

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

**BEATRIZ APARECIDA RODRIGUES DE SOUSA
VICTOR RIBEIRO NOBRE**

**ANÁLISE DE TRAÇÃO EM COMPÓSITOS DE CARBONO
REFORÇADOS COM PARTÍCULAS**

São José dos Campos
2026

**BEATRIZ APARECIDA RODRIGUES DE SOUSA
VICTOR RIBEIRO NOBRE**

**ANÁLISE DE TRAÇÃO EM COMPÓSITOS DE CARBONO
REFORÇADOS COM PARTÍCULAS**

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: Prof. Dr Bruno Peruchi Trevisan

São José dos Campos
2026

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

SOUSA, Beatriz Aparecida Rodrigues de

Análise de tração em compósitos de carbono reforçados com partículas. / Beatriz Aparecida Rodrigues de Sousa, Victor Ribeiro Nobre - São José dos Campos, 2026.

49f.

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáuticas Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2026.

Orientador Interno ou Principal: Prof. Dr Bruno Peruchi Trevisan

1. Fibra de carbono 1. 2. Compósitos poliméricos 2. 3. Reciclagem mecânica 3. I. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUSA, Beatriz Aparecida Rodrigues de; NOBRE, Victor Ribeiro. Análise de tração em compósitos de carbono reforçados com partículas. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Projetos de Estruturas Aeronáuticas) – Faculdade de Tecnologia de São Jose dos Campos Professor Jessen Vidal, São José dos Campos, 2026.

**BEATRIZ APARECIDA RODRIGUES DE SOUSA
VICTOR RIBEIRO NOBRE**

**ANÁLISE DE TRAÇÃO EM COMPÓSITOS DE CARBONO
REFORÇADOS COM PARTÍCULAS**

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.



Prof. Dr Bruno Peruchi Trevisan – FATEC de SJ: Professor Jessen Vidal



Dr. Heide Heloíse Bernardi – FATEC de SJ: Professor Jessen Vidal



Me. Celso de Oliveira – FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal

11 / 06 / 2026

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos conceder saúde, força e resiliência para superar todos os desafios ao longo desta jornada acadêmica.

Aos nossos pais e familiares, pelo amor incondicional, pela paciência durante as nossas ausências e por serem a nossa maior base de apoio emocional. Sem o incentivo de vocês, a conclusão desta etapa não seria possível.

Ao nosso orientador, Prof. Dr Bruno Peruchi Trevisan, por toda a dedicação, orientação técnica e conselhos valiosos. Agradecemos por compartilhar seu conhecimento e por nos guiar com maestria durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À Carolina Terramoto, pelo auxílio prático e apoio imprescindível durante a realização minuciosa dos nossos ensaios.

À empresa Akaer, por gentilmente nos ceder o acesso e a utilização da máquina de tração, viabilizando os testes experimentais que foram essenciais para a validação dos resultados e a concretização deste estudo.

Aos demais professores do curso de Projetos de Estruturas Aeronáuticas e à direção da FATEC Professor Jessen Vidal, pelos ensinamentos transmitidos ao longo destes anos, que foram fundamentais para a nossa formação profissional.

Aos nossos amigos e colegas de turma, pelas trocas de ideias, pelos momentos de descontração e pela parceria nas horas de estudo e dedicação.

Por fim, agradecemos um ao outro pela parceria, paciência e comprometimento durante todas as etapas deste Trabalho de Graduação.

RESUMO

O presente trabalho investiga o comportamento mecânico de compósitos poliméricos de fibra de carbono reforçados com partículas de carbono reciclado submetidos a esforços de tração. O objetivo principal do estudo consiste em analisar experimentalmente o impacto da incorporação de pó de compósito reciclado, nas proporções mássicas de 0%, 5% e 10%, na matriz epóxi de laminados com sequência de empilhamento $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$. A pesquisa adota uma metodologia experimental que engloba a fabricação das placas compósitas pelo processo de laminação manual (*hand lay-up*) com cura à temperatura ambiente, seguida do corte dos corpos de prova e da execução de ensaios de tração uniaxial em uma máquina universal MTS Insight, conforme os parâmetros da norma ASTM D3039. A análise dos dados experimentais revela que a adição de 5% de pó de compósito de carbono diminui a tensão de ruptura do material em aproximadamente 12,7%, consequência de uma dispersão deficiente que favorece a formação de aglomerados e atua como concentrador de tensão. Em contrapartida, constata-se que a incorporação de 10% de carga particulada atinge o ponto crítico de concentração, permitindo uma rede tridimensional contínua e interconectada, promovendo o endurecimento estrutural da resina. Esse arranjo resulta em um aumento expressivo de aproximadamente 10% no Módulo de Elasticidade, além de recuperar plenamente a resistência à tração e melhorar a capacidade de dissipação de energia no comportamento pós-pico do material. Conclui-se que a reutilização técnica de resíduos de fibra de carbono via trituração mecânica, quando aplicada na proporção ideal de 10%, representa uma alternativa altamente viável, pois alia o descarte sustentável e os princípios da economia circular a um ganho significativo de rigidez e previsibilidade estatística em novas estruturas compósitas.

Palavras-Chave: Fibra de carbono; Compósitos poliméricos; Reciclagem mecânica; Ensaio de tração; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The present work investigates the mechanical behavior of carbon fiber polymeric composites reinforced with recycled carbon particles subjected to tensile stress. The main objective of the study is to experimentally analyze the impact of incorporating recycled composite powder, in mass fractions of 0%, 5%, and 10%, into the epoxy matrix of laminates with a $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$ stacking sequence. The research adopts an experimental methodology that encompasses the fabrication of the composite plates via the hand lay-up process with room-temperature curing, followed by the cutting of specimens and the execution of uniaxial tensile tests on an MTS Insight universal testing machine, in accordance with ASTM D3039 standard parameters.

The analysis of the experimental data reveals that the addition of 5% of carbon composite powder decreases the ultimate tensile strength of the material by approximately 12.7%, a consequence of poor dispersion that favors the formation of agglomerates and acts as a stress concentrator. In contrast, it is observed that the incorporation of 10% particulate filler reaches the critical concentration point, enabling a continuous and interconnected three-dimensional network, thereby promoting the structural hardening of the resin. This arrangement results in a significant increase of approximately 10% in the Elastic Modulus, in addition to fully recovering the tensile strength and improving the energy dissipation capacity in the material's post-peak behavior.

It is concluded that the technical reuse of carbon fiber waste via mechanical grinding, when applied in the ideal proportion of 10%, represents a highly viable alternative, as it combines sustainable disposal and the principles of the circular economy with a significant gain in stiffness and statistical predictability in new composite structures.

Keywords: Carbon fiber; Polymer composites; Mechanical recycling; Tensile test; Mechanical properties.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo Geral	10
1.2 Objetivos Específicos	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1. Materiais Compósitos de Matriz Polimérica	12
2.1.1 Vantagens e desvantagens	13
2.2. A Fibra de Carbono como Reforço Estrutural	14
2.3. Sustentabilidade e o Desafio da Reciclagem da Fibra de Carbono	15
2.4. Caracterização Mecânica: Ensaio de Tração Uniaxial	16
2.5. Diagrama Tensão-Deformação	18
2.6. Dimensões da amostra e modos de falha	19
2.7. Sustentabilidade e aplicações futuras	21
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	23
3.1. Caracterização das amostras	23
3.1.1 Matriz Polimérica	23
3.1.2 Carga reciclada: Pó de Compósito de Carbono	24
3.2 Processo de Fabricação das Placas (Laminação Manual).....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1. Comportamento Mecânico (Grupo 1).....	34
4.2. Influência da Adição de 5% de Pó de Carbono (Grupo 2)	37
4.2.1 Análise Microestrutural Pré-Teste (Grupo 2).....	38
4.3. Influência da Adição de 10% de Pó de Carbono (Grupo 3)	40
4.3.1. Análise Microestrutural Pré-Teste (Grupo 3).....	42
4.4. Análise do Comportamento Pós-Pico e Mecanismo de Falha.....	43
5. CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

A busca por materiais que combinam leveza e alta resistência transformou a fibra de carbono em um dos pilares da engenharia moderna, especialmente em setores onde a redução de peso é crítica, como o aeroespacial. No entanto, por mais que a fibra seja a protagonista, o desempenho real de um componente não depende apenas dela, mas de quão bem a resina consegue unir essas camadas e transmitir os esforços entre elas. É nesse cenário, onde a química da matriz encontra a mecânica das fibras, que reside o desafio de criar materiais cada vez mais eficientes (CALLISTER Jr., RETHWISCH, 2020).

Em estruturas reais, as cargas raramente atuam em uma única direção. Por isso, foram utilizados laminados multidirecionais, como a sequência de $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$. Essa configuração é estratégica: ela simula condições em que o material é exigido em ângulos que fogem do eixo principal, colocando a matriz polimérica sob grande estresse. O problema é que a resina, sozinha, é muitas vezes o “elo mais fraco” da corrente, sendo o local onde as primeiras microtrincas começam a aparecer antes da falha total do componente (DANIEL, ISHAI, 2006).

A hipótese que move este trabalho surge justamente da tentativa de fortalecer esse “elo mais fraco”. Segundo Hull e Clyne (1996), a introdução de cargas particuladas pode atuar como uma barreira física, dificultando a propagação de fissuras e aumentando a rigidez global do conjunto sem a necessidade de adicionar camadas extras de tecido.

Para validar essa proposta, a experimentação torna-se indispensável. Não basta apenas teorizar; é preciso observar como o material se comporta sob tensão real. Através de ensaios de tração em grupos de amostras controladas, este estudo se propõe a medir o impacto exato dessa aditivção. O objetivo final é entender se existe um “ponto ideal” de mistura ou se o excesso de partículas acaba prejudicando a integridade do laminado. Mais do que coletar dados, busca-se um caminho prático para otimizar o uso da fibra de carbono, unindo o reaproveitamento de materiais à alta performance estrutural.

Entretanto, materializar essa hipótese na bancada de ensaios exige superar desafios técnicos significativos. A introdução de micropartículas em uma resina viscosa altera não apenas o comportamento mecânico final, mas todo o processo de laminação. A distribuição homogênea do pó é crucial. Se as partículas aglomerarem, elas podem passar de reforço a defeitos estruturais, agindo como concentradores de tensão que aceleram a ruptura. Além disso, a análise deve considerar a viscosidade e a fluidez da resina, propriedades fundamentais para garantir a impregnação completa das fibras e evitar falhas estruturais. O

excesso de pó (10%) pode tornar a resina tão espessa que a impregnação completa dos tecidos de fibra torna-se difícil, resultando em bolhas de ar ou áreas não impregnadas no laminado. Esses defeitos de fabricação podem anular qualquer ganho de resistência que a aditivação pretendia proporcionar. (MAZUMDAR, 2001)

Portanto, para validar a viabilidade técnica desse compósito aditivado, este trabalho adota uma abordagem puramente experimental. Através do ensaio de tração em 15 corpos de provas, divididos entre controle (0%) e aditivados (5% e 10%), busca-se mais do que apenas medir a carga de ruptura. O objetivo é compreender como a interação entre a orientação das fibras, a resistência da matriz e a distribuição do pó de carbono define o comportamento do material.

