

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

**ERICK CARLOS LINO
JÚLIA PEREIRA DA CONCEIÇÃO
SARAH DE SOUZA JUSTINO**

**RESISTÊNCIA À FLEXÃO E FRACTOGRAFIA DE
MATERIAIS COMPÓSITOS DE EPÓXI REFORÇADOS
COM FIBRA DE CARBONO E PÓ DE CAVACO DE
MATERIAL COMPÓSITO**

São José dos Campos
2025

**ERICK CARLOS LINO
JÚLIA PEREIRA DA CONCEIÇÃO
SARAH DE SOUZA JUSTINO**

**RESISTÊNCIA À FLEXÃO E FRACTOGRAFIA DE
MATERIAIS COMPÓSITOS DE EPÓXI REFORÇADOS
COM FIBRA DE CARBONO E PÓ DE CAVACO DE
MATERIAL COMPÓSITO**

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 Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.

**Orientador: Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi
Coorientadora: Dra. Heide Heloise Bernardi**

São José dos Campos
2025

FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec São José dos Campos Prof. Jessen Vidal
Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação

LINO, Erick Carlos; CONCEIÇÃO, Julia Pereira; JUSTINO, Sarah de Souza.

Resistência à Flexão e Fractografia de Materiais Compósitos de Epóxi Reforçados com Fibra de Carbono e Pó de Cavaco de Material Compósito. / Erick Carlos Lino, Júlia Pereira da Conceição, Sarah de Souza Justino – São José dos Campos, 2025.

42f. (número total de folhas do TG)

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáuticas Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2025.

Orientador: Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi.

Coorientador: Dra. Heide Heloise Bernardi.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

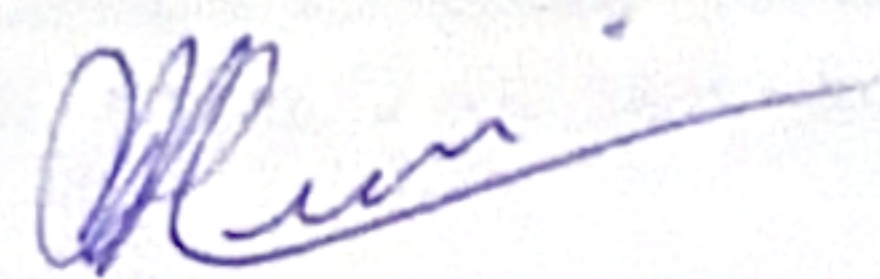
LINO, E.C.; CONCEIÇÃO, J.P.; JUSTINO, S.S. **Resistência à Flexão e Fractografia de Materiais Compósitos de Epóxi Reforçados com Fibra de Carbono e Pó de Cavaco de Material Compósito.** 2025. 40f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Projetos de Estruturas Aeronáuticas) - Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, São José dos Campos, 2025.

ERICK CARLOS LINO
JÚLIA PEREIRA DA CONCEIÇÃO
SARAH DE SOUZA JUSTINO

ERICK CARLOS LINO
JÚLIA PEREIRA DA CONCEIÇÃO
SARAH DE SOUZA JUSTINO

**RESISTÊNCIA À FLEXÃO E FRACTOGRAFIA DE
MATERIAIS COMPÓSITOS DE EPÓXI REFORÇADOS
COM FIBRA DE CARBONO E PÓ DE CAVACO DE
MATERIAL COMPÓSITO**

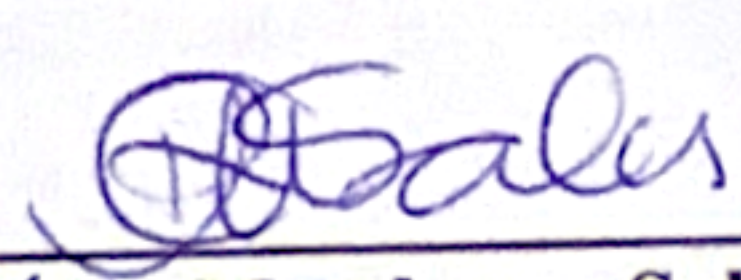
Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.



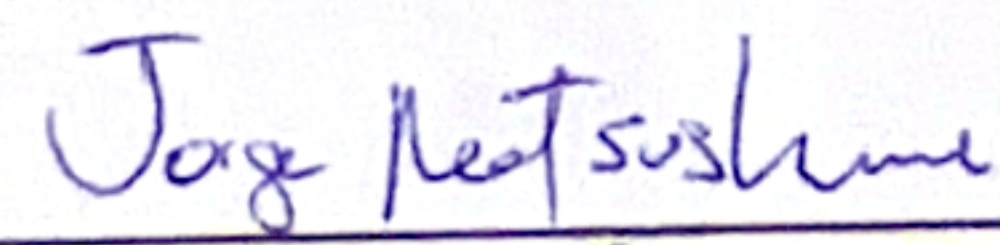
Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi – FATEC SJC



Dra. Heide Heloise Bernardi – FATEC SJC



Dra. Rita de Cássia Mendonça Sales Contini – FATEC SJC



Dr. Jorge Tadao Matsushima – FATEC SJC

25 / 11 / 2025

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida e por ter nos sustentado desde o princípio.

Às nossas famílias e amigos, que sempre nos apoiaram, dando forças e amparo em momentos exaustivos durante todo o curso e o desenvolvimento deste projeto. Mesmo em meio a sacrifícios, quando a ausência foi necessária, nunca nos faltou motivação externa para continuarmos perseverando até a conclusão deste trabalho.

Agradecemos ao nosso orientador, Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi, pela paciência e pela dedicação de seu tempo em nos auxiliar e encorajar nos momentos em que estivemos estagnados no desenvolvimento do projeto.

À nossa coorientadora, Dra. Heide Heloise Bernardi, que nos abriu portas para aprimorar este trabalho em tantos aspectos. Sem o seu vasto conhecimento na área, seus “puxões de orelha” e sua tamanha dedicação e interesse, este trabalho não teria sido o mesmo. Agradecemos por todo o auxílio nessa trajetória.

Agradecemos, de forma especial, ao Dr. Jorge Tadao Matsushima e ao Eng. Mateus Gomes Vernilli, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo apoio técnico e pela colaboração durante a realização dos ensaios de flexão, cuja orientação e experiência foram fundamentais para o bom andamento e a qualidade deste trabalho.

Agradecemos também à empresa Rallc pelo suporte com as matérias-primas, ao Instituto de Tecnologia Aeronáutica (ITA) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelos equipamentos e espaços cedidos.

E, por fim, a todos os envolvidos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste projeto.

RESUMO

Os compósitos reforçados com fibra de carbono destacam-se pela combinação entre leveza e alta resistência mecânica, características essenciais para aplicações na indústria aeronáutica. Esse tipo de material vem sendo amplamente utilizado no setor por proporcionar redução de peso e, conseqüentemente, maior eficiência e autonomia de voo. Considerando a crescente demanda por soluções sustentáveis, este trabalho teve como objetivo investigar o comportamento mecânico — com ênfase na resistência à flexão — e a morfologia de fratura de compósitos de epóxi reforçados com fibra de carbono, incorporando pó de cavaco proveniente da reciclagem de materiais compósitos. Além de analisar o desempenho estrutural, buscou-se avaliar a viabilidade do reaproveitamento desses resíduos na fabricação de novos laminados. Para a realização do estudo, foram utilizados resíduos de compósito polimérico reforçado com fibra de carbono, denominados “cavaco”, oriundos de processos industriais de usinagem e acabamento. O teste de flexão foi realizado conforme a norma ASTM D790 (2017), e os resultados para a tensão máxima de flexão mostraram que a média do laminado com pó reciclado foi ligeiramente maior (9,165 MPa) em comparação à média do laminado apenas com pré-impregnado (8,511 MPa).

Além disso, os resultados de deformação máxima indicaram que o laminado com pó reciclado apresentou menor capacidade de deformação (11,987 mm/mm) em comparação ao laminado sem pó (14,425 mm/mm), evidenciando redução da ductilidade.

Assim, conclui-se que, apesar da redução da capacidade de deformação e ductilidade do compósito, a adição do pó de cavaco possibilita a melhora da rigidez e da resistência à flexão do material. Dessa forma, a adição do pó reciclado promoveu aumento da resistência máxima à flexão e do módulo de elasticidade, indicando maior rigidez do compósito em comparação ao laminado constituído apenas por pré-impregnado virgem. Sendo assim, a reciclagem mecânica do cavaco de compósito apresenta potencial para aplicação estruturada em materiais poliméricos reforçados, contribuindo para a sustentabilidade da cadeia produtiva e para a redução de resíduos altamente persistentes no meio ambiente.

Palavras-Chave: Materiais compósitos; Fibra de carbono; Reciclagem mecânica; Resistência à flexão; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Carbon fiber–reinforced composites stand out for combining low weight with high mechanical strength, characteristics that are essential for aerospace applications. These materials are widely used in the sector because they reduce structural mass and consequently improve efficiency and flight autonomy. Considering the growing demand for sustainable solutions, this study aimed to investigate the mechanical behavior—particularly flexural strength—and the fracture morphology of epoxy composites reinforced with carbon fiber incorporating recycled chip powder obtained from machining processes. In addition to evaluating structural performance, the study sought to verify the feasibility of reusing this waste material in the production of new laminates. Flexural tests were conducted according to ASTM D790 (2017), and the results showed that the laminate containing recycled powder exhibited a slightly higher flexural strength (9.165 MPa) compared to the laminate produced only with virgin prepreg (8.511 MPa).

The maximum deformation results revealed that the laminate with recycled powder showed a lower deformation capacity (11.987 mm/mm) compared to the laminate without powder (14.425 mm/mm), indicating a reduction in ductility.

Despite this decrease in deformability, the addition of recycled chip powder contributed to increased stiffness in the composite, as reflected by both the higher maximum flexural strength and the increase in elastic modulus. Therefore, the mechanical recycling of composite chip waste demonstrates potential for structural application in polymer matrix composites, contributing to sustainability within the production chain and mitigating the environmental impact associated with long-lasting composite waste.

