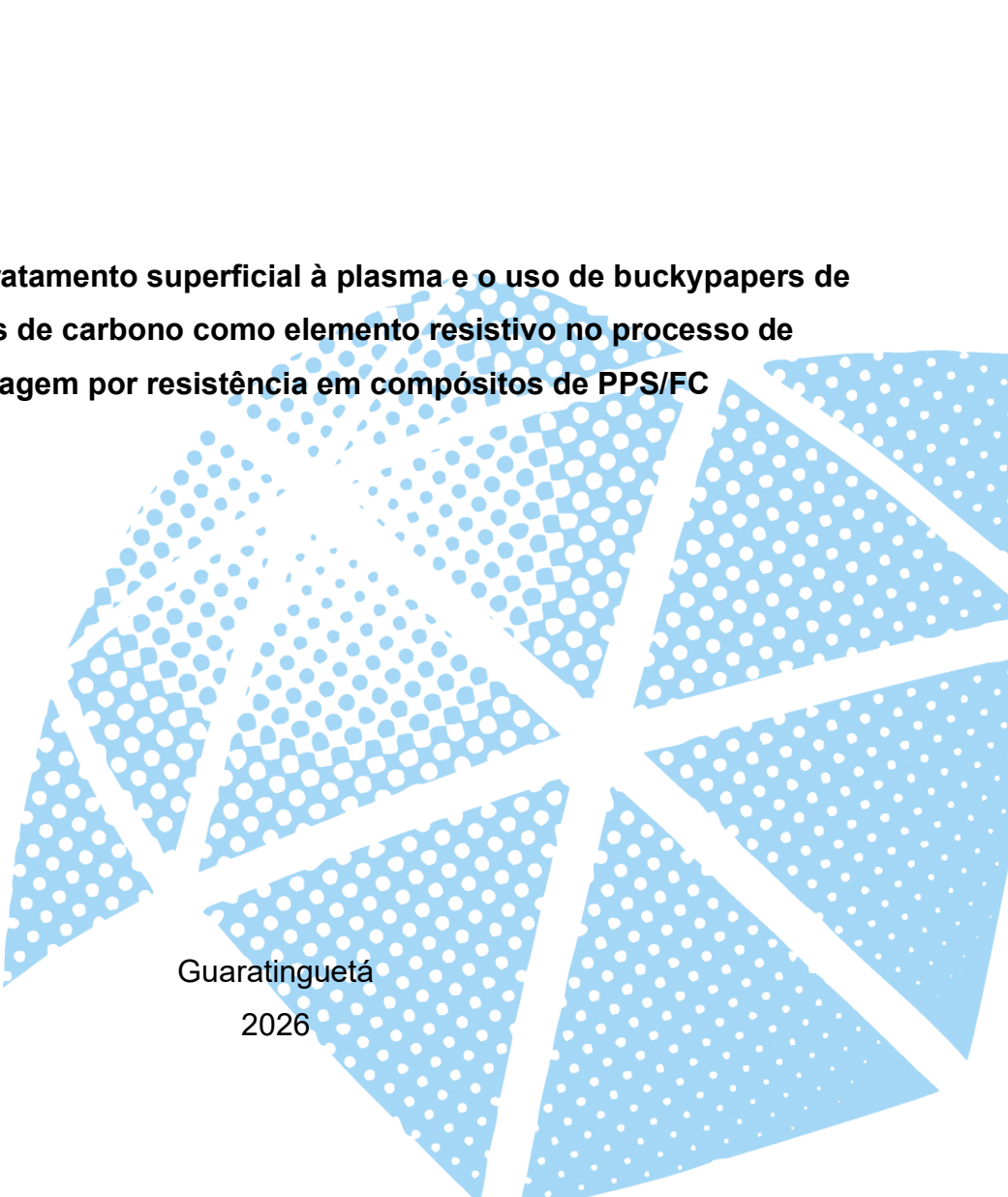


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

GABRIEL DAMASCENO FERES

A influência do tratamento superficial à plasma e o uso de buckypapers de nanotubos de carbono como elemento resistivo no processo de soldagem por resistência em compósitos de PPS/FC

Guaratinguetá
2026



GABRIEL DAMASCENO FERES

A influência do tratamento superficial à plasma e o uso de buckypapers de nanotubos de carbono como elemento resistivo no processo de soldagem por resistência em compósitos de PPS/FC

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Grau acadêmico Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:

Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

Coorientador: Dr. Luis Felipe de Paula Santos

Coorientador: Dr. Bruno Ribeiro

Guaratinguetá

2026

F349i	Feres, Gabriel Damasceno A Influência do tratamento superficial à plasma e o uso de <i>buckypapers</i> de nanotubos de carbono como elemento resistivo no processo de soldagem por resistência em compósitos de PPS/FC / Gabriel Damasceno Feres - Guaratinguetá, 2026. 84 f : il. Bibliografia: f. 76-82 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026. Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho Coorientador: Prof. Dr. Luis Felipe de Paula Santos 1. Compósitos nanoestruturados. 2. Compósitos poliméricos. 3. Nanotubos de carbono. I. Título. CDU 620.1(043)
-------	---

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto potencial desta pesquisa está em contribuir para o desenvolvimento de métodos de união de compósitos poliméricos avançados, abordando o desafio do processamento de peças complexas. Ao comparar a tradicional malha metálica (mesh 200) com o *buckypaper*, o estudo avalia a viabilidade técnica de materiais nanoestruturados de carbono como elementos resistivos alternativos, considerando aspectos como redução de peso e redução do tempo de processamento. Além disso, a investigação sobre a influência do tratamento superficial a plasma fornece dados relevantes para o entendimento da adesão interfacial e a melhoria da integridade estrutural das juntas. Os resultados obtidos podem auxiliar no aprimoramento de processos de soldagem por resistência elétrica, facilitando a aplicação de compósitos em setores industriais, como o aeroespacial e o automotivo, que demandam materiais leves e montagens confiáveis.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The potential impact of this research lies in contributing to the development of joining methods for advanced polymer composites, addressing the challenge of processing complex parts. By comparing traditional metallic mesh (200 mesh) with buckypaper, this study evaluates the technical viability of carbon nanostructured materials as alternative resistive elements, considering aspects such as weight reduction and shorter processing times. Furthermore, the investigation into the influence of plasma surface treatment provides relevant data for understanding interfacial adhesion and improving the structural integrity of the joints. The results obtained may assist in refining electrical resistance welding processes, facilitating the application of composites in industrial sectors such as aerospace and automotive, which demand lightweight materials and reliable assemblies.

GABRIEL DAMASCENO FERES

A influência do tratamento superficial à plasma e o uso de buckypapers de nanotubos de carbono como elemento resistivo no processo de soldagem por resistência em compósitos PPS/Fibra de carbono.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Data da defesa: 20/03/2026

Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
LUIS FELIPE DE PAULA SANTOS
Data: 20/03/2026 18:24:32-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. LUIS FELIPE DE PAULA SANTOS

Coorientador - IPT

 Documento assinado digitalmente
KELLY CRISTINA COELHO DE CARVALHO BENINI
Data: 20/03/2026 14:59:20-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. KELLY CRISTINA COELHO DE CARVALHO BENINI

UNESP

 Documento assinado digitalmente
FABIO ROBERTO PASSADOR
Data: 20/03/2026 11:06:10-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. FÁBIO ROBERTO PASSADOR

UNIFESP

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – 88887.940737/2024-00

RESUMO

Os compósitos poliméricos têm como características a elevada resistência mecânica e rigidez, aliadas a baixa massa específica. Porém, um dos principais desafios de sua utilização é o processamento de peças com geometrias complexas e integração de componentes. Neste sentido, a soldagem por resistência elétrica tem se tornado promissora, uma vez que consiste em uma técnica de união de componentes rápida e simples de ser trabalhada. Portanto, este trabalho tem como objetivo aprimorar o processo de soldagem por resistência elétrica, substituindo o elemento resistivo metálico, por *buckypaper* (BP), um filme fino e poroso obtido a partir de nanotubos de carbono. Com o objetivo de aumentar a molhabilidade do compósito polimérico e, consequentemente a interação entre os componentes a serem soldados, o laminado foi tratado à plasma de descarga de barreira dielétrica (DBD) por 10 minutos. O processamento do *buckypaper* foi realizado via filtração à vácuo, enquanto o laminado, via compressão à quente. Já a soldagem dos materiais foi realizada com parâmetros distintos para cada tipo de elemento resistivo. Para a malha metálica, empregou-se uma corrente elétrica de 35 A, pressão de 1,2 MPa e tempo de soldagem de 160 s. No entanto, a soldagem utilizando o BP operou com corrente de 9 A, pressão de 1,7 MPa e tempo de 100 s. A avaliação da qualidade das juntas soldadas e a influência do tratamento a plasma foram conduzidas por meio de ensaios mecânicos de cisalhamento (LSS) e análise dinâmico-mecânica (DMA). Os resultados dos ensaios de LSS demonstraram que o tratamento superficial a plasma influenciou significativamente as juntas com elemento metálico, elevando os valores de resistência média de 9,38 MPa (sem tratamento) para 14,33 MPa (com tratamento), o que representa um acréscimo de 53% na resistência da junta. Para as amostras com BP, não houve influência relevante do tratamento a plasma na resistência final (3,45 MPa sem tratamento e 3,05 MPa com tratamento), uma vez que o mecanismo de falha ocorreu na estrutura do próprio BP e não na região da interface. Por fim, o DMA evidenciou que ocorreu ativação de grupos funcionais na superfície do compósito pelo plasma, gerando aumento da mobilidade das cadeias poliméricas, resultando em um decréscimo da temperatura de transição vítrea de 5 °C.

Palavras-chave: soldagem por resistência elétrica; nanotubos de carbono; *buckypaper*; plasma.

