainda precisam ser superados (Baker et al., 2018).

2.3.3 Químicos

Os métodos químicos de reciclagem consistem na decomposição da matriz polimérica por meio de reações com solventes ou agentes químicos específicos. Essa abordagem visa preservar as fibras de carbono em sua forma original, ao mesmo tempo em que permite a recuperação de outros componentes da matriz. De acordo com Yang et al. (2012), a reciclagem química, também chamada de solvólise química, pode utilizar álcoois, ácidos ou soluções alcalinas sob condições controladas de temperatura e pressão.

A reação química pode ocorrer em meio aquoso ou orgânico, dependendo da natureza da matriz. Conforme Pickering et al. (2016), a eficiência do processo depende da escolha adequada do solvente, tempo de reação e temperatura. Um exemplo amplamente estudado é a utilização de ácido acético ou ácido fórmico para degradar a matriz epóxi de compósitos aeronáuticos, permitindo a liberação das fibras com mínima perda de propriedades mecânicas.

Vantagens da reciclagem química incluem:

- Alta seletividade na recuperação de componentes;
- Preservação das propriedades das fibras;
- Possibilidade de revalorização química da matriz.

No entanto, esse método demanda controle rigoroso de resíduos químicos e pode envolver custos mais elevados em comparação com processos mecânicos ou térmicos (Oliveux et al., 2015).

2.3.4 Retalhos

Os retalhos de prepreg são sobras de tecidos de fibra de carbono impregnados com resina (geralmente epóxi), armazenados sob refrigeração para evitar a cura prematura. Mesmo em pequenas dimensões, esses fragmentos mantêm propriedades estruturais relevantes, podendo ser reutilizados em aplicações secundárias ou em processos de laminação manual com geometria complexa (Oliveux et al., 2015).

Outra técnica envolve a compactação dos retalhos em moldes aquecidos, formando placas ou componentes estruturais. Essa abordagem é utilizada em aplicações não críticas, como painéis internos de veículos ou estruturas de suporte (Yang et al., 2012).

O reaproveitamento de retalhos contribui para a redução da pegada de carbono do ciclo de vida dos compósitos, além de diminuir os custos de descarte e aquisição de matéria-prima. Segundo Baker et al. (2018), a reutilização de prepregs pode reduzir em até 40% o volume de resíduos gerados em linhas de produção aeroespaciais.

2.3.5 Comparativo entre métodos

A escolha do método de reciclagem de fibra de carbono depende de múltiplos fatores, incluindo a aplicação final do material reciclado, a complexidade do resíduo e a viabilidade econômica do processo. Cada abordagem apresenta vantagens e limitações específicas conforme demonstrado no Quadro 6.

Quadro 6– Vantagens e desvantagens do método de reciclagem da fibra de carbono

Método	Vantagens	Desvantagens
Mecânico	Simplicidade operacional; custo relativamente baixo	Danos às fibras; baixa qualidade do material recuperado
Térmico	Recuperação de fibras em bom estado; aplicável em grande escala	Necessidade de controle térmico, emissão de gases
Químico	Alta seletividade; preservação da integridade das fibras	Alto custo, uso de solventes agressivos, necessidade de controle de descarte de químicos
Retalhos	Redução de resíduos e custo; Propriedades mecânicas ainda funcionais; Sustentabilidade industrial; Adequado para peças personalizadas.	Formato irregular dificultando a automação; Resistência estrutural inferior a tecidos contínuos; Maior exigência de controle de qualidade e limitações normativas (para aplicações críticas).

Fonte: Autoras (2025)

Segundo Oliveux et al. (2015), métodos térmicos como a pirólise são adequados para reaproveitamento em escala industrial, enquanto os químicos são preferíveis quando a integridade das fibras é prioritária. Os métodos mecânicos, embora menos eficazes, ainda são úteis em aplicações secundárias, como cargas em compósitos de baixo desempenho. Já o uso de retalhos em processos de laminação manual, especialmente em moldes

personalizados demonstram que, com o posicionamento estratégico das fibras e aplicação de técnicas como *vacuum bagging*, é possível obter peças com desempenho mecânico satisfatório (Pickering et al., 2016).

A escolha ideal pode envolver uma combinação de técnicas, visando maximizar a recuperação e minimizar os impactos ambientais e econômicos.

2.4 Aplicações da fibra de carbono reciclada

A reciclagem da fibra de carbono tem se tornado um tema central na indústria de materiais compostos, impulsionada pelo desejo de reduzir impactos ambientais e promover a economia circular. Embora preserve apenas parte significativa de suas propriedades originais, a fibra de carbono reciclada, ao contrário da virgem, ainda pode ser reutilizada em diversas aplicações sem comprometer o desempenho. Segundo estudos de pesquisadores como Pimenta e Pinho (2012) e Liu et al. (2019), a recuperação de fibras por métodos térmicos ou químicos garante resistência mecânica suficiente para novas aplicações estruturais.

2.4.1 Aplicação nos setores industriais

A fibra de carbono reciclada encontra aplicações promissoras em diferentes setores industriais, ampliando o espectro de utilização dos materiais compostos. Entre os principais segmentos que têm explorado seu potencial, destacam-se:

- **Aeroespacial:** Componentes secundários de aeronaves, interiores de cabines e peças não estruturais vêm sendo desenvolvidos com fibra reciclada para reduzir custos e impacto ambiental. (Pimenta; Pinho, 2012);
- **Automotivo:** Montadoras utilizam a fibra reciclada para fabricar painéis internos, reforços de carroceria e peças estruturais leves, contribuindo para a redução do peso dos veículos e, conseqüentemente, para a eficiência energética. (Jiang et al., 2020);
- **Energia Eólica:** As pás de turbinas eólicas são tradicionalmente fabricadas com fibras virgens, mas a aplicação de fibra reciclada em componentes menos exigentes tem mostrado viabilidade técnica e sustentável. (Oliveux et al., 2015);
- **Construção Civil:** Elementos estruturais como vigas e reforços para concreto vêm sendo fabricados com fibra de carbono reciclada, melhorando durabilidade e resistência sem aumentar significativamente os custos. (Pickering, 2006);

- **Equipamentos esportivos:** Capacetes, bicicletas e pranchas de alto desempenho já incorporam fibra reciclada, mantendo resistência e leveza a um custo mais acessível. (Liu et al., 2019).

2.4.2 Requisitos de desempenho

Embora a fibra de carbono reciclada apresente grande potencial de reutilização, a exigência por requisitos técnicos rigorosos varia conforme o produto a ser fabricado, seu uso final e as normas específicas de cada setor. Em aplicações que demandam alto desempenho estrutural ou envolvem segurança crítica — como nos setores aeroespacial e automotivo, torna-se necessário avaliar fatores como:

- **Resistência mecânica:** As fibras recicladas devem manter um nível adequado de resistência à tração e à flexão, evitando fragilização estrutural. Estudos demonstram que tratamentos térmicos preservam até 80% da resistência original da fibra. (Jiang et al., 2020)
- **Adesão à matriz polimérica:** A interação entre a fibra reciclada e a resina pode ser um desafio, exigindo tratamentos químicos para otimizar a aderência e evitar falhas interlaminares. (Oliveux et al., 2015)
- **Durabilidade e resistência química:** Produtos feitos com fibra reciclada devem demonstrar resistência à umidade, variação térmica e agentes químicos corrosivos, garantindo longevidade em diferentes ambientes. (Pickering, 2006)
- **Sustentabilidade e impacto ambiental:** A pegada de carbono da fibra reciclada deve ser analisada para garantir que sua reutilização traga benefícios ambientais reais. Estudos indicam que sua produção pode reduzir em até 70% a emissão de CO₂ em comparação com fibras virgens. (Pimenta; Pinho, 2012).

Entretanto, em setores menos exigentes ou em produtos de aplicação não estrutural, esses requisitos podem ser mais flexíveis, desde que atendam às expectativas de desempenho, segurança e conformidade do uso pretendido.

A crescente preocupação com os impactos ambientais gerados pelo descarte de resíduos industriais de materiais compósitos tem impulsionado a busca por soluções sustentáveis e economicamente viáveis. Entre esses resíduos, os retalhos de tecido de fibra de carbono prepreg representam um desafio significativo, devido ao seu alto valor agregado e à dificuldade de reciclagem convencional. Estudos recentes demonstram que é possível reaproveitar esses materiais em aplicações de segunda vida, mantendo parte substancial de

suas propriedades mecânicas e promovendo benefícios ambientais e econômicos por meio de abordagens de ciclo fechado.

O uso da fibra de carbono reciclada representa um avanço significativo na sustentabilidade dos materiais compostos. A tendência é que sua aplicação se expanda, impulsionada por pesquisas e pela adaptação dos setores industriais às novas demandas ambientais e econômicas.

2.4.3 Propriedades Mecânicas Relevantes para Validação de Retalhos em Compósitos

A validação do uso de retalhos de tecido de carbono prepreg em aplicações estruturais exige a comprovação de que o laminado resultante apresenta desempenho mecânico comparável ao de materiais contínuos. A presença de retalhos pode introduzir descontinuidades e zonas de sobreposição, as quais influenciam negativamente a distribuição de tensões internas e favorecem a ocorrência de falhas interlaminares (Shiino et al., 2019).

Ensaio mecânico como o *Interlaminar Shear Strength* (ILSS) e o cisalhamento no plano (*In-Plane Shear*) são particularmente sensíveis a tais falhas, sendo amplamente utilizados na caracterização de compósitos com múltiplas junções. Estudos demonstram que, mesmo após longos períodos de armazenamento e exposição ambiental, materiais como o prepreg 2511 mantêm desempenho satisfatório nesses ensaios, indicando robustez estrutural mesmo em condições não ideais (Gonzales et al., 2021).

A comparação direta dos resultados obtidos com os valores de referência fornecidos pelos fabricantes para tecidos contínuos constitui uma abordagem eficaz para validar a viabilidade técnica do reaproveitamento de retalhos. Essa metodologia permite avaliar a integridade estrutural do compósito e sua adequação às exigências de projeto (Costa et al., 2012).

As propriedades mais relevantes para essa comprovação são descritas no Quadro 7.

Quadro 7 – Propriedades Mecânicas Relevantes para Validação de Retalhos em Compósitos

Propriedade Mecânica	Justificativa Técnica	Referência
Resistência à tração (<i>Warp Tension Strength</i>)	Avalia a capacidade do laminado de suportar cargas de tração na direção das fibras.	Levy; Pardini, 2006
Resistência à compressão (<i>Warp Compression Strength</i>)	Essencial para aplicações estruturais sujeitas a esmagamento ou flexão.	Dvorak, 2000
Resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS)	Verifica a integridade entre camadas — crítica em materiais com múltiplas interfaces como os formados por retalhos.	Bianchi et al., 2016
Resistência ao cisalhamento no plano (<i>In-plane Shear Strength</i>)	Mede a resistência a esforços multidirecionais, comum em estruturas compostas.	Matthews; Rawlings, 1994
Módulo de cisalhamento no plano (<i>In-plane Shear Modulus</i>)	Avalia a rigidez do laminado sob esforços de cisalhamento.	EMA 898 – UFMG, 2021
Temperatura de transição vítrea (<i>Glass Transition Temp.</i>)	Define o limite térmico de uso do material antes da degradação das propriedades mecânicas.	Hexcel Corporation, 2020

Fonte: Autoras (2025).

2.4.4 Estratégias para reutilização de tecido de fibra de carbono em compósito

Segundo Shiino (2021), os retalhos de tecido ainda apresentam propriedades mecânicas relevantes que poderiam ser reaproveitadas em novas aplicações. Assim, o desenvolvimento de estratégias de reutilização desses tecidos é essencial para reduzir impactos ambientais e otimizar custos produtivos.

Dentre as alternativas, destaca-se a reconfiguração de tecidos de fibra de carbono em laminados descontínuos, os quais, quando corretamente posicionados e sobrepostos, podem preservar parte significativa da resistência mecânica original. Isso demonstra que a definição de parâmetros como tamanho dos resíduos, posicionamento no empilhamento (*lay-up*) e

sequência de armazenamento é crucial para maximizar o desempenho estrutural do compósito reciclado (Shiino et al., 2021).

2.4.4.1 Tamanho de resíduos

O tamanho dos resíduos influencia diretamente o comportamento mecânico do compósito reciclado. Estudos indicam que a redução excessiva do comprimento da fibra compromete a transferência de tensões e, conseqüentemente, a resistência final do laminado. Shiino et al. (2021) destacam que, em laminados com fragmentos de diferentes dimensões, a sobreposição estratégica de retalhos menores pode compensar a perda de continuidade da fibra, reduzindo a concentração de tensões na região da descontinuidade.

No trabalho experimental realizado por Shiino et al. (2021), foram analisados três arranjos distintos: o laminado 4F, composto por fibras contínuas e com quatro descontinuidades intercalado com e maior proporção de fibras contínuas; o 10F, com dez descontinuidades e fragmentos menores; e o 14F, composto integralmente por resíduos menores de tecido. Os resultados mostraram que o desempenho mecânico não depende apenas da quantidade de descontinuidades, mas também do tamanho e da forma como os fragmentos são posicionados (*lay-up*). A tabela 1 demonstra a dimensão dos retalhos utilizados em cada tipo de amostra.

Tabela 1 – Tamanho dos retalhos

Laminado	Nº de descontinuidades	% de material reciclado	Quantidade e Tamanho do Resíduo (mm)
4F	4	40% reciclado	8x 60,0 6x 120,0
10F	10	65% reciclado	10x 78,5
14F	14	100% reciclado	8x 60,0 2x 66,0 2x 57,0

Fonte: Autoras (2025).

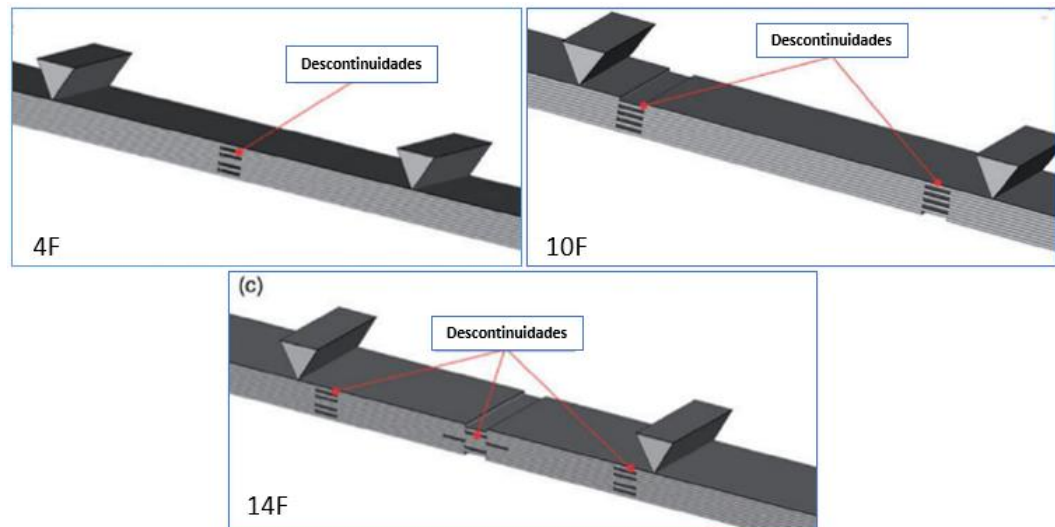
2.4.4.2 Definição de *Lay-up*

A sequência de laminação (*lay-up*) consiste em como as camadas de tecido contínuo ou descontínuo são dispostas no compósito. O tamanho e a disposição dos resíduos influenciam diretamente o comportamento mecânico do compósito reciclado. De acordo com Shiino et al. (2021), o laminado 4F foi projetado com seis camadas contínuas e quatro camadas descontínuas, nas quais cada fragmento de tecido foi posicionado entre camadas contínuas adjacentes. Essa disposição permitiu que as camadas intactas atuassem como barreiras de reforço, assegurando melhor transferência interlaminar de tensões e reduzindo a propagação de falhas locais.