Keywords: Composite materials; Carbon fiber; Mechanical recycling; Flexural strength; Sustainability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Objetivo Geral	11
1.2. Objetivos Específicos	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1. Materiais Compósitos.....	12
2.2. Compósito Polimérico Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP)	12
2.3. Reciclagem dos Materiais Compósitos	13
2.4. O Processo da Reciclagem Mecânica	14
2.5. Laminação Manual de Materiais Compósitos	15
2.6. Ensaio de Flexão	16
2.7. Análise de Fractografia.....	17
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	17
3.1. Especificações das matérias primas	18
3.2. Processo de obtenção do resíduo	18
3.3. Processo de fabricação por hand layup.....	19
3.4. Ensaio de Microscopia Óptica.....	23
3.5. Ensaio de Flexão	24
3.6. Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
4.1. Análise de Microscopia Óptica (MO)	27
4.2. Ensaio de Flexão	28
4.3. Análise Microscópica e Fractografia.....	33
5. CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1. INTRODUÇÃO

O mercado global de materiais compósitos apresenta expansão contínua, impulsionada pela necessidade crescente de estruturas mais leves, resistentes e eficientes. Em 2025, o setor é estimado em USD 67,65 bilhões, com projeção de atingir USD 86,67 bilhões até 2030, resultando em uma Taxa de Crescimento Anual Composta (TCAC) de 5,08% no período de 2025 a 2030. Esse crescimento é sustentado por uma demanda robusta nos setores de transporte, energia, infraestrutura, eletrônicos, aeroespacial e defesa, ao mesmo tempo em que a automação dos processos produtivos reduz tempos de ciclo e defeitos, ampliando a competitividade desses materiais (MORDOR INTELLIGENCE, 2025).

A região Ásia-Pacífico, responsável por 45,12% da receita global em 2024, mantém-se como principal polo de expansão devido ao avanço de turbinas eólicas, programas de eletrificação e megaprojetos de infraestrutura. Entre os segmentos industriais, o aeroespacial e de defesa é um dos que mais impulsiona a inovação em compósitos, introduzindo soluções altamente avançadas (MORDOR INTELLIGENCE, 2025).

No setor aeronáutico, laminados de fibra de carbono já representam até 50% do peso estrutural de aeronaves de fuselagem larga, contribuindo para reduções de 15% a 20% no consumo de combustível em rotas de longo alcance. Ao mesmo tempo, compósitos de matriz cerâmica (CMCs) estão redefinindo os limites de operação de componentes de propulsão. Esses materiais são capazes de tolerar temperaturas próximas de 1.600 °C, aumentando a eficiência térmica das turbinas e diminuindo a necessidade de ar de resfriamento. Um exemplo emblemático é o programa LEAP, da GE Aerospace, que já acumulou mais de 25 milhões de horas de voo utilizando shrouds de CMC, demonstrando a durabilidade desses materiais em operações civis de grande escala (MORDOR INTELLIGENCE, 2025).

No campo da defesa, estruturas baseadas em carbono possibilitam o desenvolvimento de veículos hipersônicos, unindo estabilidade térmica, leveza e propriedades de transparência ao radar. Paralelamente, empresas de lançamento espacial vêm adotando CMCs de temperatura ultraltralta, capazes de suportar picos térmicos superiores a 1.700 °C durante a reentrada (MORDOR INTELLIGENCE, 2025).

De acordo com o relatório anual Boeing Commercial Market Outlook (CMO) 2022-2041, o total de entregas globais de novos aviões é estimado em 41.170 até 2041. Devido a essas enormes entregas esperadas, a procura por fibra de carbono durante a produção de aeronaves deverá aumentar em todo o mundo (MORDOR INTELLIGENCE, 2024).

Porém, por conta do forte estímulo às restrições ambientais, é perceptível que para esse objetivo ser atingido, novos métodos de energia limpa precisam ser implementados e diversos países como o Reino Unido, tem se comprometido a diminuir em 78% a emissão de CO₂ na atmosfera (BRITO, 2024). O número de aeronaves, como o B-787, deverá aumentar e a demanda para a fabricação de materiais compósitos será cada vez mais amplificados.

O descarte desses materiais é altamente poluente, pois sua matriz não se degrada naturalmente no ambiente. Por se tratar de compósitos com matriz termorrígida, não é possível remoldá-los após o processo de cura, já que a matriz polimérica passa a apresentar ligações cruzadas permanentes que impedem qualquer modificação posterior (PICKERING, 2005). Esse cenário se torna ainda mais preocupante quando observado em escala global: estima-se que, apenas na Europa, o volume anual de resíduos de compósitos termorrígidos ultrapasse 400 mil toneladas, com projeções indicando que esse valor pode chegar a cerca de 900 mil toneladas por ano até 2025. Desse total, apenas uma fração é efetivamente reciclada, enquanto a maior parte segue para aterros ou incineração — muitas vezes sem recuperação energética significativa (COMPOSIGHTS, 2025). Além disso, segmentos específicos, como o de energia eólica, podem adicionar mais 0,5 milhão de toneladas por ano de resíduos de pás de turbinas até 2030, ampliando ainda mais o problema global (PENDER; YANG, 2025). Como consequência, grandes quantidades de sucata são descartadas anualmente, resultando no desperdício de matéria-prima de alto valor agregado e contribuindo para a degradação ambiental.

Uma das possíveis soluções para tal problema, é a utilização da reciclagem mecânica para obtenção de pós finos de compósito polimérico reforçado com fibra de carbono. Duas metodologias aplicáveis são a trituração e moagem do compósito em máquinas de refinamento. Este processo tem a finalidade de reduzir o tamanho da matéria prima a micro e nano escalas e, posteriormente, aplicá-la como carga e/ou reforço parcial em um novo compósito. Assim, a reciclagem mecânica se prova viável, uma vez que seu processo simples dispensa a utilização de energia térmica e produtos químicos agressivos, contribuindo para redução de custos e menor consumo de matéria-prima virgem, além de proporcionar de gerar economia de energia quando se comparado a outros tipos de reciclagem de compósitos (ALDOSARI et al., 2024).

Dessa forma, este trabalho tem por finalidade investigar o comportamento mecânico, em especial a resistência à flexão, e a morfologia de fratura de compósitos de epóxi

reforçados com fibra de carbono e com adição de pó de cavaco proveniente de compósitos reciclados.

1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem por finalidade analisar a influência da adição de pó de cavaco de materiais compósitos reciclados, proveniente do processo de moagem, nas propriedades de flexão e nas características fractográficas em material compósito de epóxi reforçado com fibra de carbono.

1.2. Objetivos Específicos

Para a consecução deste objetivo geral foram estabelecidos os objetivos específicos:

1. Obter pó de cavaco de compósito polimérico reforçado com fibra de carbono, por meio da reciclagem mecânica, em parceria com a empresa Rallc;
2. Confeccionar corpos de prova com e sem o pó reciclado por processo de *hand layup*, conforme parâmetros da empresa Rallc;
3. Realizar ensaio destrutivo de flexão, conforme a norma ASTM D790, para determinar o comportamento mecânico do compósito produzido;
4. Observar defeitos superficiais por meio de ensaio de microscopia óptica;
5. Analisar as superfícies de fratura através da microscopia eletrônica de varredura, correlacionando o desempenho mecânico obtido;
6. Discutir a influência de incorporar o pó reciclado nas propriedades mecânicas e morfológicas do compósito produzido, bem como as limitações do material e possíveis ajustes a serem aplicados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Materiais Compósitos

O material compósito é uma mistura de dois ou mais materiais, com a finalidade de obter um produto com propriedades combinadas e melhoradas. Essa mistura combina as características dos materiais em suas individualidades, unificando-as e formando um compósito com propriedades aperfeiçoadas, como por exemplo a diminuição de peso, o aumento da rigidez e a alta resistência mecânica ou até mesmo resistência a intempéries. Além disso, o compósito é formado por duas fases, sendo elas a matriz e o reforço, no qual este último, geralmente composto por fibras, exerce a função de melhorar a resistência e rigidez da matriz (CALLISTER Jr., 2016).

Os compósitos podem ser classificados de diversas maneiras, dependendo da natureza da matriz, do tipo de reforço ou da configuração estrutural. Entre as categorias mais tradicionais estão: Compósito de Matriz Polimérica (CMP), quando utilizado resina como matriz polimérica juntamente com as fibras de reforço (vidro, carbono ou aramida); Compósito de Matriz Metálica (CMM), que faz uso do metal como matriz (por exemplo, alumínio) com o reforço de fibra ou particulados, como o carboneto de silício, e Compósito de Matriz Cerâmica (CMC), no qual a matriz é feita de material cerâmico e o reforço é composto por fibras curtas ou *whiskers* que são feitos de, por exemplo, nitreto de boro (GURIT, 2024).

2.2. Compósito Polimérico Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP)

De forma abrangente, os compósitos poliméricos reforçados por fibras, apresentam parâmetros melhores de resistência e rigidez em relação ao seu baixo peso, principalmente se comparados aos compósitos de matriz cerâmica.

Partindo disso, apesar de terem um custo mais elevado em comparação a outros reforços, as fibras de carbono (FC) estão sendo cada vez mais utilizadas no setor aeronáutico devido a suas propriedades de alto desempenho. Estas fibras se diferem pela alta resistência à tração e à corrosão, além da baixa absorção de umidade quando expostas a temperatura ambiente (CALLISTER Jr., 2016).

Para a produção destas fibras é necessário um processo com uma atmosfera inerte e de filamentos precursores orgânicos, como fibras de poliacrilonitrila (PAN), raiom ou piche. Elas passam por um processo de estiramento, carbonização e grafitação. Ainda, com a

finalidade de aumentar a aderência da matriz polimérica a ser impregnada, é aplicada uma camada protetora de resina epóxi nas fibras de carbono (MENDONÇA, 2005).

Apesar de suas grandes vantagens, tais compósitos têm gerado grande preocupação em relação ao quesito ambiental, como o descarte e reciclagem desses materiais. Por isso, há uma demanda tanto governamental, quanto por parte da indústria, de desenvolver processos capazes de realizar uma reciclagem eficiente.

2.3. Reciclagem dos Materiais Compósitos

Um dos destinos dos materiais compósitos tem sido os aterros sanitários. Devido à natureza resistente desses materiais, é estimado que para ocorrer a degradação em aterros, sejam necessários 60.000 anos para que aconteça uma significativa redução (HALLIWELL, 2006).