ABSTRACT

The use of advanced polymer composites is characterized by high mechanical strength and stiffness, combined with low density. However, one of the main challenges of their utilization is the processing of parts with complex geometries and component integration. In this context, electrical resistance welding has proven promising, as it is a fast and easy-to-implement component joining technique. Therefore, this work aims to enhance the electrical resistance welding process, replacing the metallic resistive element traditionally used in this process with buckypaper (BP), a thin, porous film obtained from carbon nanotubes. With the goal of increasing the wettability of the polymer composite and, consequently, the interaction between the components to be welded, the laminate was treated with dielectric barrier discharge (DBD) plasma for 10 minutes. The buckypaper processing was carried out via vacuum filtration, while the laminate was manufactured via hot compression molding. The welding of the materials was performed using distinct parameters for each type of resistive element. For the metallic mesh, welding was carried out with an electric current of 35 A, pressure of 1.2 MPa, and a welding time of 160 s. Conversely, welding using BP was performed with a current of 9 A, pressure of 1.7 MPa, and a time of 100 s. The evaluation of welded joint quality and the influence of plasma treatment were conducted through mechanical lap shear strength (LSS) testing and dynamic mechanical analysis (DMA). The LSS test results demonstrated that surface plasma treatment significantly influenced the joints with the metallic element, increasing average strength values from 9.38 MPa (untreated) to 14.33 MPa (treated), representing a 53% increase in joint strength. For the samples with BP, there was no relevant influence of plasma treatment on the final strength (3.45 MPa untreated and 3.05 MPa treated), since the failure mechanism occurred within the BP structure itself and not at the interface region. Additionally, DMA analysis highlighted that functional group activation occurred on the composite surface due to the plasma, leading to increased polymer chain mobility and resulting in a 5 °C decrease in the glass transition temperature.

Keywords: resistance welding; carbon nanotubes; buckypaper; plasma.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
1.2	MOTIVAÇÃO.....	13
1.3	OBJETIVOS.....	14
1.4	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	14
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1	COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	16
2.2	POLI (SULFETO DE FENILENO) (PPS).....	17
2.3	TÉCNICAS DE UNIÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	18
2.3.1	Soldagem por resistência elétrica	21
2.4	BUCKYPAPER DE NANOTUBOS DE CARBONO.....	28
2.5	NANOTUBOS DE CARBONO.....	30
2.6	TRATAMENTO SUPERFICIAL À PLASMA	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	MATERIAIS	38
3.2	MÉTODOS.....	39
3.2.1	Termogravimetria (TGA)	40
3.2.2	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	41
3.2.3	Processamento por moldagem por compressão a quente.....	41
3.2.4	Processamento dos <i>buckypapers</i>	44
3.2.5	Avaliação dos <i>buckypapers</i>	45
3.2.6	Tratamento superficial à plasma.....	46
3.2.7	Espectroscopia no infravermelho com transformada de fourier (ftir)	47
3.2.8	Análise de ângulo de contato.....	47
3.2.9	Soldagem por resistência elétrica	47
3.2.10	Análise dinâmico mecânica (DMA).....	50
3.2.11	<i>Lap shear</i> (LSS)	51
3.2.12	Fractografia.....	52
3.2.13	Soldagem por resistência elétrica	52
4	RESULTADOS	56
4.1	CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO SEMIPREG DE PPS/FIBRA DE CARBONO	

4.2	MOLDAGEM POR COMPRESSÃO A QUENTE	59
4.3	TRATAMENTO À PLASMA NA SUPERFÍCIE DO COMPÓSITO PPS/FIBRA DE CARBONO.....	62
4.4	ENSAIO DE <i>LAP SHEAR</i> UTILIZANDO MALHA METÁLICA E <i>BUCKYPAPER</i> COMO ELEMENTO RESISTIVO.	65
4.5	ANÁLISE DE <i>LAP SHEAR</i> E A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO À PLASMA.	68
4.6	ANÁLISE DE DMA E A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO À PLASMA.....	72
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
	REFERÊNCIAS.....	76
	DADOS CURRICULARES.....	83

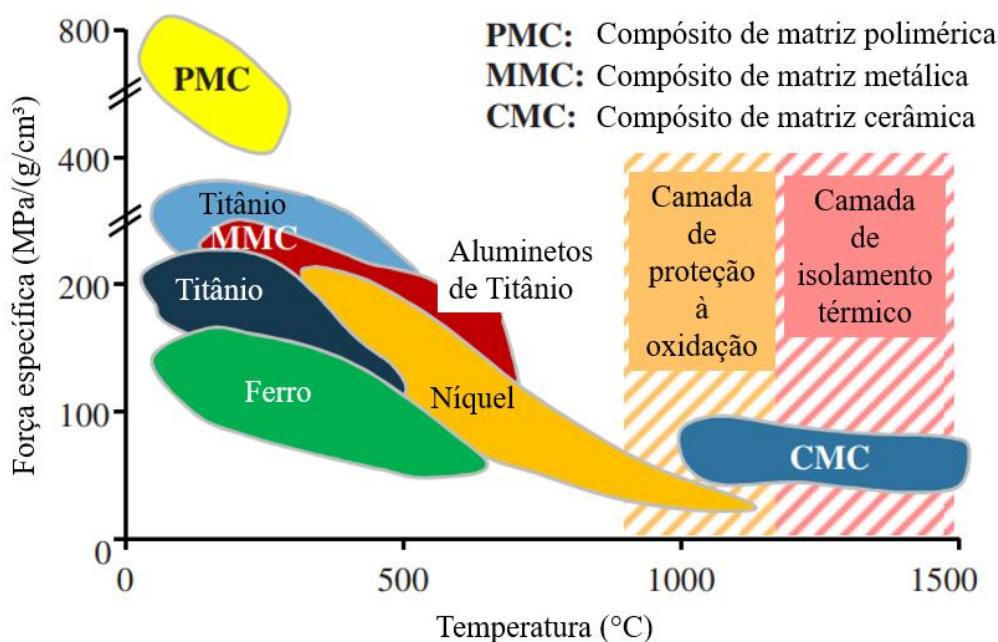
1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O acelerado crescimento da aviação moderna tem impulsionado avanços significativos no desenvolvimento de novos materiais utilizados em aplicações aeronáuticas motivado, principalmente, pelo aumento da eficiência energética e pela redução de custos. Desse modo, materiais com baixa massa específica e elevadas propriedades mecânicas têm se destacado neste cenário, resultando em um aumento significativo do alcance de voo e da capacidade de carga, o que levou à redução dos custos operacionais. Nos últimos 80 anos, ligas metálicas à base de alumínio dominaram este setor devido, principalmente, às suas elevadas propriedades mecânicas, resistência ao desgaste e baixa expansão térmica (PARVEEZ *et al.*, 2022).

Os avanços na ciência dos materiais ao longo das décadas têm permitido a substituição gradual das ligas metálicas por compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras (*Polymer Matrix Composites* – PMC, em inglês). Esses materiais apresentam propriedades mecânicas superiores aos materiais tradicionais empregados neste setor, além de uma elevada resistência específica, conforme ilustrado na Figura 1 (KLOCKE *et al.*, 2013; KUMAR SHARMA *et al.*, 2022).

Figura 1 - Diagrama comparativo da força específica em função da temperatura para diferentes tipos de materiais.



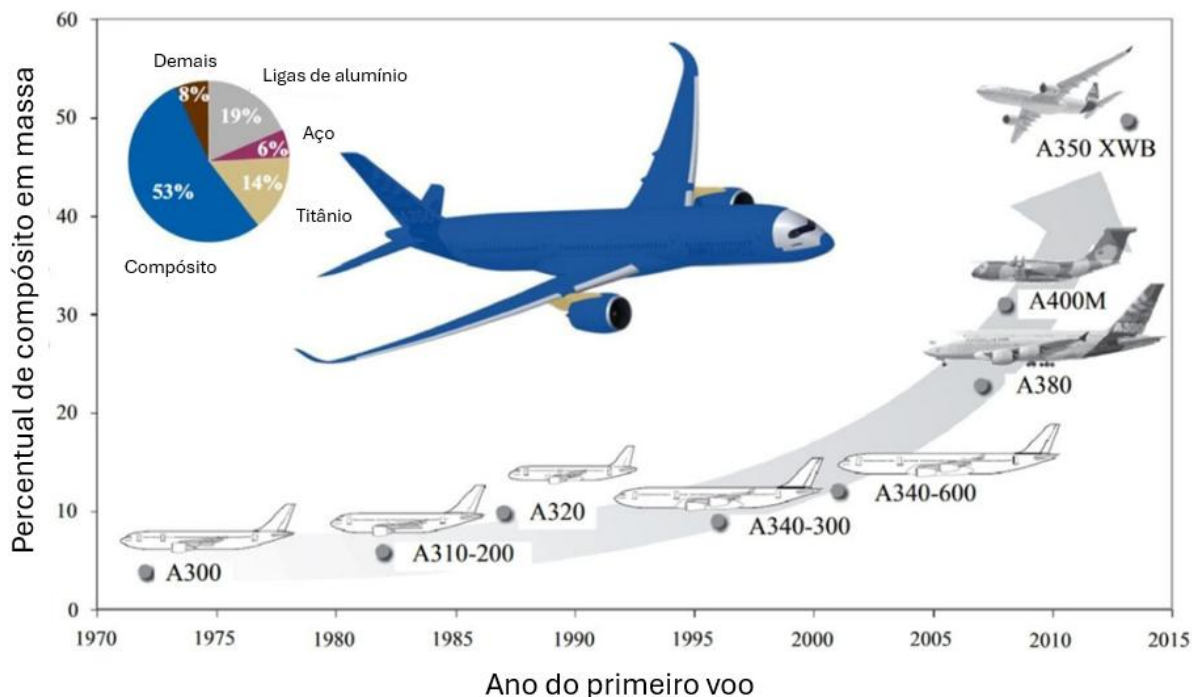
Fonte: Adaptado de Klocke *et al.* (2013)

Nos últimos anos, houve um aumento significativo na utilização de compósitos termoplásticos na indústria aeronáutica. Empresas como Embraer, Airbus e Boeing têm adotado materiais como o PEI (poli (éter imida)) e o PPS (poli (sulfeto de fenileno)) reforçados com fibras de vidro ou carbono, aplicando-os em diversos componentes estruturais, como por exemplo, nos bordos de ataque das aeronaves Airbus A340-500/600 e A380 (GARDINER, 2006).

A introdução comercial de fibras de carbono de alto desempenho no final da década de 1960 impulsionou o setor, levando ao desenvolvimento de fibras como a T300 na década de 1970 e a T800 na de 1980 (XU *et al.*, 2025). Os dados industriais revelam um crescimento exponencial no uso de compósitos: enquanto o Boeing 767, lançado em 1981, utilizava apenas 3% de compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono em seu peso estrutural, aeronaves modernas como o Boeing 787 e o Airbus A350 XWB atingiram marcas de 50% e 53%, respectivamente, em percentual de massa, conforme apresentado na Figura 2. Gráficos de tendências na indústria evidenciam que o peso dos PMCs em aeronaves civis saltou de cerca de 2% para mais de 50% em um período de aproximadamente 50 anos. Esse aumento permite uma redução de peso

estrutural que varia entre 20% e 30% em comparação com as ligas metálicas tradicionais (TRZEPIECIŃSKI *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2025).