O laminado 10F, por sua vez, foi composto exclusivamente por camadas descontínuas, totalizando dez discontinuidades, com fragmentos alternados de tamanhos diferentes. Essa configuração assimétrica buscou evitar o alinhamento vertical das discontinuidades, mas resultou em um comportamento mecânico menos eficiente, devido à concentração de tensões nas regiões próximas ao ponto de carregamento.

Já o laminado 14F foi elaborado com 100% de tecidos reaproveitados, contendo quatorze discontinuidades dispostas de forma alternada e com uma camada central assimétrica, concebida para evitar coincidências entre as falhas das camadas. Essa arquitetura promoveu uma distribuição mais uniforme das tensões de flexão, o que resultou em desempenho superior ao laminado 10F, mesmo utilizando apenas fragmentos de menor dimensão. Em síntese, a disposição estratégica dos fragmentos - o *lay-up* - mostrou-se determinante para a otimização da resistência mecânica dos compósitos reciclados, demonstrando que a geometria e a sequência de empilhamento podem compensar a perda de continuidade das fibras (Shiino et al., 2021). A Figura 4 ilustra o *lay-up* utilizado em cada modelo de amostra.

Figura 4 – Lay-up por tipo de amostra



Fonte: Shiino et al (2021).

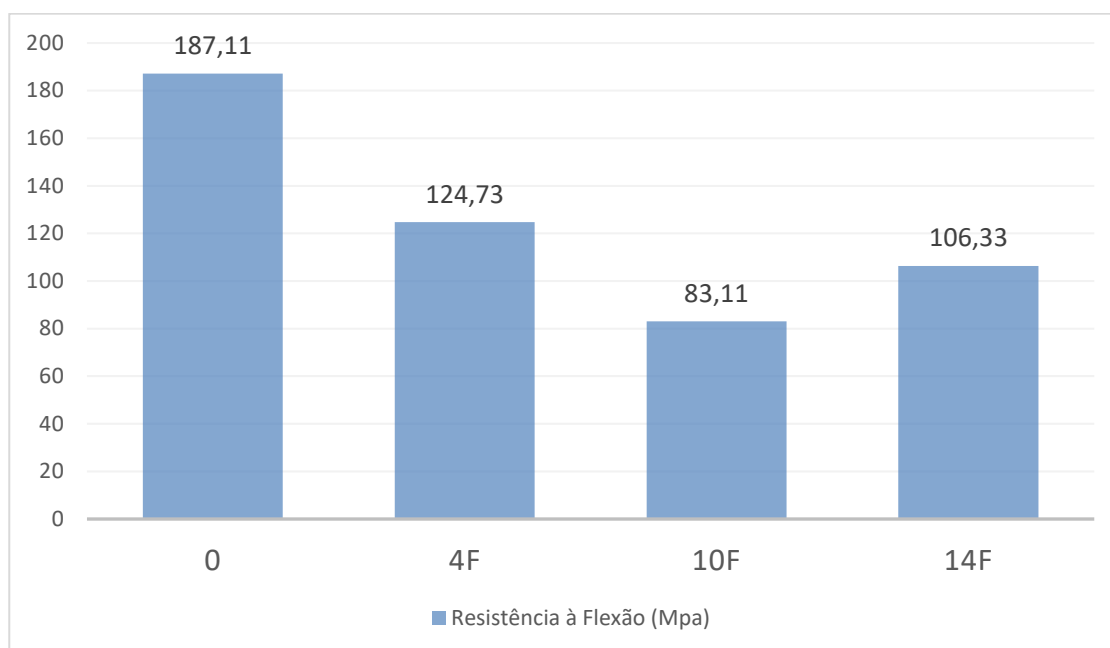
2.4.4.3 Propriedades mecânicas

Os ensaios de flexão em quatro pontos revelaram que a resistência máxima dos compósitos reciclados diminui conforme aumenta o número de descontinuidades. O laminado 4F apresentou uma redução de aproximadamente 33% em relação ao compósito contínuo, enquanto o 10F teve a pior performance, com redução de 55,5%. Curiosamente, o laminado 14F, mesmo contendo apenas fragmentos de tecido e maior número de descontinuidades, apresentou resistência superior ao 10F, resultado atribuído à estratégia de distribuição dos resíduos e à posição das falhas no empilhamento (SHIINO et al., 2021). O resultado dos ensaios de Resistência e Módulo de Flexão são registrados na Tabela 2 e Figura 5.

Tabela 2 – Resistência e Modo à Flexão

Laminado	Nº de descontinuidades	Resistência máxima à flexão (MPa)	Redução (%)	Módulo de flexão (GPa)	Redução do módulo (%)
Referência (contínuo)	N/A	187,11	-	58,39	-
4F	4	124,73	33,34%	36,77	37,03%
10F	10	83,11	55,58%	25,48	56,36%
14F	14	106,33	43,17%	24,63	58,39%

Fonte: Autoras (2025).

Figura 5 – Resistência à Flexão por amostra

Fonte: Shiino et al (2021).

Quadro 8 – Resultado dos ensaios

Laminado	Nº de descontinuidades	% de material reciclado	Observações
4F	4	40% reciclado	Menor perda de desempenho; presença de fibras contínuas protegeu a falha.
10F	10	65% reciclado	Pior desempenho; assimetria de descontinuidades aumentou tensões e falhas prematuras.
14F	14	100% reciclado	Melhor estratégia de empilhamento com retalho; apresentou comportamento mais previsível e baixa dispersão dos resultados.

Fonte: Autoras (2025).

O estudo de Shiino et al (2021) demonstrou que a configuração da sequência de *lay-up* pode mitigar os efeitos negativos do uso de fragmentos menores, indicando que não apenas a integridade do tecido, mas também a sua disposição dentro do laminado, são determinantes para o desempenho final.

Segundo Shiino et al. (2021), a estratégia de sempre posicionar uma camada descontínua entre duas camadas contínuas ou com sobreposição assimétrica de fragmentos reduz a propagação de falhas e melhora a transferência interlaminar de tensões.

Essa técnica foi fundamental para explicar o melhor desempenho do laminado 14F em relação ao 10F, pois a disposição centralizada e alternada dos fragmentos proporcionou uma distribuição mais uniforme das tensões, reduzindo a variabilidade nos resultados. Assim, a definição criteriosa da sequência de *lay-up* torna-se uma ferramenta indispensável para o aproveitamento de resíduos de fibra de carbono em aplicações estruturais.

2.4.5 Reaproveitamento de Materiais em Ciclo Fechado

O reaproveitamento de materiais por meio de abordagens de ciclo fechado representa uma estratégia central na transição para uma economia circular. Diferente do ciclo aberto — onde os materiais são reciclados, mas acabam sendo usados em aplicações de menor valor ou qualidade (*downcycling*) — o ciclo fechado busca reintegrar resíduos e subprodutos ao processo produtivo, mantendo o valor dos materiais e reduzindo impactos ambientais (*upcycling*).

Segundo Aquino; Pantoja; Luz (2023), o ciclo fechado configura-se como um processo de reversão e reintegração de resíduos, permitindo que estes sejam transformados em novos insumos produtivos, o que reduz a necessidade de recursos naturais e a geração de lixo.

Fontgallandf et al. (2022) destacam que, ao preservar a funcionalidade dos materiais, o ciclo fechado promove benefícios econômicos e ambientais, como a redução de custos com matéria-prima virgem e a mitigação de emissões de carbono.

Benefícios ambientais e econômicos:

- Redução de resíduos: menos descarte em aterros ou incineração (Fontgalland et al., 2022).
- Economia de recursos naturais: menos necessidade de extrair matéria-prima virgem (Aquino; Pantoja; Luz, 2023).
- Eficiência energética: processos de reaproveitamento geralmente consomem menos energia (Costa, 2019).
- Manutenção de valor: em muitos casos os materiais mantêm suas propriedades mecânicas, como resistência e durabilidade, o que permite seu uso em segunda vida com desempenho satisfatório (Fontgalland et al., 2022).

Portanto, o ciclo fechado não apenas representa uma alternativa técnica viável, mas também uma estratégia de gestão ambiental integrada, alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável e da economia circular.

2.5 Crédito de Carbono

O crédito de carbono é um instrumento de compensação ambiental que representa a redução ou remoção de uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera. No Brasil, sua regulamentação foi formalizada pelo Decreto nº 11.075/2022 e pela Lei nº 15.042/2024, que instituem o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), alinhado ao Acordo de Paris e ao Plano de Transformação Ecológica do governo federal (Ministério da Fazenda, 2024; Jusbrasil, 2024).

Empresas que adotam tecnologias de baixo carbono — como o uso de tecidos de fibra de carbono prepeg, que reduzem peso estrutural e consumo energético — podem gerar créditos por meio da comprovação de emissões evitadas, utilizando metodologias reconhecidas pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) ou pelo mercado voluntário (SEBRAE, 2023). A captação ocorre via projetos certificados que quantificam a redução de GEE (gases de efeito estufa), e os créditos podem ser comercializados em plataformas nacionais ou internacionais, como o SBCE ou mercados voluntários globais para compensar emissões próprias, cumprir metas regulatórias ou serem vendidos a empresas e governos.

O retorno financeiro é significativo: estima-se que o Brasil possa gerar até US\$ 100 bilhões em receitas com créditos de carbono até 2030 (SEBRAE, 2023). Empresas que incorporam tecidos de fibra de carbono prepeg em seus processos produtivos podem obter vantagens estratégicas significativas, como acesso a mercados com exigências ambientais mais rigorosas, valorização da imagem institucional, atração de investimentos sustentáveis e redução de custos operacionais por meio da eficiência energética e da inovação tecnológica. Segundo o Ministério da Fazenda (2024), práticas industriais alinhadas à descarbonização e à economia circular são cada vez mais valorizadas em mercados internacionais e podem gerar retorno financeiro adicional por meio de instrumentos como os créditos de carbono e financiamentos verdes.

Com base na publicação do Arquivo de Certificação da empresa Weihai Baowei New Material Technology Co., Ltd., (ICDP, 2024), há registro da quantidade de carbono emitida em sua produção de tecido de fibra de carbono (Tabela 3), gerando base para cálculo da estimativa de potencial de crédito de carbono para esta categoria de material.

Fontes como o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Embrapa e estudos acadêmicos da UFMG, estimam que os custos ambientais e financeiros associados à eliminação da necessidade de produção de tecido de fibra de carbono prepreg (como produção, energia elétrica, água envolvida no processo e logística), podem ser utilizados como base de cálculo para o retorno potencial em créditos de carbono se utilizado retalhos, como segue na Tabela 4.

Tabela 3 - Custos ambientais e emissões na produção de prepreg (por m²).

Item	Emissão de GEE (kg CO ₂ e/ m ²)	Fonte de impacto ambiental
Aquisição de M.Prima	3,609	Energia e processo químico
Transporte de M.Prima	0,0112	Combustíveis fósseis
Produção	1,2398	Matriz energética industrial, Captação e tratamento de água, Processo químico de Resina com derivado petroquímico
Total por m²	4,86	—

Fonte: Adaptado de ICDP (2024)

Tabela 4 - Retorno em Créditos de Carbono ao reutilizar retalhos (por m²).

Cenário de Reutilização	Emissão evitada (kg CO ₂ e/m ²) ¹	Crédito gerado (t CO ₂ e)	Valor médio por crédito (US\$) ²
Reutilização de retalhos (100%)	4,86	0,00486	25

Fonte: Adaptado de MCTI (2016), Embrapa (2023), ICDP (2024).

¹Um crédito de carbono = 1 tonelada de CO₂e evitado;

² O valor médio de mercado para créditos de carbono voluntários varia entre US\$ 4,80 e US\$ 30 por tonelada de CO₂e, conforme dados da Capital Reset (2024), podendo alcançar até US\$ 50 em projetos com certificações premium como Gold Standard ou Verra, segundo relatório da ICC Brasil (2023). O cálculo do retorno financeiro em m² é representado na Equação 1;

$$\left(\frac{Ee}{1000}\right) \times Vc \times Cd \quad (1)$$

Onde:

Ee: Emissão evitada (kg CO₂e)

Vc: Valor de crédito (US\$)

Cd: Cotação do dólar (R\$)

A reutilização de retalhos de tecido de fibra de carbono prepreg representa uma estratégia eficaz de redução de impactos ambientais e geração de valor econômico. O retorno financeiro por metro quadrado reaproveitado decorre da diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à produção convencional, permitindo a conversão dessas emissões evitadas em créditos de carbono comercializáveis. Quanto maior o volume reaproveitado, maior o potencial de retorno agregado, tanto em termos financeiros quanto reputacionais. Segundo Magalhães (2013), práticas industriais voltadas à economia de baixo carbono não apenas reduzem custos operacionais, mas também ampliam a competitividade das empresas em mercados sustentáveis.

2.5.1 Estruturação de projeto de redução de GEE

Segundo a ECOVALOR (2024) e o BNDES (2025), a estruturação de projetos voltados à redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) requer o cumprimento de etapas metodológicas rigorosas, que garantam a credibilidade e a rastreabilidade dos resultados obtidos. Para que tais projetos sejam elegíveis à geração de créditos de carbono comercializáveis, é necessário seguir protocolos técnicos reconhecidos internacionalmente, conforme instruções descritas nas etapas abaixo:

a. Inventário de emissões de GEE

- Usar metodologias reconhecidas como o GHG Protocol ou ISO 14064;
- Identificar e quantificar as fontes de emissão (escopos 1, 2 e 3 das metodologias);
- Utilizar ferramentas como o Selo GHG Protocol ajudam a validar esse inventário.

b. Definição do escopo do projeto

- Determinar o tipo de projeto: reflorestamento, eficiência energética, reaproveitamento de resíduos, substituição de combustíveis fósseis ou demais opções;
- Estimar o potencial de redução de emissões (em toneladas de CO₂ equivalente);

c. Metodologia de quantificação

- Escolher uma metodologia aprovada por padrões como: Verra (VCS), Gold Standard, ART-TREES, SBCE (Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões). A metodologia define como calcular, monitorar e verificar as reduções.

d. Validação e verificação

- Contratar uma entidade independente (verificadora acreditada) para validar o projeto. Após verificação, os créditos são emitidos e registrados.

e. Registro e comercialização

- Registrar o projeto em plataformas como: SBCE (regulamentado pela Lei 15.042/2024) e Mercado voluntário internacional (Verra, Gold Standard). Os créditos podem ser vendidos em leilões, plataformas digitais ou diretamente a compradores interessados.