Contudo, a viabilidade técnica desse compósito aditivado ganha uma relevância ainda maior quando analisado o ciclo de vida da fibra de carbono. Atualmente, o aumento exponencial da demanda global por esses materiais trouxe consigo um desafio crítico: a gestão de resíduos. Por ser um material de alto custo e de difícil degradação, o descarte de sobras de laminação ou de componentes em fim de vida representa um passivo ambiental e econômico que a engenharia moderna busca diminuir.

É nesse contexto que a utilização do particulado de carbono deixa de ser apenas uma busca por ganho mecânico e passa a ser uma estratégia de economia circular. O "pó" utilizado nesta pesquisa representa a possibilidade de reinserir fibras que são descartadas de volta ao processo produtivo. Ao transformar resíduos em partículas para reforçar a matriz de novos laminados, fecha-se o ciclo de reaproveitamento do material.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi analisar experimentalmente o impacto da adição de diferentes concentrações de micropartículas de carbono (0%, 5% e 10%) nas propriedades mecânicas de tração em laminados de fibra de carbono com sequência de empilhamento $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$.

1.2 Objetivos Específicos

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

- Avaliar as propriedades mecânicas da resina aditivada com micropartículas de fibra de carbono reciclada, estabelecendo uma base comparativa do impacto do reaproveitamento na resistência final do material;

- Confeccionar os corpos de prova por laminação manual (*hand lay-up*) na configuração $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$, controlando a dispersão das micropartículas para garantir a homogeneidade da matriz e mitigar a formação de aglomerados;
- Parametrizar e operar a máquina universal de ensaios (MTS Insight), aplicando critérios rigorosos de calibração para capturar com precisão o comportamento de ruptura frágil dos compósitos;
- Conduzir ensaios mecânicos de tração para a obtenção das curvas tensão-deformação, comparando o desempenho do grupo de controle com os laminados contendo 5% e 10% de aditivação;
- Realizar a análise macro ou microestrutural das superfícies de fratura, investigando os mecanismos de falha e como a presença das micropartículas altera a mecânica de ruptura do laminado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

Os materiais compósitos de matriz polimérica (PMC — *Polymer Matrix Composites*), frequentemente designados como Polímeros Reforçados por Fibras, são essenciais na engenharia moderna devido à sua combinação única de propriedades. Eles são definidos pela união de duas ou mais fases distintas e insolúveis entre si — uma matriz e um reforço — que apresentam uma interface clara e, quando combinadas, exibem propriedades mecânicas superiores às de seus constituintes isolados (CALLISTER Jr., RETHWISCH, 2020; DANIEL, ISHAI, 1994). Na indústria aeronáutica, esses materiais destacam-se pela alta resistência específica, permitindo uma redução significativa do peso estrutural sem comprometer a segurança.

Um sistema compósito é composto fundamentalmente por duas fases principais:

- Fase Matriz: Geralmente constituída por polímeros termofixos (resinas epóxi, poliéster ou viniléster) ou termoplásticos. Sua função principal é envolver e sustentar o reforço, protegendo-o contra danos ambientais e químicos. Além disso, a matriz é o elemento que garante que o conjunto trabalhe de forma integrada, sendo responsável por transmitir e distribuir as tensões aplicadas para as fibras de alta resistência. Enquanto as matrizes termofixas curam irreversivelmente e oferecem alta rigidez, as termoplásticas podem ser reprocessadas, oferecendo maior tenacidade e potencial de reciclagem. (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2020)
- Fase Reforço: Composta por fibras (carbono, vidro, aramida ou boro), é o elemento que confere rigidez e resistência mecânica ao conjunto. As fibras são as principais responsáveis por suportar a carga externa aplicada à estrutura. Elas podem ser classificadas quanto à sua orientação: unidirecionais, orientadas segundo uma única direção, ou bidimensionais (tecidos), orientadas em direções ortogonais. (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2020)

A eficiência de um PMC depende fortemente da interface fibra-matriz. Uma adesão pobre nessa região impede a transferência eficaz de carga, resultando em propriedades mecânicas inferiores às teóricas. Em processos de laminação manual com cura sem pressão externa, a qualidade dessa interface é crítica, pois pode ser influenciada pela viscosidade da resina e pela presença de vazios ou bolhas de ar.

Neste contexto, a introdução de cargas particuladas na fase matriz, como o pó de carbono, transforma o sistema em um compósito de três fases ou uma "matriz aditivada". Teoricamente, essas micropartículas podem atuar no preenchimento de microvasos ou vazios na resina e alterar sua tenacidade, influenciando diretamente o modo como as trincas se propagam durante a sollicitação mecânica (LEVY NETO, PARDINI, 2016).

Diferente dos metais, que são geralmente isotrópicos (propriedades uniformes em todas as direções), os compósitos possuem a característica da anisotropia. Isso significa que suas propriedades variam drasticamente dependendo do ângulo de aplicação da força em relação à orientação das fibras. Em laminados multidirecionais, como a configuração $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$, a resposta mecânica final é uma combinação das propriedades de cada lâmina individual (LEVY NETO, PARDINI, 2016).

Devido a essa complexidade estrutural e à sensibilidade do material frente a variações na composição da matriz, a validação de novas formulações, como o uso de resíduos de carbono na laminação, exige uma rigorosa caracterização experimental, cujos fundamentos de ensaio serão detalhados no tópico 2.5.

2.1.1 Vantagens e desvantagens

Os materiais compósitos de matriz polimérica oferecem um conjunto de propriedades que os tornam preferenciais em diversas aplicações de alta performance, sendo frequentemente uma alternativa superior aos materiais metálicos tradicionais. A vantagem mais significativa e que impulsiona o uso desses materiais na indústria aeroespacial é a elevada relação resistência/peso. Essa característica, conhecida como resistência específica, é essencial para a redução da massa estrutural, contribuindo diretamente para a eficiência energética e para o aumento da capacidade de carga em aeronaves e veículos (CALLISTER Jr., RETHWISCH, 2020). Somado a isso, os compósitos exibem excelente resistência à corrosão e a ambientes quimicamente agressivos, o que lhes confere uma durabilidade estrutural superior e reduz a necessidade de manutenções frequentes em comparação às ligas de alumínio ou aço.

Outro diferencial estratégico reside na anisotropia controlada, que permite ao projetista otimizar a rigidez e a resistência do material precisamente nas direções de maior sollicitação mecânica, eliminando o peso morto de reforços desnecessários (MENDONÇA, 2016). Além disso, a natureza multifásica dos compósitos confere a eles uma alta resistência à fadiga sob carregamentos cíclicos. Isso ocorre porque a interface entre a fibra e a matriz,

aliada à descontinuidade do reforço, atua como uma barreira natural que dificulta e retarda a propagação de microtrincas que, em materiais isotrópicos, levariam à falha prematura.

Apesar dessas qualidades, a utilização de compósitos impõe desafios notáveis que devem ser considerados no dimensionamento e na produção. O custo final é significativamente elevado, tanto pelas matérias-primas de alto desempenho quanto pela complexidade dos processos de fabricação (MARINUCCI, 2011). Ambientalmente, a reciclagem representa um gargalo crítico; a natureza das matrizes poliméricas termorrígidas impede que o material seja fundido novamente, tornando a recuperação das fibras um processo difícil que muitas vezes resulta em subprodutos com propriedades mecânicas degradadas.

Sob o ponto de vista mecânico, a própria anisotropia que atua como vantagem pode se tornar uma limitação, visto que o material tende a ser vulnerável a tensões fora do eixo das fibras, sendo a delaminação (separação entre as camadas) um dos modos de falha mais comuns e perigosos. Por fim, o desempenho estrutural é extremamente sensível à qualidade do processo de fabricação. Como a integridade do laminado depende da ausência de vazios e da correta impregnação da resina, métodos que não utilizam pressão externa, como a laminação manual, exigem um controle rigoroso para evitar porosidades que possam comprometer a segurança da estrutura (LEVY NETO, PARDINI, 2016).

2.2. A Fibra de Carbono como Reforço Estrutural

Entre os diversos tipos de reforço fibroso utilizados na engenharia de compósitos, a fibra de carbono destaca-se como o material de escolha para aplicações de alto desempenho e estruturas críticas. Sua relevância reside na combinação única de propriedades mecânicas e físicas superiores, que superam a maioria dos materiais metálicos e outros tipos de fibras. Produzida majoritariamente através da carbonização controlada de precursores poliméricos, como a Poliacrilonitrila (PAN), a fibra passa por um processo térmico que confere à sua microestrutura uma organização cristalina semelhante ao grafite (CALLISTER Jr., RETHWISCH, 2018). Essa estrutura altamente ordenada, com átomos de carbono alinhados ao longo do eixo longitudinal, é a base fundamental de suas propriedades excepcionais de rigidez e resistência.

Uma das principais características que justificam o uso da fibra de carbono é o seu elevado módulo de elasticidade. O Módulo de Young (E) deste reforço é significativamente superior ao da fibra de vidro e até mesmo ao de ligas de aço estrutural, o que confere ao

compósito final uma rigidez excepcional, fator crucial para evitar deflexões excessivas em componentes aeronáuticos (LEVY NETO, PARDINI, 2016). Somado a isso, sua baixa massa específica contribui diretamente para a alta resistência específica do material. Este parâmetro, que define a razão entre a resistência à tração e a densidade, é um dos mais altos entre todos os materiais de engenharia disponíveis, permitindo o desenvolvimento de estruturas leves e extremamente robustas.

Além do desempenho mecânico, a fibra de carbono apresenta excelente estabilidade térmica e química, características herdadas de sua composição grafítica, o que a torna resistente à degradação em ambientes severos (SHACKELFORD, 2008). Ao ser incorporada em uma matriz polimérica, ela permite a criação de materiais com capacidades de engenharia que seriam impossíveis de obter com materiais monolíticos tradicionais. A eficiência dessa união depende, contudo, da especificação correta da geometria do reforço — seja através de mantas unidirecionais ou tecidos com tramas do tipo *plain weave* ou *twill weave*. Esses arranjos geométricos são determinantes para a anisotropia do laminado e definem a capacidade de transferência de carga e a integridade da interface entre as camadas (MARINUCCI, 2011).