Figura 2 - Percentual de compósitos em massa em aeronaves
Airbus.



Fonte: Adaptado de Trzepieciński *et al.* (2021).

Nos caças militares, a evolução também é notável, onde o F-22 apresenta 24% de seu peso estrutural em compósitos, enquanto modelos como o Typhoon chegam a 40% e o F-35 atinge 35%. Além dos compósitos de fibra de carbono, a indústria desenvolveu os laminados metal-fibra (LMF) para unir as vantagens dos metais com a resistência dos polímeros. O ARALL (compósito polimérico com fibras de aramida e alumínio), primeira geração de laminados metal-fibra, surgiu em 1978, seguido pelo GLARE (compósito polimérico com fibras de vidro e alumínio) em 1987, que se tornou célebre pelo seu uso extensivo no Airbus A380, principalmente em aplicações como painéis de fuselagem e bordos de ataque (TRZEPIECIŃSKI *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2025).

A evolução tecnológica também permitiu a transição do uso exclusivo de resinas termorrígidas, como epóxis e bismaleimidas (BMI), para termoplásticos de alto desempenho como o PEEK (poli (éter éter cetona) e o PPS, que

oferecem ciclos de processamento mais curtos e maior resistência ao impacto, além da possibilidade de serem reciclados (XU *et al.*, 2025).

No campo da nanotecnologia, a síntese do primeiro "*buckypaper*" de nanotubos de carbono, em 1998, abriu caminho para compósitos multifuncionais com propriedades de blindagem eletromagnética e proteção contra raios.

Atualmente, a indústria foca na automação a partir de tecnologias como o Posicionamento Automático de Fibras (AFP) e a impressão 3D, visando mitigar o fato de que cerca de 70% do custo de um componente em compósito deriva do seu processo de fabricação (RANI *et al.*, 2023; XU *et al.*, 2025).

Visando aperfeiçoar o processo de fabricação de compósitos termoplásticos, o processo de soldagem por resistência elétrica tem se destacado no setor aeronáutico nos últimos anos, principalmente pela facilidade proporcionada pela técnica para a união de peças com geometrias complexas. Todavia, a baixa condutividade elétrica dos compósitos poliméricos representa um desafio para o processo uma vez que depende da eficiência do efeito Joule em gerar calor e, conseqüentemente, viabilizar a união dos componentes. Para superar esta limitação, a incorporação de elementos resistivos metálicos, como malhas de aço e cobre é indicada, pois atuam como fontes de calor para promover a soldagem. No entanto, essa abordagem pode apresentar desvantagens, como o aumento de peso da estrutura soldada e possíveis incompatibilidades com a matriz polimérica (GARDINER, 2006; TOTLA *et al.*, 2023).

Neste contexto, a interação entre o compósito e o elemento resistivo é fundamental para uma junta soldada eficiente e pode ser alcançada aprimorando sua adesão a partir de diferentes mecanismos, como intertravamento mecânico (*interlocking*), difusão, e ligações química e física (TOTLA *et al.*, 2023).

Para otimizar estes mecanismos, o tratamento superficial à plasma de baixa temperatura é amplamente utilizado, pois modifica a química da superfície sem alterar as propriedades volumétricas do material (BRASSARD *et al.*, 2019; COOLS *et al.*, 2020; GRACE; GERENSER, 2003). O bombardeio de espécies reativas do plasma promove a quebra de ligações químicas e a formação de radicais livres, que favorecem a presença de grupos funcionais polares (como hidroxila e carboxila). Ocasionalmente um aumento significativo da energia livre de superfície e da molhabilidade, facilitando tanto a ligação química quanto o

interlocking a partir de um leve aumento na rugosidade. Reforçando a eficácia desta técnica, estudos anteriores, como de Iqbal *et al.*, já demonstraram a aplicação bem-sucedida do tratamento a plasma em compósitos termoplásticos de alta performance, especificamente em PEEK e PPS reforçados com fibra de carbono, resultando em um aumento expressivo da energia superficial desses materiais. (IQBAL *et al.*, 2010; LEVCHENKO *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2021).

Diante do exposto anteriormente, este trabalho busca avaliar a influência do tratamento superficial à plasma na adesão entre o laminado e o elemento resistivo. Este estudo também apresenta uma inovação envolvendo a utilização de um elemento resistivo alternativo, composto por nanotubos de carbono, conhecido na literatura como *buckypaper* (WANG *et al.*, 2021). O filme nanoestruturado que, devido à sua elevada condutividade elétrica e capacidade de gerar calor por efeito Joule, surge como uma alternativa promissora para a soldagem de compósitos. Além disso, sua baixa massa específica (~ 1 a 2 g/cm^3) e possível afinidade com a matriz polimérica, pode proporcionar uma evolução aos tradicionais elementos resistivos metálicos comumente utilizados neste processo. Desse modo, a utilização do *buckypaper* como elemento resistivo pode contribuir com a inovação tecnológica nos processos de fabricação e reparo de compósitos de matriz polimérica, alinhando-se às demandas da indústria por materiais mais leves e resistentes.

1.2 MOTIVAÇÃO

A principal motivação deste trabalho consiste em aprimorar o processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos poliméricos, proporcionando a união de peças com geometrias complexas aliada a propriedades mecânicas aprimoradas na região soldada. Logo, foi idealizado para o trabalho a substituição do elemento resistivo metálico pelo *buckypaper*. Por fim, os seguintes aspectos do projeto devem ser levados em consideração:

- Estabelecimento de parâmetros de soldagem utilizando *buckypaper* como elemento resistivo,;

- Comparação entre as propriedades mecânicas da junta soldada utilizando malha metálica e o *buckypaper* como elemento resistivo;
- Avaliação da influência do plasma nas propriedades mecânicas da junta soldada.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar a viabilidade do uso de *buckypapers* como elemento resistivo na soldagem por resistência elétrica, além de estudar as propriedades mecânicas das uniões soldadas de compósitos de PPS/FC. Os objetivos específicos incluem:

- Processar e caracterizar *buckypapers* de nanotubos de carbono;
- Processar o compósito PPS/Fibra de carbono por moldagem por compressão à quente;
- Avaliar a influência do tratamento superficial à plasma na adesão entre o elemento resistivo e o compósito PPS/Fibra de carbono;
- Estudar a resistência interlaminar das uniões soldadas por meio dos ensaios por LSS (*Lap Shear Strength*);
- Avaliar como os *buckypapers* afetam os modos de falha das uniões soldadas.

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido em etapas e compilado em quatro capítulos, além do capítulo de introdução. São estes:

- Capítulo 2 – Revisão da literatura: Apresenta uma revisão bibliográfica a respeito do assunto abordado, proporcionando fundamentação teórica ao estudo experimental realizado.
- Capítulo 3 – Materiais e métodos: Evidencia os materiais que foram utilizados no trabalho bem como a metodologia abordada para sua caracterização inicial e processamento.
- Capítulo 4 – Resultados: Apresenta a discussão sobre os principais resultados obtidos, apontando os principais fatores relacionados as condições analisadas.

- Capítulo 5 – Considerações finais: São apresentadas as conclusões preliminares obtidas bem como sua contribuição em eventos técnicos científicos e próximos passos a serem realizados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Materiais compósitos consiste na união de dois ou mais materiais imiscíveis entre si com o objetivo principal de proporcionar materiais com propriedades aprimoradas. A combinação física e química dos componentes resulta em um material que apresenta duas fases: a matriz e o reforço. A matriz, tem como função envolver o reforço, mantendo-o unido e protegido de intempéries, além de distribuir a carga aplicada no material. O reforço, por sua vez, garante o aumento das propriedades mecânicas, podendo ser utilizado na forma de fibras ou partículas (KUMAR SHARMA *et al.*, 2022; PARVEEZ *et al.*, 2022).

Os reforços mais utilizados em compósitos estruturais de matriz polimérica são as fibras de carbono, as fibras de aramida e as fibras de vidro, destacando-se a primeira na indústria aeronáutica devido à sua baixa massa específica e elevadas propriedades mecânicas. Estudos mostram que, ao serem utilizados em compósitos com uma fração volumétrica de 60%, as fibras de carbono resultam em módulos elásticos unidirecionais, resistência à tração unidirecional e densidade aproximada de 1200 MPa, 145 GPa e 1,6 g/cm³, respectivamente (HSISSOU *et al.*, 2021; PARVEEZ *et al.*, 2022; TETI, 2002).

As matrizes poliméricas utilizadas na indústria aeronáutica podem ser classificadas em dois grandes grupos: termorrígidas e termoplásticas. Durante o processamento da matriz termorrígida, ocorre o processo de cura, responsável por ocasionar ligações primárias entre as cadeias poliméricas, resultando em um material que, ao ser aquecido, não amolece, dificultando e até impossibilitando sua reciclagem. Por outro lado, a matriz polimérica termoplástica, ao ser reaquecida, amolece (ou funde), viabilizando seu reprocessamento e sua reciclagem (KUMAR SHARMA *et al.*, 2022).

Os compósitos de matriz polimérica termoplástica, quando comparados aos compósitos de matriz termorrígida, se destacam por apresentarem as seguintes vantagens: rápido processamento, baixa absorção de umidade, maior resistência ao impacto, maior tenacidade à fratura, maior resistência à intempéries resistência a inflamabilidade e facilidade de reparos (HERAKOVICH, 2012).

Devido a estas características, os compósitos de matriz termoplástica vêm ganhando notoriedade no setor aeronáutico, uma vez que podem apresentar propriedades mecânicas iguais ou superiores às aquelas apresentadas pelos compósitos de matriz termorrígidas. Além disso, o uso de compósitos de matriz termoplástica para aplicações estruturais é muito promissor, proporcionando uma redução em massa de aproximadamente 30%, se comparados a estruturas metálicas convencionais (PARVEEZ *et al.*, 2022).

Os termoplásticos podem ser divididos entre polímeros semicristalinos e amorfos. O polímero semicristalino apresenta estrutura atômica com regiões amorfas e cristalinas em que suas cadeias poliméricas são, em sua maioria, lineares, podendo alguns polímeros apresentarem estruturas ramificadas. Neste material, a mudança de fase do estado sólido para o viscoso ocorre com a fusão da fase cristalina (KUMAR SHARMA *et al.*, 2022).

Dentre os polímeros termoplásticos que podem ser utilizados como matrizes de compósitos poliméricos para aplicação de alto desempenho estão os polímeros como PPS, PEI e PEEK. Estes materiais apresentam uma elevada quantidade de anéis aromáticos em sua cadeia polimérica, proporcionando rigidez a cadeia e, consequentemente, maior estabilidade térmica.