Os Créditos de Carbono podem ser utilizados como créditos para a empresa geradora ou podem ser comercializados para uso de empresas com interesse em mitigação de impactos ambientais, sendo abaixo detalhados:

- Compensação de emissões própria: empresas podem usar créditos para neutralizar suas emissões e alcançar metas de carbono zero;
- Cumprimento de metas regulatórias: em mercados regulados como o SBCE, créditos podem ser usados para cumprir limites legais de emissão;
- Comercialização: créditos podem ser vendidos a empresas, governos ou investidores que desejam compensar suas emissões ou cumprir compromissos ESG;
- Marketing e reputação: empresas que compensam suas emissões podem usar isso como diferencial competitivo e reputacional.

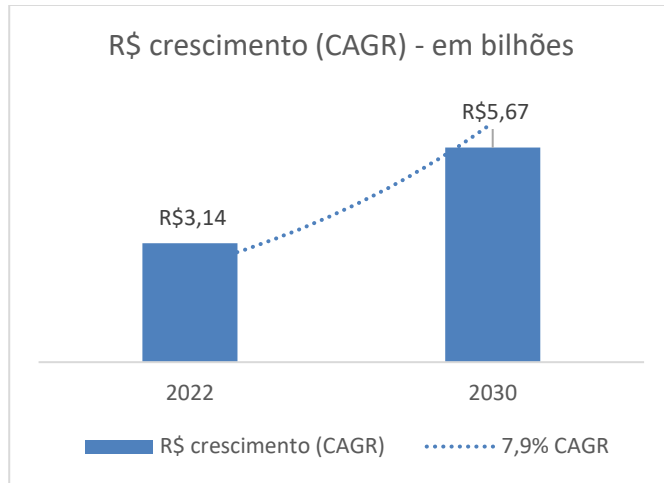
Portanto, a implementação de projetos de redução de GEE representa não apenas uma contribuição estratégica para a mitigação das mudanças climáticas, mas também uma oportunidade econômica relevante. Nesse contexto, os créditos de carbono consolidam-se como instrumentos eficazes de transição para uma economia de baixo carbono, com alcance global e potencial de rentabilidade sustentável.

2.6 Mercado global, projeções e oportunidades

Segundo o relatório da *Verified Market Reports* (2024) e Figura 6, o mercado de tecido de fibra de carbono prepreg foi avaliado em US\$ 3,14 bilhões em 2022 e tem previsão de atingir US\$ 5,67 bilhões até 2030, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 7,9% entre 2024 e 2030. As oportunidades de expansão estão fortemente ligadas ao crescimento do setor de veículos elétricos (VEs), que demanda componentes mais leves para melhorar a autonomia e o desempenho dos automóveis. Além disso, avanços tecnológicos

na fabricação de preregs e esforços para redução de custos estão tornando o material mais acessível, ampliando sua adoção em diversas indústrias.

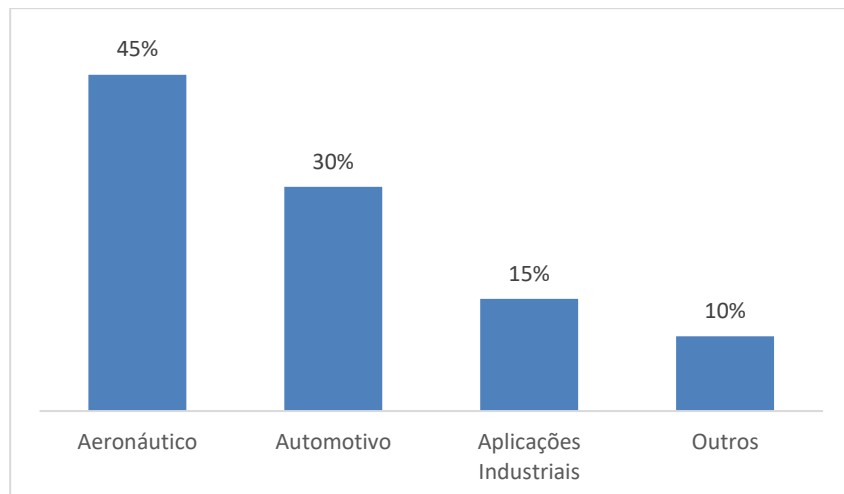
Figura 6 – Crescimento do mercado de Tecido de Fibra de Carbono



Fonte: Autoras (2025)

A versatilidade do carbono prereg reforça o papel estratégico do material na transição para soluções mais sustentáveis e eficientes, sendo o setor aeronáutico que lidera a receita global do carbono, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Distribuição do prereg de carbono no Mercado global



Fonte: Autoras (2025)

Segundo o Centro de Estudos do Novo Desenvolvimentismo da FGV EAESP, setores industriais com maior intensidade tecnológica — como o de materiais avançados — apresentam margens de lucro médias superiores a 30%, podendo ultrapassar 50% em nichos especializados com alto valor agregado e baixa concorrência, tornando o segmento atrativo.

3 DESENVOLVIMENTO

O tecido de carbono prepreg é amplamente utilizado em setores como aeroespacial, automobilístico e esportivo devido à sua alta resistência mecânica e leveza. No entanto, o processo de corte e conformação geram uma quantidade significativa de retalhos, que frequentemente são descartados por não atenderem aos requisitos estruturais dos produtos finais.

Segundo Fontgalland et al. (2022), o reaproveitamento de materiais compósitos em ciclo fechado pode gerar benefícios ambientais e econômicos relevantes, especialmente quando os materiais mantêm suas propriedades originais.

Para atingir o propósito de reaproveitar retalhos de tecido de carbono prepreg oriundos da indústria para reuso em ciclo fechado, a pesquisa se estrutura em três abordagens metodológicas principais: a pesquisa bibliográfica, fundamentada em livros, artigos, teses e demais materiais acadêmicos relevantes; o estudo de caso, direcionado à análise aprofundada da realidade da empresa Rallc Usinagem e Composto; e a pesquisa-ação, que envolve participação ativa na proposição e implementação de soluções práticas para o problema identificado.

Neste contexto, este capítulo apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para a gestão de retalhos de tecido de carbono prepreg, a análise da viabilidade econômica e a análise de restrições para reutilização na fabricação de produtos de segunda vida (produtos reutilizados diretamente ou com pequenas adaptações).

Para a elaboração da Gestão de Retalhos e a análise de viabilidade, a proposta integra ferramentas de Gestão Financeira, Gestão de Estoque, Indicadores ESG, Gestão da Qualidade, Processo e Logística.

3.1 Abordagem Metodológica – Gestão de Retalhos de tecido de fibra de carbono prepreg

Este capítulo descreve a metodologia empregada no desenvolvimento da Gestão de Retalhos a partir de retalhos de tecido de fibra de carbono prepreg. Esta etapa adota uma abordagem qualitativa e quantitativa, fundamentada na pesquisa-ação, permitindo o desenvolvimento e a validação da análise de viabilidade econômica e ambiental apresentada neste projeto.

3.1.1 Análise de Custo-Benefício (ACB)

A ACB é uma ferramenta clássica da gestão financeira e estratégica que permite comparar os custos operacionais com os benefícios econômicos.

A presente análise visa avaliar a viabilidade econômica e ambiental do armazenamento controlado de retalhos de tecido de carbono prepreg in natura, com o objetivo de reaproveitá-los em aplicações que não exigem desempenho estrutural elevado.

Para compor o estudo, foram realizadas as etapas de A à D, conforme listado abaixo:

- A. Custo com descarte de resíduos de tecido de carbono prepreg;
- B. Custos de armazenamento deste material;
- C. Cálculos de ganho com o uso dos retalhos;
- D. Resultados do custo-benefício com o uso dos retalhos.

3.1.1.1 Custos com descarte

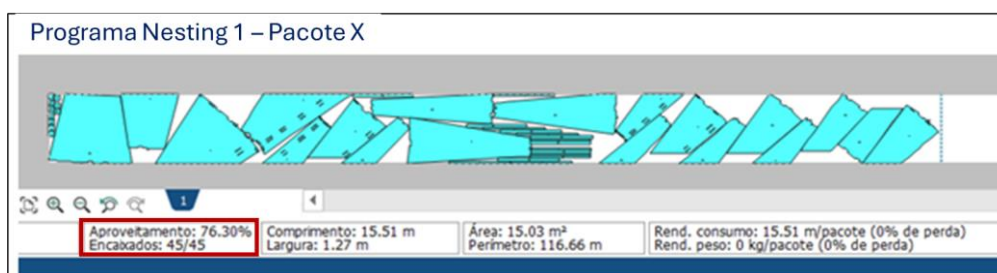
Para embasar o estudo em dados reais de produção, realizado a análise do consumo mensal de tecido de carbono prepreg e seu descarte com base na linha de produção de um pacote de produtos (denominado Pacote X para preservar os dados da empresa de pesquisa).

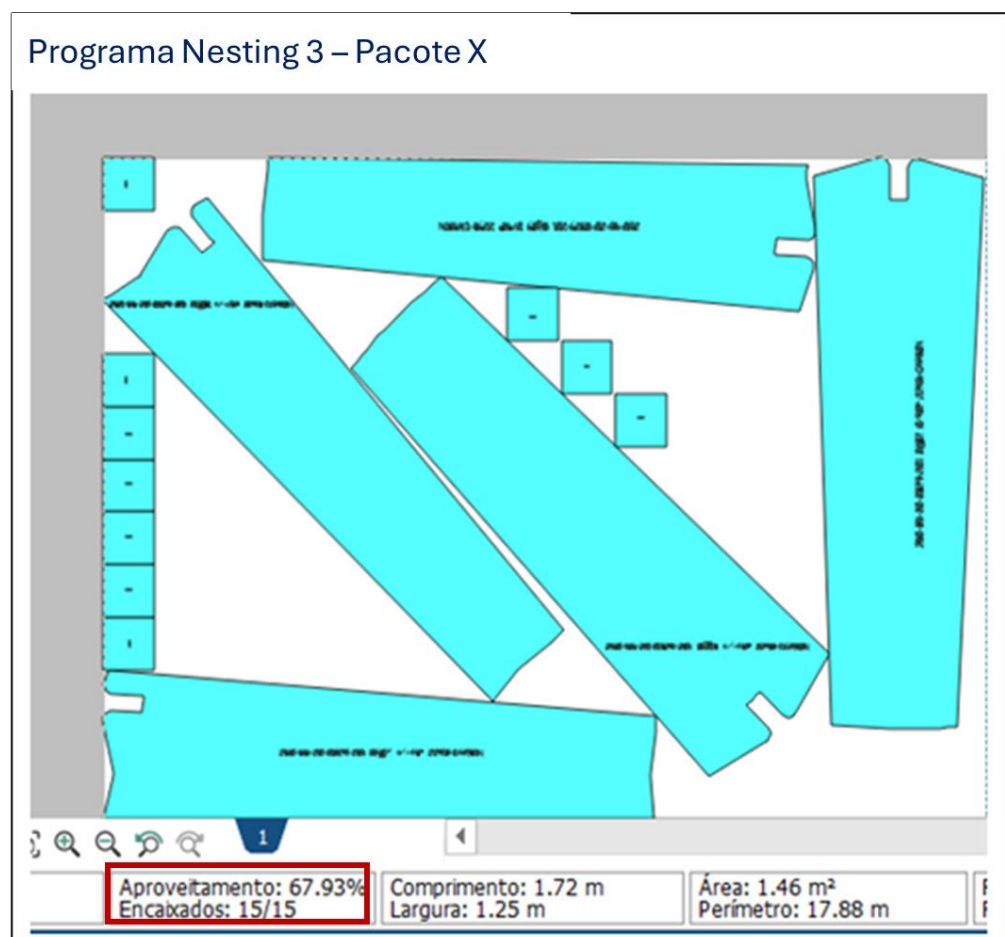
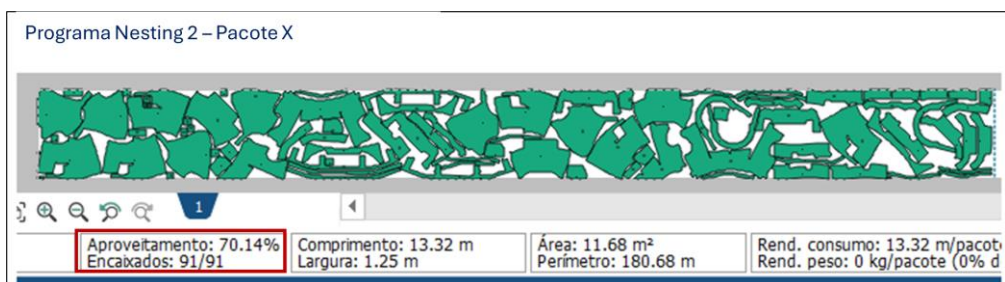
Utilizando o material CARBON PLAIN WEAVE FABRIC, CURE 180°, 8552S AS4 e os dados de propriedades descritas no *Data Sheet* do fabricante Hexcel.

Para visibilidade do custo-benefício deste projeto em uma demanda futura, estimado também o cálculo anual simulando uma linha de produção operante em 100% de sua capacidade. Os resultados são dispostos nas Tabelas 5 e 6.

Em análise do Pacote X (pacote estudado), verificado o percentual médio de retalhos gerados com base nos valores percentuais de aproveitamento de material demonstrados no extrato gerador do *Nesting* – Figura 8. Consolidado então a resultante média de 28,54% de material não aproveitado (retalhos).

Figura 8 – Extrato gerador de *Nesting* – referente ao Pacote X





Fonte: Nesting Pacote X – Ralle Usinagem e Composto (2025)

Tabela 5– Dados de consumo e dos retalhos gerados

Demanda	Qtd tecido utilizado (m ²)	Valor médio de compra do tecido / m ²	Valor médio de compra do tecido / m ² ¹	Sobras geradas (m ²) (base em 28,54%)	Valor agregado das sobras (R\$/ m ²)
Atual (Pacote X)	32,75	US\$ 60,00	R\$ 323,08	9,35	R\$ 561,00
100% da capacidade / ano	177.915,91	US\$ 60,00	R\$ 323,08	50.777,20	R\$ 3.046.632,12

Fonte: Custos Ralle (2025)

¹Conforme Banco Central do Brasil., para fins de conversão cambial dos valores apresentados, foi utilizada a taxa média de câmbio do dólar americano em relação ao real brasileiro, correspondente ao período de 2025 (R\$ 5,3846). Essa abordagem permite maior consistência nas comparações econômicas ao longo do tempo, evitando distorções causadas por flutuações pontuais da moeda.