Outra forma utilizada é a incineração, que é um método mais rápido e que gera grande redução de volume, diminuindo a necessidade de espaço nos aterros. Porém, incinerar uma tonelada de compósitos pode produzir mais de 2.000 kg de CO₂ e, por conta das mudanças de legislações ambientais e a corrida para redução de lixo e emissão de gás carbônico, entidades públicas e privadas têm sido pressionadas a buscar novos métodos de descarte e reutilização dessas fibras. A reciclagem torna-se então, uma forma de reduzir os desperdícios, promovendo práticas mais sustentáveis (HALLIWELL, 2006; PICKERING, 2005).

Devido à alta no uso de materiais compósitos, é estimado que a indústria aeronáutica acumule mais de 500 mil toneladas de descarte de material compósito até 2050 caso não haja um sistema de reciclagem vigente. Isso porque a previsão é de que até esta data, cerca de 8500 aeronaves comerciais serão descomissionadas. Com o intuito de minimizar o descarte em aterros sanitários, o processo de reciclagem de compósito pode oferecer uma “segunda vida” a esses materiais (ALDOSARI et al., 2024).

Alguns métodos têm sido desenvolvidos para que a reciclagem seja possível, porém ainda existe uma grande complexidade para colocá-las em prática devido aos componentes do material. As resinas termofixas, que são frequentemente utilizadas como matrizes, possuem uma alta resistência a intempéries, sendo uma grande vantagem em determinadas aplicações. Isso porque, após o processo de cura, a resina adquire uma ligação muito forte com a fibra, fazendo com que a sua separação seja complexa.

Assim, se faz necessário romper a rede tridimensional formada entre a fibra e a resina, sendo essa uma estrutura reticulada que confere alta rigidez e resistência. Para romper essa rede, é necessário utilizar métodos intensivos em energias e recursos, mas que podem resultar em danos às fibras, comprometendo sua integridade final (SHIINO; REZENDE, 2020).

A reciclagem de materiais compósitos pode ser dividida em três segmentos, sendo eles: térmica, química e mecânica. A reciclagem por pirólise é um exemplo de processo térmico para recuperação de fibras. Nela, a decomposição acontece devido a um procedimento onde ocorre o aquecimento do material compósito em uma atmosfera inerte. Se feito corretamente, em condições adequadas ao material descartado, as propriedades das fibras recicladas podem se aproximar das fibras virgens (SHIINO; REZENDE, 2020).

A metodologia de reciclagem química se dá pela própria degradação química, processo que consiste em utilizar solventes químicos que degradem a matriz polimérica. Porém, a escolha das condições do processo e do solvente a ser utilizado influenciam na integridade da fibra (SHIINO; REZENDE, 2020).

Por fim, tem-se a reciclagem mecânica. Esse método se dá pela diminuição do tamanho dos resíduos descartados, resultando em um material que pode ser classificado em reciclados finos, com alta proporção de resina, e reciclados grossos, com alta proporção de fibra. Os produtos gerados desse método são em geral materiais de reforços em novos compósitos, pois suas propriedades mecânicas não se igualam às das fibras virgens (SHIINO; REZENDE, 2020).

2.4. O Processo da Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica é uma das alternativas mais acessíveis e viáveis para o reaproveitamento de resíduos de compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono (CFRP), tanto industriais quanto pós-consumo. O processo consiste, basicamente, na fragmentação do material por meio de operações como trituração, moagem e peneiramento, sem a necessidade de altas temperaturas ou uso de solventes químicos agressivos (ALDOSARI et al., 2024). Dessa forma, parte das propriedades das fibras é preservada, embora ocorra uma redução no comprimento das mesmas, o que limita sua aplicação em componentes estruturais de alta exigência (OLIVEUX, DANDY, LEEKE, 2015).

Além disso, a reciclagem mecânica apresenta vantagens ambientais, pois reduz a quantidade de resíduos enviados a aterros e diminui a necessidade de extração de novas

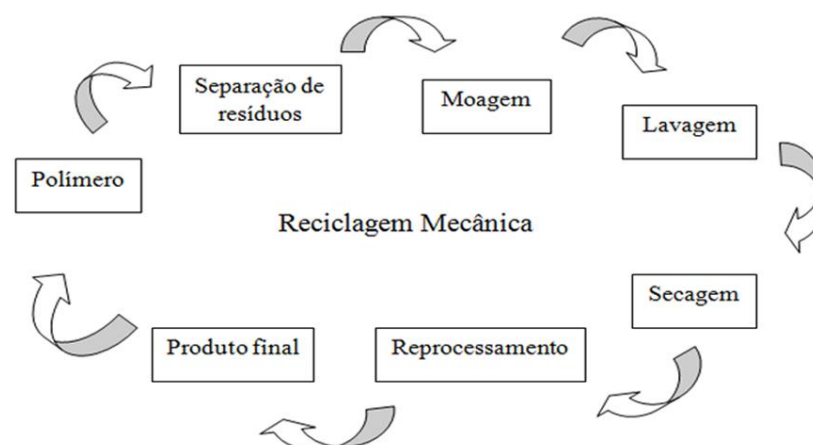
matérias-primas, contribuindo para a sustentabilidade do setor aeronáutico (PICKERING, 2006).

A trituração tem como função reduzir o tamanho do compósito até que ele se transforme em pó ou em fragmentos fibrosos de menor tamanho. Os reciclados em pó possuem maior proporção de resina, enquanto os fragmentos mais grossos apresentam maior concentração de fibra. Esses materiais podem ser utilizados como enchimentos, reforços em concretos asfálticos e em produtos de estrutura secundária. Esse processo evita que o descarte seja realizado em aterros ou por incineração (DEMSKI et al., 2024).

O processo de trituração pode ser realizado em equipamentos como trituradores de múltiplos eixos, possibilitando o controle do comprimento das fibras por meio da regulagem da distância entre as lâminas, da velocidade de rotação e do tamanho da peneira utilizada (ALDOSARI et al., 2024).

Outra fonte importante de material triturado é o resíduo gerado nos processos de usinagem em oficinas de manutenção, comumente denominado cavaco. Através de operações como lixamento, fresagem, esmerilhamento e corte de peças de fibra de carbono, obtêm-se fragmentos que podem ser reaproveitados como cargas reforçantes em matrizes poliméricas, promovendo melhor distribuição de tensões e redução da deformação superficial (MARTÍNEZ-FRANCO et al., 2024). A Figura 1 apresenta o ciclo completo da reciclagem mecânica.

Figura 1. Processo de Reciclagem Mecânica



Fonte: Rodrigues et al. (2016).

2.5. Laminação Manual de Materiais Compósitos

O processo de laminação manual é um dos mais utilizados na indústria dos materiais compósitos pela sua menor complexidade quando comparado a outros processos. Porém, essa tecnologia carrega algumas imprecisões no seu processo de fabricação, o que a torna não recomendável para peças críticas como as utilizadas em aeronaves (TREVISAN, 2024).

A laminação consiste em aplicar manualmente a resina sobre um tecido de fibra, suficiente para impregnar as mantas e tecidos que foram previamente cortados. A resina é espalhada através de um rolo ou pincel. O compósito se conforma sobre um molde que da forma ao produto (EMBRAPOL, 2024).

Por se tratar de um processo manual, torna-se de baixo investimento e não requer profundos conhecimentos da tecnologia para poder ser aplicado e, por esta razão, é amplamente utilizado na indústria, em especial na aeronáutica (TREVISAN, 2024).

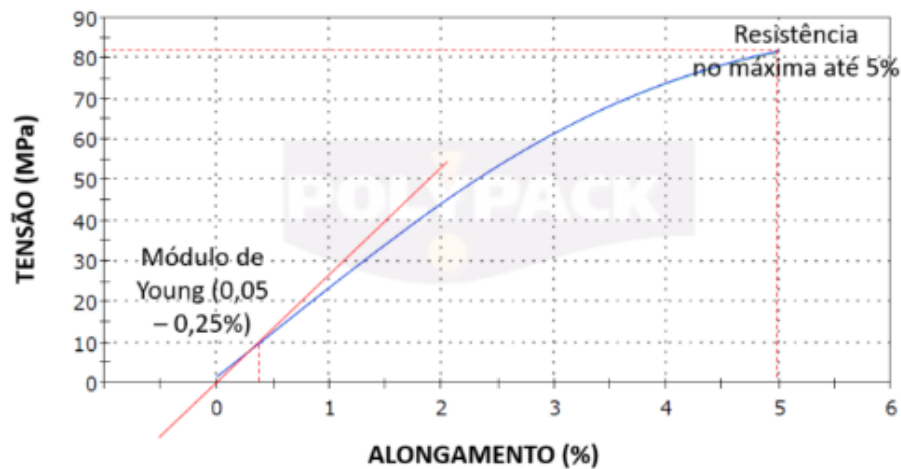
Além disso, este processo manual traz consigo algumas falhas devido ao manuseio humano, tornando-se uma opção não tão atrativa quando se requer peças de alta resistência mecânica onde a resina deve ser devidamente distribuída igualmente pela superfície da peça.

2.6. Ensaio de Flexão

O teste de flexão é classificado como um ensaio destrutivo e é um dos mais utilizados para determinação de propriedades mecânicas do material ensaiado, como o módulo de elasticidade e a resistência à flexão (ZANCHETTA, 2025).

Ao posicionar a amostra em dois apoios, uma carga é aplicada gradativamente em 1 ou 2 pontos específicos do material, até que ocorra a ruptura ou uma deformação expressiva do corpo de prova. Assim, com os dados fornecidos durante o ensaio, é possível traçar um gráfico de tensão *versus* deflexão para análise de suas propriedades, conforme exemplificado na Figura 2 (BIOPID, 2025; POLYPACK, 2025).

Figura 2. Curva de tensão versus alongamento no ensaio de flexão.



Fonte: Polypack (2025).

Para que haja consistência e confiabilidade nos resultados obtidos, o ensaio é realizado utilizando normas técnicas estabelecidas por organizações como ASTM (*American Society for Testing and Materials*), ISO (*International Organization for Standardization*) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Tais normas fornecem padrões de procedimento, especificações das amostras e meios de análise dos resultados.

Para materiais compósitos, é comumente utilizado as normas ASTM D7264 e ASTM D790.