2.3. Sustentabilidade e o Desafio da Reciclagem da Fibra de Carbono

Apesar das inegáveis vantagens técnicas da fibra de carbono e de seus compósitos, a sustentabilidade e o ciclo de vida desses materiais constituem um dos principais desafios para sua expansão em escala global. Estruturas fabricadas com resinas termorrígidas, embora extremamente duráveis e eficientes em serviço, são intrinsecamente difíceis de reciclar ao fim de sua vida útil devido às ligações químicas cruzadas que formam uma rede tridimensional irreversível (LEVY NETO, PARDINI, 2016). O descarte tradicional, via aterros sanitários ou incineração, mostra-se econômica e ambientalmente ineficiente, dada a alta energia incorporada na produção da fibra de carbono virgem e o volume crescente de resíduos gerados pelas indústrias aeronáutica e eólica (RODRIGUES et al., 2021).

O principal obstáculo para a circularidade desses materiais reside na estabilidade química e térmica da matriz polimérica, geralmente epóxi, que fixa as fibras de forma permanente. Para mitigar este problema, as pesquisas têm se concentrado em processos de recuperação que visam extrair as fibras de carbono para reuso. O método mais estabelecido industrialmente é a Pirólise Térmica, processo no qual o compósito é aquecido em atmosfera inerte para decompor a matriz orgânica, liberando o reforço. No entanto, a pirólise e o

manuseio subsequente resultam em dois impactos críticos na qualidade do material recuperado: a redução do comprimento das fibras, que se tornam descontínuas e curtas, e o dano interfacial causado por resíduos carbonáceos que permanecem na superfície da fibra, comprometendo a adesão mecânica com uma nova matriz (ABDOU, 2016; OISHI, 2021).

Além dos métodos térmicos, existem alternativas como a reciclagem mecânica, que fragmenta o compósito em moagens de diversas granulometrias para uso como enchimentos (*fillers*), e a reciclagem química ou solvólise. Esta última utiliza solventes e catalisadores para dissolver a matriz polimérica, permitindo, em alguns casos, a recuperação de fibras com maior integridade mecânica e a própria recuperação dos monômeros da resina. A reintrodução dessas fibras ou de seus subprodutos granulados em novas laminações representa uma fronteira tecnológica importante, buscando equilibrar o desempenho mecânico com a redução do impacto ambiental da indústria de compósitos de alto desempenho.

2.4. Caracterização Mecânica: Ensaio de Tração Uniaxial

Quando uma força de tração é aplicada a um material, ocorre um aumento em seu comprimento e uma redução em sua seção transversal. Se essa força estiver dentro do limite elástico do material, ele retorna à sua forma original após a remoção da carga. No entanto, à medida que a força aplicada aumenta e ultrapassa esse limite, o material passa a apresentar uma deformação permanente, mesmo após a retirada da carga. Esse comportamento é estudado por meio do ensaio de tração, que permite avaliar propriedades mecânicas como resistência, ductilidade e limite de escoamento (BEER et al., 2015).

O ensaio é realizado com máquinas universais que registram todas as informações necessárias para análise de resistência dos materiais. Quando um corpo passa pelo ensaio de tração o equipamento fornece um gráfico que estabelece uma relação entre a força aplicada e as deformações ocorridas durante o ensaio.

A tensão (T) é definida como a força aplicada (F) dividida pela área da seção transversal (S). (HIBBELER, 2019). Utilizando a Equação 1:

$$T = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Historicamente, o cálculo da tensão em ensaios de tração era realizado de forma manual. A força era medida por meio de manômetros ou sistemas mecânicos, e a área da seção era determinada com instrumentos como paquímetros. A deformação era acompanhada visualmente ou com extensômetros analógicos, exigindo atenção constante do operador e maior suscetibilidade a erros humanos.

Com o avanço da tecnologia, as máquinas universais modernas passaram a incorporar sistemas computadorizados (PROENÇA, 2018). Hoje, células de carga de alta precisão medem a força aplicada, enquanto extensômetros eletrônicos ou sistemas ópticos capturam a deformação com extrema exatidão. Os dados são processados em tempo real por *softwares* que aplicam automaticamente a fórmula, gerando gráficos, tabelas e relatórios completos.

A caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica é um passo indispensável no desenvolvimento e validação de estruturas, especialmente quando se trata de materiais reforçados com fibra de carbono. A propriedade mecânica fundamental para a aplicação estrutural e para a quantificação de perdas de desempenho (como no caso da Fibra de Carbono Reciclada – RCF) é determinada pelo Ensaio de Tração Uniaxial. Este teste submete um corpo de prova a uma força de tração crescente e axial, registrando a resposta do material até a falha (SHACKELFORD, 2008).

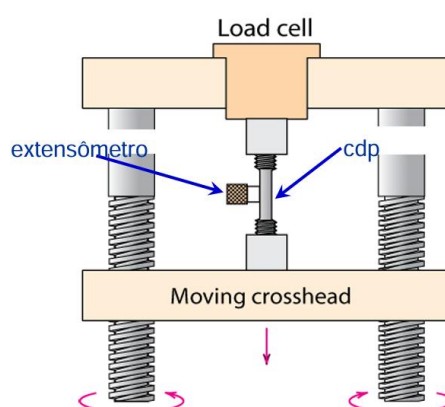
A execução do ensaio permite o levantamento da curva Tensão-Deformação (σ - ϵ), a partir da qual são determinados os principais parâmetros mecânicos:

- **Tensão de Tração (σ)**: Calculada pela força aplicada (F) dividida pela área da seção transversal inicial (A_0), conforme a Equação 2 $\sigma = \frac{F}{A_0}$.
- **Deformação (ϵ)**: Calculada pela variação do comprimento (ΔL) dividida pelo comprimento inicial (L_0), conforme a Equação 3 $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$.
- **Módulo de Elasticidade (E)**: A medida fundamental da rigidez do material, determinada pela inclinação da curva Tensão-Deformação no regime linear elástico. Em compósitos de alto desempenho, o alto valor de E é crucial para manter a estabilidade dimensional e evitar deflexões excessivas.
- **Resistência Máxima à Tração (σ_{max})**: O ponto de tensão máxima suportada pelo compósito antes da ocorrência da fratura.

A padronização rigorosa dos ensaios em compósitos poliméricos reforçados por fibras de alto módulo é realizada através da norma ASTM D3039/D3039M (*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*). Esta norma

estabelece critérios precisos para a geometria do corpo de prova (dimensões e espessura), o método de fixação (geralmente com o uso de *end tabs* para distribuir a carga e evitar falha prematura nas garras) e a taxa de carregamento. O uso da norma ASTM garante que os resultados de diferentes laboratórios sejam comparáveis e cientificamente válidos (LEVY NETO, PARDINI, 2016). O processo de ensaio é realizado pela máquina universal de ensaios, onde a travessa móvel traciona o corpo de prova para avaliar sua resistência. Durante o processo, a célula de carga e o extensômetro quantificam simultaneamente a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo material.

Figura 1. Processos de ensaio.

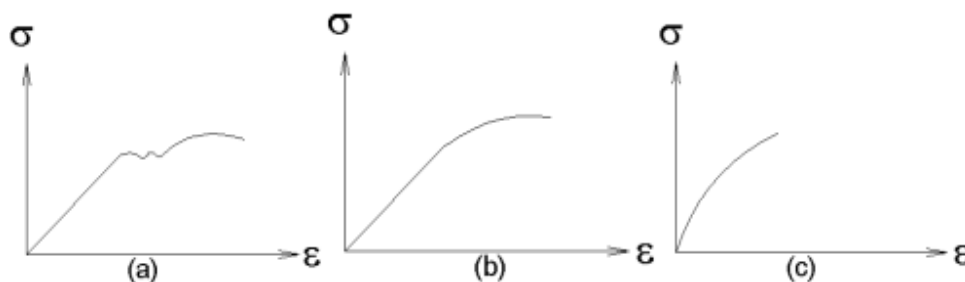


Fonte: Livro Callister Jr. E Rethwisch 8ed.

É importante notar que a falha de materiais compósitos bidimensionais submetidos à tração não ocorre de forma abrupta, como em materiais frágeis. Em geral, o processo de falha envolve mecanismos progressivos, como fissuração da matriz, descolamento na interface fibra–matriz, delaminação entre camadas e ruptura das fibras, sendo a resistência final fortemente influenciada pela integridade do reforço fibroso (SHACKELFORD, 2008). A avaliação da degradação desses parâmetros após a utilização de fibras recicladas de carbono (rCFs) constitui um aspecto central na validação do processo de reciclagem.

2.5. Diagrama Tensão-Deformação

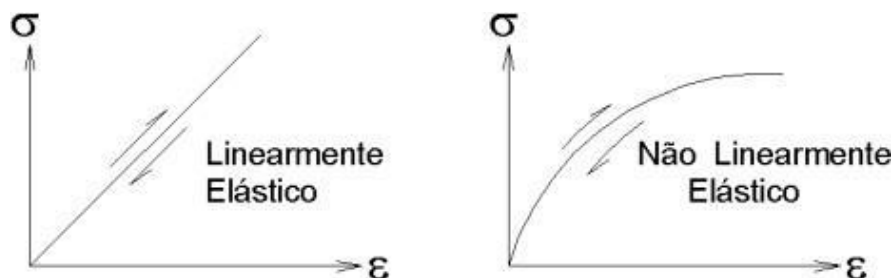
O diagrama tensão-deformação (Figura 2) é essencial para compreender o comportamento dos materiais sob carga (BOTELHO, 2017). O valor de deformação é representado no eixo das abscissas pela letra grega ϵ (épsilon), enquanto a tensão é indicada no eixo das ordenadas pela letra grega σ (sigma).

Figura 2. Diagrama Tensão-Deformação

Fonte: Nilson, Darwin, Dolan (2006)

A análise do comportamento mecânico dos materiais é essencial, sendo o diagrama Tensão-Deformação (Figura 2) a ferramenta-chave para a classificação em tenacidade e modo de falha. Materiais classificados como dúcteis (Figuras 2a e 2b) demonstram uma capacidade crucial de deformação plástica, onde o alongamento sob tensão confere uma margem de segurança à estrutura, pois a falha é previamente manifestada. Em contrapartida, os materiais frágeis (Figura 2c), categoria na qual se inserem o concreto e o compósito de fibra de carbono, exibem baixa ou nula deformação plástica. Essa fragilidade resulta em ruptura de maneira rápida e catastrófica, com pouca evidência de aviso, o que demanda uma precisão ainda maior no dimensionamento e na avaliação da integridade, especialmente para compósitos utilizados em aplicações críticas.