Para compor o custo com o descarte de resíduos Classe I – Contaminados, analisado as especificações técnicas do material para atribuição de espessura e volume, a fim de possibilitar o cálculo estimado, conforme demonstrado abaixo:

- a. Fabricante: Hexcel.
- b. Descrição: 8552S AS4 *Plain Weave Fabric*
- c. Tipo de fibra: AS4 carbono
- d. Tipo de tecido: *Plain Weave* (AW)
- e. Gramatura: 193 g/m²
- f. Densidade estimada: cerca de 1,6 g/cm³ = 1600 kg/m³
- g. Espessura do tecido curado: 0,195mm

Para o cálculo de volume do tecido por m², utilizado a Fórmula 2.

$$\text{Volume por m}^2 = \text{área (m}^2) \times \text{espessura (m)} \quad (2)$$

$$\text{Volume por m}^2 = 1 \text{ m}^2 \times 0,000195 \text{ m}$$

$$\text{Volume por m}^2 = 0,000195 \text{ m}^3$$

Sabendo que os custos de descarte dos resíduos são computados por caçamba cheia com volume de 5m³, a Tabela 6 demonstra os custos totais para descarte de resíduos Classe I – Contaminados por m³ e a Tabela 7, os custos para o projeto nos 2 cenários estudados.

Tabela 6– Custo para descarte de resíduo Classe I – Contaminados

Custo com transporte (caçamba de 5m³)	Custo com transporte / m³	Custo de destinação - Coprocessamento / m³	Custo TOTAL para descarte / m³
R\$ 700,00	R\$ 140,00	R\$ 500,00	R\$ 640,00

Fonte: Custos Ralle (2025)

Tabela 7– Custo para descarte de resíduo no projeto

Demanda	Sobras geradas (m2)	Volume de tecido por m2 (m3)	Sobras geradas (m3)	Custo TOTAL do descarte
Pacote X	9,35		0,00182325	R\$ 1,17
100% da capacidade /ano	50.777,20	0,000195	9,901554404	R\$ 6.336,99

Fonte: Autoras (2025)

Conclui-se que além dos custos de descarte dos materiais demonstrados nas Tabelas 6 e 7 (R\$ 0,12 / m²), as empresas que utilizam este tipo de material também possuem uma perda financeira pelo descarte de um tecido de alto custo, que deixa de ser transformado em produto conforme demonstrado na Tabela 5 (R\$ 323,08 / m²).

Conclui-se também que o custo de transporte e coprocessamento para descarte do tecido de carbono prepreg compete à $\approx 0,21\%$ do valor venal do material (considerando sua área).

3.1.1.2 Custos de armazenamento dos retalhos

Realizado a análise dos custos para o armazenamento dos retalhos de prepreg, em operação própria e em operação terceirizada.

Na modalidade de armazenamento em operação própria, a empresa é responsável por toda a infraestrutura, manutenção, energia, mão de obra e controle dos materiais estocados. Considerações sobre os cálculos da Tabela 9:

- a. Ocupação das câmaras frias: Para o consumo energético, foi calculado a taxa percentual de ocupação na Tabela 8 com relação ao equipamento total que possui capacidade bruta de 114m³ e capacidade útil de 3m³. Este percentual foi utilizado para definição do custo relativo à taxa percentual de ocupação no freezer, como informativo na Tabela 9.
- b. Custos de Infraestrutura: Para modalidade de operação própria foi excluída a aquisição de freezer industrial ou câmara fria, uma vez que as empresas que utilizam o material estudado – tecido de fibra de carbono prepreg – já dispõem desses equipamentos em suas operações rotineiras. Para modalidade de operação

terceirizada foi considerado a locação de *containers reefer* de 10 pés, com capacidade: capacidade 14,8m³ de armazenamento interno.

- c. Custos relacionados a monitoramento, armazenamento e controle e qualidade: O tempo computado para essas atividades foi estimado com base em um colaborador destinado para estas operações. Essa abordagem considera empresas que já utilizam o tecido de fibra de carbono prepreg como material base, e que aproveitam sua infraestrutura – sistemática existente e parte de seus recursos operacionais – para realizar a gestão de retalhos.

Tabela 8 – Taxa de ocupação no freezer

Demanda	Sobras Total geradas no pacote (m³)	Sobras Total geradas no pacote/mês (m³)	Capacidade útil de armazenamento (m³)	Taxa de ocupação no freezer (%)	Peso do material (kg)
Pacote X	0,00182325	-		0,0608%	1,80
100% da capacidade /ano	9,901554404	0,825129534	3	27,5043%	9.800,00

Fonte: Autoras (2025)

Tabela 9 – Custo mês de armazenamento no Pacote 100% da capacidade – Operação Própria

Item	Descrição	Custo médio de operação do equipamento por mês	Custo conf. taxa % de ocupação no freezer (R\$)
Armazenamento refrigerado, monitoramento e controle	1 colaborador/mês	R\$ 8.000,00	R\$ 6.601,04
Gerador	Gerador para segurança do sistema	R\$ 7.200,00	R\$ 5.940,93
Energia elétrica	Consumo médio de 16.200 kWh / mês. Taxa de R\$0,82/kWh	R\$ 13.284,00	R\$ 10.961,02
Manutenção preventiva dos equipamentos	Troca de peças, limpeza, ajustes técnicos (36h / mês)	R\$ 1.383,46	R\$ 1.141,53
Locação	Custo com locação do espaço (36,6m ²)	R\$ 669,83	R\$ 552,70
Depreciação dos equipamentos	Custo mensal proporcional à vida útil dos freezers (10% ao ano)	R\$ 625,00	R\$ 515,71
TOTAL		R\$ 31.162,29	R\$ 25.712,93

Fonte: Autoras (2025)

Para empresas que desejam demandar a atividade de armazenamento e gestão dos retalhos para uma terceirizada, foi analisado o custo na Tabela 10. Este tipo de operação também pode ser utilizado para estruturação de uma central cooperativa de armazenagem e uso dos materiais retalhados, sendo a venda destes tecidos uma fonte de renda para a organização geradora.

**Tabela 10 - Custo mês de armazenamento no Pacote 100% da capacidade –
Operação Terceirizada**

Item	Descrição	Custo médio de operação do equipamento por mês	Custo conf. taxa % de ocupação no freezer (R\$)
Locação	Locação de containers reefer (10 pés): capacidade 14,8m ³	R\$ 3.500,00	R\$ 195,13
Transporte entrega	Taxa logística (Taxa única)	R\$ 2.500,00	R\$ 208,33
Energia	Consumo médio de 8–12 kWh/hora, não incluso no aluguel. Taxa de R\$0,82/kWh	R\$ 7.084,80	R\$ 394,99
Gerador	Gerador para segurança do sistema	R\$ 7.200,00	R\$ 401,41
Taxa de controle	Inventários, identificação, picking e controle (fixo)	R\$ 1.200,00	R\$ 1.200,00
TOTAL		R\$ 21.484,80	R\$ 2.399,87

Fonte: Autoras (2025)

Quanto ao custo de armazenagem, conclui-se que o custo de armazém terceirizado é mais rentável em 31,1% que o armazém próprio. A armazenagem terceirizada da Tabela 10 considera a locação de *containers reefer*, a qual a energia consumida é de responsabilidade da empresa que o loca.

Não há muita oferta de empresas especializadas que operem com armazenagem de congelados (menor que -20°C). Para estes casos especiais, verifica-se que há oportunidade de mercado para que empresas almejem atuar neste segmento com a armazenagem terceirizada de retalhos prepeg, tanto para beneficiamento próprio quanto para prestação deste tipo de serviço.

O uso do material em linha de produção própria possibilita que a organização destine o material de alto custo em ciclo fechado (*upcycling*), sem que ela perca o seu valor. Já a destinação para uma central cooperativa (logística reversa) pode gerar a depreciação no valor

de venda deste material, enquadrando-se em ciclo aberto (*downcycling*), mas ainda sim gerando uma rentabilidade para a empresa geradora.

3.1.1.3 Cálculos com ganho do uso de retalhos

O reuso de retalhos possibilita que a organização possa reduzir o consumo de recursos naturais – o que ocorre em escala comum na fabricação dos materiais contínuos -, bem como gerar créditos ambientais compatíveis com a redução de carga de carbono que deixam de emitir na atmosfera. A Tabela 11 descreve as resultantes para o cenário do Pacote de 100% da capacidade.

**Tabela 11– Crédito de carbono pela emissão evitada de GEE –
Pacote 100% da Capacidade**

Benefícios gerados	Qtd. De retalhos gerado (m²)	Emissão evitada (kg CO₂e/m²)	Crédito gerado (t CO₂e)	Valor médio por crédito (US\$)	Retorno médio financeiro (R\$) ¹
Fator de cálculo	-	1	0,001		R\$ 0,13
				25	
100% da capacidade	50.777,20	246.777,20	246,78		R\$ 33.219,91

Fonte: Autoras (2025)

¹Conforme Banco Central do Brasil., para fins de conversão cambial dos valores apresentados, foi utilizada a taxa média de câmbio do dólar americano em relação ao real brasileiro, correspondente ao período de 2025 (R\$ 5,3846). Essa abordagem permite maior consistência nas comparações econômicas ao longo do tempo, evitando distorções causadas por flutuações pontuais da moeda.

3.1.1.4 Resultados do custo-benefício com o uso dos retalhos

A Tabela 12 apresenta a consolidação dos resultados obtidos a partir da análise de custo-benefício relacionada ao aproveitamento de retalhos de tecido de fibra de carbono prepeg. Os dados sintetizam os aspectos discutidos nos tópicos 3.1.1.1 a 3.1.1.3, abrangendo tanto os custos operacionais envolvidos na implementação do reaproveitamento quanto os benefícios econômicos e produtivos gerados pela adoção dessa prática.

Tabela 12 - Benefícios quantitativos com o uso de retalhos / ano

	Tipo de aplicação	Referência de cálculo	Retorno financeiro médio no Pacote de 100% da capacidade / ano (R\$)
Operacional	Redução de compra de MP ¹	Tabela 5	R\$ 3.046.632,12
	Redução com descarte ²	Tabela 7	R\$ 6.336,99
	Custo armaz. Próprio ³	Tabela 9	-R\$ 308.555,11
	Custo armaz. Terceir. ⁴	Tabela 10	-R\$ 257.817,60
Ambiental	Crédito carbono ⁵	Tabela 11	R\$ 33.219,91
	Auditorias e Certificações ⁶	Tópico 2.5.1	-R\$ 150.000,00
	Lucro em novos produtos ⁷	Tópico 2.5	30%
Total em armazenamento próprio			R\$ 2.627.633,92
Total em armazenamento terceirizado			R\$ 2.678.371,43

Fonte: Autoras (2025)

¹Redução de compra de matéria-prima (alto custo) por retalhos reaproveitados

²Redução dos valores de descarte de Contaminados - Classe I

³Custo por ano de armazenamento em câmaras frias - Operação própria

⁴Custo por ano de armazenamento em câmaras frias - Operação terceirizada

⁵ Crédito de Carbono pela emissão de GEE evitada

⁶ Custo com auditorias e certificações para Crédito de Carbono

⁷ Valorização de subprodutos a partir da venda das peças produzidas com os retalhos.

Quadro 8 – Benefícios qualitativos com o uso de retalhos

Tipo de aplicação	Benefícios gerados	Referência
Ambiental e Estratégica	Acesso a mercados com exigências ambientais mais rigorosas	Conforme tópico 2.6
	Sustentabilidade e valorização da imagem corporativa	
	Atração de investimentos e entrada em projetos sustentáveis	

Fonte: Autoras (2025)

Diante dos resultados consolidados na Tabela 11 e no Quadro 8, observa-se que o reaproveitamento de retalhos de tecido de fibra de carbono prepreg representa uma estratégia

altamente vantajosa sob os aspectos econômico, operacional, ambiental e estratégico para altas demandas. A análise evidencia retornos financeiros expressivos de $\approx 0,02\%$ sobre o faturamento de linha da empresa no Pacote 100% da Capacidade, com destaque para a redução de custos com compra de matéria-prima, tornando os custos para a operação pouco relevantes diante do retorno estimado.

O percentual de lucro foi estimado em 30% sobre o valor de venda. Este valor não foi contabilizado nos cálculos deste projeto, pois o lucro depende do faturamento da empresa e da sistemática de atuação referente aos custos de operação. Desta forma, considera-se como grande potência a reversão de retalhos em novos produtos, visando não somente o retorno financeiro calculado neste projeto, mas também o aumento do faturamento e lucro à partir da economia circular gerada.

Além disso, os benefícios ambientais associados à mitigação de emissões de GEE e à valorização da imagem corporativa reforçam o potencial competitivo da prática, ampliando o acesso a mercados mais exigentes e atraindo investimentos sustentáveis.

Assim, a adoção sistemática do reaproveitamento de retalhos consolida-se como uma solução eficaz para promover eficiência produtiva, responsabilidade ambiental e geração de valor agregado.

3.1.2 Desafios e limitações

A implementação de processos envolvendo o reaproveitamento de retalhos de prepeg apresenta uma série de desafios técnicos e operacionais que devem ser cuidadosamente gerenciados para garantir a eficiência e a conformidade com normas ambientais e de qualidade. Os principais pontos críticos incluem:

1. Gestão de validade e rastreabilidade de lotes: O prepeg possui vida útil limitada, após a qual suas propriedades físico-químicas podem ser comprometidas. Dessa forma, é imprescindível que os operadores estejam capacitados para identificar corretamente a data de validade dos materiais e alocá-los de forma adequada aos kits de retalhos, assegurando a integridade do processo produtivo. Baixa oferta de empresas terceirizadas que realizam o armazenamento e a gestão de materiais em estado de congelamento (-20°C).

2. Triagem e seleção de materiais reutilizáveis: Nem todos os retalhos disponíveis são aptos para reutilização. É necessário realizar uma inspeção visual criteriosa para avaliar as condições dos materiais, descartando aqueles que não atendem aos requisitos mínimos de qualidade e desempenho.

3. Capacitação técnica da equipe operacional: A operação exige conhecimento específico sobre os parâmetros de laminação e as regras de aplicabilidade dos materiais em retalho. Portanto, é fundamental investir na formação dos colaboradores envolvidos, garantindo que estejam aptos a operar com segurança e precisão dentro dos padrões estabelecidos.

4. Conformidade com certificações ambientais: Para assegurar a sustentabilidade do processo e atender às exigências legais, é necessário realizar auditorias periódicas que validem as práticas adotadas e possibilitem a emissão e manutenção das certificações ambientais pertinentes.

3.1.3 Indicadores de viabilidade

A avaliação da viabilidade econômica de um projeto é fundamental para orientar decisões estratégicas e garantir a sustentabilidade das ações propostas. Neste estudo, foram utilizados dois indicadores principais para mensurar o desempenho financeiro da iniciativa de reaproveitamento de retalhos de prepreg: o Retorno sobre Investimento (ROI) e o *Payback*.

Esses parâmetros permitem estimar o potencial de retorno, o tempo necessário para recuperar o capital investido no projeto.

3.1.3.1 Retorno sobre investimento (ROI)

O *ROI* é um indicador financeiro utilizado para mensurar a eficiência econômica de uma ação, refletindo o lucro obtido em relação ao capital investido. Trata-se de uma métrica essencial para justificar a viabilidade econômica da adoção de práticas inovadoras, como o reaproveitamento de retalhos de prepreg.

A metodologia de cálculo do *ROI* está representada na Fórmula 3:

$$ROI = \frac{(Go - In)}{In} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Go: Ganho obtido

In: Investimento inicial

Para ilustrar a potencialidade econômica do projeto, a Tabela 13 apresenta os resultados dos cálculos de *ROI* aplicado ao cenário estudado: Pacote 100% da Capacidade.