2.7. Análise de Fractografia

A fractografia se caracteriza pelo estudo de falhas proveniente de uma fratura, ou seja, analisa a estrutura da superfície rompida com o objetivo de mapear e identificar a causa da fratura, levando em consideração aspectos como a geometria e coloração (FORTES, 2025).

A princípio, esta investigação requer uma análise visual, que pode ser a olho nu ou com auxílio de aparatos (lupa ou lentes binoculares). Além disso, o uso de técnicas como a microscopia eletrônica de varredura (MEV), são amplamente utilizadas com o intuito de complementar a análise de maneira micrográfica (FORTES, 2025).

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1. Especificações das matérias primas

Para a realização deste trabalho, foram utilizados resíduos de compósito polimérico reforçado com fibra de carbono (CRFC), comumente denominados “cavaco”, provenientes de processos industriais de usinagem e acabamento. O material residual consistia em laminados fabricados a partir do pré-impregnado HexPly 8552- AGP193-PW, fornecido pela Hexcel Corporation, que é amplamente reconhecido por suas propriedades mecânicas avançadas e estabilidade térmica. Este pré-impregnado é composto por uma matriz epoxídica termofixa, a HexPly M901, e reforçado com fibras de carbono de alta resistência do tipo HexTow AS4C3K, também da Hexcel. Conforme as especificações técnicas do fabricante, o pré-impregnado apresenta uma fração volumétrica de fibra de aproximadamente 55,29%, o que confere ao compósito um excelente balanço entre rigidez, resistência e leveza, características essenciais para aplicações aeroespaciais.

A confecção dos laminados originais foi realizada por meio de um processo de laminação em autoclave, utilizando bolsa de vácuo para garantir a remoção de bolhas e assegurar a compactação adequada das camadas. O equipamento utilizado foi ajustado para operar sob condições controladas de pressão e temperatura, especificamente a 100 psi (aproximadamente 6,9 bar) e 180°C, respectivamente, conforme as recomendações técnicas do fabricante do pré-impregnado. Essas condições térmicas são fundamentais para a cura completa da matriz epóxi.

Para a fabricação do novo compósito incorporando o resíduo reciclado, utilizou-se o mesmo tipo de pré-impregnado HexPly 8552- AGP193-PW como matriz virgem, garantindo compatibilidade química e estrutural com o material reciclado. Contudo, foram implementadas variações na quantidade de camadas e na sequência de empilhamento (*lay-up*), com o objetivo de avaliar o efeito do resíduo triturado na performance final do compósito. Essa abordagem permite analisar a influência da incorporação do cavaco na microestrutura, as propriedades mecânicas e o comportamento frente a esforços típicos do setor aeronáutico, além de possibilitar a otimização do processo de fabricação para futuras aplicações industriais.

3.2. Processo de obtenção do resíduo

O compósito reciclado foi obtido a partir de resíduos gerados nos processos mecânicos de lixamento, esmerilhamento e fresagem, procedimentos amplamente

empregados para o acabamento e ajuste dimensional de peças aeronáuticas. Esses processos utilizam ferramentas rotativas abrasivas, como limas rotativas e rebolos, que promovem a remoção controlada de material das superfícies, garantindo tolerâncias dimensionais rigorosas e acabamento superficial adequado para aplicações aeroespaciais. As operações foram realizadas na empresa RALLC, situada na cidade de São José dos Campos, São Paulo. A Figura 3 ilustra o resíduo de pó de CRFC resultante que comumente é descartado.

Figura 3. Resíduo de CRFC a partir do acabamento de peças aeronáuticas.



Fonte: Autores (2025).

3.3. Processo de fabricação por *hand layup*

Para a fabricação do novo compósito utilizando o material reciclado, adotou-se o método *hand-lay-up* de laminação.

O molde de alumínio, conforme Figura 4, passou por um processo de limpeza, no qual um pano descartável sem fiapos embebido com álcool isopropílico, foi utilizado para remover impurezas do molde, logo de imediato fez-se o uso de um pano seco para secar a superfície e evitar a evaporação do solvente no molde. Em seguida, aplicou-se 2 camadas uniformes e perpendiculares entre elas do agente desmoldante Loctite Frekote 700-NC (Henkel) com pano descartável. Nota-se que para esta aplicação, o tempo de intervalo entre as camadas foi de 5 minutos.

Figura 4. Molde de alumínio utilizado para laminação.



Fonte: Autores (2025).

Para a fabricação do corpo de prova (cdp) utilizando o pó reciclado, a primeira camada de pré-impregnado (0°) foi depositada sobre o molde (Figura 5 (a)) e com o auxílio de um estilete, retirou-se o filme de proteção (Figura 5 (b)). Em seguida, com o auxílio de um pincel, aplicou-se uma camada de aproximadamente 0,03 g do pó na superfície do pré-impregnado (Figura 5 (c)). Esse processo foi repetido para as 5 camadas do laminado, que obteve uma sequência final de $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$.

Figura 5. a) Preparação da primeira camada do laminado , b) Retirada do filme de proteção e c) Aplicação da camada de pó reciclado no pré-impregnado.

a)



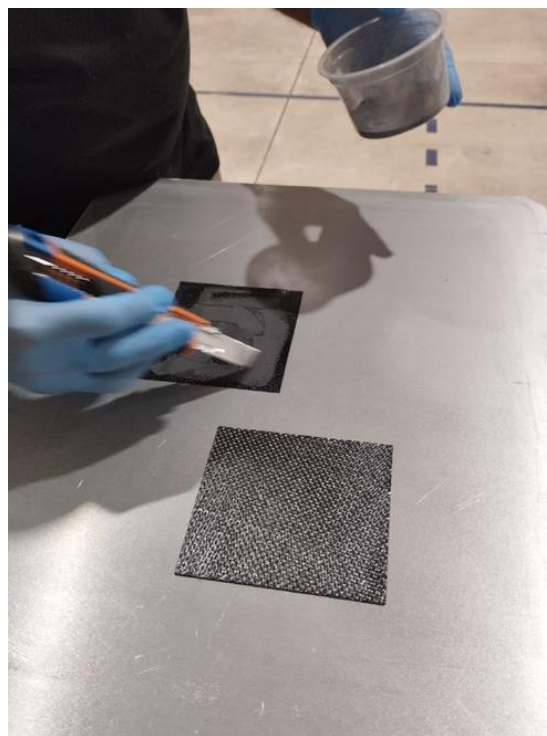
Fonte: Autores (2025).

b)



Fonte: Autores (2025).

c)



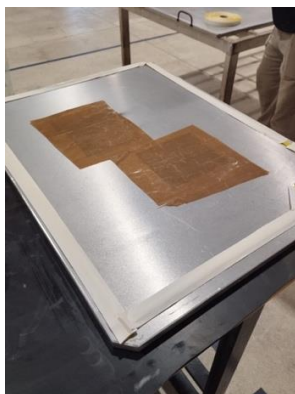
Fonte: Autores (2025).

O processo de fabricação do cdp sem o pó reciclado foi o mesmo, com exceção do passo de aplicação deste material. A quantidade de camadas (5) e a sequência de orientação delas ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$) foi replicada para este cdp. É válido ressaltar que, tais parâmetros foram seguidos conforme especificações do fornecedor das matérias primas, bem como da empresa parceira.

Para finalizar a laminação, a bolsa de vácuo foi preparada utilizando-se o *peel ply* (Figura 6 (a)), o *bleeder* (feltro poroso) (Figura 6 (b)), filme plástico para vácuo e a fita adesiva para selar a bolsa de vácuo. Após a preparação, conjunto foi levado até a autoclave, onde foi acoplado a mangueira da bomba à bolsa de vácuo (Figura 6 (c)) e deu-se início ao processo de cura dos cdp's. A autoclave da marca Campel foi configurada a temperatura de 180°C e pressão de 100 psi, usando uma rampa de aquecimento de $1,5^\circ\text{C}/\text{min}$. até 110°C , mantido por 60min. e aquecido novamente até 180°C , mantido por 120min. e depois resfriado a $5^\circ\text{C}/\text{min}$ até a temperatura ambiente conforme recomendação do fabricante do material.

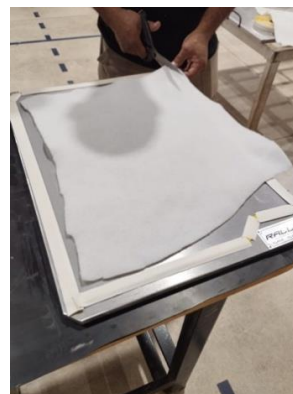
Figura 6. a) Preparação da primeira camada do laminado , b) Retirada do filme de proteção e c) Aplicação da camada de pó reciclado no pré-impregnado.

a)



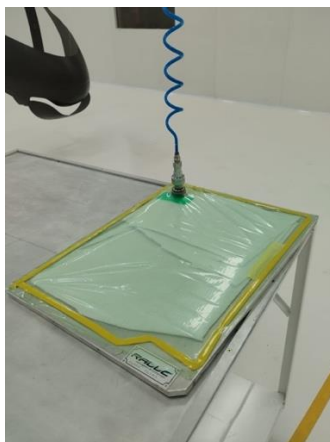
Fonte: Autores (2025).

b)



Fonte: Autores (2025).

c)



Fonte: Autores (2025).

Após a finalização do processo de cura, os laminados foram desmoldados, conforme ilustrado na Figura 7 (a) e (b). Os dois laminados foram pesados em balança de semi analítica, no Laboratório de Ensaios de Materiais Carbonosos e Metálicos da FATEC SJC. Para identificar cada amostra, adotou-se a nomenclatura PGP para as amostras contendo apenas o pré-impregnado e PGR para amostras que contém pré-impregnado + pó reciclado.

Figura 7. a) Laminado PGP e b) Laminado PGR

a)



Fonte: Autores (2025).

b)



Fonte: Autores (2025).

3.4. Ensaio de Microscopia Óptica

Com o objetivo de detectar e avaliar possíveis defeitos nas superfícies dos laminados, o ensaio de microscopia óptica foi realizado com o auxílio de um microscópio óptico portátil

(Microscópio Profissional Digital) da marca Knup modelo 8012. A partir do ensaio, foram obtidas as imagens das superfícies de cada cdp, bem como a calibração da escala. O teste foi conduzido no Laboratório de Ensaios de Materiais Carbonosos e Metálicos da FATEC SJC.