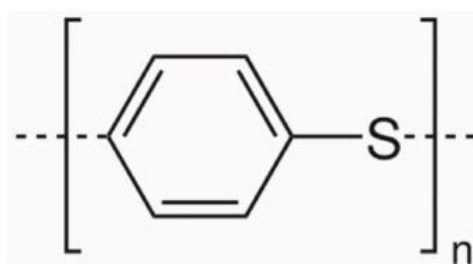
As características dos compósitos de matriz termoplástica expostas anteriormente resultaram no interesse do setor industrial, uma vez que a rapidez no processamento associado à sua reciclabilidade facilitam sua aplicabilidade em diversas tarefas, como o reparo e a união de componentes. É importante ressaltar que a união entre peças confeccionadas em compósitos de matriz termoplástica pode ser realizada por técnicas de soldagem, tais como a soldagem a laser, ultrassônica ou por resistência elétrica (BRASSARD *et al.*, 2021; TOTLA *et al.*, 2023).

2.2 POLI (SULFETO DE FENILENO) (PPS)

O poli (sulfeto de fenileno) (PPS) é um polímero termoplástico formado por meros de tiofenol, como apresentado na Figura 3. Seu monômero é constituído por anéis benzênicos que proporcionam rigidez para a cadeia polimérica, enquanto a ligação com o enxofre (-S-) garante certa flexibilidade. Ademais, o PPS apresenta uma massa molecular modesta (18000g/mol) e baixa viscosidade na fase fundida

(na ordem de 3 a 5 Pa.s), além de estabilidade térmica aprimorada em intervalos de temperatura de 220 a 240 °C. Por fim, apresenta outras propriedades interessantes para o setor aeronáutico como elevada estabilidade dimensional, baixa massa específica ($1,35 \text{ g.cm}^{-3}$) e elevada resistência à chama (RAHATE *et al.*, 2013; SUN *et al.*, 2022).

Figura 3 – Representação do mero do PPS.



Fonte: (CHEN *et al.*, 2021).

A estabilidade química do PPS proporciona propriedades notáveis quanto a sua solubilidade, sendo o material insolúvel a diversos solventes orgânicos expostos a temperaturas inferiores a 200 °C, além de resistir a corrosão de inúmeros ácidos, álcalis e soluções com elevada concentração de sais. É importante ressaltar que apresenta temperaturas de transição vítrea (T_g) e fusão (T_m) de, aproximadamente 85 °C e 285 °C, respectivamente, sendo reconhecido como um dos termoplásticos semicristalinos mais estáveis termicamente. Por fim, o PPS apresenta excelente estabilidade térmica em atmosfera oxidante, uma vez que a sua temperatura de degradação é da ordem de 450 °C (CHEN *et al.*, 2021; GAO *et al.*, 2022).

2.3 TÉCNICAS DE UNIÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

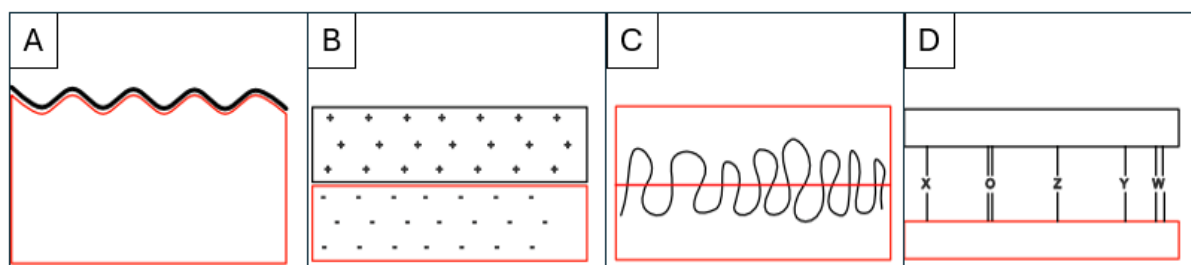
Uma das limitações do uso dos compósitos encontra-se relacionada à obtenção de peças complexas devido às limitações inerentes do processo de fabricação. Logo, técnicas que proporcionam a união destes materiais são fundamentais para aumentar sua aplicabilidade, além de facilitar processos de reparo. Sendo assim, as junções são necessárias e podem ser um fator crítico, uma vez que, dependendo da técnica de união, pode gerar pontos de irregularidades suscetíveis à fratura (PEREIRA *et al.*, 2022). Neste contexto, a junção de compósitos poliméricos de matriz termoplástica na indústria é inevitável, sendo comumente

unidos por três métodos principais: adesivos, fixadores mecânicos (parafusos, rebites e pinos) e fusão (SILVA *et al.*, 2021).

A união por adesivos é amplamente utilizada em compósitos poliméricos devido a sua capacidade de distribuir uniformemente o esforço aplicado pela região de união entre os materiais, garantindo assim sua integridade (RAVICHANDRAN; BALASUBRAMANIAN, 2024). Os adesivos são comumente aplicados em forma líquida ou pastosa entre dois substratos que, após determinado tempo, serão polimerizados, resultando em uma ligação robusta entre os materiais. No geral, a união de materiais com adesivos se resume em três principais componentes: o substrato, a camada adesiva e a interface que conecta o substrato ao adesivo (RAVICHANDRAN; BALASUBRAMANIAN, 2024; SILVA *et al.*, 2021).

Neste método ocorre uma interação física e química entre o adesivo e os substratos, abrangendo os seguintes mecanismos: *interlocking*, ligação física, difusão e ligação química, conforme apresentado na Figura 4 (RAVICHANDRAN; BALASUBRAMANIAN, 2024). Esses mecanismos são influenciados por fatores como textura, energias de superfície e de reação. Sendo assim, a morfologia e a rugosidade da superfície do material irão influenciar na dispersão do adesivo pelo substrato, favorecendo sua impregnação e, conseqüentemente, aumentando as propriedades mecânicas da região unida (LAMBIASE *et al.*, 2021; PEREIRA *et al.*, 2022; STANKIEWICZ *et al.*, 2024).

Figura 4 - Mecanismos de união: (A) *interlocking*, (B) ligação física, (C) difusão, (D) ligação química.



Fonte: Adaptado de RAVICHANDRAN *et al.* (2024)

O mecanismo de *interlocking* (Figura 4A) consiste no preenchimento dos vazios e irregularidades presentes na superfície do substrato pelo adesivo, aumentando a área de contato entre os materiais, melhorando a eficácia da adesão

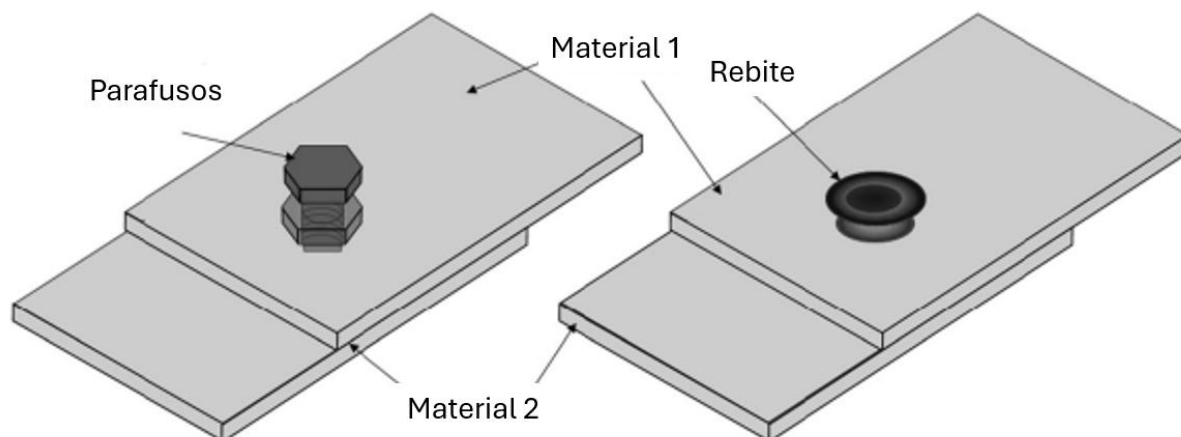
(SILVA *et al.*, 2021). Trabalhos como o de Baldan (2012), mostram que o tratamento superficial com objetivo de aumentar a rugosidade da superfície ocasiona um aumento da força de adesão entre adesivo e substrato. Enquanto, a ligação física (Figura 4B) se baseia na interação intermolecular de baixa energia, garantindo a interação entre os substratos a partir de ligações secundárias, como forças de van der Waals. Já a ligação por difusão (Figura 4C), que ocorre amplamente em termoplásticos, envolve a aplicação de solventes que permite a difusão do adesivo próximo à interface. Por fim, o mecanismo de união por ligação química (Figura 4D) é um processo que depende da energia de superfície do substrato e da reatividade da superfície adesiva para uma melhor adesão (BALDAN, 2012; RAVICHANDRAN; BALASUBRAMANIAN, 2024).

Fatores ambientais, como temperatura e umidade, desempenham um papel fundamental na degradação do adesivo, podendo ocasionar perda na resistência mecânica. Além disso, os adesivos resultam em um material mais leve, se comparado aos materiais com fixação mecânica, reduzindo os custos de fabricação e aumentando a tolerância a danos (RAVICHANDRAN; BALASUBRAMANIAN, 2024).

Já a união por fixação mecânica é um dos métodos mais populares e consiste no uso de componentes como parafusos e rebites que irão unir dois ou mais materiais, como exemplificado na Figura 5. Este método é bem estabelecido na indústria, tendo como característica a sua rapidez e eficiência na união de peças, sendo muito utilizado na produção em larga escala (SILVA *et al.*, 2021).

No entanto, esta forma de unir substratos apresenta uma performance mecânica governada por diversas variáveis e parâmetros, dificultando seu uso em aplicações avançadas. Porém, para abordagens mais simples e menos dispendiosas, a técnica é largamente utilizada. Uma das maiores desvantagens é a necessidade de perfurar o material, criando uma área concentradora de tensão que pode ser responsável por causar danos aos substratos, como, por exemplo, a delaminação entre as camadas (REIS *et al.*, 2020; STANKIEWICZ *et al.*, 2024).

Figura 5 – Exemplos de fixação mecânica



Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2021)

Por fim, a fixação de compósitos poliméricos de matriz termoplástica por fusão, também conhecida como soldagem, se destaca devido à sua capacidade de proporcionar elevada resistência mecânica e durabilidade, além de ser um processo que exige pouca ou nenhuma preparação prévia da superfície, reduzindo significativamente o tempo de processamento e os custos associados ao processo. Outro aspecto relevante desta técnica é a rapidez, podendo ocasionar um aumento de produtividade tanto em processos de fabricação quanto na manutenção de equipamentos (STANKIEWICZ *et al.*, 2024).