Tabela 13 – Retorno sobre o investimento no cenário estudado

Referência (Tabela 12)	Pacote 100% da capacidade
Ganho Obtido	R\$ 3.086.189,33
Custo op. Propria + Custo de certificação	R\$ 458.555,11
Custo op. Terceirizada + Custo de Certificação	R\$ 407.817,60
ROI – operação própria	573%
ROI – operação terceirizada	657%

Fonte: Autoras (2025)

A análise revelou contrastes significativos entre os dois cenários avaliados. Na modalidade de operação terceirizada o *ROI* demonstrou ser mais rentável que em operação própria.

Por outro lado, para a operação terceirizada existe a barreira da escassez de empresas especializadas que operem com armazenagem de congelados (menor que -20°C). Para estes casos especiais, verifica-se que há oportunidade de mercado para que empresas almejem atuar neste segmento com a armazenagem terceirizada de retalhos prepreg, tanto para beneficiamento próprio quanto para prestação deste tipo de serviço.

3.1.3.2 *Payback* estimado

O *Payback* é um indicador utilizado para estimar o tempo necessário para recuperar o valor investido em um projeto, considerando a diferença entre os benefícios financeiros gerados e os custos operacionais envolvidos. Trata-se de uma métrica estratégica para avaliar a viabilidade econômica de iniciativas, especialmente em contextos industriais que demandam retorno rápido sobre o capital aplicado.

A representação do cálculo em unidade de tempo dia, está representada na Fórmula 4.

$$Payback = \frac{Investimento}{(Benefício - Custo)} \times 365 \quad (4)$$

Para este estudo, foram analisadas duas modalidades: em operação de armazenagem própria e em operação terceirizada. A Tabela 14 apresenta os valores de investimento, benefício, custo operacional e o tempo estimado de retorno para cada modalidade.

Tabela 14 – Tempo (dias) para Retorno sobre o investimento

Referência (Tabela 12)	Pacote 100% da capacidade
Investimento	R\$ 150.000,00
Benefício	R\$ 3.086.189,33
Custo op. Própria	R\$ 308.555,11
Custo op. Terceirizada	R\$ 257.817,60
<i>Payback - Operação Própria</i>	19,71
<i>Payback - Operação Terceirizada</i>	19,35

Fonte: Autoras (2025)

A avaliação de viabilidade demonstrou que o reaproveitamento de retalhos de prepreg apresenta forte potencial econômico, especialmente quando aplicado em larga escala. O *Payback* nas duas modalidades apresentou resultado baixíssimo comparado aos projetos tradicionais de mercado, com retorno praticamente imediato – menor que um mês - sobre o investimento.

O resultado do *Payback* e *ROI* estimados evidenciam que, quando o reaproveitamento é integrado a operações de maior porte, torna-se não apenas viável, mas extremamente lucrativo.

Dessa forma, conclui-se que o projeto é economicamente viável e promissor, desde que direcionado a contextos de produção com alta demanda e estrutura adequada. A adoção dessa prática pode contribuir significativamente para a sustentabilidade industrial, a redução de desperdícios e a geração de valor em múltiplas frentes produtivas

3.1.4 Gestão de Estoques e Logística Interna

Realizada aplicação da técnica FEFO (*First Expired, First Out*) para priorizar o uso de produtos com a data de vencimento e/ou exposição mais próxima, independentemente da ordem em que foram recebidos.

Para gerenciamento dos rolos e kits (materiais contínuos), a organização possui um formulário em Excel que gera dados de horas restantes de exposição, de validade e

quantidade de material utilizado em tempo real administrado pelo operador de corte responsável pela manipulação destes tecidos e imputa automaticamente estes dados à uma planilha geral de gerenciamento de materiais armazenados em freezer.

De forma a minimizar custos de investimentos em *softwares* e ERPs e utilizar ferramentas de uso comum na organização - *Microsoft 365* -, foi criado um aplicativo no *Power Apps* nomeado *Carbon Control* que utiliza a planilha geral para integrar dados em seu banco, permitindo:

- Controle por lote de retalho gerado
- Registro de data de fabricação e validade
- Tempo de exposição fora da refrigeração
- Data limite de cura (TTL – *Time to Life*)
- Alertas automáticas de validade;
- Integração com Excel e *SharePoint*;
- Gestão visual do gerenciamento dos rolos, kits e dos retalhos;
- Notificações por e-mail ou *Teams*.

Este controle permite que a organização identifique quais lotes deve consumir primeiro, evitando desperdícios e garantindo a qualidade do retalho aplicado.

3.1.5 Seleção dos retalhos

Para garantir o armazenamento adequado dos retalhos e preservar sua qualidade para uso futuro, recomenda-se a realização imediata da triagem dos materiais gerados após o corte. A seleção deve considerar os seguintes critérios:

- Presença das duas películas plásticas externas de proteção;
- Ausência de dobras, rugas ou deformações;
- Dimensões mínimas: 50 mm de largura e comprimento;
- Dimensões máximas: 500mm de largura e comprimento, possibilitando o armazenamento nas embalagens destinadas para este fim.
- Origem rastreável, com identificação do lote e momento do corte.

A triagem deve ser realizada logo após o término do processo de corte, antes do reabastecimento da máquina ou troca de materiais e lotes. Essa prática evita misturas indesejadas e garante a rastreabilidade dos retalhos, essencial para controle de qualidade e conformidade com processos de reaproveitamento.

Se identificado necessidade de recorte para adequar à dimensão máxima para armazenamento sem que haja dobras no material, deve-se verificar a melhor otimização e aproveitamento possível.

Os retalhos que não atendem ao padrão estabelecido, devem seguir para o descarte de contaminados determinado pela organização.

3.1.6 Armazenamento dos retalhos

O objetivo é realizar a padronização de um método que irá garantir a integridade físico-química dos retalhos de prepreg durante o armazenamento, evitando contaminação por umidade ou agentes externos e a organização destes materiais em estoque.

Cada lote de prepreg é embalado e sua rastreabilidade mantidos para uso posterior.

As condições de armazenamento e controle são:

- Temperatura de armazenamento: -18 °C mínimo;
- Local de armazenamento: Câmara fria / freezer industrial, com controle de acesso e monitoramento eletrônico contínuo da temperatura;
- Local de posicionamento: embalagem secundária posicionada em paletes de plástico ou prateleiras segmentadas para este fim.

Embalagem primária recomendada:

- Tipo: saco plástico de polietileno selado termicamente (Figura 9). Outra opção de embalagem é o saco de polietileno com zíper hermético duplo reforçado como barreira contra umidade (Figura 10), o que permite múltiplas aberturas e fechamentos manuais sem perda de vedação e que pode ser adquirido em dimensões personalizadas, conforme volume de retalhos.

Figura 9 – Embalagem selada termicamente



Fonte: Rallc (2025)

Figura 10 – Embalagem com duplo zíper



Fonte: Rallc (2025)

- Reutilização: tanto os sacos selados termicamente quanto os com zíper hermético podem ser reutilizados se sua integridade for mantida;
- Identificação: etiquetado com data de entrada, validade, tipo de fibra e lote/rolo a qual foram originados e a quantidade de tecido que possui no pacote (m²). Estes dados irão auxiliar o gerenciamento de estoque, a posterior seleção de uso destes materiais, bem como minimizar a exposição indevida de materiais;
- Cuidados no armazenamento: cuidar para que os materiais não sejam dobrados, o que pode gerar rugas indesejadas no processo de uso do material.

Embalagem secundária recomendada:

- Caixas de papelão contendo sachês dessecantes de sílica gel para auxiliar no controle interno de umidade (se utilizado os sacos com zíper herméticos);
- Material: Papelão branco tratado / plastificado com resistência térmica (Suporta temperaturas de até -80 °C, com modelo similar aos utilizados para amostras laboratoriais, tubos criogênicos), contendo camada impermeável para evitar absorção de umidade e congelamento do papelão (Figura 11);
- Formato: Com tampa;
- Tamanho: recomendável caixa com L50 x C50 x A70 cm;
- Resistência: empilhamento de 3 caixas, para otimização em estoque;
- Quantidade: mínimo de 1 caixa para cada tipo de material utilizado. A quantidade pode ser ajustada conforme o aumento de demanda de retalhos;
- Identificação: etiqueta com a descrição do tipo de material que nela será armazenado.

Figura 11 – Caixa de papelão tratada



Fonte: Eppendorf (2025)

Procedimento para controle:

O colaborador responsável pelo armazenamento dos materiais deve acessar o aplicativo *Carbon Control* e registrar os dados da etiqueta do retalho. Esse processo gera automaticamente um número de identificação para o pacote, que deve ser marcado diretamente na embalagem com caneta permanente, facilitando o rastreamento e o controle de uso futuro.

Como o sistema possui integração automática, o colaborador da área de suprimentos — responsável pelo controle de materiais refrigerados — deve acompanhar os alertas de vencimento enviados pelo aplicativo via *Teams*. Em conjunto com o setor de planejamento, esse profissional será responsável por direcionar os materiais próximos ao vencimento para aplicações previamente configuradas em produtos de *upcycling*.

Ao retirar o material do freezer para uso, é obrigatório registrar no aplicativo o número do pacote correspondente. Isso permite que o sistema realize a baixa automática do item e gere as datas de limite de cura, conforme os parâmetros definidos, gerando dados de estoque e registros exigidos para as certificações ambientais para Crédito de Carbono.

Para garantir a organização e a atualização contínua do processo, é essencial manter os procedimentos já estabelecidos para o controle de materiais contínuos (como rolos e kits). Isso inclui o registro da saída e retorno ao freezer, bem como a contabilização precisa da quantidade utilizada e da geração de novos retalhos.

3.2 Considerações sobre a Gestão de retalhos

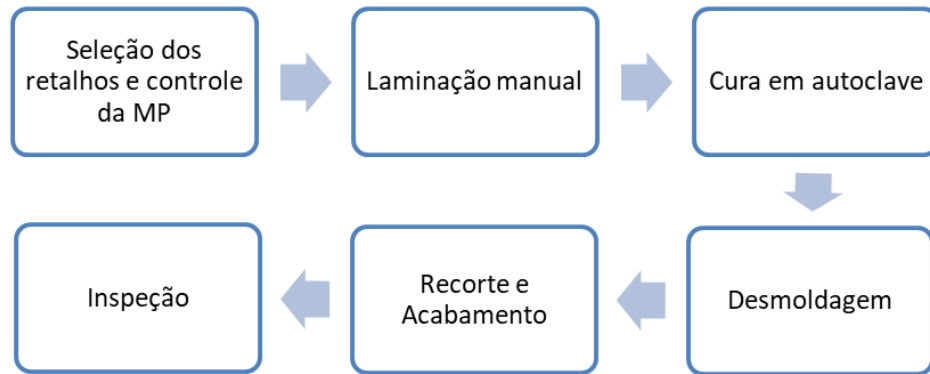
A análise demonstra que o reaproveitamento de retalhos de prepreg in natura é economicamente viável, especialmente em empresas que já operam com compósitos e possuem infraestrutura de armazenamento refrigerado. Além dos ganhos financeiros, a prática contribui para a redução custos com matéria-prima, minimiza desperdícios, evolução no alcance de metas de sustentabilidade e reforça o compromisso com a sustentabilidade industrial — desde que o controle de qualidade e o gerenciamento logístico sejam bem executados.

3.3 Fabricação com uso de retalhos

Este capítulo descreve a metodologia empregada para o processo padronizado de laminação a partir de retalhos de tecido de fibra de carbono prepreg.

A Figura 12 ilustra a estrutura do processo de manufatura utilizando os retalhos na produção.

Figura 12 – Processo de reaproveitamento dos retalhos de tecido de carbono prepeg



Fonte: Autoras (2025)

Os próximos tópicos seguirão com o detalhamento das etapas de Seleção de retalhos, Laminação e Inspeção. Demais etapas devem seguir o processo padrão de cada organização e definições conforme o *Data Sheet* dos materiais utilizados.

3.3.1 Seleção dos retalhos e Laminação

O objetivo desta etapa é selecionar os retalhos apropriados para compor o processo de laminação do produto desejado – configuração descrita no Quadro 9 – e realizar o controle de exposição e determinação do limite de cura.

Quadro 9 – Configuração da laminação

Características	Especificação	Detalhamento
Tecido	Retalhos do material especificado pelo Processo	
Camadas	Conforme especificado pelo Processo	
Orientação	Não aplicável	
Tipo de junção	Topo à topo	Figura 6
Posição das junções	Intercaladas assimétricas	Figura 7

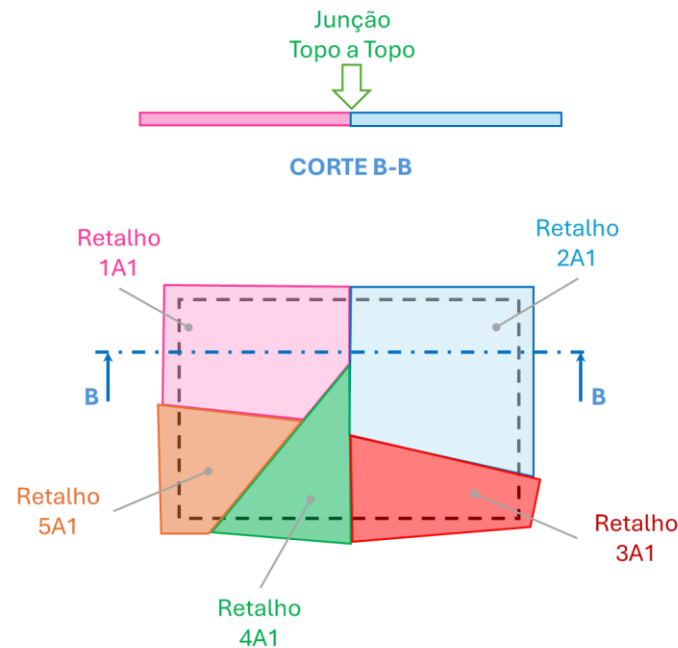
Fonte: Autoras (2025)

O processo é realizado na seguinte sequência:

- Retirada do kit de material na quantidade desejada do *freezer* (MP armazenados em *freezer* a -18°C) e o registro da hora de retirada no aplicativo *Carbon Control*. O app irá gerar uma data limite de cura, que deverá ser anotada no pacote;
- Seleção das amostras em uma montagem de quebra-cabeça, selecionar os retalhos com dimensional / forma apropriada para a montagem do perfil

desejado e formação das camadas de tecido com junção topo a topo conforme Figura 13, mantendo a geometria final do produto desejado;

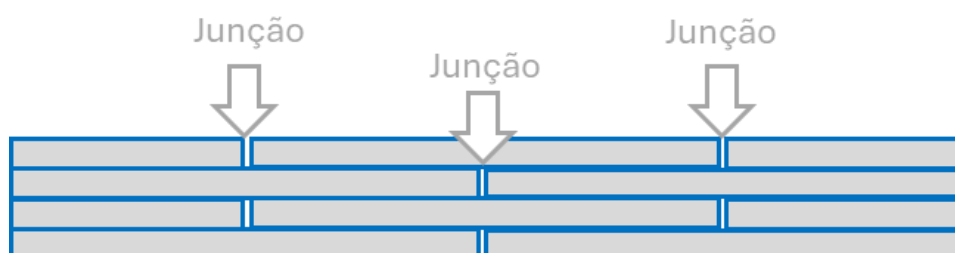
Figura 13 – Junção de camadas



Fonte: Autoras (2025)

- c) Realizar a laminação com retalhos com o número da camada à qual compõe o produto, cumprindo as seguintes estratégias de *lay-up*: sempre posicionar uma camada descontínua entre duas camadas contínuas ou com sobreposição assimétrica de fragmentos, a fim de reduzir a propagação de falhas e melhora a transferência interlaminar de tensões (Figura 14);
- d) Demais características do processo devem seguir o padrão predeterminado pela organização (método de pré-vácuo, bolsa e vácuo final);
- e) Encaminhar o material para cura atentando-se à data limite exposta no pacote.
- f) Selar a embalagem com o restante dos retalhos não utilizados e voltar para o *freezer*, dando nova entrada dos retalhos no app (saldo e n° do kit).