3.5. Ensaio de Flexão

Os laminados foram cortados em 4 amostras de cada, com dimensões de 127,0 mm x 12,5 mm, segundo a indicação da ASTM D790 (2017). A Tabela 1 apresenta as dimensões exatas de todas as amostras.

Tabela 1. Dimensões das amostras.

Corpo de prova	Largura (SP){mm}	Comprimento(w){mm}	Espessura(e){mm}
Laminado PGP			
PGP 1	16,8	29,950	1,050
PGP 2	16,64	29,140	1,040
PGP 3	16,96	28,780	1,060
PGP 4	16,96	30,450	1,060
Laminado PGR			
PGR 1	18,56	21,780	1,160
PGR 2	19,36	22,670	1,210
PGR 3	19,36	23,580	1,210
PGR 4	19,36	24,130	1,210

Fonte: Autores (2025).

O teste de flexão foi realizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), na cidade de São José dos Campos. Utilizou-se a máquina da marca InterMetric (Figura 8) para o ensaio de 3 pontos, conforme a norma ASTM D790 (2017).

Figura 8. Máquina para ensaio de flexão - InterMetric.



Fonte: Imagem cedida pelo INPE.

Esta norma estabelece que a razão entre o espaçamento dos suportes (L) e a espessura (h) deve ser igual a 16, conforme apresentado na Equação 1.

$$\frac{L}{e} = 16 \quad (1)$$

Onde L é o espaçamento entre os suportes, e e é a espessura do cdp.

Este ensaio teve como objetivo a determinação das principais propriedades mecânicas em flexão, a saber: a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade. Tais propriedades foram obtidas a partir da curva tensão de flexão versus deformação. Os valores correspondentes de tensão de flexão e deformação foram calculados de acordo com os critérios estabelecidos na norma ASTM D790 (2017), conforme descrito nas Equações 2 e 3.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

Onde σ_f é a tensão de flexão, P é a carga aplicada no centro do cdp, L é a distância entre os dois apoios, b e e representam a largura e a espessura do cdp, respectivamente.

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3)$$

Onde ε_f é a deformação no momento da flexão; D é o deslocamento; L é a distância entre os dois apoios e d é a espessura do cdp.

A partir dos valores de tensão e deformação em flexão calculados, torna-se possível determinar o módulo de elasticidade tangente (E_B), calculado conforme a Equação 4.

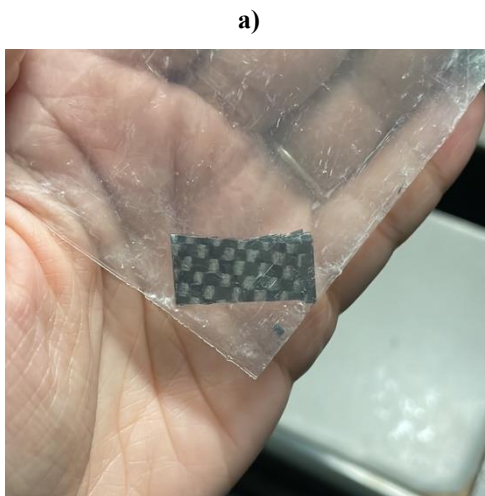
$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (4)$$

Onde L representa a distância entre os apoios do corpo de prova, b corresponde à largura do cdp, d refere-se à espessura do cdp, e m é o coeficiente angular da tangente à região linear inicial da curva tensão–deformação em flexão, indicando a rigidez inicial do material.

3.6. Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise microscópica foi realizada no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), em São José dos Campos. A partir do ensaio de flexão, os cdp's que sofreram fratura foram cortados com 1cm de altura a partir da superfície fraturada, conforme exemplificado na Figura 9 a). Para as análises fractográficas, as amostras foram metalizadas com ouro (Figura 9 b) e foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da TESCAN VEGA3 da Shimadzu instalado no Departamento de Materiais e Processos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, no modo de elétrons secundários (SE) com filamento de tungstênio.

Figura 9. a) CDPs cortados para o MEV e b) Preparação dos CDPs para *sputtering*.



Fonte: Autores (2025).



Fonte: Autores (2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

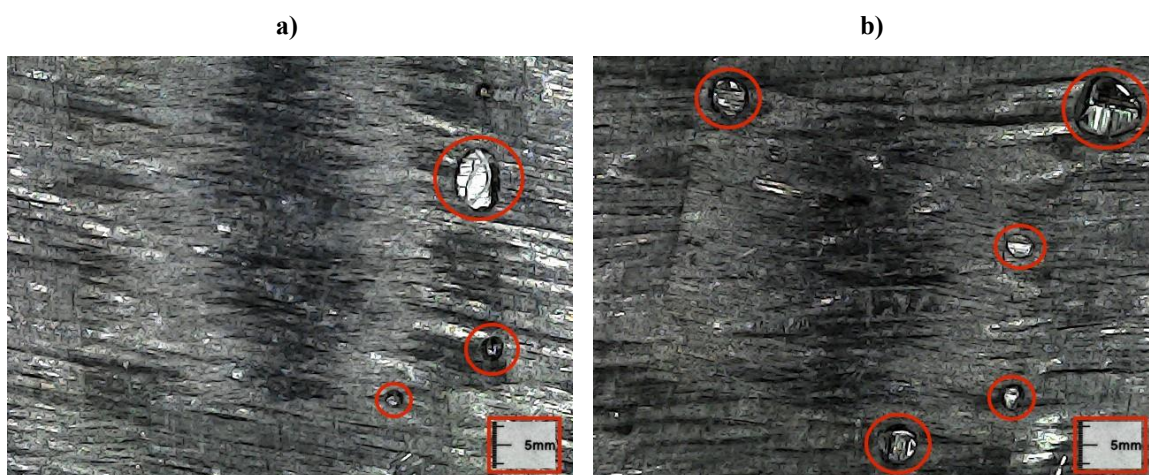
4.1. Análise de Microscopia Óptica (MO)

Após a laminação dos cdp's, o teste de microscopia óptica foi realizado a fim de observar suas superfícies e detectar possíveis defeitos oriundos do processo de fabricação utilizado.

Assim, foi possível identificar a formação de vazios (círculos vermelhos) na superfície do cdp da amostra PGP 2, além da inclusão de particulados provenientes do ambiente utilizado para a laminação, conforme mostrado na Figura 10 a). Notou-se também, na Figura 10 b), a formação de vazios (círculos vermelhos) e do particulado na superfície do cdp da amostra PGR 3, porém em maior quantidade. Resultados semelhantes foram detectados por Durante et al. (2023), que reportaram porosidades residuais devido ao processo produção dos cdp's, sugerindo a necessidade de investigação de diferentes métodos de fabricação do material compósito.

Os dois laminados foram pesados em balança semi analítica, onde o cdp PGP resultou em massa de 20,64g e o cdp PGR, 22,19g. Com estes dados, já foi possível entender que a densidade entre os dois cdp's seria diferente.

Figura 10. MO na superfície do a) cdp PGP 2 e do b) cdp PGR 3.



Fonte: Autores (2025).

Fonte: Autores (2025).

4.2. Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão teve como objetivo entender o comportamento mecânico dos compósitos produzidos e realizar uma comparação das amostras fabricadas apenas com o PGP e com o PGR, proveniente de compósito reciclado.

Os valores de tensão máxima de flexão, deformação máxima em flexão e módulo de elasticidade foram apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4, respectivamente. Tais dados foram obtidos a partir das Equações 2, 3 e 4.

Ao analisar os dados da Tabela 2, é possível identificar que, a média do laminado PGR é ligeiramente maior (9,165 MPa), em comparação a média do laminado PGP (8,511 MPa). Estes dados indicam que a adição do pó reciclado favoreceu o aumento da resistência mecânica do material, uma vez que o pó atua como um reforço adicional dentro da matriz epoxídica, restringindo deslocamentos e deformações locais. Segundo estudo semelhante de Durante et al. (2023), os autores justificam o efeito à boa dispersão das partículas moídas, que preservam parte da integridade estrutural das fibras curtas.

Tabela 2. Valores de tensão máxima de flexão, média e desvio padrão para cada corpo de prova dos compósitos PGP e PGR.

Corpo de prova	Tensão máxima de flexão (MPa)
Laminado PGP	
PGP 1	8,904
PGP 2	8,579
PGP 3	8,195
PGP 4	8,365
Média	8,511
Desvio Padrão	0,841
Laminado PGR	
PGR 1	9,499
PGR 2	9,843
PGR 3	8,412
PGR 4	8,905
Média	9,165
Desvio Padrão	0,745

Fonte: Autores (2025).

Em compensação, na Tabela 3 pode-se observar que a média de deformação máxima de flexão do PGR (11,987 mm/mm) foi menor do que a média do laminado PGP (14,425 mm/mm), indicando uma menor ductilidade do material e reforçando a maior rigidez, previamente apontada na Tabela 2. Este comportamento foi atestado na literatura, onde

descreve que a inclusão de partículas sólidas ou fibras curtas pode reduzir a capacidade de deformação, aumentando a rigidez e a tendência a fratura frágil (PRAMUDI, 2024).