Alguns materiais elásticos apresentam uma relação essencialmente linear entre tensão e deformação. Tais materiais são chamados de linearmente elásticos (aço). Outros são não linearmente elásticos (borracha), como mostra a Figura 3. (NILSON, Darwin, Dolan, 2006)

Figura 3. Elasticidade no Material

Fonte: Nilson, Darwin, Dolan (2006)

2.6. Dimensões da amostra e modos de falha

A padronização dimensional dos corpos de prova é um requisito essencial da norma ASTM D3039 para garantir resultados reprodutíveis e comparáveis. Para compósitos

laminados com orientação multidirecional, a geometria retangular é a indicada, pois distribui uniformemente a carga ao longo da seção útil durante a tração uniaxial. Neste estudo, os corpos de prova foram cortados com dimensões nominais de 250 mm de comprimento por 25 mm de largura, com espessura variando conforme o grupo experimental, em função das diferenças de viscosidade da resina aditivada, medida individualmente por paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

Quanto aos modos de falha, compósitos laminados multidirecionais como o $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$ não rompem de forma abrupta e singular. A falha é um processo progressivo em cascata: inicialmente ocorre o fissuramento da matriz polimérica, seguido pelo descolamento na interface fibra-matriz (*debonding*), pela delaminação entre camadas e, por fim, pela ruptura das fibras longitudinais. A norma ASTM D3039 classifica os modos de falha por localização (seção útil, aba ou extremidade) e por tipo (fratura angular, explosiva, em camadas, entre outros), sendo válidos para análise apenas os modos ocorridos na seção útil do corpo de prova.

A Tabela 1 sintetiza a classificação dos modos de falha observados nos três grupos.

Tabela 1. Classificação dos Modos de Falha

CÓDIGO	MODO DE FALHA (INGLES)	TRADUÇÃO TÉCNICA	COMPORTAMENTO TÍPICO NO MATERIAL
A	<i>Angled</i>	Angular/Diagonal	Comum em lâminas com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$.
B	<i>Brimstone/Explosive</i>	Explosiva/Filamentar	Ocorre em fibras a 0° de alta energia (ex: carbono puro).
G	<i>Grip</i>	Esmagamento na Garra	Ensaio inválido. Indica excesso de pressão.
L	<i>Lateral</i>	Transversal Reta	Típico de falhas governadas pela matriz ou fibra a 90° .
M	<i>Multi-mode</i>	Modos Múltiplos	Frequentemente em laminados complexos com tecidos multidirecionais.
S	<i>Longitudinal splitting</i>	Divisão Longitudinal	Tração na direção de menor resistência das fibras.
D	Delamination	Delaminação	Indica falhas por cisalhamento interlaminar ou fraqueza na resina

Fonte: Autores (2026), com base em ASTM Internacional (2017).

2.7. Sustentabilidade e aplicações futuras

A reciclagem de compósitos termorrígidos (como aqueles que possuem matriz epóxi, poliéster ou viniléster) é crucial devido a quantidade de resíduos gerados nos setores supracitados. Diferentemente dos termoplásticos, esses materiais não podem ser facilmente reprocessados/moldados, tornando-se um desafio o seu descarte, e que já ameaçam a sobrecarga em aterros sanitários.

Além do descarte deve ser considerado o custo do produto, que por suas amplas propriedades possuem um valor elevado, devido ao consumo energético e ao preço das matérias-primas. Com sua reciclagem, o processo contribui para a economia circular, onde os resíduos de uma indústria tornam-se insumos de alto valor para outra. Para que se torne insumo, a reciclagem deve garantir um alto nível de desempenho que justifique o seu uso através de certificação, obtidas com testes de suas propriedades mecânicas após o processo, análise da superfície e padronização com especificações e tolerâncias.

Visando aplicações futuras, foram adaptadas de tecnologias químicas e de engenharia dois tipos distintos de reciclagem para esses compósitos, sendo Pirólise e Solvólise. Foi realizada a comparação entre as tecnologias como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação - Pirólise vs Solvólise.

Característica	Pirólise	Solvólise
Definição	Decomposição térmica de materiais orgânicos na ausência de oxigênio.	Reação de decomposição ou substituição química na qual um solvente quebra as ligações do material.
Agente reativo	Calor (altas temperaturas).	Um solvente
Mecanismo de reação	Mecanismo de reação	O solvente atua como um nucleófilo, atacando as ligações para quebrá-las.
Diferenças	É o calor que fornece a energia para quebrar as ligações químicas na ausência de oxigênio.	É a ação química de um solvente que reage com a substância, quebrando suas ligações.

Fonte: Autores (2026), com base em Oliveux, Dandan e Fitzpatrick (2015).

Embora a Pirólise e a Solvólise sejam eficazes na recuperação de fibras longas, elas envolvem alta complexidade operacional e custos elevados. Neste contexto, a Reciclagem Mecânica via Trituração, método adotado neste estudo, apresenta-se como uma alternativa técnica e economicamente viável para o reaproveitamento de resíduos de CFRP (*Carbon*

Fiber Reinforced Polymer). Este processo consiste na fragmentação e moagem do compósito original, reduzindo-o a partículas micronizadas conhecidas como pó de fibra (*milled fiber*), com comprimento tipicamente inferior a 100 μm .

Diferente dos métodos químicos, a trituração não visa a remoção total da resina antiga, mas sim a transformação do material em uma carga particulada de alto valor. O uso desse pó é focado em aplicações onde o custo e a sustentabilidade são prioridades, permitindo a criação de uma matriz aditivada. O objetivo não é necessariamente atingir a performance de estruturas aeronáuticas primárias, mas sim determinar o potencial de ganho mecânico em componentes não críticos quando comparados a uma matriz pura.

A principal limitação enfrentada por fibras que passaram por processos de separação ou trituração reside na adesão interfacial. Após a fragmentação, a superfície da fibra pode apresentar resíduos da matriz anterior ou a ausência do agente de calibragem (*sizing*) original, o que prejudica a transferência de tensões entre o reforço e a nova resina. Por essa razão, a análise das propriedades mecânicas de tração, que será detalhada nos capítulos seguintes, é fundamental para validar se a incorporação do pó nas proporções de 5% e 10% melhora a coesão do laminado ou se introduz pontos de fragilidade na estrutura.

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Compreendida a metodologia fundamental do ensaio de tração e a importância do diagrama tensão-deformação para a caracterização de materiais, o trabalho teve como objetivo principal avaliar experimentalmente como a adição de micropartículas de carbono (0%, 5% e 10%) influencia as propriedades mecânicas de tração em laminados de fibra de carbono com empilhamento $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$, utilizando a máquina MTS Insight.

Para atingir esse objetivo, foram definidos alguns passos: aprender a operar e calibrar a máquina de ensaio, analisar as características das micropartículas recicladas em comparação às fibras virgens, produzir as amostras por laminação manual garantindo boa distribuição do material, realizar ensaios de tração para obter curvas tensão-deformação e comparar os resultados entre as diferentes concentrações, além de examinar as superfícies de ruptura para entender como as partículas afetam o modo de falha.

Os corpos de prova utilizados foram laminados de fibra de carbono com diferentes teores de micropartículas (0%, 5% e 10%), e o principal ensaio realizado foi o ensaio de tração, complementado pela análise das fraturas das amostras.

3.1. Caracterização das amostras

A validação experimental deste estudo baseou-se em materiais de especificação técnica homologada. O reforço primário estrutural consistiu no tecido comercial Texiglass CC-200-1,30, composto por 100% de fibra de carbono com padrão de tecelagem tipo Tela. O material possui gramatura nominal de 200 g/m², espessura nominal de 0,33 mm por camada.

As camadas de tecido foram arranjadas manualmente na sequência multidirecional e simétrica de $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$ para a posterior impregnação e ensaio.

3.1.1 Matriz Polimérica

A matriz polimérica é a fase contínua do compósito, cuja função primária é aglutinar as fibras e transferir as tensões aplicadas entre os elementos de reforço (MALLICK, 2008).

Para a matriz polimérica, utilizou-se o sistema epóxi modificado da fabricante Huntsman, composto pela resina RenLam® M, caracterizada por sua baixa viscosidade de 1.500 mPas a 25°C e ausência de solventes, e pelo endurecedor Aradur® 956-2. A resina selecionada foi utilizada em conjunto com o seu respectivo endurecedor na proporção de 5:1

em massa, garantindo a reticulação completa e o desenvolvimento das propriedades mecânicas máximas.

A matriz polimérica pura (sem adição de carga reciclada) servirá como material de referência (grupo controle) no ensaio de tração, permitindo a análise comparativa do impacto da adição do Pó de Compósito Reciclado nas propriedades finais do material.

3.1.2 Carga reciclada: Pó de Compósito de Carbono

O elemento central deste estudo é a incorporação de um material de fonte secundária, o Pó de Compósito Reciclado, como carga funcional na nova matriz polimérica. Esta abordagem visa valorizar os resíduos industriais, contribuindo para a sustentabilidade da cadeia produtiva de compósitos.

O Pó de Compósito Reciclado foi obtido a partir de resíduos sólidos de compósitos de fibra de carbono reforçada com resina epoxi. A técnica utilizada para o reprocessamento deste resíduo ocorre através do processo de corte e ajuste das peças fabricadas, a qual se destaca por ser um método de reciclagem economicamente acessível e de alta velocidade.

3.2 Processo de Fabricação das Placas (Laminação Manual)

O método de processamento escolhido para a confecção das placas compósitas foi a Laminação Manual (*Hand Lay-up*). Este método foi selecionado por sua simplicidade, baixo custo de implementação e por ser o procedimento mais comum no processamento de compósitos utilizando resinas termorrígidas e em laboratórios de pesquisa, sendo também o método que gera o tipo de resíduo que origina o Pó de Compósito Reciclado (PCR).

O processo foi controlado através da pesagem rigorosa dos constituintes, garantindo a fidelidade às proporções estabelecidas para cada grupo experimental (0%, 5% e 10% de carga reciclada).

● Preparação da Matriz e Incorporação do Pó de Carbono

Para cada placa, as massas de resina e catalisador foram calculadas com base no peso do reforço (fibra de carbono), mantendo-se uma proporção de catalisador de aproximadamente 20% em relação à massa da resina.

A inclusão da carga (pó de carbono) foi realizada de forma escalonada: para a Amostra 01 (controle), utilizou-se 0g de pó; para a Amostra 02, foram incorporados 2,09g (5%); e para a Amostra 03, adicionou-se 4,9g (10%). O pó foi misturado à resina antes da

adição do agente catalisador para permitir uma homogeneização mecânica prolongada sem o risco de polimerização precoce. Observou-se que a adição de 10% de pó alterou significativamente a reologia da mistura, elevando sua viscosidade. Esse fenômeno aumentou o atrito interno do fluido, exigindo maior esforço mecânico para garantir a dispersão das partículas e evitar a formação de aglomerados (clusters).