Figura 14 – Lay-up



Fonte: Autoras (2025)

A configuração da sequência de *lay-up* pode mitigar os efeitos negativos do uso de fragmentos menores, indicando que não apenas a integridade do tecido, mas também a sua disposição dentro do laminado (centralizada e alternada), são determinantes para o desempenho final.

A escolha cuidadosa da sequência de *lay-up* é essencial para otimizar o uso de fragmentos de fibra de carbono, garantindo melhor distribuição de tensões e maior eficiência estrutural.

3.3.2 Inspeção

Esta etapa consistiu em garantir que as características dimensionais e visuais (Quadro 10) esperadas na fabricação foram garantidas.

A inspeção dimensional deve ser realizada com instrumentos calibrados em laboratório certificado e o visual garantido por operador qualificado em inspeção de produtos de material compósito.

Quadro 10 – Características para inspeção

Característica	Critério de aceitação
Dimensional	Conforme requisito do produto / cliente
Porosidade (ausência de resina)	Permitido superficialmente, desde que as fibras do tecido não estejam expostas
Empenamento	Isento
Delaminação	Isento
Trinca	Isento
Bolhas (excesso de resina)	Isento
Rugas	Até Alt.0,15mm x comp. 25mm

Fonte: Autoras (2025)

Para compor os resultados, é recomendável realizar por amostragem a inspeção por Ultrassom para garantir que não haja falhas na estrutura do produto.

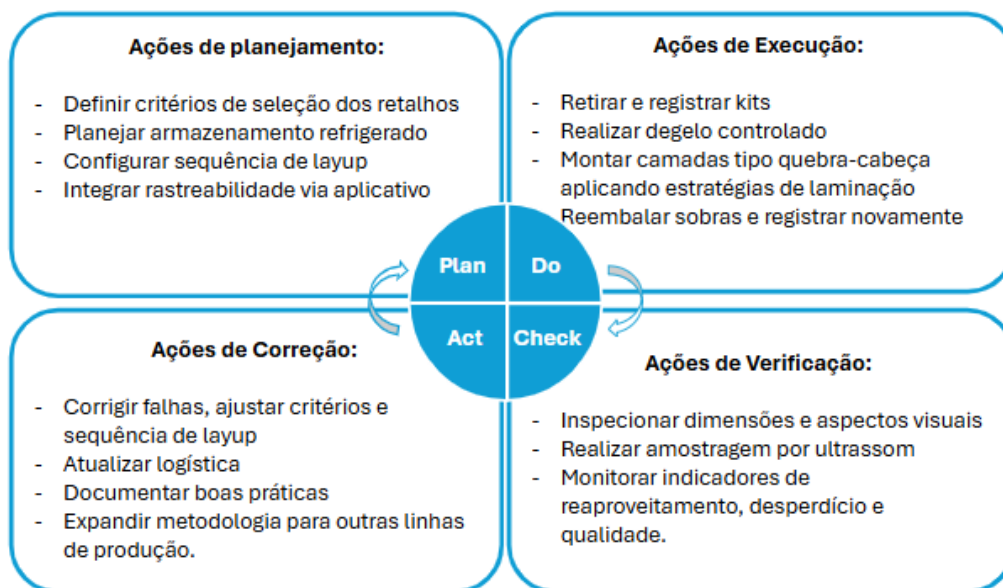
3.4 Gestão da Qualidade

A utilização de ferramentas como PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) e o 5S para organização do ambiente de armazenamento podem auxiliar na estruturação do processo de

gestão do reuso das sobras de prepreg, com o objetivo de garantir viabilidade econômica e sustentabilidade no reaproveitamento de retalhos.

O processo segue o ciclo PDCA (Figura 15), com reuniões mensais para avaliar falhas (inclusive estruturais conforme definidas no Quadro 10), propor melhorias e padronizar procedimentos.

Figura 15 – Ciclo PDCA do projeto



Fonte: Autoras (2025)

O PDCA tem o propósito de garantir que o reaproveitamento de retalhos de prepreg seja controlado, eficiente e sustentável, alinhando qualidade técnica com metas ambientais e econômicas.

3.5 Possibilidades de Mercado para Aplicação dos Retalhos de Prepreg

A reutilização de resíduos de tecido de fibra de carbono prepreg insere-se como prática alinhada à economia circular, oferecendo vantagens econômicas e ambientais. Apesar das limitações de formato e dimensão, esses fragmentos apresentam elevada aplicabilidade em produtos de menor porte e sem exigências estruturais críticas, como drones, acessórios automotivos, equipamentos esportivos e itens de design industrial.

O mercado global de compósitos leves projeta crescimento contínuo estimando atingir US\$ 5,67 bilhões até 2030. Nesse contexto, os drones destacam-se como nicho estratégico, dada a compatibilidade entre suas exigências de leveza e precisão dimensional e as propriedades dos resíduos, permitindo redução de custos sem comprometer desempenho.

Além dos drones, há potencial para aplicações em produtos premium e funcionais, como painéis internos automotivos e peças personalizadas, que valorizam atributos de leveza, estética e sustentabilidade. O fortalecimento das políticas de responsabilidade ambiental corporativa (ESG) e a valorização de produtos sustentáveis ampliam a atratividade dessa prática e oportunidades em setores emergentes de manufatura avançada, conforme denota o Quadro 11.

Quadro 11– Oportunidades de mercado para uso de retalhos

Segmento	Aplicações Potenciais	Vantagens Técnicas e Econômicas	Valor Total de Venda no Mercado (estimado)
Drones	Carcaças, suportes estruturais, braços e componentes não críticos	- Redução de custos produtivos- Manutenção de leveza e resistência- Alta compatibilidade dimensional	Mercado global estimado em US\$ 55 bilhões até 2030, impulsionado por agricultura, logística e monitoramento. (Grand View Research, 2024)
Acessórios Automotivos	Painéis internos, suportes, capas, peças de acabamento	- Leveza e estética refinada- Redução de descarte industrial- Boa aceitação em produtos premium	Mercado global de componentes automotivos de compósitos leves deve alcançar US\$ 9,3 bilhões até 2030 (Verified Market Reports, 2024).
Equipamentos Esportivos	Bicicletas, pranchas, raquetes e acessórios de alto desempenho	- Alta resistência mecânica- Excelente relação peso/desempenho- Atraente ao consumidor consciente	Mercado global de equipamentos esportivos em compósitos projetado em US\$ 5,1 bilhões até 2030. (Grand View Research, 2024)
Design Industrial e Produtos de Consumo Premium	Mobiliário leve, peças decorativas, componentes personalizados	- Valor estético e inovação de material- Possibilidade de customização- Reutilização de resíduos em pequena escala	Mercado global de design sustentável e produtos premium supera US\$ 45 bilhões (2025), com tendência de alta. (Verified Market Reports, 2024)
Mercado Aeroespacial e Mobilidade Elétrica (indireto)	Componentes secundários e não estruturais	- Inserção em cadeias de valor complementares- Redução de custos de descarte	Valor global de US\$ 5,67 bilhões até 2030 em fibra de carbono prepreg. (Virtue Market Research, 2024)
Certificações Ambientais / ESG	Reutilização com benefícios ambientais e financeiros	- Redução de custos de descarte- Geração de créditos de carbono- Melhoria de imagem corporativa	Mercado global de ESG e créditos de carbono deve atingir US\$ 250 bilhões até 2030 (Fontgalland et al., 2022).

Fonte: Autoras (2025).

A análise das possibilidades de mercado evidencia que o reaproveitamento de retalhos de prepreg é considerada mais do que uma simples redução de custos, configurando-se como vetor de inovação e posicionamento estratégico. Ao integrar sustentabilidade, eficiência produtiva e valor agregado, essa prática fortalece a competitividade das indústrias e amplia sua inserção em cadeias de produção avançada, consolidando-se como alternativa relevante para o futuro dos materiais compósitos.

4. RESULTADOS

A análise dos dados obtidos no desenvolvimento permitiu avaliar, de forma integrada, os aspectos econômicos, ambientais e estratégicos da prática de reaproveitamento. Os resultados apresentados neste capítulo consolidam os cenários estudados, destacando os ganhos financeiros, a redução de impactos ambientais e a viabilidade operacional da adoção sistemática do reaproveitamento em escalas de produção.

No âmbito deste projeto, os indicadores de reaproveitamento de retalhos foram incorporados ao plano de gestão ambiental, alinhados à norma ISO 14001. A prática foi registrada como ação de melhoria contínua e contribuiu para a obtenção de pontos adicionais em futuras auditorias de certificação ambiental, bem como na participação de programas de reembolso como o Crédito de Carbono.

Abaixo segue a definição dos Key Performance Indicator (KPI) econômicos e ambientais estabelecidos para monitoramento dos resultados e desempenho do projeto.

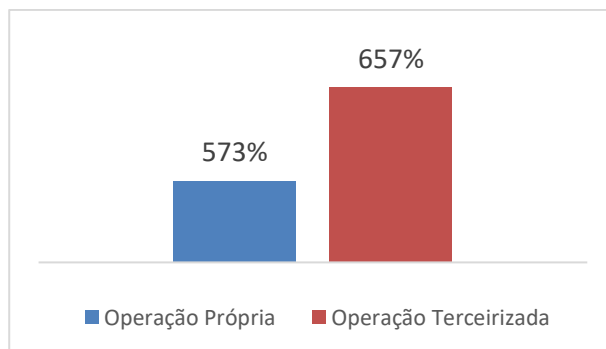
4.1 Indicadores Financeiros

A avaliação de custo-benefício demonstrou que, apesar dos custos associados ao armazenamento e à logística, o reaproveitamento de retalhos é significativamente vantajoso. Os ganhos com a redução da compra de matéria-prima e a eliminação de despesas com descarte superam os custos operacionais, especialmente em cenários de alta demanda.

Além disso, os benefícios ambientais, como a mitigação de emissões de GEE e a valorização da imagem corporativa, reforçam o caráter estratégico da prática.

Os resultados de ROI evidenciaram contrastes entre os cenários analisados, apesar dos custos fixos e das exigências de certificações ambientais. O ROI apresentou valores extremamente positivos, superiores a 573% (Figura 16), comprovando que o reaproveitamento de retalhos em larga escala é altamente lucrativo e sustentável.

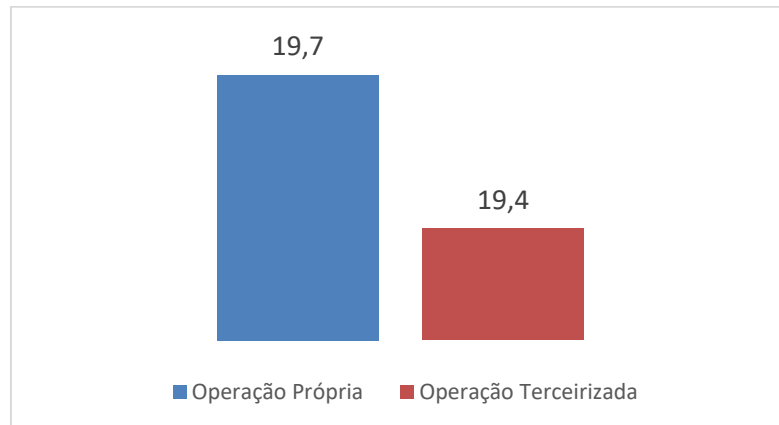
Figura 16 – Indicador ROI – Pacote 100% da Capacidade



Fonte: Autoras (2025).

A análise do *Payback* reforçou a viabilidade econômica do projeto nas duas modalidades e o tempo de retorno manteve-se relativamente curto, em torno 20 dias de operação (Figura 17), evidenciando que o *Payback* foi praticamente imediato e demonstrando que a sistemática quando aplicada em operações de maior escala, garante retorno rápido sobre o investimento e fortalece a competitividade industrial.

Figura 17 - Indicador *Payback* (dias)

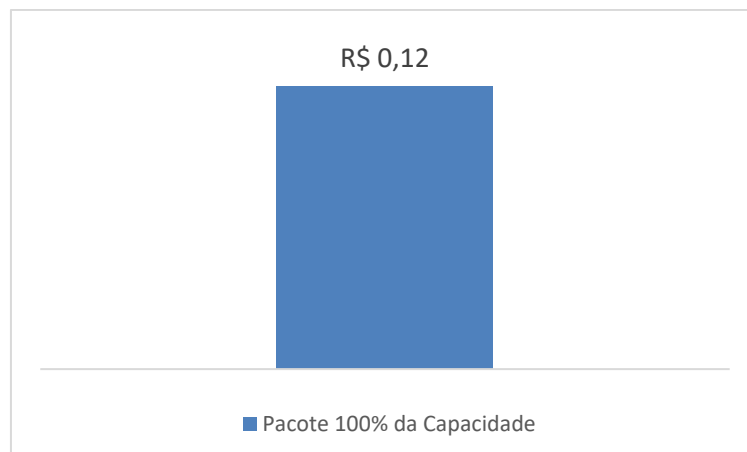


Fonte: Autoras (2025).

4.2 Indicadores Ambientais

A análise dos índices de redução com descartes e de novas compras evidencia que o reaproveitamento de retalhos de prepeg gera impactos econômicos relevantes em diferentes frentes. A Figura 18 demonstra que a redução de custos por metro quadrado descartado é significativamente baixa; porém torna-se um retorno expressivo em produções de alta demanda como no pacote de 100% da capacidade, reforçando a vantagem de evitar perdas de um material de alto valor agregado.

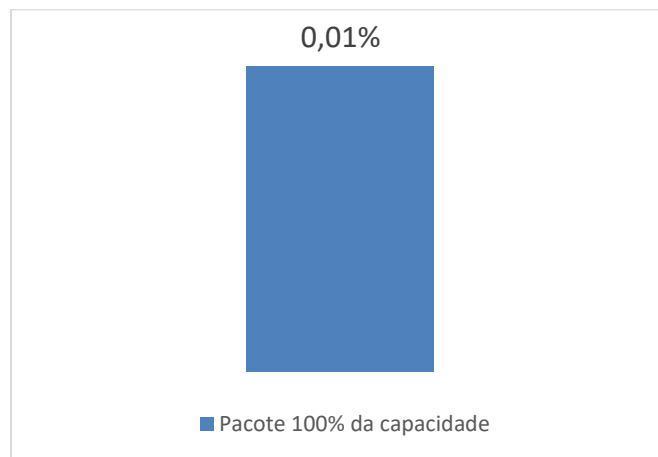
Figura 18 - Indicador redução de custo com descarte (R\$ / m²)



Fonte: Autoras (2025).