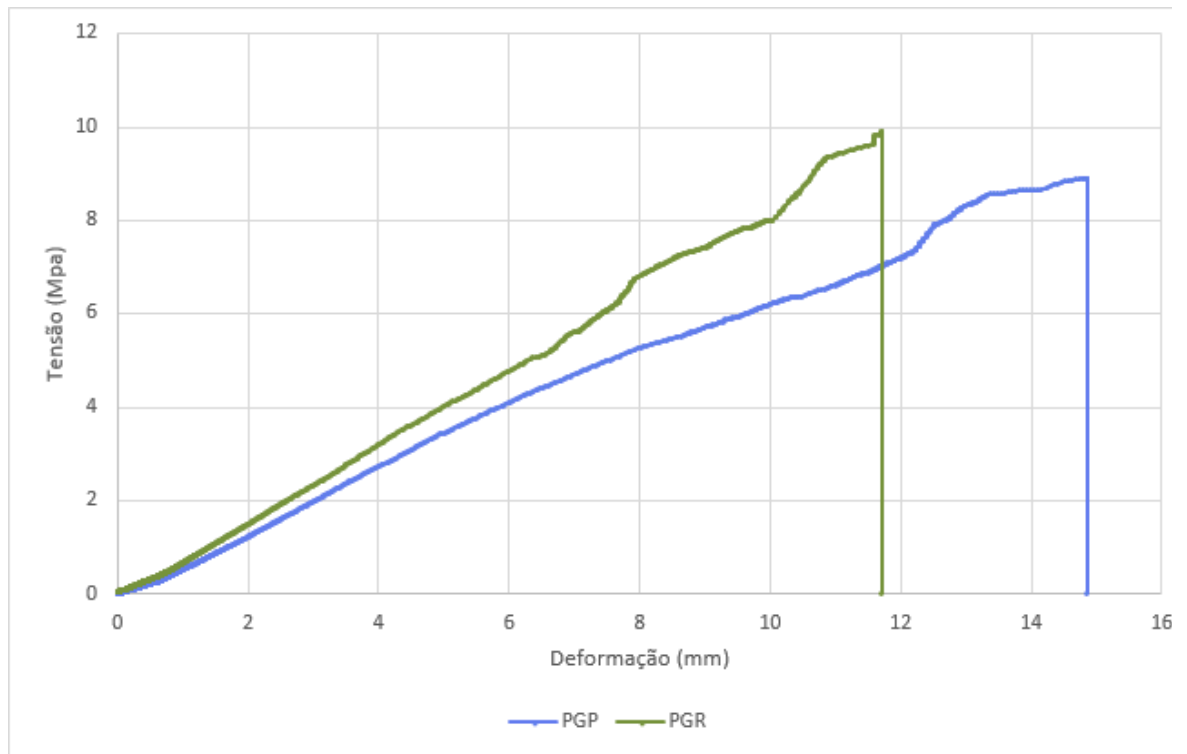
Tabela 3. Valores de deformação máxima de flexão, média e desvio padrão para cada corpo de prova dos compósitos PGP e PGR.

Corpo de prova	Deformação máxima de flexão (mm/mm)
Laminado PGP	
PGP 1	14,670
PGP 2	15,180
PGP 3	13,220
PGP 4	14,630
Média	14,425
Desvio Padrão	0,842
Laminado PGR	
PGR 1	12,470
PGR 2	11,570
PGR 3	11,920
PGR 4	13,280
Média	11,987
Desvio Padrão	0,453

Fonte: Autores (2025).

O gráfico comparativo (Figura 11) foi plotado a fim de representar visualmente esta tendência à fratura frágil. Enquanto o PGP apresentou um comportamento gradual, com maior alongamento antes da ruptura (fratura dúctil) e melhor capacidade de absorver energia antes da falha, o PGR mostrou um aumento mais rápido da força em função da deformação.

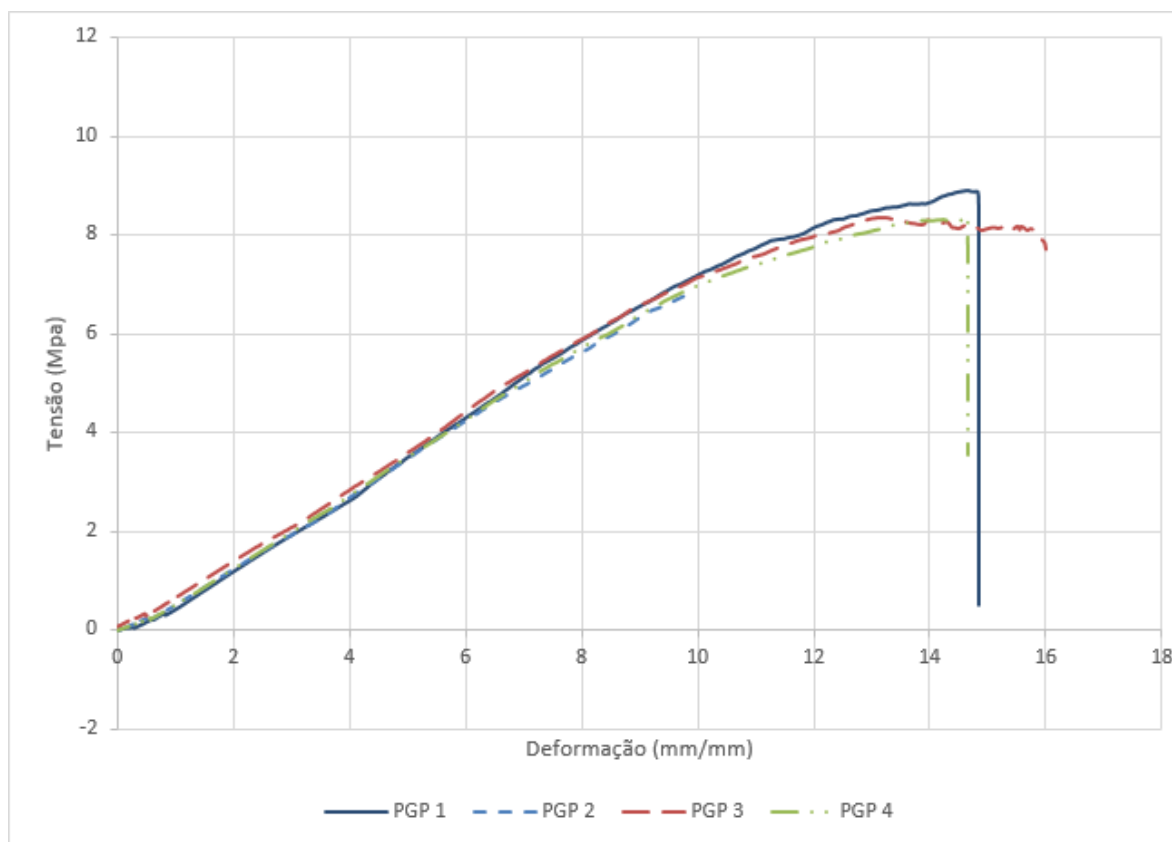
Figura 11. Gráfico Tensão x Deformação das amostras PGP e PGR.



Fonte: Autores (2025).

O gráfico individual (Figura 12) do laminado PGP apresenta as curvas formando uma dispersão pouco acentuada entre os cdp's, porém mantendo um comportamento homogêneo de crescimento linear até a falha.

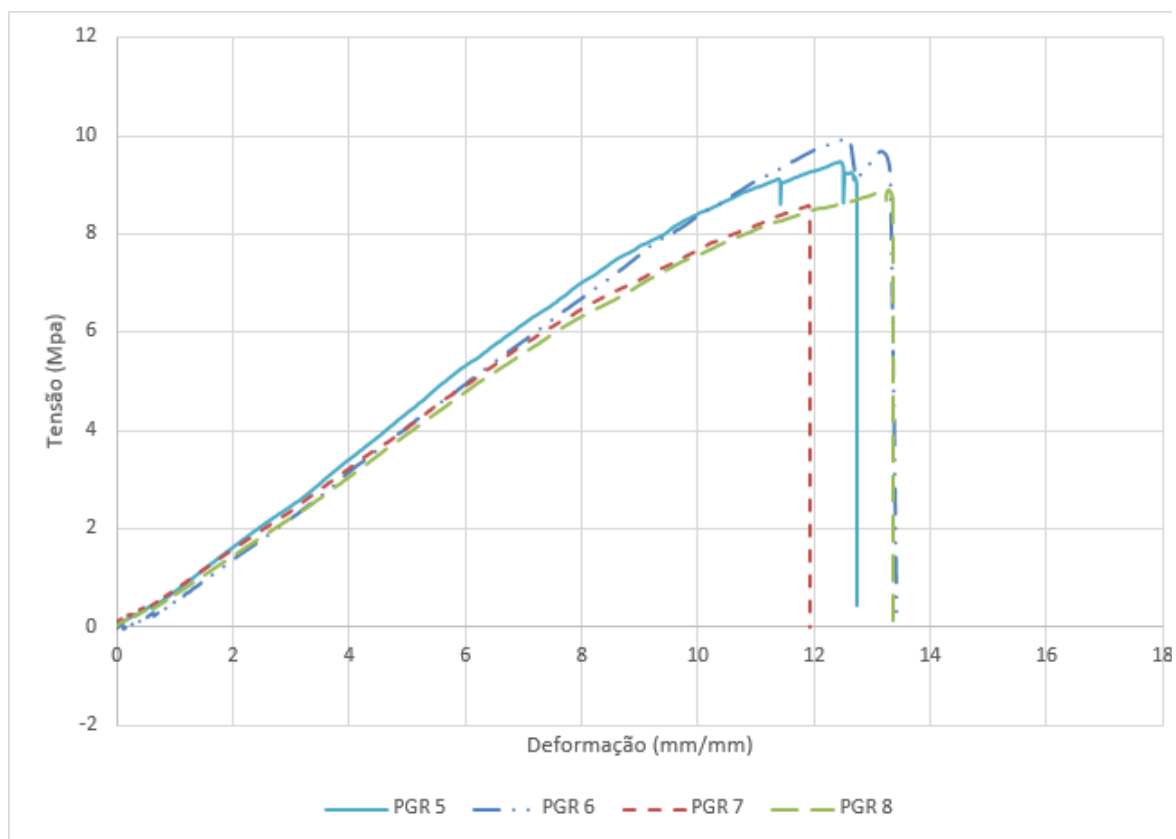
Figura 12. Gráfico Tensão x Deformação das amostras de PGP.



Fonte: Autores (2025).

Entretanto, o gráfico individual (Figura 13) do laminado PGR demonstra um pico de carga mais elevado, mas com ruptura brusca. Esta informação é corroborada pela característica de compósitos rígidos, os quais apresentam fraturas súbitas devido a rapidez com a qual o limite elástico é atingido, comprovando a menor capacidade de deformação.

Figura 13. Gráfico Tensão x Deformação PGR.



Fonte: Autores (2025).

A Tabela 4 comprova este comportamento mecânico, onde o laminado PGR apresentou uma média de módulo de elasticidade maior (0,747 MPa) em relação ao laminado PGP (0,590 MPa), indicando o aumento da rigidez no compósito com adição de pó reciclado. Ainda que adicionar o material reciclado apresente a tendência em comprometer a tenacidade do material, é evidente sua efetividade como reforço, uma vez que comprovada o aumento da rigidez.

Tabela 4. Valores dos módulos de elasticidade, média e desvio padrão para cada corpo de prova dos compósitos PGP e PGR.