A escolha das proporções de 5% e 10% justificam-se pelo comportamento reológico e mecânico de compósitos particulados documentado na literatura. Segundo Fu et al. (2008), concentrações em torno de 5% permitem observar a zona de transição onde a aglomeração de partículas tende a atuar como concentradora de tensões, enquanto a faixa de 10% representa o limiar ótimo de percolação, formando uma rede tridimensional contínua que eleva a rigidez estrutural do polímero. Além disso, o limite máximo de 10% obedece a um critério crítico de manufatura estabelecido por Mazumdar (2001): proporções superiores aumentam exponencialmente a viscosidade da matriz, impedindo o fluxo capilar da resina e inviabilizando a impregnação adequada dos tecidos de fibra durante a laminação manual. Os cálculos foram realizados nas proporções de 5/1, em relação ao catalisador na resina como apresentado na Tabela 3. Logo após, sua definição foi realizada a homogeneidade do pó de fibra de carbono na resina como apresenta a Figura 4.

Tabela 3. Cálculo de proporções.

Cálculo de proporção					
Amostras	Reciclável	Carbono	Resina	Catalisador	Pó
Amostras 01	0%	40,9 g	34,08 g	6,82 g	0 g
Amostras 02	5%	41,8 g	34,83 g	6,97 g	2,09 g
Amostras 03	10%	49,0 g	40,83 g	8,17 g	4,9 g

Fonte: Autores (2026).

Figura 4. Homogeneização do pó de Carbono.



Fonte: Autores (2026).

- **Sequência de Laminação e Impregnação**

Com a matriz preparada, procedeu-se à laminação sobre uma base plana tratada com agente desmoldante. A configuração adotada foi o empilhamento de três camadas de tecido de fibra de carbono com a orientação $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$.

Para garantir a uniformidade entre os grupos, utilizou-se a técnica de compressão manual com espátulas em todas as camadas de todas as amostras (Figuras 5 e 6). Esse procedimento teve como objetivo forçar a penetração da matriz (independente da viscosidade) entre os filamentos do tecido e auxiliar na expulsão de bolhas de ar aprisionadas. Nas amostras aditivadas (5% e 10%), o uso da espátula foi ainda mais crítico para assegurar que a resina mais espessa preenchesse os vazios interfibras de maneira homogênea.

Figura 5. Laminação Manual.



Fonte: Autores (2026).

Figura 6. Laminação Manual.



Fonte: Autores (2026).

- **Consolidação e Cura**

Após a impregnação da última camada (45°), os painéis foram submetidos ao processo de cura em temperatura ambiente (Figura 7). Diferente de processos industriais que

utilizam vácuo ou prensagem, as placas permaneceram em repouso sobre a bancada, sem a aplicação de pressão externa durante o tempo de polimerização.

Essa condição de cura reflete um cenário de fabricação simplificado, onde a integridade final do compósito depende estritamente da eficiência da laminação manual prévia. A ausência de pressão externa implica que a espessura final de cada placa foi determinada naturalmente pela viscosidade da mistura e pela compressão exercida manualmente pelas espátulas durante o lay-up, fator que será levado em consideração na análise dimensional das amostras antes dos ensaios de tração, já que o vácuo serve para compactar as camadas e remover o excesso de resina. O excesso de resina pode diminuir a resistência do material.

Figura 7. Placas Curadas.



Fonte: Autores (2026).

3.4 Preparação dos Corpos de Prova

Após a cura completa dos laminados, procedeu-se à transformação das placas em corpos de prova individuais. Esta etapa é crítica para a validade dos resultados, uma vez que imperfeições no corte ou variações dimensionais podem atuar como concentradores de tensão e invalidar os ensaios. Para garantir as dimensões precisas foi demarcado de acordo com as medidas da norma ASTM D3039, como apresentado na Figura 8.

Figura 8. Marcação nas dimensões das amostras.



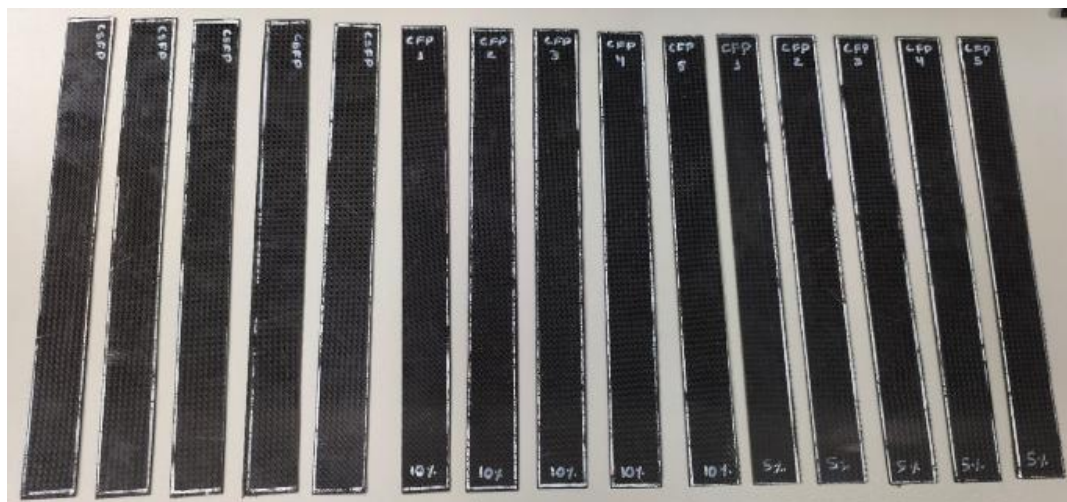
Fonte: Autores (2026).

3.4.1 Corte e Geometria

A extração das amostras foi realizada de acordo com as diretrizes da norma ASTM D3039. Utilizou-se um sistema de corte com disco diamantado para garantir um acabamento lateral limpo, minimizando o surgimento de delaminações nas bordas ou o desfiamento das fibras superficiais (Figura 9).

As amostras foram cortadas em tiras retangulares com dimensões nominais de 25 mm de largura por 250 mm de comprimento. A precisão do corte foi essencial para assegurar que as fibras externas, orientadas a $\pm 45^\circ$, permanecessem íntegras e capazes de transmitir carga adequadamente durante o ensaio uniaxial.

Figura 9. Amostras Cortadas.

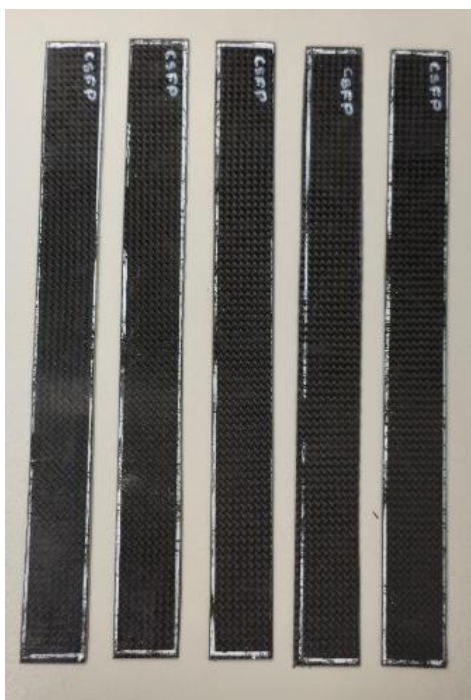


Fonte: Autores (2026).

3.4.2 Identificação e Codificação

Para assegurar a rastreabilidade dos dados e evitar confusões entre as diferentes concentrações de pó de carbono, foi adotado um sistema de codificação alfanumérica. Cada grupo experimental, composto por 5 amostras, recebeu uma identificação específica:

Figura 10. Amostras CSFP.



CSFP (0-1 a 0-5): Amostras de controle (0% de pó).

Fonte: Autores (2026).

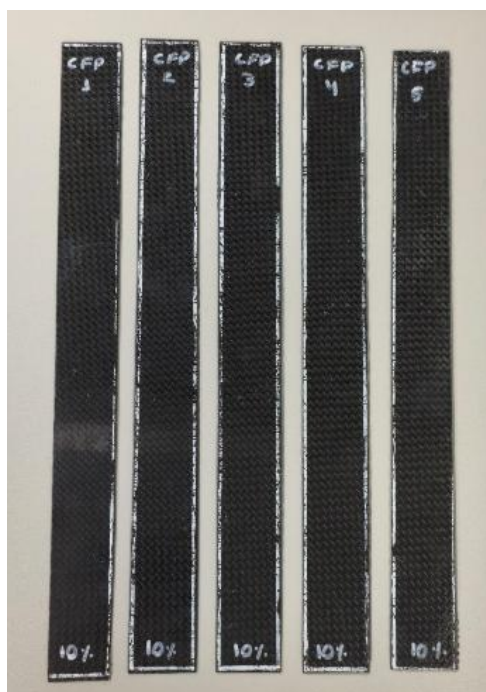
Figura 11. Amostras CFP5.



CFP5 (5-1 a 5-5): Amostras aditivadas com 5% de pó de compósito reciclado.

Fonte: Autores (2026).

Figura 12. Amostras CFP10.



CFP10 (10-1 a 10-5): Amostras aditivadas com 10% de pó de compósito reciclado.

Fonte: Autores (2026).

3.4.3 Metrologia e Inspeção Pré-Ensaio

Considerando que a laminação foi manual e a cura ocorreu sem aplicação de pressão externa, a medição individual de cada corpo de prova foi indispensável. Utilizou-se um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm para aferir a largura e a espessura em três pontos distintos da seção útil de cada amostra.

A média dessas medições foi registrada para compor o banco de dados de entrada do *software* da máquina universal de ensaios. Este procedimento garante que a Tensão de Tração seja calculada com base na área da seção transversal real de cada espécime, compensando eventuais variações de espessura decorrentes da maior viscosidade observada na resina do grupo G10.

3.5. Metodologia Experimental

O objetivo deste ensaio é determinar as propriedades de tração no plano de amostras de compósito de matriz polimérica reforçadas com fibra de carbono reciclada. As propriedades mecânicas a serem determinadas incluem:

- Resistência à Tração Final
- Deformação à Tração Final
- Módulo de Elasticidade
- Deformação

O ensaio foi realizado em conformidade com a norma ASTM D3039/D3039M (*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*). Esta norma é aplicável a compósitos reforçados com fibras de alto módulo, exigindo que o laminado seja balanceado e simétrico em relação à direção do carregamento para evitar esforços de flexão ou torção induzidos durante a tração uniaxial.

O laminado desenvolvido para este estudo apresenta uma sequência de empilhamento $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$, o que caracteriza uma configuração simétrica em relação ao plano médio. Embora a carga reciclada (pó de carbono) esteja distribuída de forma aleatória na matriz polimérica, a arquitetura do reforço principal (tecido de fibra de carbono) mantém a simetria e o balanceamento do sistema, atendendo aos requisitos de estabilidade mecânica preconizados pela norma para a validade dos resultados experimentais.