Os custos com descarte de resíduos Classe I são relativamente baixos quando comparado ao valor de M.Prima comprada (Figura 19). Porém este valor contribui diretamente para a eficiência operacional em altas demandas e para a sustentabilidade do processo, reduzindo descartes de resíduos contaminantes e gases poluentes ao meio ambiente.

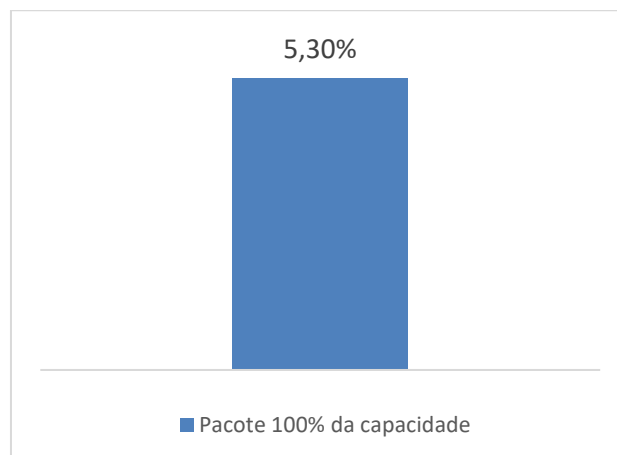
Figura 19 - Indicador do % redução de custo com descarte de resíduos Classe I – Pacote 100% da capacidade



Fonte: Autoras (2025).

A Figura 20 indica que a principal economia identificada no estudo resulta da diminuição dos custos de aquisição de matéria-prima, em relação ao valor necessário para a compra integral do material utilizado no pacote. Essa redução configura um dos ganhos financeiros mais relevantes associados à adoção do reuso de retalhos.

Figura 20 - Indicador redução de custos de compras – Pacote 100% da Capacidade

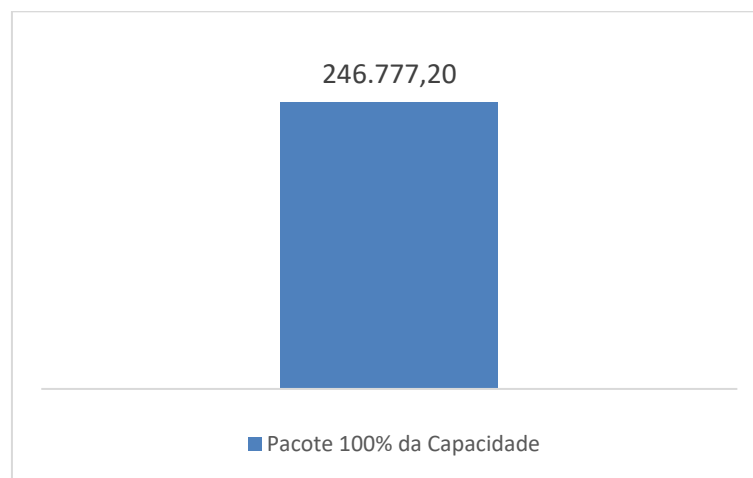


Fonte: Autoras (2025).

De forma consolidada, os três gráficos comprovam que o reaproveitamento de retalhos não apenas minimiza custos de descarte, mas também reduz substancialmente a necessidade de aquisição de novos insumos, tornando-se uma estratégia econômica sólida e ambientalmente responsável para a indústria de compósitos.

A análise do Pacote de 100% da capacidade demonstra que, o reaproveitamento de retalhos contribui para reduzir emissões de gases de efeito estufa (Figura 21) e custos ambientais associados à produção de novos materiais.

Figura 21 - Indicador emissões evitadas de GEE (kg CO₂e)

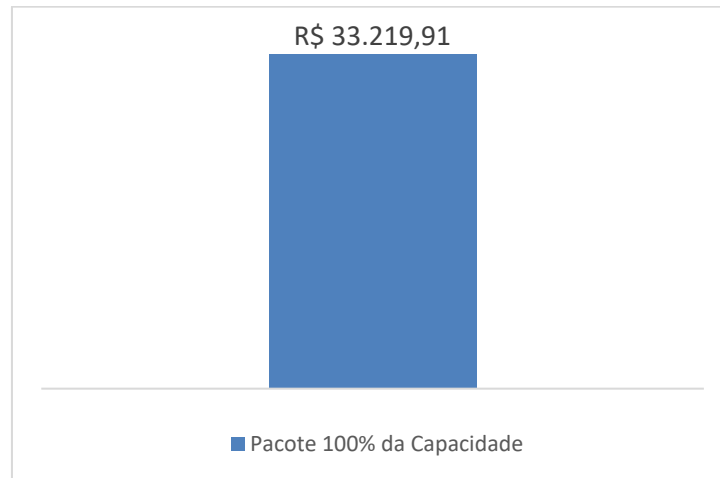


Fonte: Autoras (2025).

No cenário de plena capacidade, os resultados mostram impacto ambiental expressivo, com emissões superiores a 200 mil kg de CO₂e evitados. Esse dado reforça que a escala produtiva amplia significativamente os benefícios ambientais, consolidando o reaproveitamento como estratégia eficaz para mitigar impactos e reduzir a pegada de carbono da indústria de compósitos.

A avaliação dos créditos de carbono evidencia o potencial financeiro adicional da prática. No Pacote 100% da capacidade, os créditos gerados representam retorno financeiro significativo com percentual de 1,26% sobre o valor total de retorno financeiro do projeto (valor na Figura 22), capaz de transformar o reaproveitamento em fonte de receita, além de fortalecer a imagem corporativa em mercados que valorizam práticas ESG.

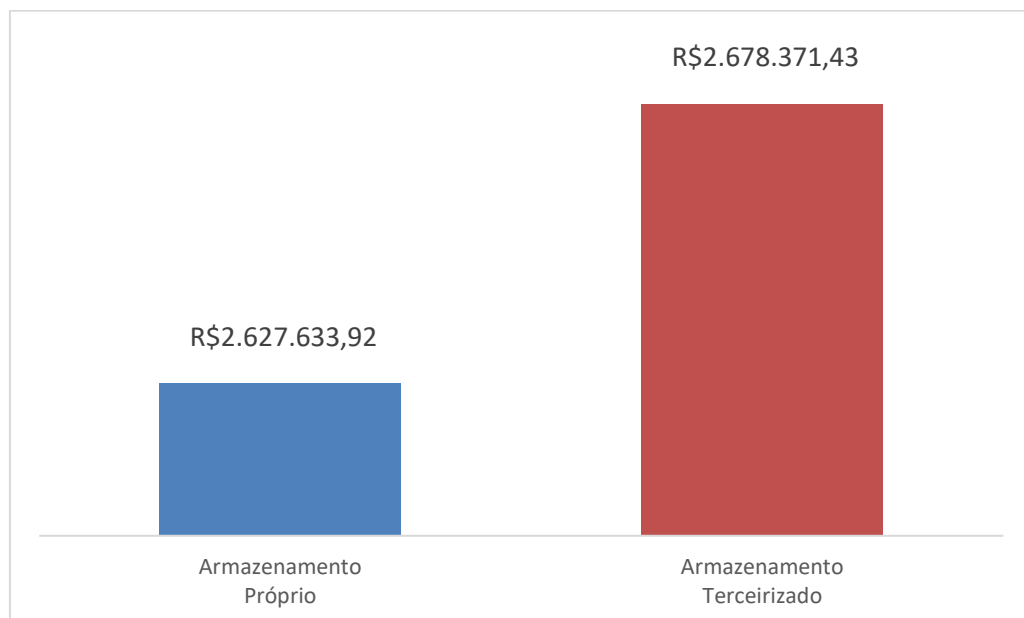
Figura 22 - Indicador crédito de carbono pela emissão evitada (t CO₂e)



Fonte: Autoras (2025).

A Figura 23 apresenta o retorno financeiro potencial estimado neste projeto. Os resultados indicam que, em ambas as modalidades — operação própria e terceirizada — o retorno é positivo para a organização, viabilizando à empresa geradora de resíduos a obtenção de ganhos financeiros associados à mitigação de impactos ambientais, correspondentes a 0,02% do faturamento total do pacote e 4,57% em relação ao valor total do material utilizado no pacote.

Figura 23 - Indicador benefícios com o uso de retalhos - Pacote 100% da Capacidade



Fonte: Autoras (2025).

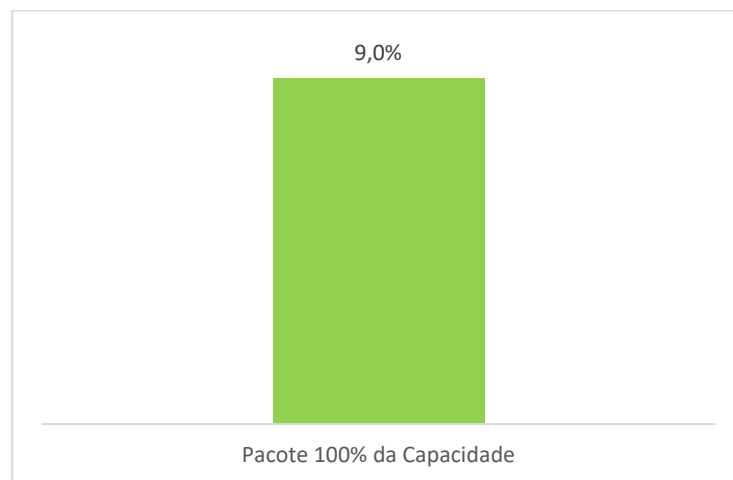
Os resultados consolidados confirmam que o reaproveitamento de retalhos de prepreg é uma estratégia eficaz para integrar eficiência produtiva, sustentabilidade e geração de valor. Em pequena escala, os ganhos são limitados pela influência de custos fixos e

certificações, mas ainda apresentam retorno em médio prazo. Em larga escala, os indicadores revelam elevado potencial econômico, com *ROI* expressivo e *Payback* imediato, além de benefícios ambientais relevantes.

Deve-se considerar o potencial adicional de retorno financeiro estimado em 30% de lucro sobre a venda de novos produtos oriundos dos retalhos armazenados. Esse valor não foi incluído nos cálculos do projeto, uma vez que depende do faturamento da empresa e da estrutura operacional adotada. Assim, a transformação de retalhos em novos produtos representa uma oportunidade estratégica, contribuindo não apenas para o retorno financeiro previsto, mas também para o incremento do faturamento e da lucratividade por meio da economia circular.

Para o pacote com 100% da capacidade, estimou-se um retorno financeiro total de 9%, considerando os benefícios gerados pelo projeto e a margem de lucro de 30% sobre os novos produtos fabricados a partir dos retalhos. Esse percentual (Figura 24) foi calculado com base no faturamento total do pacote.

Figura 24 – Indicador Consolidado de Retorno Financeiro: Projeto + Lucro sobre Retalhos Reutilizados



Fonte: Autoras (2025).

Dessa forma, a adoção sistemática do reaproveitamento posiciona-se como solução competitiva e responsável, capaz de ampliar o acesso a mercados exigentes, reduzir desperdícios e consolidar práticas alinhadas às diretrizes ESG.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho demonstrou que o reaproveitamento de retalhos de tecido de fibra de carbono prepeg pode ser incorporado de maneira consistente ao processo produtivo, desde que apoiado por procedimentos padronizados e alinhados às boas práticas da indústria de compósitos. A construção de um fluxo operacional envolvendo triagem, armazenamento refrigerado, organização por FEFO e diretrizes de laminação permitiu estabelecer um processo confiável, capaz de transformar um resíduo de difícil destinação em um material funcional para aplicações não estruturais.

À medida que essas etapas foram integradas, evidenciou-se que o reaproveitamento não apenas preserva características relevantes do prepeg, mas também amplia a eficiência interna da empresa ao reduzir desperdícios e otimizar o uso de insumos disponíveis. Essa dinâmica refletiu diretamente nos resultados econômicos, que apontaram redução nos custos com descarte e diminuição da necessidade de aquisição de material virgem, reforçando a viabilidade financeira da proposta e sua adequação aos desafios enfrentados por empresas que lidam com compósitos de alto valor agregado.

Essas melhorias operacionais convergem também para benefícios ambientais significativos. O reaproveitamento contribuiu para a redução da geração de resíduos, aproximando o processo produtivo dos princípios da economia circular e das diretrizes da PNRS. As estimativas de emissões evitadas, ainda que não configurando créditos de carbono certificados, ilustram o potencial da iniciativa para mitigar impactos ambientais e apoiar estratégias empresariais voltadas à sustentabilidade e ao atendimento de metas ESG.

Apesar dos avanços alcançados, o estudo identificou limitações inerentes ao uso de retalhos, como a restrição às aplicações não estruturais, a dependência de infraestrutura refrigerada, a baixa oferta do serviço deste tipo de armazenamento no mercado e a variabilidade dos fragmentos, que exige triagem. Também persiste a ausência de normas específicas para a reutilização de compósitos, o que reforça a necessidade de validação contínua e de análises complementares que tornem o processo ainda mais robusto e seguro.

Esses aspectos abrem espaço para desdobramentos futuros, como a ampliação dos ensaios mecânicos, estudos de durabilidade, desenvolvimento de metodologias formais para certificação de emissões evitadas e exploração de mercados capazes de absorver maior volume de produtos de segunda vida. Investigações sobre automação de etapas e rotas híbridas de reciclagem também representam caminhos promissores para ampliar o alcance e a eficiência da solução proposta.

Adicionalmente, destaca-se o potencial de geração de lucro estimado em 30% sobre o valor de venda de novos produtos fabricados a partir dos retalhos reaproveitados. Embora esse valor não tenha sido incorporado aos cálculos financeiros do projeto, por depender do faturamento específico da empresa e da estrutura operacional adotada, ele representa uma oportunidade relevante. A reversão de retalhos em produtos comercializáveis reforça não apenas o retorno financeiro já demonstrado, mas também a capacidade de ampliar o faturamento e a margem de lucro por meio de práticas alinhadas à economia circular, consolidando o reaproveitamento como vetor estratégico de crescimento e sustentabilidade.

Além disso, a análise das oportunidades de mercado demonstra que o reaproveitamento de retalhos de prepreg pode impulsionar a entrada da empresa em segmentos emergentes e de alto valor agregado. Setores como drones, mobilidade elétrica, acessórios automotivos, equipamentos esportivos e design industrial apresentam crescimento consistente e elevada aceitação de materiais sustentáveis, criando um ambiente favorável para produtos de segunda vida fabricados com retalhos de fibra de carbono

Assim, o trabalho evidencia que integrar inovação técnica, racionalidade econômica e responsabilidade ambiental permite transformar um resíduo complexo em uma oportunidade produtiva real. Ao sistematizar o reaproveitamento de retalhos de prepreg, a empresa fortalece sua competitividade, reduz custos e contribui para modelos industriais mais sustentáveis, reafirmando a relevância desse tipo de iniciativa em um cenário cada vez mais orientado à circularidade e à eficiência no uso de recursos.