Corpo de prova	Módulo de elasticidade (MPa)
Laminado PGP	
PGP 1	0,603
PGP 2	0,565
PGP 3	0,620
PGP 4	0,572
Média	0,590
Desvio Padrão	0,0259
Laminado PGR	
PGR 1	0,762
PGR 2	0,851
PGR 3	0,706
PGR 4	0,671
Média	0,747
Desvio Padrão	0,0785

Fonte: Autores (2025).

Dessa forma, é possível concluir que apesar da redução da capacidade de deformação e ductilidade do compósito, a adição do pó de cavaco possibilita a melhora da rigidez e resistência a flexão do material. Este desempenho é relacionado à menor homogeneidade da matriz, à presença de regiões de acúmulo de resina e formações de vazios, oriundo do processo de laminação manual.

Para compreender melhor os resultados e verificar de que forma a microestrutura e morfologia de fratura influenciam no comportamento mecânico observado neste ensaio de flexão, a análise de microscopia eletrônica de varredura foi realizada, conforme Seção 4.3 a seguir.

4.3. Análise Microscópica e Fractografia

O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizado para observar com mais detalhe a superfície e a estrutura interna do compósito, buscando entender como o pó reciclado se comporta entre as camadas e de que forma ele influencia na adesão.

Assim, essa análise por busca identificar os defeitos microestruturais, como aglomerados e vazios, que podem contribuir com a alteração no comportamento de flexão observado, especialmente o aumento de rigidez e a potencial fragilização.

Por meio das imagens obtidas, foi possível visualizar a distribuição das partículas, identificar possíveis regiões com porosidade e avaliar se houve uma boa impregnação da resina nas fibras.

Na Figura 14 é possível observar o pó proveniente do processo de usinagem em peças de compósito, onde esse resíduo foi recolhido e reutilizado. As partículas mais alongadas e retas correspondem às fibras, enquanto as regiões mais irregulares e deformadas representam a resina aderida à sua superfície. O pó resultante é, portanto, uma mistura de fibras picadas e resina fragmentada, sendo possível notar que a resina tende a se apresentar de forma mais aglomerada.

Figura 14. Microscopia do pó



Fonte: Autores (2025)

Essa combinação contribui para o reforço do novo compósito, as fibras oferecem resistência, enquanto a resina garante a coesão da estrutura. No entanto, é possível notar que a mistura não é completamente uniforme, apresentando aglomerados e pequenos vazios.

O pó apresenta uma característica interessante, pois as fibras estão distribuídas em várias direções, o que confere um comportamento mais isotrópico ao material, ou seja, as propriedades tendem a se distribuir de forma mais uniforme em diferentes sentidos. Em algumas fibras, é possível observar que a resina ainda está impregnada.

Essa falta de homogeneidade está relacionada principalmente ao método manual de mistura, que dificulta o controle da distribuição das partículas. Melhorar essa etapa,

buscando uma homogeneização mais eficiente, pode reduzir defeitos e contribuir para um desempenho mecânico mais consistente do material final.

Estudos sobre a adição de RCFP em outras matrizes poliméricas, como o poliuretano, demonstram que a aglomeração e o preenchimento de vazios pela partícula granular resultam em um aumento da rigidez, mas frequentemente levam a uma diminuição na resistência à flexão devido à fragilização do compósito (PRAMUDI, 2024).

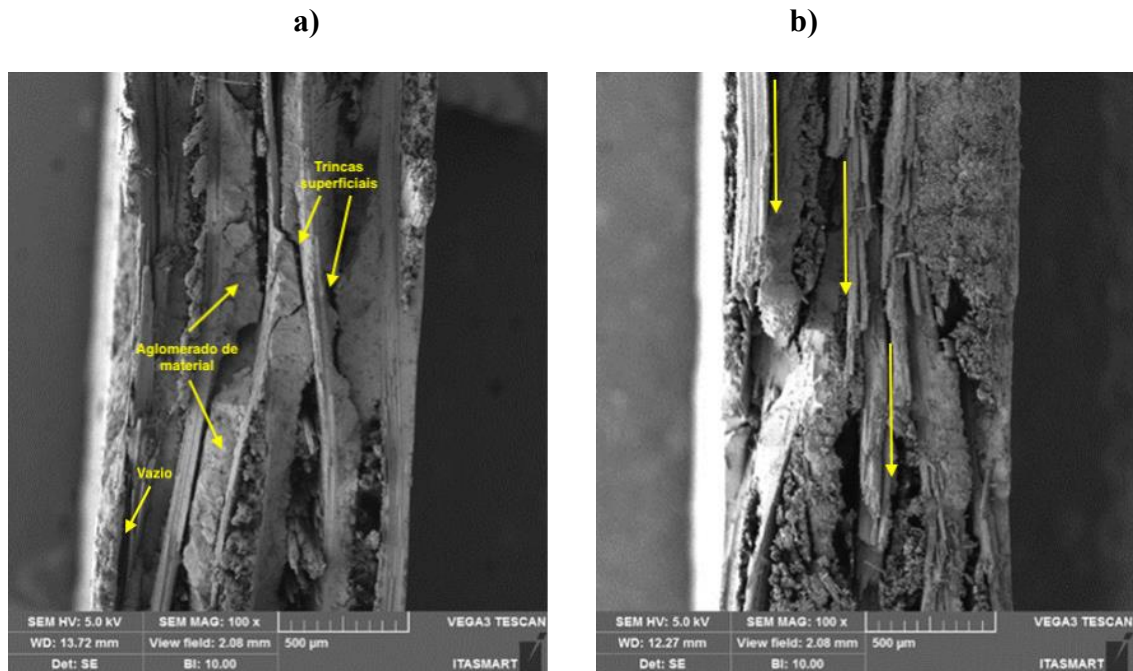
A Figura 15 a) mostra a região onde ocorreu a fratura do corpo de prova durante o ensaio de flexão. É possível observar fibras envolvidas por um grande aglomerado de material, além da presença de diversos vazios distribuídos ao redor dessa área. Em algumas faixas da amostra, as fibras não são visíveis, indicando zonas com acúmulo de resina e aumento de espessura local. Também é possível notar trincas superficiais, que se propagam a partir dessas regiões mais densas, possivelmente devido à concentração do pó reciclado e às tensões geradas durante o carregamento mecânico.

Na Figura 15 b), é possível observar com clareza o sentido das fibras do material (sentido da seta), que se apresentam bem alinhadas e distribuídas ao longo da matriz. Diferente do que foi visto na amostra com pó reciclado, não há presença de aglomerados nem acúmulo excessivo de resina, o que indica uma estrutura mais homogênea e coesa.

Estudos anteriores (DURANTE et al., 2023; MARTÍNEZ-FRNACO et al., 2023; NEWMAN et al., 2022) demonstraram que a adição de partículas rígidas tende a aumentar o módulo de elasticidade (rigidez) do material, mas pode, em teores mais altos, levar a uma queda na resistência devido ao enrijecimento excessivo (YUÁN et al., 2024).

De modo geral, essa amostra serve como referência para comparação, evidenciando como a adição do pó reciclado altera a microestrutura do compósito e influência na forma como o material responde aos esforços aplicados.

Figura 15 a) Região fraturada do compósito com adição de pó reciclado. b) Região fraturada do compósito sem adição de pó reciclado

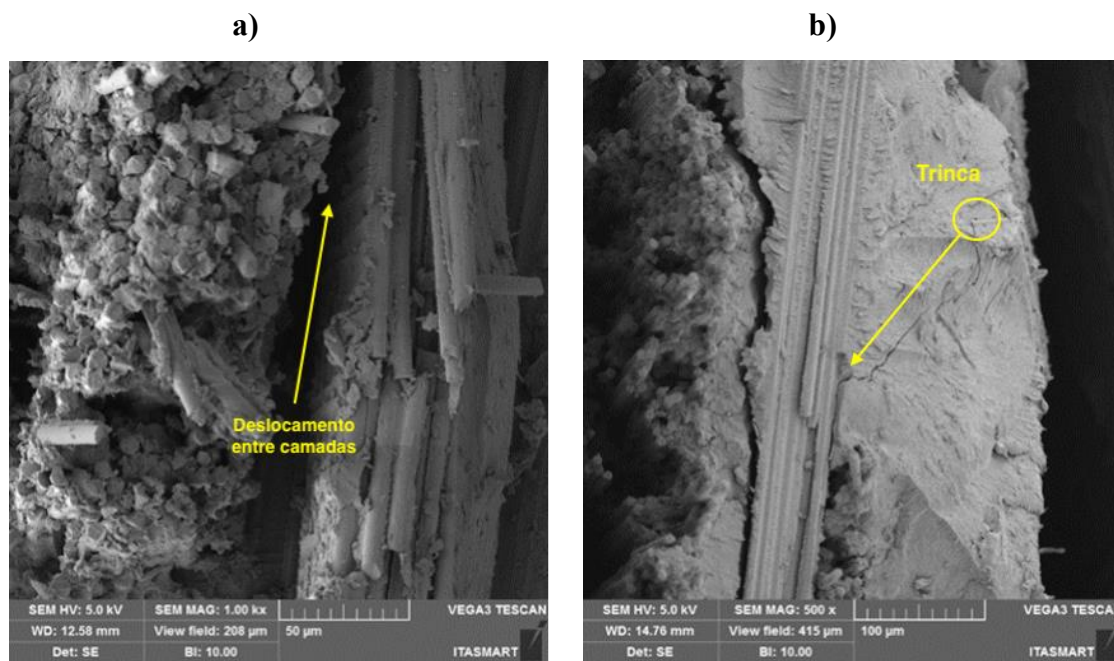


Fonte: Autores (2025)

Na Figura 16 a), observa-se o corpo de prova após o ensaio de flexão, onde é possível identificar o descolamento entre as camadas de tecido e uma superfície bastante irregular. Esse aspecto demonstra que, durante o carregamento, houve separação parcial entre as fibras e a matriz, indicando diferenças no modo como cada região do material respondeu aos esforços de tração e compressão.

Por outro lado, na Figura 16 b), a região onde a trinca aparece tem o aspecto de uma fratura frágil, com uma superfície bem lisa, o que significa que o material resistiu até o limite e depois rompeu de uma vez só. Esse tipo de ruptura é comum em compósitos que sofrem esforços de compressão e tração ao mesmo tempo, como acontece em testes de flexão.