Figura 13. Máquina de Tração MTS INSIGHT



Fonte: Imagem cedida pela AKAER (2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma vez consolidada a metodologia de fabricação e a configuração estrutural dos laminados [$\pm 45^\circ / 0^\circ - 90^\circ / \pm 45^\circ$], este capítulo é dedicado à apresentação, análise e discussão dos dados obtidos nos ensaios de tração axial, realizados em conformidade com a norma ASTM D3039. A taxa de carregamento aplicada pelo travessão do equipamento foi mantida constante em 4 mm/min para todas as amostras. No total, foram ensaiados 15 corpos de prova, divididos igualmente em três grupos de estudo: fibra de carbono pura (controle), laminados com 5% e laminados com 10% de fração mássica de pó de carbono. Para fins de precisão analítica, todas as propriedades de tensão mecânica e rigidez foram calculadas com base na área da seção transversal inicial das amostras (25 mm²).

A Tabela consolida os parâmetros mecânicos médios obtidos para os três grupos de estudo (0%, 5% e 10% de fração mássica de pó de carbono), detalhando o comportamento estatístico por meio da média aritmética e do desvio padrão de cada grupo.

Tabela 4. Média das Propriedades Mecânicas obtidas no ensaio de tração.

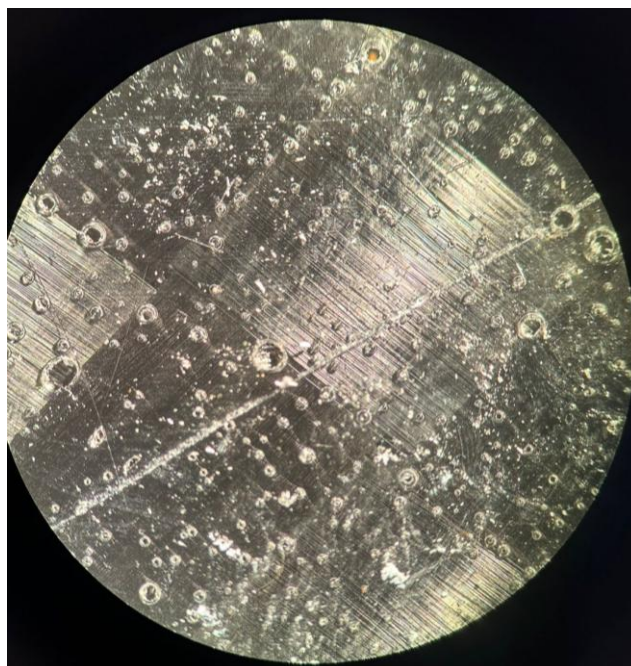
Grupo	Carga Máxima Média (N)	Módulo de Elasticidade Médio (E em MPa)	Deformação na Ruptura Média (ϵ_u em mm/mm)
Grupo 1 (0% Pó)	5820,43 $\pm$ 187,03	3649,39 $\pm$ 365,65	0,047 $\pm$ 0,009
Grupo 2 (5% Pó)	5081,11 $\pm$ 354,77	3598,01 $\pm$ 247,02	0,042 $\pm$ 0,004
Grupo 3 (10% Pó)	5917,92 $\pm$ 267,00	4017,03 $\pm$ 124,35	0,046 $\pm$ 0,004

Fonte: Autores (2026).

4.1. Comportamento Mecânico (Grupo 1)

O Grupo 1 foi avaliado com o propósito de estabelecer a linha de base (referência) deste estudo, representando o comportamento mecânico puro do laminado multidirecional com sequência de empilhamento [$\pm 45^\circ / 0^\circ - 90^\circ / \pm 45^\circ$] sem a inclusão de particulados na resina epóxi. A Figura 14 apresenta, de forma geral, a imagem microscópica das amostras do grupo 1.

Figura 14. Imagens do microscópio, amostra Grupo 1.



Fonte: Imagem microscópio (2026).

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos individualmente para o grupo 1, servindo como parâmetro comparativo para as seções subsequentes.

Tabela 5. Resultados individuais obtidos para o grupo 1 (Referência - 0% Pó)

Amostra	Carga Máxima (N)	Módulo de Elasticidade (E em MPa)	Deformação na Ruptura (ϵ em mm/mm)
CSFP-01	5.672,57	4.077,66	0,034
CSFP -02	5.836,31	3.542,57	0,057
CSFP -03	5.638,54	3.105,95	0,05
CSFP -04	5.842,13	3.768,15	0,044
CSFP -05	6.112,59	3.752,61	0,047
Média	$5.820,43 \pm 187,03$	$3.649,39 \pm 365,65$	$0,046 \pm 0,009$

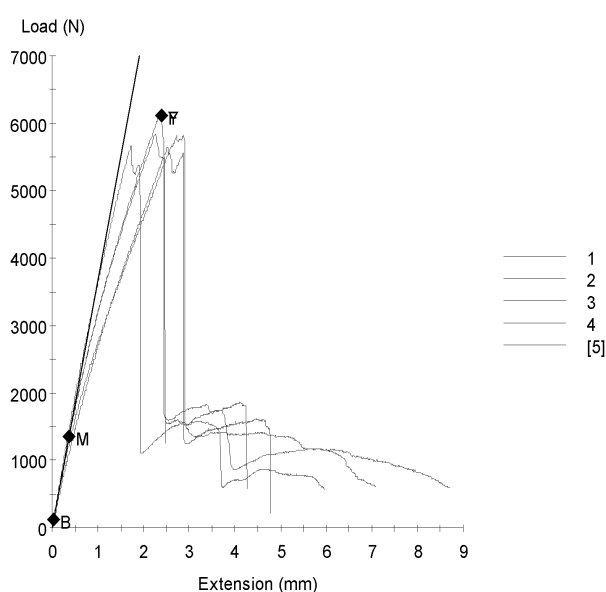
Fonte: Autores (2026).

Os dados obtidos revelam que o material puro possui uma rigidez média inicial de 3649,39 MPa e atinge uma tensão de ruptura média de 232,82 MPa. O desvio padrão

relativamente baixo na tensão (7,48 MPa) indica que o processo de laminação convencional e cura da resina epóxi sem aditivos garantiu uma boa repetibilidade e homogeneidade padrão entre os corpos de prova.

O perfil de carregamento mecânico deste grupo controle pode ser visualizado de forma clara no gráfico de Tensão (F) x Deformação (De) apresentado na Figura 15.

Figura 15. Curva de Tensão x Deformação Obtidas para o Grupo 1.



Fonte: Autores (2026).

A análise das curvas da Figura 15 demonstra um comportamento característico de materiais compósitos laminados com fibras orientadas. Observa-se uma resposta predominantemente linear no início do carregamento, regida pela elasticidade das fibras longitudinais a 0°-90°. À medida que a deformação se aproxima do limite de ruptura, pequenas inflexões nas curvas sugerem o início de microfalhas internas na matriz epóxi puramente polimérica, culminando no colapso repentino e frágil do material ao atingir o pico de carga, estabelecendo assim os parâmetros de comparação para avaliar o efeito da adição do pó de carbono.

4.2. Influência da Adição de 5% de Pó de Carbono (Grupo 2)

Tabela 6. Resultados individuais obtidos para o grupo 2 (Referência - 5% Pó).

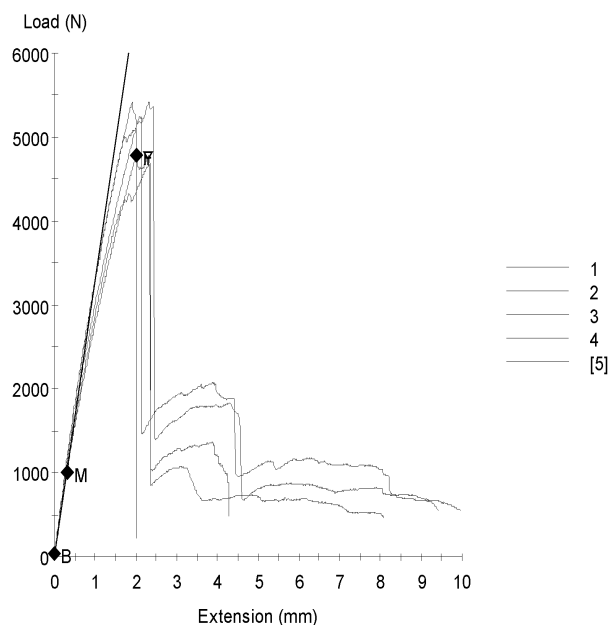
Amostra	Carga Máxima (N)	Módulo de Elasticidade (E em MPa)	Deformação na Ruptura (ϵ_u em mm/mm)
CFP5-01	4.672,12	3.323,48	0,046
CFP5-02	5.108,87	3.794,02	0,039
CFP5-03	5.420,48	3.620,39	0,046
CFP5-04	5.422,30	3.876,65	0,037
CFP5-05	4.781,76	3.375,13	0,04
Média	5.081,11 $\pm$ 354,77	3.597,93 $\pm$ 247,02	0,042 $\pm$ 0,004

Fonte: Autores (2026).

Ao analisar os dados obtidos para o Grupo 2, que contou com a incorporação de 5% em massa de pó de carbono na matriz epóxi, observa-se uma redução de aproximadamente 12,7% na tensão de ruptura média (203,24 MPa) quando comparado ao Grupo 1 de controle (232,82 MPa). Além da queda na resistência mecânica, este grupo apresentou o maior desvio padrão entre as amostras avaliadas ($\pm 14,19$ MPa), evidenciando uma perda de homogeneidade nas propriedades do compósito. Como visto na Tabela 6, o corpo de prova CFP5-01, por exemplo, rompeu prematuramente com uma tensão de apenas 186,8 MPa, enquanto o CFP5-04 atingiu 216,8 MPa.

Essa forte oscilação de comportamento se reflete de forma nítida no comportamento gráfico do Grupo 2, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16. Curvas de Tensão x Deformação obtidas para o Grupos 2.



Fonte: Autores (2026).

Esse comportamento deletério inicial está associado ao fenômeno de aglomeração de partículas. Em frações mássicas intermediárias, a ausência de uma dispersão perfeitamente homogênea do pó de carbono favorece a formação de aglomerados locais na resina. Esses pontos de saturação localizada atuam como severos concentradores de tensão dentro da fase contínua do polímero. (Levy Neto; Pardini, 2016)

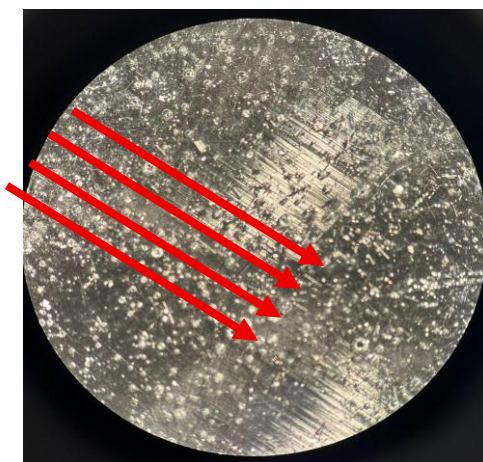
Como as camadas externas do laminado estão orientadas a $\pm 45^\circ$, elas são fortemente solicitadas por esforços de cisalhamento interfacial durante o ensaio de tração axial. A presença de aglomerados de carga fragiliza a interface matriz-reforço nestas camadas periféricas, antecipando a nucleação e a propagação de microtrincas interlaminares. Consequentemente, ocorre o fenômeno de delaminação precoce do sanduíche estrutural, limitando a capacidade do material de transferir integralmente os esforços de tração para as fibras longitudinais a 0° - 90° posicionadas no núcleo da amostra.