REFERÊNCIAS

- ABMACO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE COMPÓSITOS. Relatório setorial 2022: Panorama do setor de compósitos no Brasil. São Paulo: ABMACO, 2022. Disponível em: <https://abmaco.org.br>. Acesso em: 14 maio 2025.
- AQUINO, M.; PANTOJA, M. J.; LUZ, K. G. Economia circular: uma revisão sistemática da literatura. *Revista da UI_IPSantarém, Santarém*, v. 11, n. 2, p. 1–20, 2023. DOI: 10.25746/ruiips.v11.i2.32802. Acesso em: 20 set. 2025.
- ASHBY, M. F. *Seleção de Materiais em Engenharia Mecânica*. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004:2004 – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16785:2019 – Gestão de resíduos sólidos – Diretrizes para implantação de sistema de logística reversa. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BAKER, A. A. et al. *Composite Materials for Aircraft Structures*. Reston: AIAA, 2018.
- BAKER, A. et al. Recycling and disposal methods for composite materials. *Journal of Composite Materials*, v. 52, n. 10, p. 1371–1385, 2018.
- BAKER, D. A. et al. Economic analysis of carbon fiber production from pyrolysis and recovery of recycled carbon fibers. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 135, p. 117–127, 2018.
- BAKIS, C. E. et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, v. 6, n. 2, p. 73–87, 2002.
- BIANCHI, O. et al. Viscoelastic properties of PS-POSS hybrid materials prepared by reactive processing. *Polymer Testing*, v. 54, p. 159–167, 2016.
- BNDES. *Créditos de Carbono*. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/mercado-de-capitais/creditos-de-carbono>. Acesso em: 09 nov. 2025.
- BRASIL. Banco Central do Brasil. Taxas de câmbio. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/conversao>. Acesso em: 07 nov. 2025.
- BRASIL. Decreto nº 875, de 19 de julho de 1993. Promulga a Convenção da Basileia sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito. *Diário Oficial da União, Brasília, DF*, 20 jul. 1993.
- BRASIL. Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011. Fixa normas para a cooperação entre os entes federativos nas ações administrativas decorrentes da Lei nº 6.938/81. *Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF*, p. 1, 09 dez. 2011. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LCP/Lcp140.htm. Acesso em: 14 maio 2025.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF*, p. 3, 03 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 14 maio 2025.
- CALLISTER, W. D. Jr. *Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Abordagem Integrada*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Abordagem Integrada. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CAPITAL RESET. Preço do crédito de carbono segue em queda livre. 2024. Disponível em: <https://capitalreset.uol.com.br/carbono/creditos-de-carbono/preco-de-credito-de-carbono-cai-18-no-mercado-voluntario>. Acesso em: 09 nov. 2025.

Carbon Fiber Fabric Prepreg Market Size And Forecast. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.verifiedmarketreports.com/pt/product/carbon-fiber-fabric-prepreg-market/>. Acesso em: 17 out. 2025.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre o licenciamento ambiental. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 dez. 1997.

COSTA, A.; SILVA, J. Reutilização de resíduos de compósitos de fibra de carbono: perspectivas técnicas e econômicas na economia circular. Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade, v. 9, n. 2, p. 45-59, 2024.

COSTA, M. L. et al. Avaliação térmica e reológica do ciclo de cura do pré-impregnado de carbono/epóxi. Polímeros: Ciência e Tecnologia, São Carlos, v. 22, n. 3, p. 258–264, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/yMczXWDvyVBNLdHHmKBpgDG/?format=html>. Acesso em: 21 set. 2025.

CT CARBON. Carbon fiber accessories collection. CT Carbon, 2024. Disponível em: <https://www.ctcarbon.co>. Acesso em: 15 out. 2025.

DENG, J. et al. Pyrolytic recycling of CFRP waste and its potential applications. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 119, p. 187–196, 2016.

DÍAZ, F. J. et al. Advances in the recycling of composite materials. Waste Management, v. 85, p. 526–540, 2019.

DRONE PILOT GROUND SCHOOL. How much does a drone cost? Drone Pilot Ground School, 2024. Disponível em: <https://www.dronepilotgroundschool.com/how-much-does-a-drone-cost/>. Acesso em: 15 out. 2025.

DVORAK, G. J. Composite Materials: Engineering and Science. [S.l.]: Springer, 2000.

ECOBRAZ. Reciclagem de compósitos. Disponível em: <https://ecobraz.org>. Acesso em: 29 set. 2025.

ECOVALOR. *Plano de Descarbonização – Por Onde Começar e Como Estruturar?*. 2024. Disponível em: <https://ecovalor.eco.br/plano-de-descarbonizacao/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

EDC Tecnologia. Novos materiais compósitos desenvolvidos por meio da simulação molecular com BIOVIA Materials Studio. Disponível em: <https://edctecnologia.com.br/novos-materiais-compositos-desenvolvidos-por-meio-da-simulacao-molecular-com-biovia-materials-studio/>. Acesso em: 1 jul. 2025.

EPPENDORF. Caixas de papelão e divisores para freezer. Disponível em: <https://www.eppendorf.com/br-pt/Produtos/Cold-Storage/Freezer-Boxes/Caixas-de-papel%C3%A3o-e-divisores-para-freezer-p-PF-12133102>. Acesso em: 11 nov. 2025.

EUR-LEX. Convenção da Basileia: regras internacionais. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu>. Acesso em: 27 set. 2025.

- EVOX PERFORMANCE. Carbon fiber automotive accessories catalog. Evox Performance, 2024. Disponível em: <https://www.evox-performance.com>. Acesso em: 15 out. 2025.
- EXOTIC CARBON FIBER. How much does carbon fiber cost on a car? Exotic Carbon Fiber, 2024. Disponível em: <https://exoticcarbonfiber.com>. Acesso em: 15 out. 2025.
- FERNANDES, M. Como fazer referência de sites (norma ABNT atualizada). Toda Matéria. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/referencia-site-abnt/>. Acesso em: 26 maio 2025.
- FGV EAESP. Margens de Lucro Setoriais. Centro de Estudos do Novo Desenvolvimentismo. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-novo-desenvolvimentismo/projetos/margens-lucro-setoriais>. Acesso em: 09 nov. 2025.
- FIBRAV. Reciclagem industrial de compósitos. Disponível em: <https://metallum.com.br>. Acesso em: 27 set. 2025.
- FIESC. Painel de resíduos industriais. Disponível em: <https://fiesc.com.br>. Acesso em: 29 set. 2025.
- FONTGALLAND, C.; MORAIS, G. L.; RIBEIRO, L. Políticas ESG e competitividade industrial: caminhos para a sustentabilidade empresarial. *Revista de Gestão Ambiental e Responsabilidade Social*, v. 14, n. 1, p. 23-41, 2022.
- FONTGALLAND, I. et al. Economia circular e consumo sustentável. Brasília: Editora Amplla, 2022. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/701677/2/EconomiaCircularConsumoSustentavel.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.
- FRANCO, D.S. Tecnologia dos materiais compósitos. São José dos Campos, DC: RALLC, 2025. 25 p. (RALLC).
- GONZALES, T. P. F. et al. Efeito do envelhecimento na vida útil do Prepreg 2511. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UNESP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/7e25f64d-3c76-48de-a43f-ac1da603ba5e>. Acesso em: 21 set. 2025.
- GRAND VIEW RESEARCH. Drones market size, share & trends analysis report, 2024–2030. Grand View Research, 2024. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com>. Acesso em: 15 out. 2025.
- GRAND VIEW RESEARCH. Sports composites market size, share & trends analysis report, 2024–2030. Grand View Research, 2024. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com>. Acesso em: 15 out. 2025.
- HEXCEL CORPORATION. HexPly® M92: 125°C versatile curing epoxy matrix for aerospace structures – Product Data Sheet. 2020. Disponível em: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_M92_eu_DataSheet.pdf. Acesso em: 21 set. 2025.
- HEXCEL CORPORATION. HexPly® M92: 125°C versatile curing epoxy matrix for aerospace structures – Product Data Sheet. Stamford, CT: Hexcel, 2020. 4 p. (Hexcel Data Sheet M92).
- HULL, D.; CLYNE, T. W. Introdução aos Materiais Compósitos. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

- IBAMA. Instrução Normativa nº 13, de 18 de dezembro de 2012. Estabelece a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 dez. 2012.
- IBAMA. Relatório sobre resíduos de compósitos. Brasília, DF: IBAMA, 2023.
- ICC BRASIL. Oportunidades para o Brasil em Mercados de Carbono. 2023. Disponível em: https://www.iccbrasil.org/wp-content/uploads/2023/11/RELATORIO_ICCBBR_2023.pdf. Acesso em: 09 nov. 2025
- JIANG, G. et al. Recycling of carbon fiber reinforced composites using thermal and chemical processes: A review. *Composites Part B: Engineering*, v. 175, p. 107120, 2020.
- JONES, F. R. Composite recycling: Beyond the stage of ‘myth’. *Composites Science and Technology*, v. 138, p. 7–8, 2017.
- JUSBRAZIL. Nova lei do mercado de carbono no Brasil: o essencial. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br>. Acesso em: 21 set. 2025.
- LEVY, V. A.; PARDINI, L. C. Materiais compósitos estruturais. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- LIU, Y. et al. Characterization of recycled carbon fibers and their application in reinforced polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 121, p. 95–105, 2019.
- MARCA AMBIENTAL. Logística reversa. Disponível em: <https://marcaambiental.com.br>. Acesso em: 27 set. 2025.
- MASUDA, H. Reciclagem de compósitos de fibra de carbono. Universidade Federal de São Paulo, 2023.
- MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. *Composite Materials: Engineering and Science*. [S.l.]: CRC Press, 1994
- MENDES, J. A. Reaproveitamento de resíduos de fibra de carbono por pirólise: uma revisão. 2021. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.
- MINISTÉRIO DA FAZENDA. Plano de transformação ecológica: crédito de carbono e financiamento sustentável. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda>. Acesso em: 21 set. 2025.
- OISHI, K. Gestão de resíduos de fibra de carbono. Universidade Estadual Paulista, 2021.
- OLIVEUX, G.; DERVEAUX, J.; LEYSSENS, C. Recycling of thermoset composites for sustainable development: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 78, p. 143-153, 2015. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.07.024.
- OLIVEUX, G.; DUDDLESTONE, R. M.; PICKERING, S. J. A review of commercial recycling technologies for carbon fibre-reinforced composites. *Progress in Materials Science*, v. 72, p. 61–99, 2015.
- OLIVEUX, G.; DUDT, M.; LEKEUX, A. Recycling of thermoset composites: a review. *Composites Part A*, v. 78, p. 447–458, 2015.
- PARK, J. M. et al. Mechanical recycling of thermoset carbon fiber composites and applications. *Composites Part B: Engineering*, v. 182, p. 107602, 2020.
- PICKERING, S. J. et al. A review of composite recycling technologies. *Journal of Composite Materials*, v. 50, n. 6, p. 643–653, 2016.

- PICKERING, S. J.; LIU, Y.; WONG, K. H. A review of chemical recycling of carbon fiber reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 94, p. 447–460, 2016.
- PICKERING, S. J. Recycling technologies for thermoset composite materials—Current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 37, p. 1206–1215, 2006.
- PIMENTA, S.; PINHO, S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*, v. 31, p. 378–392, 2012.
- PIMENTA, S.; PINHO, S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook. *Waste Management*, v. 31, n. 2, p. 378-392, 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.019.
- PINHEIRO, L. A. Reciclagem de materiais compósitos avançados: desafios tecnológicos. Braga: Universidade do Minho, 2020. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt>. Acesso em: 14 maio 2025.
- RESEARCH AND MARKETS. Global automotive composites strategic industry report 2024. Research and Markets, 2024. Disponível em: <https://rss.globenewswire.com/fr/news-release/2024/02/27/2835828/28124/en/Global-Automotive-Composites-Strategic-Industry-Report-2024.html>. Acesso em: 15 out. 2025.
- RIBEIRO, M. C. S. et al. Gestão e reaproveitamento de resíduos industriais de compósitos poliméricos reforçados com fibras. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 1, p. e12345, 2019. DOI: 10.1590/S1517-707620190001.0684.
- SABER Q TRANSFORMA. Economia circular aplicada. Disponível em: <https://saberquetransforma.com.br>. Acesso em: 27 set. 2025.
- SEBRAE. Como funciona a comercialização de crédito de carbono? Brasília, 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br>. Acesso em: 21 set. 2025.
- SECRETARIADO DA CONVENÇÃO DE BASILEIA. Convenção da Basileia sobre o controle de movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e seu depósito. Genebra: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 1989. Disponível em: <https://www.basel.int>. Acesso em: 14 maio 2025.
- SHIINO, M. Y. et al. Reuso de retalhos de prepreg de fibra de carbono do ciclo de produção: viabilização do processo via prensagem a quente. São José dos Campos: UNESP, 2019. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/pt/auxilios/98570>. Acesso em: 21 set. 2025. (Verde) (Considerado Tese/Dissertação/Trabalho de Conclusão pela descrição de produção na UNESP e apoio FAPESP)
- SHIINO, T. Reciclagem e reaproveitamento de compósitos. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), 2021.
- SILVA, D. Materiais Compósitos: Fundamentos e Aplicações. São Paulo: [s.n.], 2024.
- SNS INSIDER. Recycled Carbon Fiber Market Report 2024–2030. SNS Insider, 2024. Disponível em: <https://www.snsinsider.com/reports/recycled-carbon-fiber-market-1728>. Acesso em: 14 maio 2025.
- STRONG, A. B. Fundamentos da Fabricação de Compósitos: Materiais, Métodos e Aplicações. 2. ed. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- SUPREEMCARBON. Tecnologias de reciclagem de fibra de carbono. Disponível em: <https://supreemcarbon.com>. Acesso em: 27 set. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. EMA 898 – Mecânica dos Materiais Compósitos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021. Disponível em: <https://pos.eng.ufmg.br/disciplinas/ema898>. Acesso em: 21 set. 2025.

VERIFIED MARKET REPORTS. Carbon fiber prepreg market size and forecast (2024–2030). Verified Market Reports, 2024. Disponível em: <https://www.verifiedmarketreports.com>. Acesso em: 15 out. 2025.

VIRTUE MARKET RESEARCH. Carbon fiber prepreg market report 2024. Virtue Market Research, 2024. Disponível em: <https://virtuemarketresearch.com/report/carbon-fiber-prepreg-market>. Acesso em: 15 out. 2025.

WEIHAI BAOWEI NEW MATERIAL TECHNOLOGY CO., LTD. Carbon Fiber Prepreg | Product Carbon Footprint Disclosure. Disponível em: <https://www.icdpta.com/en/disclosure/34f14a57-8498-4a93-a19c-6d51aa122991>. Acesso em: 28 nov. 2025.

YANG, Y. et al. Recycling of composite materials. *Chemical Engineering Progress*, v. 108, n. 6, p. 34–40, 2012.