2.3.1 Soldagem por resistência elétrica

O processo de soldagem por resistência elétrica consiste na compressão de dois laminados e um elemento resistivo intermediário. Este elemento, que geralmente é uma malha metálica, é submetido a uma corrente elétrica por um período específico, resultando no seu aquecimento que, devido a ocorrência do efeito Joule, permitirá a fusão (polímeros semicristalinos) dos laminados de matriz termoplástica e, conseqüentemente, a união entre os componentes.

Logo, a geração de calor segue a Lei de Joule, representada na Equação 1 (TOTLA *et al.*, 2023).

$$Q = i^2 \times R \times t \quad (1)$$

Onde: Q – Energia dissipada pelo resistor (J)

i – Corrente elétrica aplicada (A)

R – Resistência na interface (Ω)

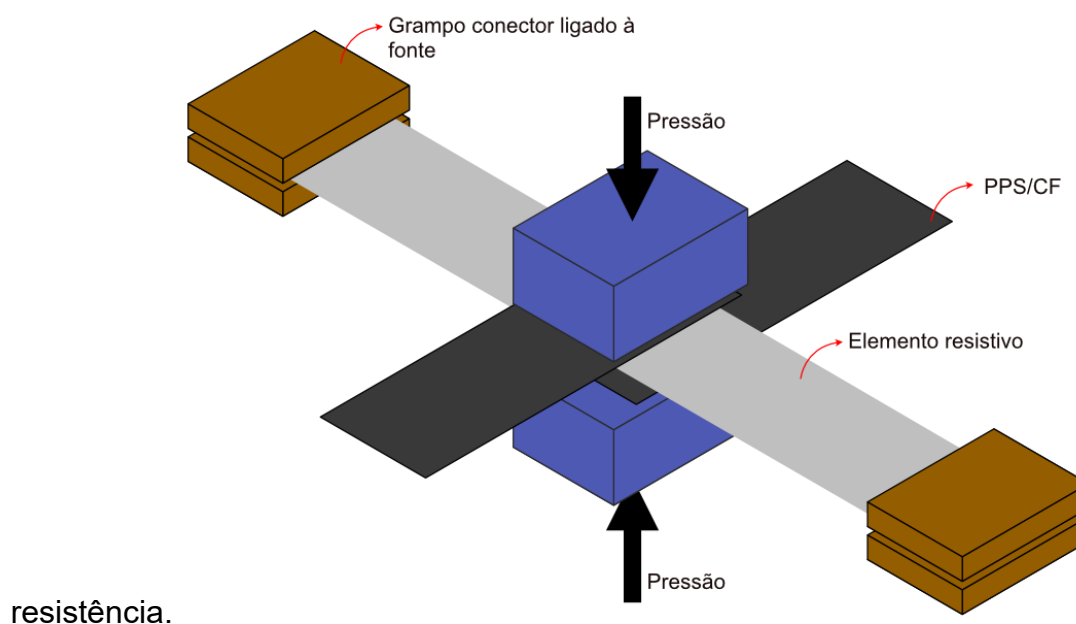
t – Tempo de soldagem (s)

O aquecimento do elemento resistivo deve ser definido a partir da matriz polimérica utilizada. Caso o compósito apresente matriz polimérica amorfa, é necessário que o elemento resistivo aqueça a região a ser soldada até a T_g da matriz. Caso a matriz seja semicristalina, a temperatura desejada será a T_m do material (BRASSARD *et al.*, 2019). A soldagem por resistência elétrica de um compósito polimérico de matriz semicristalina ocorre da seguinte maneira: sob determinada pressão, o elemento resistivo entre os substratos é aquecido por efeito Joule, elevando a temperatura da superfície a ser soldada até o ponto de fusão da matriz. Nesse estágio, a matriz escoa e penetra nos poros do elemento resistivo, promovendo o processo de difusão molecular entre o substrato e o elemento resistivo.

Após atingir a temperatura de fusão da matriz, o aquecimento é interrompido, e o conjunto é resfriado, mantendo-se a pressão aplicada no início do processo. Após um determinado tempo, a pressão é completamente retirada, e o compósito permanece soldado com o elemento resistivo em seu interior (BRASSARD *et al.*, 2019; TOTLA *et al.*, 2023).

Desse modo, os principais fatores que influenciam a qualidade da soldagem são a corrente elétrica aplicada, a resistência elétrica do elemento resistivo, a pressão e o tempo de soldagem (ROHART *et al.*, 2020; TOTLA *et al.*, 2023; XIONG *et al.*, 2021). Além disso, o processo de soldagem por resistência elétrica se destaca dos demais pela sua simplicidade de execução e velocidade de processamento. O esquema de soldagem por resistência pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Esquema representativo do processo de soldagem por



resistência.

Fonte: Elaborado pelo autor

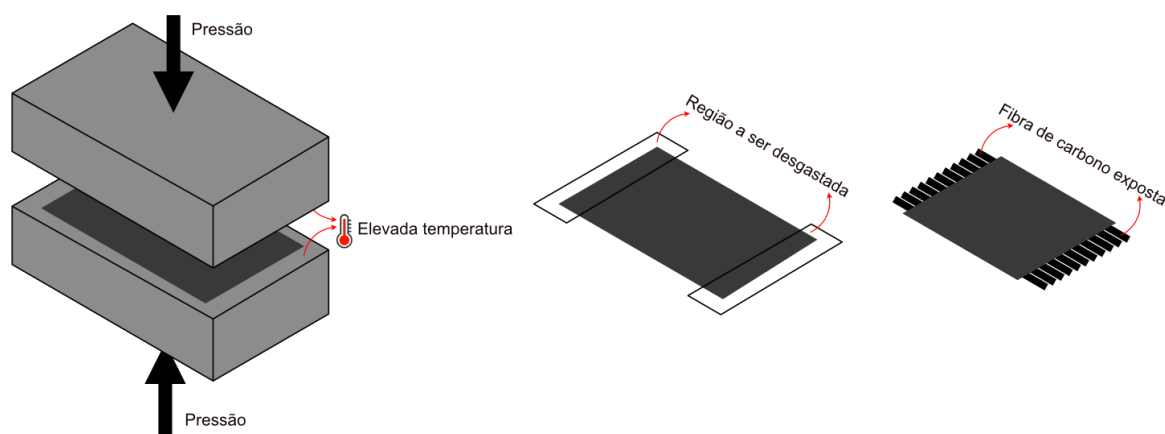
O processo de soldagem por resistência elétrica aquece somente a interface que será soldada, logo, se comparado às demais técnicas de soldagem por fusão, exige um menor gasto de energia, além da sua grande amplitude de aplicações, uma vez que o tamanho, espessura e forma do material, não apresentam grande efeito neste processo. O maior desafio na utilização deste método de soldagem está relacionado com a homogeneidade de temperatura e controle da pressão de consolidação na região soldada (RUSSELLO *et al.*, 2023).

O elemento resistivo tem como principal objetivo garantir o aquecimento do polímero termoplástico por efeito Joule. Logo, pode ser considerado elemento resistivo qualquer material que seja bom condutor elétrico e apresente propriedades adequadas para a aplicação do material soldado. Os tipos de elementos resistivos mais utilizados podem ser divididos em dois grandes grupos: elementos resistivos à base de fibra de carbono e elementos resistivos de malha metálica (STAVROV; BERSEE, 2005).

Os elementos resistivos à base de fibra de carbono são compostos de um pré-impregnado (semipreg) que apresenta a mesma matriz do laminado a ser soldado. A atratividade deste elemento resistivo para a união de compósitos consiste na sua compatibilidade com o substrato, uma vez que o elemento resistivo irá permanecer no material após o processo de soldagem (TOTLA *et al.*, 2023). Sua

utilização consiste em processar o semipreg via moldagem por compressão à quente, com o objetivo de aumentar a qualidade de impregnação e tornar a superfície mais lisa. Vale ressaltar que, caso o laminado apresente um percentual de resina inferior a 50% em massa, é aconselhável acrescentar camadas extras de resina. No fim deste processo, a matriz é retirada de duas extremidades opostas do laminado, garantindo uma região de contato direto da fibra de carbono com o contato elétrico. É possível remover a matriz a partir da sua queima com o auxílio de um maçarico a gás ou a partir da sua dissolução (STAVROV; BERSEE, 2005). O preparo deste elemento encontra-se exemplificado na Figura 7.

Figura 7 - Produção de um elemento resistivo com fibra de carbono e matriz polimérica.



Fonte: Elaborado pelo autor

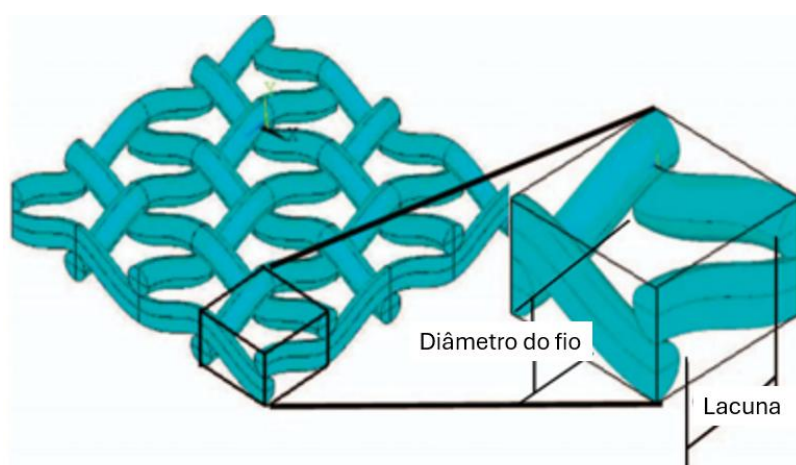
Durante este processo ocorre a oxidação da fibra de carbono, que irá aumentar sua resistividade elétrica de 10 a 20%. É importante destacar que este elemento resistivo também pode ser utilizado para soldar materiais reforçados com fibra de vidro ou aramida, desde que o substrato apresente a mesma matriz polimérica que o elemento resistivo (STAVROV; BERSEE, 2005; TOTLA *et al.*, 2023).

Porém, a utilização de um elemento resistivo a base de fibra de carbono apresenta como principal desvantagem o aquecimento desigual da superfície a ser soldada, devido ao elevado grau de dispersão na resistividade do semipreg. Isso limita a utilização deste material, pois dificulta a reprodutibilidade de uma solda confiável (XIONG *et al.*, 2021).