Figura 16 a) Região fraturada do compósito sem adição de pó reciclado. B) Região fraturada do compósito com adição de pó reciclado



Fonte: Autores (2025)

No PGR, foi possível identificar a presença de rachaduras interrompidas pelas fibras, o que demonstra a eficiência do reforço fibroso na contenção e retardamento da propagação de trincas. A boa transferência de esforços entre a matriz e as fibras indica uma aderência ainda satisfatória, mesmo após o processo de reciclagem. Observou-se também que, embora existam aglomerados e pequenas falhas na homogeneidade da matriz, o material mantém comportamento mecânico adequado, sugerindo potencial de reaproveitamento.

Ao comparar os resultados, percebe-se que o compósito com adição de pó apresentou uma superfície de fratura mais lisa e uniforme, característica de uma ruptura frágil, na qual o material rompe de forma súbita. Já no compósito sem pó, as fibras se alongaram de forma gradual, rompendo-se progressivamente, o que resultou em uma superfície mais heterogênea, indicando maior ductilidade. Essa diferença de comportamento confirma o princípio mecânico de que a presença de pó na matriz aumenta a rigidez, reduzindo a capacidade de deformação e tornando o material mais propenso a falhas bruscas. Assim, nota-se que a adição de partículas influencia diretamente o mecanismo de falha e o desempenho do compósito sob flexão. Um alto teor de reciclado (como 12%) pode levar a uma diminuição drástica na resistência à flexão devido ao aumento da rigidez (PRAMUDI, 2024).

5. CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a adição do pó reciclado promoveu aumento da resistência máxima à flexão e do módulo de elasticidade, indicando maior rigidez do compósito em comparação ao laminado constituído apenas por pré-impregnado virgem. Por outro lado, verificou-se uma redução da deformação máxima até a ruptura, caracterizando uma tendência à fratura mais frágil. As análises por microscopia óptica e MEV corroboraram esses achados, ao evidenciarem regiões com vazios, aglomerações de resina e distribuição heterogênea das partículas recicladas, influenciando diretamente o mecanismo de falha e a dissipação de energia durante o carregamento.

Dessa forma, conclui-se que a reciclagem mecânica do cavaco de compósito apresenta potencial para aplicação estruturada em materiais poliméricos reforçados, contribuindo para a sustentabilidade da cadeia produtiva e redução de resíduos altamente persistentes no meio ambiente. No entanto, para otimizar o desempenho mecânico e reduzir a fragilidade observada, recomenda-se aprimorar a etapa de dispersão e homogeneização do pó, bem como avaliar diferentes teores e configurações de lay-up em trabalhos futuros. Assim, reforça-se a relevância da pesquisa como apoio ao avanço de soluções sustentáveis associadas ao desenvolvimento de materiais compósitos de maior valor agregado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDOSARI, S. M.; ALOTAIBI, B. M.; ALBLALAIHID, K. S.; ALDOIHI, S. A.; ALOGAB, K. A.; ALSALEH, S. S.; ALSHAMARY, D. O.; ALANAZI, T. H.; ALDREES, S. D.; ALSHAMMARI, B. A. **Mechanical recycling of carbon fiber-reinforced polymer in a circular economy**. *Polymers*, Basel, v. 16, n. 10, p. 1363, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16101363>. Acesso em: 24/04/2025.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D790-17**: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D7264/D7264M-21**: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

BIOPID. **Ensaio de Flexão: Um Guia Completo sobre Testes de Resistência e Propriedades Mecânicas de Materiais**. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-flexao/>. Acesso em: 20/04/2025.

BRITO, S. **O exemplo do Reino Unido na redução de emissões de gases de efeito estufa**. Disponível em: <https://nossoimpacto.com.br/historias/o-exemplo-do-reino-unido-na-reducao-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: 19/09/2024.

CALLISTER, Jr. W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**: 9. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2016.

COMPOSIGHTS. **EuCIA Maps the Road to a Circular Future for Composite Waste in Europe**. Disponível em: <https://www.composights.com/composites-industry-news/EuCIA-Maps-the-Road-to-a-Circular-Future-for-Composite-Waste-in-Europe>. Acesso em: 04/12/2025.

DEMSKI, S.; BRZĄKALSKI, D.; GUBERNAT, M.; DYDEK, K.; CZAJA, P.; ŻOCHOWSKI, K.; KOZERA, P.; KRAWCZYK, Z.; SZTORCH, B.; PRZEKOP, R. E.; MARCZAK, M.; EHRLICH, H.; BOCZKOWSKA, A. **Nanocomposites based on thermoplastic acrylic resin with the addition of chemically modified multi-walled carbon nanotubes**. *Polymers*, v. 16, n. 3, art. no. 422, 2024. DOI: 10.3390/polym16030422. Acesso em: 24/04/2025.

DURANTE, M.; BOCCARUSSO, L.; DE FAZIO, D.; FORMISANO, A.; LANGELLA, A. **Investigation on the Mechanical Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Polymers by Peripheral Down-Milling**. *Polymers*, v. 15, n. 4, art. 854, 2023. DOI: 10.3390/polym15040854. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/4/854>. Acesso em: 15/10/2025.

EMPRABOL. **Processo de Laminação**. Disponível em: https://www.embrapol.com.br/hot_resinas/pro_laminacao.html. Acesso em: 30/10/2024.

EUCIA (EUROPEAN COMPOSITES INDUSTRY ASSOCIATION). EuCIA highlights the untapped potential of Europe's composites recycling market. Disponível em: <https://eucia.eu/eucia-highlights-the-untapped-potential-of-europes-composites-recycling-market/>. Acesso em: 04/12/2025.

FORTES, M. S. **Análise e Interpretação de Falhas Mecânicas**. Disponível em: https://sites.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/produto-mariana-souza-forte.pdf. Acesso em: 03/03/2025.

GURIT. **Guide to Composites**. Disponível em: <https://www.gurit.com/wp-content/uploads/2022/12/guide-to-composites-1.pdf>. Acesso em: 30/10/2024.

HALLIWELL, S. **End of Life Options of Composite Waste: Recycle, Reuse or Dispose?**. National Composites Network, TWI Ltda, 2006.

MARTÍNEZ-FRANCO, E.; GÓMEZ CULEBRO, V. A.; FRANCO-URQUIZA, E. A. **Technologies for Mechanical Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Polymers (CFRP) Composites: End Mill, High-Energy Ball Milling, and Ultrasonication**. *Polymers*, v. 16, n. 16, p. 2350, 2024. DOI: 10.3390/polym16162350. Acesso em: 24/04/2025.

MDPI SUSTAINABILITY. Glass Fibre Composites Recycling Using the Fluidised Bed: A Comparative Study into the Carbon Footprint in the UK. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/3/1016>. Acesso em: 04/12/2025.

MENDONÇA, P.T.R., **Materiais Compostos & Estruturas-sanduiche: Projeto e Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Manole, 2005.

MORDOR INTELLIGENCE. **Análise De Tamanho E Participação Do Mercado De Material Compósito - Tendências De Crescimento E Previsões (2025 - 2030)**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/composite-material-market>. Acesso em: 04/12/2025.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho e participação do mercado de fibra de carbono - Análise da Indústria**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/activated-carbon-fiber-market>. Acesso em: 22/09/2024.

NEWMAN, B.; CREIGHTON, C.; HENDERSON, L.C.; STOJCEVSKI, F. **A review of milled carbon fibres in composite materials**. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X22004304?via%3Dihub>. Acesso em: 11/10/2025.

OLIVEUX, G.; DANDY, L. O.; LEEKE, G. A. **Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties**. *Progress in Materials Science*, v. 72, p. 61-99, 2015. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.004. Acesso em: 24/04/2025.

PICKERING, S.J. **Recycling Technologies for Thermoset Composite Materials - current status**. *Science Direct - Composites Part A: applied Science and manufacturing*. Vol. 37, p. 1206-1215, 2005.

POLYPACK. **Ensaaios de Tração, Flexão e Compressão.** Disponível em: <https://polypack.com.br/ensaaios-mecanicos-tracao-flexao-e-compressao/>. Acesso em: 02/03/2025.

PRAMUDI, G. **Effect of Recycle Carbon Fiber Powder (RCFP) and Fabric Reinforcement (FR) on the Flexural Properties of Polyurethane.** *Clareus Scientific Science and Engineering (CSSE)*, v. 1, n. 1, 2024.

RODRIGUES, V. E.; COSTA, H. M. S.; FONSECA, B.C.S.; BALDAN, M. R.; SALES, R. C. M.; MATSUSHIMA, J. T. **Reciclagem de fibras de carbono oriundas de compósitos estruturais de matriz epóxi por processo térmico de pirólise e aplicação como materiais de eletrodo em supercapacitores.** *Revista Matéria*, São Paulo, v. 26, n. 2, p. e1270, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210002.1270>. Acesso em: 20/02/2025.

SHIINO, M. Y., e REZENDE, M. C. **Materiais compósitos: desafios da reciclagem e reuso.** In: VILANOVA, M. R. N., and SHIINO, M. Y., eds. *Fronteiras da engenharia e ciências ambientais: perspectivas multidisciplinares* [online]. São Paulo: Editora UNESP, 2020, pp. 163-185. ISBN: 978-65-5714-009-3. <https://doi.org/10.7476/9786557140093.0008>. Acesso em: 24/04/2025.

TREVISAN, L. **Laminação manual de fibra de vidro: Como fazer? Passo a passo completo.** Disponível em: <https://alanharpercomposites.com.br/laminacao-manual-de-fibra-de-vidro-como-fazer-passo-a-passo-completo/>. Acesso em: 30/10/2024.

YUÁN, M.; LI, Z.; TENG, Z. **Progress and prospects of recycling technology for carbon fibre reinforced polymer (CFRP).** *Frontiers in Materials*, v. 11, 2024. DOI: 10.3389/fmats.2024.1484544. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2024.1484544/full>. Acesso em: 18/10/2025.

ZANCHETTA, A. **Materiais Compósitos: Características, Propriedades e Aplicações.** Disponível em: <https://graduacao.iqsc.usp.br/files/Materiais-Comp%C3%B3sitos-2.pdf>. Acesso em: 02/03/2025.