4.2.1 Análise Microestrutural Pré-Teste (Grupo 2)

As micrografias ópticas obtidas para o Grupo 2 (5% de pó de carbono) antes da realização dos ensaios mecânicos revelam um cenário de alta heterogeneidade na distribuição da carga particulada sobre o laminado [$\pm 45^\circ$ / 0° - 90° / $\pm 45^\circ$].

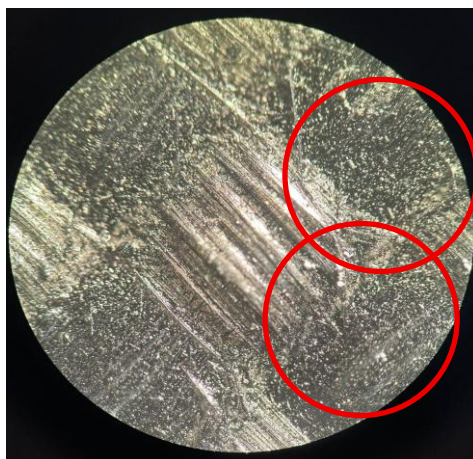
Em determinadas regiões da amostra, como observado na Figura 17, é possível identificar claramente o alinhamento das fibras de carbono, circundadas por uma transição gradual de resina modificada. No entanto, ao analisar outras regiões do mesmo corpo de prova, evidenciadas pela Figura 17, constata-se uma severa segregação e acúmulo de partículas. Nestes pontos, a alta concentração de pó de carbono propiciou a formação de uma densa rede de aglomerados microestruturais (pelotas de carga), que obliteram a visualização das fibras subjacentes.

Figura 17. Imagens do microscópio, amostra Grupo 2.



Fonte: Imagem microscópio (2026).

Figura 18. Imagens do microscópio, amostra Grupo 2.



Fonte: Imagem microscópio (2026).

Essa oscilação entre áreas limpas e áreas com alta densidade de aglomerados confirma a dispersão deficiente da fração de 5%. A presença dessas colônias de partículas isoladas na matriz epóxi cria descontinuidades físicas no compósito. Sob a ação de carregamento axial, a interface entre essas regiões ricas em aglomerados e o tecido de fibra de carbono atua como um

severo concentrador de tensões, explicando a ruptura precoce do material e a grande dispersão nos resultados estatísticos de resistência deste grupo.

4.3. Influência da Adição de 10% de Pó de Carbono (Grupo 3)

Para iniciar esta análise, a Tabela 7 apresenta os resultados obtidos individualmente para cada corpo de prova deste grupo, permitindo observar a baixa dispersão dos dados antes da avaliação dos mecanismos microestruturais e gráficos.

Tabela 7. Resultados individuais obtidos para o grupo 2 (Referência - 5% Pó).

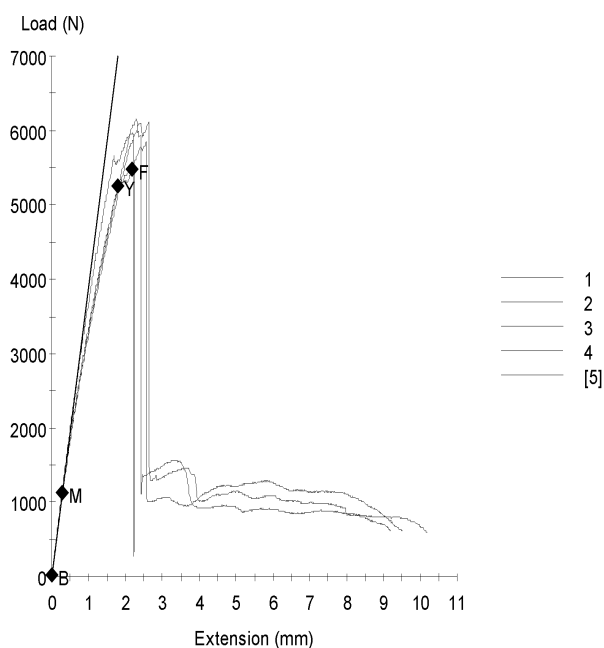
Amostra	Carga Máxima (N)	Módulo de Elasticidade (E em MPa)	Deformação na Ruptura (ϵ_u em mm/mm)
CFP10-01	5.851,10	3.908,06	0,05
CFP10-02	5.982,60	4.231,34	0,042
CFP10-03	6.122,45	3.967,57	0,052
CFP10-04	6.154,65	3.974,46	0,045
CFP10-05	5.478,80	4.003,72	0,043
Média	5.917,92± 267,00	4.017,03±124,35	0,046±0,004

Fonte: Autores (2026), MTS INSIGHT (2026).

Em contraste com os resultados do grupo anterior, os ensaios realizados no Grupo 3 (10% em massa de pó de carbono) revelaram um comportamento mecânico altamente eficiente. A tensão de ruptura média recuperou-se plenamente, atingindo 236,72 MPa, o que supera ligeiramente o grupo de controle puro (232,82 MPa). Além disso, o Módulo de Elasticidade Médio apresentou um incremento expressivo de aproximadamente 10%, elevando-se para 4017,03 MPa e registrando o menor desvio padrão do estudo (124,35 MPa). Como pode ser observado, todos os corpos de prova apresentaram valores de tensão e rigidez muito próximos e concentrados ao redor da média.

Essa grande regularidade estatística e o ganho de rigidez refletem-se de maneira nítida no perfil das curvas do ensaio, dispostas na Figura 19.

Figura 19. Curvas de Tensão x Deformação obtidas para o Grupos 3.



Fonte: MTS INSIGHT (2026).

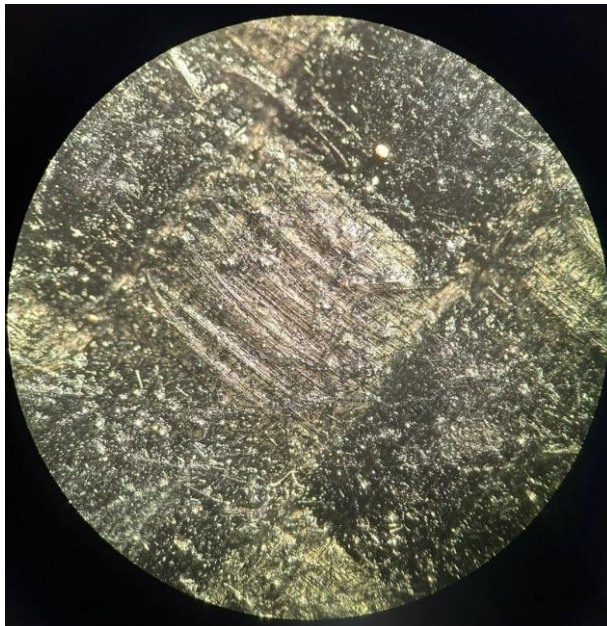
Diferente do Grupo 2, o comportamento gráfico deste grupo exibe curvas altamente agrupadas, lineares e estáveis. Esse salto de desempenho indica que a fração mássica de 10% atingiu o chamado limiar de percolação. Com essa concentração elevada, as partículas de pó de carbono deixaram de atuar como defeitos isolados e passaram a formar uma rede tridimensional contínua e interconectada através da matriz epóxi. Esse fenômeno promove o endurecimento severo da resina (*matrix stiffening*), restringindo a mobilidade das suas cadeias poliméricas. (Gibson, 2016)

Como as camadas externas do laminado estão orientadas a $\pm 45^\circ$, a sua tendência natural sob tração é sofrer distorção por cisalhamento. Ao tornar a resina significativamente mais rígida, a rede de pó de carbono "travou" geometricamente essas camadas periféricas, impedindo a sua deformação precoce. Com a matriz estabilizada, o laminado foi capaz de distribuir as tensões de forma homogênea e transferir a carga de maneira direta e integral para as fibras contínuas a 0° - 90° do núcleo estrutural, justificando o ganho simultâneo de rigidez, resistência e previsibilidade estatística. (Levy Neto; Pardini, 2016)

4.3.1. Análise Microestrutural Pré-Teste (Grupo 3)

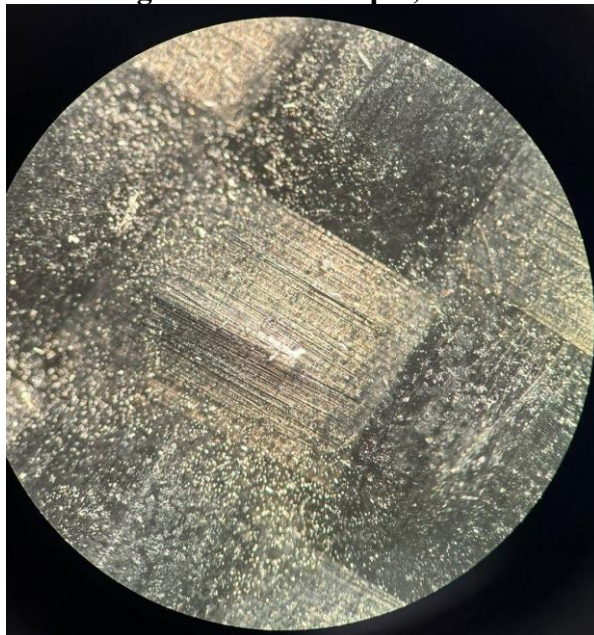
Em nítido contraste com o grupo anterior, as micrografias ópticas obtidas para o Grupo 3 (10% de pó de carbono), apresentadas nas Figuras 20 e 21, revelam uma microestrutura consideravelmente mais preenchida.

Figura 20. Imagens do microscópio, amostra Grupo 3.



Fonte: Imagem microscópio (2026).

Figura 21. Imagens do microscópio, amostra Grupo 3.



Fonte: Imagem microscópio (2026).

Observa-se que a maior fração mássica de carga particulada resultou em uma distribuição densa e uniforme das partículas por toda a extensão da matriz epóxi. Não se nota a presença de grandes aglomerados isolados ou zonas de segregação drástica como as mapeadas no Grupo 2. Em vez disso, as partículas preencheram de forma contínua os vazios interlaminares, contornando a trama geométrica do tecido de fibra de carbono subjacente.