Os elementos resistivos de malha metálica são compostos de aço inoxidável em forma de malhas e são de simples utilização, se comparado ao elemento resistivo a base de fibras de carbono. Somado a este fator, este tipo de elemento resistivo proporciona soldas confiáveis e de fácil reprodutibilidade, características estas que proporcionaram notoriedade desta técnica no mercado (XIONG *et al.*, 2021). Xiong e colaboradores (2021) mostraram que a aplicação de malhas metálicas como elemento resistivo em compósitos de matriz polimérica de PPS foi satisfatória, apresentando uma superfície de fratura, após o ensaio de LSS, que evidencia boa adesão entre o substrato e o elemento resistivo.

As malhas metálicas apresentam diversas diagramações, podendo apresentar diferentes diâmetros de fios e lacunas (Figura 8) que impactam a sua resistência elétrica e, conseqüentemente, influenciam o resultado da soldagem por resistência.

Figura 8 - Esquema de uma malha metálica.



Fonte: Adaptado de Xiong *et al.* (2021)

O estudo realizado por Martine Dubé (2012) destaca a importância do uso da malha metálica correta durante o processo de soldagem de compósitos poliméricos da alta performance. Neste trabalho foram utilizadas três malhas metálicas distintas para soldar os seguintes materiais: PEKK/Fibra de carbono (FC), PEI/FC e PEI/fibra de vidro (GF). As especificações das malhas metálicas encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características das malhas metálicas.

Elemento resistivo	A	B	C
Diâmetro do fio (mm)	0,066	0,041	0,036
Lacuna (mm)	0,104	0,089	0,043
Fração de área livre	0,374	0,469	0,296
Densidade linear dos fios (fios/mm)	5,8	7,7	12,5

Fonte: Adaptado de Dubé *et al.* (2012)

Além disso, foi realizado uma série de ensaios mecânicos de *lap shear*, onde o material soldado com a malha B (Tabela 1) apresentou melhor desempenho, resultando em uma força de cisalhamento máxima de 52, 47 e 33 MPa para os laminados de PEKK/FC, PEI/FC e PEI/GF, respectivamente. A análise dos resultados permitiu concluir que a malha metálica B resultou em um melhor desempenho, logo, a razão entre lacuna e diâmetro do fio demonstrou ser o parâmetro mais importante na escolha de uma malha metálica como elemento resistivo.

Ao se tratar do processo de soldagem por resistência do compósito de PPS/FC com fibras unidirecionais, Yu *et al.* (2024) realizaram uma série de tratamentos estatísticos, utilizando o método de superfície-resposta, afim de encontrar a malha metálica ideal para o processo de soldagem por resistência. Nesse trabalho, foram usadas malhas com *mesh* 40, 100 e 200, onde a malha com melhor desempenho sofreu os seguintes tratamentos: tratamento por oxidação e adição de resina de PPS (YU *et al.*, 2024). A malha metálica de *mesh* 100 apresentou o melhor desempenho mecânico (10,76 MPa), enquanto a malha de *mesh* 200 obteve um desempenho levemente inferior (10,50 MPa, aproximadamente). Por fim, foi realizado tratamento superficial à plasma na malha de *mesh* 100, demonstrando que o tratamento superficial antes do processo de soldagem por resistência, ocasiona juntas soldadas com melhores propriedades mecânicas, uma vez que o material tratado por oxidação, teve um ganho de 10,23% enquanto o material com adição de resina PPS, apresentou um ganho de 11,22% (YU *et al.*, 2024).

Para assegurar uma adesão eficiente entre o compósito termoplástico e o elemento resistivo utilizado no processo de soldagem, torna-se imprescindível o uso

de técnicas de tratamento de superfície. Entre essas técnicas, o uso de plasma tem se mostrado particularmente eficaz em determinados cenários, uma vez que promove melhorias significativas nas propriedades tribológicas e de adesão, como o coeficiente de fricção, a molhabilidade e a energia superficial, além de incrementar a rugosidade da superfície (IQBAL *et al.*, 2010; KONDOH, 2022). Ademais, tais tratamentos induzem modificações químicas na matriz polimérica, conferindo maior estabilidade e durabilidade às juntas ao longo do tempo (SCARSELLI *et al.*, 2021; XIONG *et al.*, 2021).

Essas alterações superficiais decorrem do bombardeio de íons e elétrons energizados, que atuam de forma complementar. O impacto físico promove a remoção de camadas superficiais frágeis e o aumento da rugosidade em nanoescala, favorecendo o mecanismo de *interlocking*, no qual a matriz polimérica fundida penetra nas cavidades geradas e se ancora fisicamente ao substrato. Simultaneamente, a interação das espécies reativas do plasma com a superfície do compósito ocasiona a cisão de cadeias poliméricas e a formação de radicais livres. Estes, por sua vez, reagem com o oxigênio e a umidade presentes, originando grupos funcionais polares, como hidroxilas, carbonilas e carboxilas (COOLS *et al.*, 2020; SALMORIA *et al.*, 2013; UŞAK, 2023; YUDHANTO *et al.*, 2021).

A introdução desses grupos funcionais resulta em um aumento expressivo da energia livre de superfície e na redução do ângulo de contato, tornando o material mais hidrofílico e, portanto, mais apto a uma molhabilidade superior durante o processo de fusão. Em compósitos de PPS/FC, por exemplo, o tratamento por plasma é capaz de reduzir o ângulo de contato com a água de aproximadamente 72,5° para valores próximos de 12,8°, o que se traduz em juntas com resistência ao cisalhamento significativamente maiores. Nessas condições, a fratura deixa de ocorrer na interface e passa a se manifestar no próprio material, evidenciando a qualidade superior da união obtida (AGEORGES *et al.*, 2001; SCARSELLI *et al.*, 2021; UŞAK, 2023).

O sucesso do processo de soldagem por resistência elétrica encontra-se diretamente relacionado a adesão entre o laminado (substrato) e o elemento resistivo. Portanto, a interação aprimorada entre o substrato e o elemento resistivo é essencial para garantir a obtenção de juntas soldadas de boa qualidade e, conseqüentemente, componentes com boas propriedades mecânicas.

Neste contexto, os elementos resistivos à base de nanopartículas surgem com o objetivo de proporcionar uma melhor adesão com a matriz, garantindo que o processo de soldagem por resistência elétrica seja mais eficiente, além de substituição do material metálico (BRASSARD *et al.*, 2021).

Os *buckypapers* constituídos por nanopartículas à base de carbono podem ser uma alternativa como elemento resistivo utilizado no processo de soldagem por resistência elétrica. A literatura mostra que a sua incorporação em compósitos poliméricos evidencia um aumento das propriedades mecânicas do material (ROJAS *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2015). Diante do exposto, os *buckypapers* consistem em filmes finos e porosos, com espessura entre 0,02 a 0,1 milímetros, constituídos exclusivamente de nanopartículas, sendo os nanotubos de carbono e o grafeno as nanopartículas carbonosas mais utilizadas para este fim. O filme é comumente fabricado a partir da filtragem à vácuo de uma suspensão de nanopartículas e tem se tornado um material promissor que pode ser utilizado nas mais diversas aplicações, como em sensores para detecção de gases e baterias (AFRIN; SHAH, 2015).

Apesar do progresso nas áreas de sensoriamento, o uso do buckypaper como elemento resistivo no processo de soldagem por resistência ainda não foi suficientemente explorado, visto que parte dos trabalhos se restringe à experimentos laboratoriais de caracterização (BARATTA *et al.*, 2024). Devido a elevada condutividade térmica, que pode ser superior à do diamante, e uma condutividade elétrica comparável à do cobre ou silício, o *buckypaper* apresenta características promissoras para o processo de soldagem por resistência. Tais propriedades permitem que o *buckypaper* converta eletricidade em calor de forma eficiente por efeito Joule, garantindo uma distribuição térmica uniforme, favorecendo os mecanismos de adesão durante o processo de soldagem (KHAN *et al.*, 2016).

2.4 BUCKYPAPER DE NANOTUBOS DE CARBONO

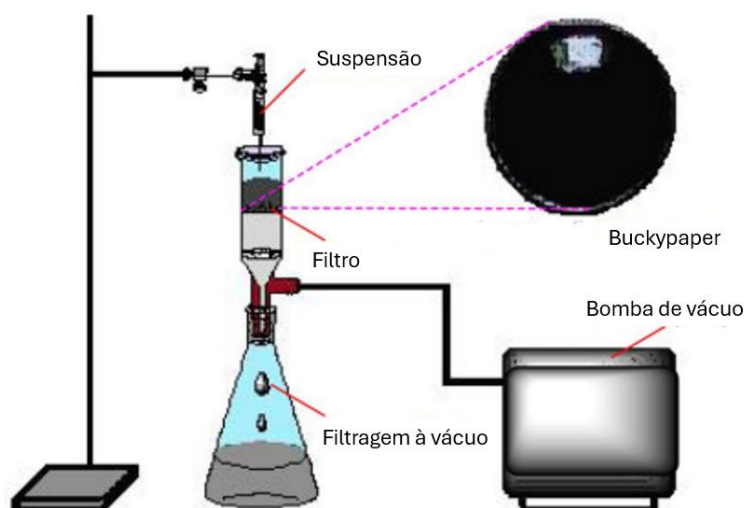
O *buckypaper* (BP) consiste em um filme fino e poroso feito exclusivamente de nanotubos de carbono. Neste caso, o filme se mantém coeso graças as interações entre as ligações de van der Waals dos nanotubos. Mesmo que esta ligação seja considerada de baixa energia, a elevada densidade dessas forças por unidade de volume é extremamente elevada, garantindo a resistência do material.

Este material apresenta espessura de cerca de 20 μm a 80 μm e porosidade elevada, cerca de 60% a 70% do volume total do material (BARATTA *et al.*, 2024).

De modo geral, este material apresenta condutividade elétrica comparável à do cobre ou do silício, variando conforme a quiralidade dos nanotubos e o grau de alinhamento, além de uma elevada condutividade térmica que, em condições ideais, pode superar a do diamante (KHAN *et al.*, 2015). Para o caso onde os nanotubos de carbono se encontram distribuídos de forma aleatória, os valores típicos de condutividade elétrica situam-se em torno de 49 S/cm, enquanto a condutividade térmica alcança valores de aproximadamente 13,5 W/mK (DÍEZ-PASCUAL *et al.*, 2012). Por outro lado, em estruturas alinhadas magneticamente, a condutividade térmica pode variar entre 50 e 200 W/mK, evidenciando o impacto direto da orientação dos nanotubos nas propriedades finais do material. Além dessas características, o uso do BP se destaca pela facilidade de incorporação de nanopartículas em um compósito, que permite atingir um aumento de cerca de 20% em massa do compósito, se comparado aos métodos de dispersão de nanopartículas em matriz polimérica (WANG *et al.*, 2021).

A fabricação dos *buckypapers* envolve comumente a filtração à vácuo de uma suspensão aquosa contendo nanotubos de carbono e um surfactante. Um sistema de filtração, encontra-se ilustrado na Figura 9, onde as nanopartículas são depositadas sobre uma membrana de filtração de porosidade micrométrica (ROJAS *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2021).

Figura 9 - Processo de filtração à vácuo.

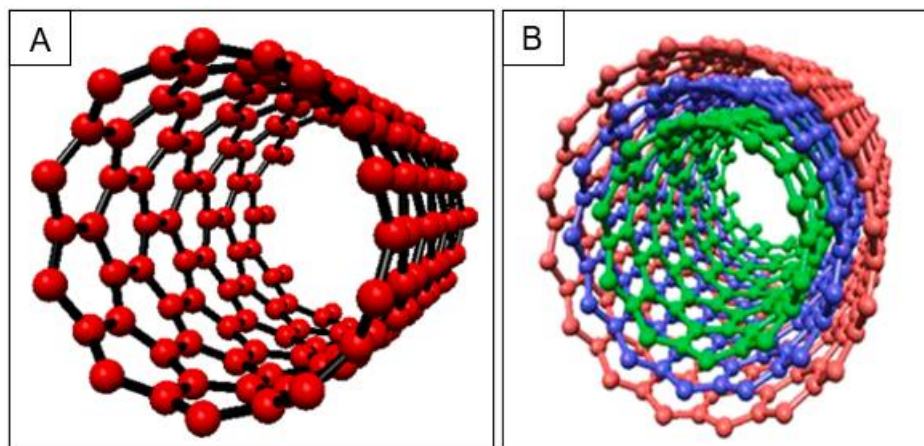


Fonte: Adaptado de Khan *et al.* (2015).

2.5 NANOTUBOS DE CARBONO

O nanotubo de carbono (*carbon nanotube* – CNT, em inglês) é um material unidimensional (1D) que consiste em uma ou mais folhas de grafeno enroladas formando um ou mais cilindros concêntricos, com comprimentos da ordem de micrometros e diâmetros de tamanho nanométrico. Sua classificação é pautada em dois grupos principais: os nanotubos de carbono de paredes simples (*single-walled carbon nanotube* – SWCNT, em inglês) e nanotubos de paredes múltiplas (*multi-walled carbon nanotube* – MWCNT, em inglês). O primeiro consiste em um único cilindro formado por uma folha de grafeno com um diâmetro entre 1-2 nanômetros ao passo que o segundo apresenta dois ou mais cilindros concêntricos com um diâmetro externo entre 2-50 nanômetros, conforme exemplificado na Figura 10 (MAHESWARAN; SHANMUGAVEL, 2022; RATHINAVEL *et al.*, 2021).

Figura 10 - SWCNT (A) e MWCNT (B)



Fonte: Adaptado de Rathinavel *et al.* (2021).

Os CNTs apresentam propriedades mecânicas elevadas, com resistência e rigidez de até 100 GPa e 1000 GPa, respectivamente. Além disso, possuem alta condutividade térmica, atingindo até $600 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ e destacam-se, por suas propriedades elétricas, apresentando uma densidade de corrente elétrica de até $4 \times 10^9 \text{ A/cm}^2$. Essas características fazem dos CNTs um material promissor para dispositivos e circuitos eletrônicos, especialmente devido à sua elevada densidade de corrente (GARG *et al.*, 2021; SHOUKAT; KHAN, 2021).

A condutividade elétrica dos nanotubos de carbono, sejam de paredes simples ou múltiplas, está relacionada com o seu diâmetro e ângulo chiral. Tais parâmetros resultam nos índices de Hamada, que são índices dos vetores unitários da rede hexagonal (n e m) e definem o tipo de nanotubo, podendo ser: armchair ($n = m$), zig-zag ($n, m = 0$) e chiral ($n \neq m \neq 0$). Além disso, os índices de Hamada podem ser influenciados pelo tipo de nanotubo, podendo este ser metálico, quando $n - m$ for múltiplo de 3, caso contrário o nanotubo é semicondutor. Por fim, a estrutura quase unidimensional dos CNTs favorece a condução elétrica através de grandes extensões e sem sofrer espalhamento (CORAZZA et al., 2020; HAWRYLAK et al., 2004).

As propriedades intrínsecas dos nanotubos de carbono, fundamentadas em sua estrutura atômica de hibridização sp^2 proporcionam uma condutividade térmica excepcional ao buckypaper. Graças a esta estrutura, a transferência de calor é determinada primordialmente por fônons, permitindo um transporte térmico rápido e eficiente através da rede contínua de nanopartículas. Logo, o principal diferencial do *buckypaper* de nanotubos de carbono reside em sua capacidade de fornecer uma rede de nanopartículas estável, garantindo uma distribuição uniforme de propriedades condutoras por toda a interface do material.

2.6 TRATAMENTO SUPERFICIAL À PLASMA

O plasma, comumente citado como o quarto estado da matéria, é produzido a partir de gás ionizado. Quando um material é exposto ao plasma ocorre uma série de ativações em sua superfície, tornando-o atrativo em diversos setores, como na agricultura, onde a aplicação de plasma resulta no aumento da sobrevivência e da produtividade de algumas espécies de plantas comercializadas. Além de mudar o comportamento biológico de plantas, o plasma vem ganhando destaque nos setores de processamento e engenharia de materiais, modificando a superfície dos materiais e proporcionando características fundamentais para o setor, como o aumento da molhabilidade (AVCI et al., 2024; LEVCHENKO et al., 2021).

O tratamento superficial à plasma, exemplificado na Figura 11, é uma técnica de baixo custo, versátil, não invasiva e de simples e curto tempo de aplicação, sendo muito utilizada pós processamento, com o objetivo de alterar quimicamente a

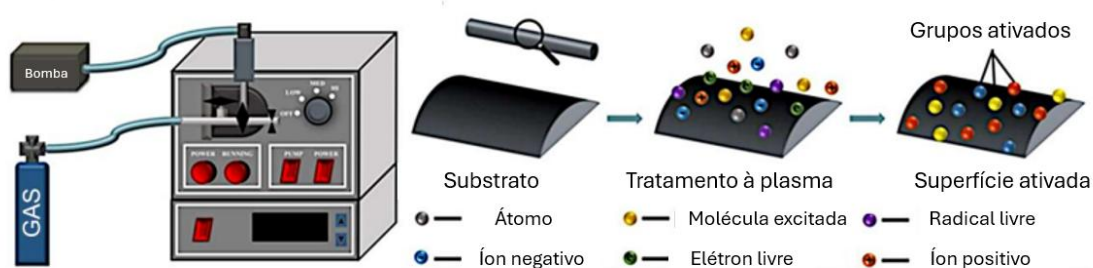
superfície do material, resultando em propriedades como bio e cito compatibilidade e absorção óptica (GHOBEIRA *et al.*, 2022b).

Geralmente, os efeitos do plasma resultam em processos como reticulação, condicionamento e criação de novos grupos funcionais, ocasionando o aumento (ativação) ou a redução (passivação) da energia livre na superfície tratada. Estes processos ocorrem de forma simultânea, porém, dependendo das condições experimentais estabelecidas, um efeito pode se destacar em relação a outros (COOLS *et al.*, 2020).

Dentre as diversas reações induzidas pelo plasma, a inserção de grupos funcionais quimicamente reativos em substratos poliméricos inicialmente inertes tem sido um dos focos principais na literatura (IQBAL *et al.*, 2010; LEVCHENKO *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2021). A introdução dessas funcionalidades reativas promove um aumento na energia superficial do material, ocasionando a melhora de sua hidrofilicidade. Esta característica é altamente desejável em aplicações que envolvam interação entre componentes, como a criação de biointerfaces, uma vez que superfícies mais hidrofílicas favorecem a interação com sistemas biológicos (GHOBEIRA *et al.*, 2022a).

No entanto, uma das principais limitações associadas à ativação por plasma é a diversidade de grupos funcionais gerados na superfície do material. Essa variedade decorre das inúmeras reações químicas que ocorrem na região, resultando em uma complexa mistura de espécies ativas. Essas espécies, que incluem radicais livres, íons e elétrons, têm um impacto significativo na química superficial do material. Quando colidem com a superfície polimérica, podem induzir a dissociação e ionização das propriedades do material (GHOBEIRA *et al.*, 2022a; LEVCHENKO *et al.*, 2021; UŞAK, 2023b).

Figura 11 - Esquema de tratamento à plasma.



Fonte: Adaptado de Levchenko *et al.* (2021).

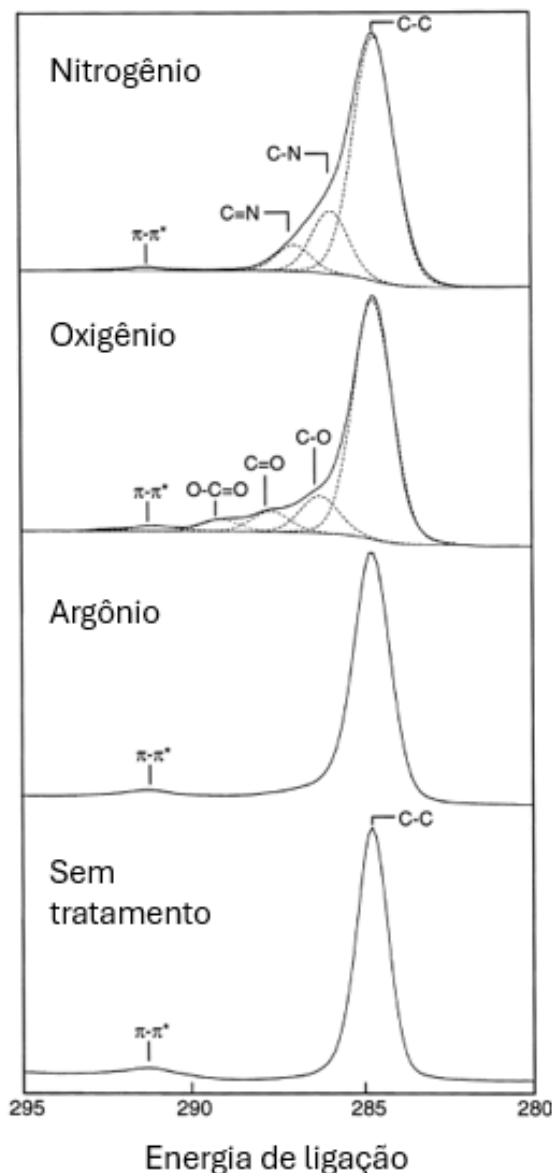
A complexidade química torna o controle minucioso das modificações superficiais um grande desafio, uma vez que a composição e a densidade dos grupos funcionais introduzidos dependem de alguns fatores como o gás utilizado, a potência aplicada do plasma, o tempo de exposição e as características do substrato polimérico. Portanto, embora o tratamento por plasma seja uma ferramenta poderosa para a funcionalização de superfícies, é necessário a compreensão detalhada dos mecanismos envolvidos e da otimização das condições experimentais, garantindo assim, os resultados desejados na aplicação pretendida (GRACE; GERENSER, 2003).