Esse arranjo espacial contínuo confirma visualmente que o compósito atingiu o limiar de percolação. Ao formarem uma rede tridimensional interconectada e bem distribuída, as partículas passaram a atuar de forma sinérgica com a resina, promovendo o seu endurecimento global (*matrix stiffening*). A ausência de pontos críticos de concentração de tensões e a estabilidade dessa nova interface justificam o ganho de 10% no Módulo de Elasticidade médio (4017,03 MPa) e, fundamentalmente, a alta previsibilidade do material, refletida no menor desvio padrão de rigidez registrado no estudo.

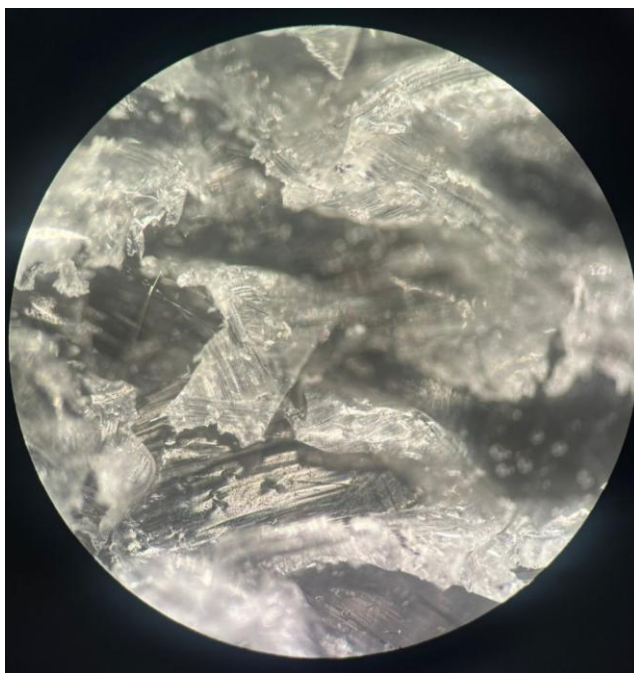
4.4. Análise do Comportamento Pós-Pico e Mecanismo de Falha

Um aspecto de grande relevância observado nas curvas de Tensão (T) x Deformação (De) de todos os grupos estudados é o comportamento do material após atingir a carga máxima de ruptura. Em materiais puramente frágeis, a força cai abruptamente até zero de forma instantânea. No entanto, os laminados avaliados apresentaram uma queda vertical severa seguida por um patamar residual de carregamento, estendendo-se por vários milímetros antes do colapso total da amostra.

A queda vertical inicial representa a falha catastrófica e frágil das fibras de carbono longitudinais alinhadas a 0°-90° no núcleo do laminado, que são as principais responsáveis por suportar os esforços de tração direta. No momento em que essas fibras se rompem, o material perde a sua capacidade de carregamento principal.

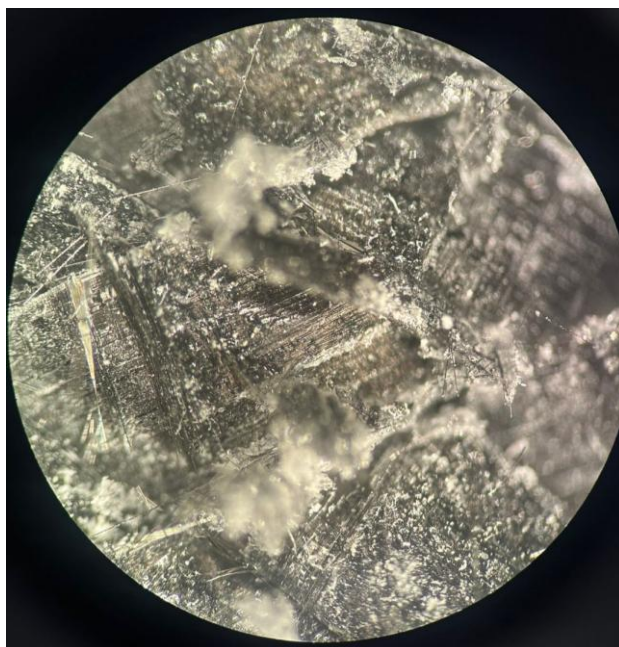
Contudo, a persistência de uma força residual (na faixa de 1000 N a 2000 N) comprova a ocorrência de mecanismos secundários de dissipação de energia, tais como a delaminação progressiva e o arrancamento de fibras (*fiber pull-out*). As camadas externas orientadas a $\pm 45^\circ$, embora severamente danificadas, continuam sofrendo deformação e gerando atrito cinético conforme as fibras remanescentes são arrancadas da matriz epóxi.

Figura 22. Fratura na amostra 04 (Grupo 1).



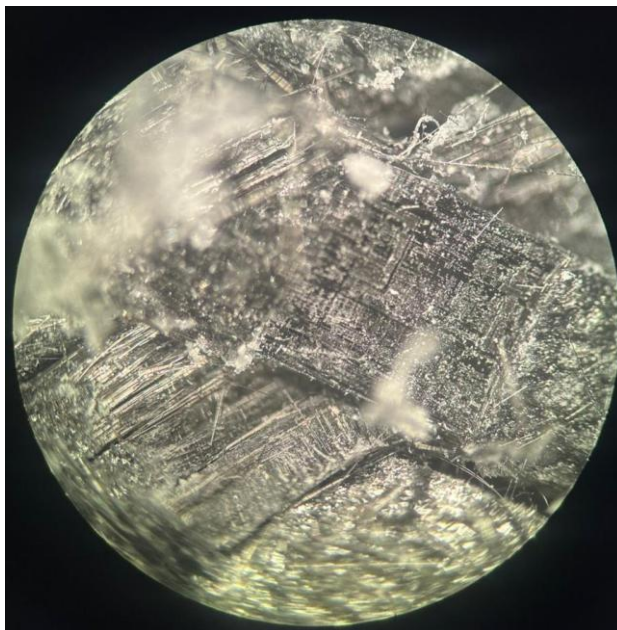
Fonte: Imagem microscópio (2026).

Figura 23. Fratura na amostra 01 (Grupo 2).



Fonte: Imagem microscópio (2026).

Figura 24. Fratura na amostra 03 (Grupo 3).



Fonte: Imagem microscópio (2026).

As Figuras 22, 23 e 24 apresentam imagens microscópicas das fraturas das amostras dos Grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

A Figura 22 exibe a morfologia de falha do Grupo 1 (0% de pó). A superfície de fratura da matriz epóxi apresenta um aspecto predominantemente liso e espelhado, indicando uma ruptura frágil sem obstáculos físicos. Nota-se um arrancamento limpo dos filamentos (*fiber pull-out*), com as fibras de carbono expostas e praticamente isentas de resina residual em suas superfícies.

Na Figura 23, a fratura do Grupo 2 (5% de pó) revela uma topografia altamente irregular e fragmentada. A imagem destaca uma superfície granular, onde as zonas de ruptura coincidem visualmente com "nódulos" escuros e aglomerados de carga. As bordas da fratura apresentam um aspecto quebradiço e descontínuo, confirmando fisicamente os pontos de descolamento prematuro ao redor das partículas mal dispersas.

A Figura 24 (Grupo 3, 10% de pó) demonstra uma mudança substancial no padrão de ruptura, exibindo uma superfície notavelmente rugosa e coesa. Visualmente, os aglomerados isolados desaparecem, dando lugar a uma textura áspera e uniforme. As fibras rompidas na área de fratura permanecem densamente revestidas pela matriz, evidenciando uma falha integrada e a forte adesão física entre o polímero aditivado e o tecido de carbono estrutural.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo central analisar experimentalmente o impacto da adição de partículas de carbono reciclado nas propriedades mecânicas de tração de laminados com matriz epóxi e sequência de empilhamento $[\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ]$.

A hipótese inicial de que a adição de cargas particuladas aumentaria a rigidez do CDP revelou-se dependente da concentração e da distribuição do pó. Os ensaios demonstraram que a adição de 5% de pó de carbono (Grupo 2) gerou um efeito inferior ao esperado na estrutura, reduzindo a tensão de ruptura média em aproximadamente 12,7% em comparação ao grupo controle. A análise microestrutural confirmou que, nessa proporção, a distribuição deficiente resultou na formação de aglomerados que atuaram como grandes concentradores de tensão, fragilizando a matriz-reforço e antecipando a falha por delaminação.

Em contrapartida, os resultados obtidos com a incorporação de 10% de pó de carbono (Grupo 3) validaram a viabilidade técnica da criação de um compósito com aditivo. Nessa concentração, o material alcançou o ponto crítico de concentração, permitindo que as micropartículas formassem uma rede tridimensional contínua e interconectada. Esse arranjo estrutural promoveu um endurecimento significativo da resina, restringindo a deformação das camadas e melhorando a transferência de carga para o núcleo do laminado. Como consequência, observou-se uma recuperação da tensão de ruptura e um aumento expressivo de aproximadamente 10% no Módulo de Elasticidade, aliado à maior homogeneidade dos resultados (menor desvio padrão).

Por fim, do ponto de vista ambiental e econômico, o trabalho confirma que a utilização da reciclagem mecânica por trituração é uma alternativa altamente viável. A reinserção desses resíduos, quando feita na proporção correta (10%), deixa de ser apenas um meio de descarte sustentável e passa a ser uma estratégia tecnológica de economia circular, transformando passivos ambientais em aditivos que elevam a performance mecânica de novos materiais estruturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOU, T. R. **Recuperação de fibras de carbono presentes em descarte industrial de compósito polimérico**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3039 / D3039M - 17: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CARLSSON, L. A.; ADAMS, D. F.; BYRON PIPES, R. **Experimental characterization of advanced composite materials**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2006.

FU, S.-Y.; FENG, X.-Q.; LAUKE, B.; MAI, Y.-W. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 39, n. 6, p. 933-961, 2008.

GIBSON, R. F. **Principles of composite material mechanics**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2019.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An Introduction to Composite Materials**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

MALLICK, P. K. **Fiber-Reinforced Composites: materials, manufacturing, and design**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: fundamentos e tecnologia**. São Paulo: Artliber, 2011.

MAZUMDAR, S. K. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais Compostos e Estruturas Sanduíche: projeto e análise**. São Paulo: Manole, 2016.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Princípios de mecânica dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2023.

NILSON, A. H.; DARWIN, D.; DOLAN, C. W. **Design of Concrete Structures**. 13. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

OISHI, W. K. **Aplicações de compósitos reciclados com fibra de carbono baseado em propriedades mecânicas**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", São José dos Campos, 2021.

OLIVEUX, G.; DANDAN, L. O.; FITZPATRICK, C. 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.

PROENÇA, S. P. B. **Curso de Resistência dos Materiais**. São Carlos: EESC/USP, 2018.

RODRIGUES, V. E. et al. 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. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, 2021.

SHACKELFORD, J. F. **Introdução à Ciência dos Materiais para Engenheiros**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.