A mudança da superfície do material por plasma está diretamente relacionada com o gás no qual este será utilizado, onde os mais comuns são: oxigênio, nitrogênio, amônia, gás carbônico, gases nobres e ar. Sendo assim, a escolha do gás que será utilizado no processo de tratamento superficial à plasma, irá depender da aplicação do material (GRACE; GERENSER, 2003).

A adesão em superfícies poliméricas tratadas por plasma é fortemente influenciada pela natureza e distribuição dos grupos funcionais introduzidos durante o processo. No entanto, nem todos os grupos funcionais gerados contribuem positivamente para a adesão, alguns podem ser irrelevantes ou até mesmo prejudiciais ao desempenho desejado. Portanto, é fundamental identificar quais grupos funcionais são essenciais para uma aplicação específica e direcionar a modificação superficial para favorecer a formação desses grupos (GRACE; GERENSER, 2003; KHOMUTOVA *et al.*, 2024).

O trabalho realizado por Grace *et al.* (2003), usa um polímero de cadeia polimérica linear (poliestireno (PS)) para evidenciar o efeito do gás na formação dos grupos funcionais na superfície do material. Para isso, o material foi tratado com plasma utilizando 3 gases distintos: argônio, oxigênio e nitrogênio. Por fim, as amostras foram avaliadas via espectroscopia de fotoelétrons na região de raios-X (XPS), evidenciando a formação de grupos funcionais distintos, conforme apresentado na Figura 12.

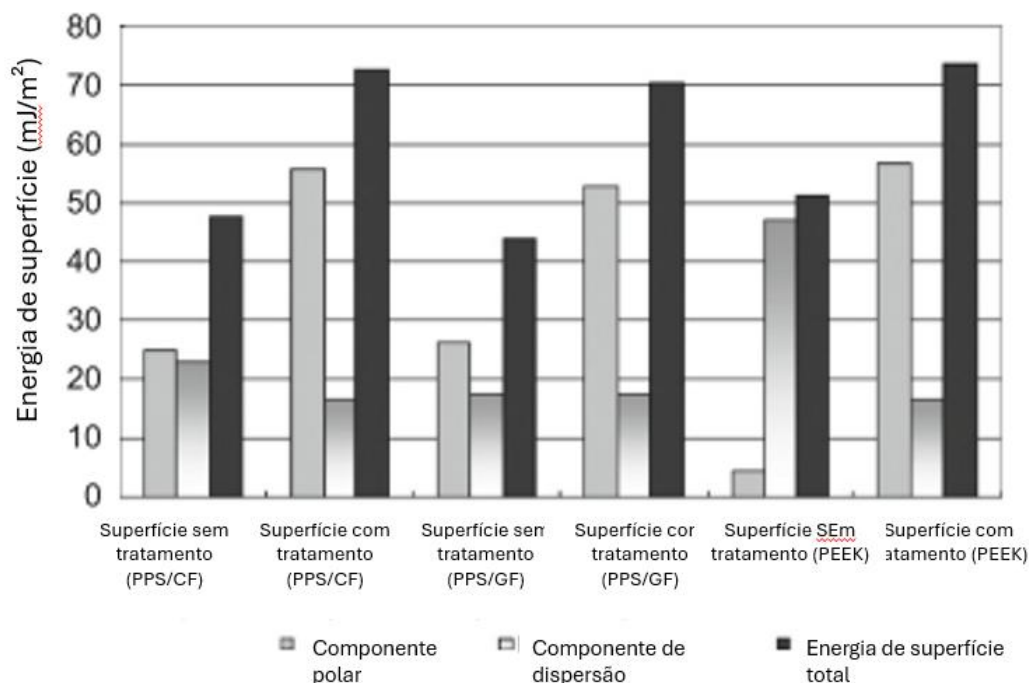
Figura 12 - Influência do gás no tratamento superficial com plasma do PS



Fonte: Adaptado de Grace; Gerenser (2003).

O trabalho de Iqbal *et al.* (2010) avaliou a influência do tratamento superficial à plasma para a união de compósitos a partir de um adesivo a base de epóxi. Neste trabalho foram utilizados os seguintes materiais para análise: PPS/CF, PPS/GF e PEEK. Todos os materiais tiveram a superfície tratada com plasma à baixa pressão e à pressão atmosférica. Ao avaliar os laminados, aqueles submetidos ao tratamento superficial com plasma à pressão atmosférica obtiveram uma maior energia de superfície, conforme apresentado na Figura 13 (IQBAL *et al.*, 2010).

Figura 13 - Energia de superfície do trabalho de Iqbal



Fonte: Adaptado de Iqbal et al. (2010).

Por fim, foram realizados ensaios de *lap shear* das amostras com e sem tratamento superficial com plasma, sendo possível notar que o laminado de PPS/FC tratado com plasma à pressão atmosférica apresentou um desempenho mecânico três vezes maior que o laminado puro. Logo, o PPS/FC é altamente influenciado pelo tratamento à plasma em atmosfera padrão, aumentando assim o grau de componente polares, ocasionando melhores propriedades de adesão e, consequentemente, uma maior resistência da junta colada de materiais reforçados com fibras.

2.6.1 O plasma de descarga de barreira dielétrica (DBD)

O plasma de descarga de barreira dielétrica é um dispositivo de descarga elétrica operado a partir da aplicação de uma alta voltagem entre dois eletrodos, nos quais pelo menos um é revestido por um material isolante dielétrico, como vidro, quartzo ou cerâmica. Este isolante atua como um limitador de corrente, impedindo a formação de faíscas ou arcos e permitindo a geração de inúmeras micros descargas filamentosas estáveis e de curta duração que formam um plasma uniforme. Uma das maiores vantagens do plasma DBD é a sua capacidade de operar em condições de

atmosfera padrão (pressão atmosférica), o que elimina a necessidade de sistemas de vácuo caros e complexos, economizando tempo, espaço e energia nos processos industriais. Devido à sua natureza não térmica, permite o tratamento de materiais sensíveis ao calor, sendo um método economicamente eficiente, ecológico, rápido e facilmente automatizável em linhas de produção contínuas (DIMITRAKELLIS *et al.*, 2022; LAPENA; LOPES, 2023; SHVYDYUK *et al.*, 2023; ZHAO *et al.*, 2024).

A aplicação deste tipo de plasma altera a superfície de materiais compósitos de forma profunda a partir de modificações físicas e químicas que resultam em uma melhoria significativa na adesão. Do ponto de vista químico, o bombardeamento da superfície por espécies reativas induz a formação de grupos funcionais polares, como hidroxila ($-OH$), carboxila ($-COOH$), carbonila ($C=O$) e grupos contendo nitrogênio (como aminas). Essas mudanças elevam a energia livre de superfície e reduzem os ângulos de contato da água, transformando superfícies hidrofóbicas e inertes em superfícies hidrofílicas e reativas, capazes de estabelecer ligações químicas fortes com adesivos e revestimentos. Além disso, o plasma DBD atua na limpeza superficial, removendo contaminantes orgânicos e resíduos de agentes desmoldantes, como silicone e flúor, que prejudicam a qualidade da colagem (AYAZ *et al.*, 2024; DIMITRAKELLIS *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2024).

Em termos físicos, o tratamento por plasma DBD provoca o bombardeamento da superfície por espécies energéticas, o que contribui para a alteração da morfologia e da rugosidade. Embora em microescala a superfície possa parecer inalterada, em escala nanométrica observa-se a formação de uma nano-rugosidade que aumenta a área de contato efetiva entre o compósito e o adesivo. Esse aumento da rugosidade favorece o *interlocking*, permitindo que o polímero fundido penetre nas irregularidades criadas e se ancore de forma mais robusta. O resultado direto dessas transformações é o aumento da resistência mecânica das juntas, frequentemente evidenciado por uma mudança no modo de falha: de falhas adesivas interfaciais para falhas coesivas no adesivo ou falhas de arrancamento de fibras no substrato, indicando que a interface se tornou mais resistente do que o próprio material (DIMITRAKELLIS *et al.*, 2022; SCARSELLI *et al.*, 2021).

Baseado no exposto, nota-se que os compósitos de matriz termoplástica de alto desempenho, como o PPS/FC, vem se destacado no setor aeronáutico e apresenta um desafio em relação ao processamento de componentes de geometria complexas. Embora a técnica de soldagem por resistência utilizando uma malha

metálica como elemento resistivo seja promissora, o uso de elemento resistivo metálico ocasiona o aumento do peso estrutural. Para garantir um elemento resistivo mais leve e que não sofra por intemperismo, surge o *buckypaper*.

Este material composto exclusivamente de nanopartículas apresenta elevada condutividade térmica e elétrica, sendo promissor para substituir a malha metálica. Por fim, para aprimorar os mecanismos de união durante o processo de soldagem por resistência, a técnica de plasma DBD foi implementada em atmosfera padrão, uma vez que trabalhos recentes mostram a sua eficácia no tratamento superficial de compósitos de matriz termoplástica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

O processamento do compósito PPS/fibra de carbono foi realizado por meio da moldagem por compressão a quente. Para manufatura dos laminados foi utilizado o *semipreg* unidirecional (*tape*) de PPS/fibra de carbono (P20051-12X), Figura 14, fornecido pela empresa Teijin (Japão) com um teor de fibra de 70%. A Tabela 2 evidencia as principais propriedades deste *tape*.

Tabela 2 - Propriedades do *tape* de PPS/FC utilizado.

Propriedades	Valores
Temperatura de transição vítrea	90 °C
Massa específica das fibras	1,77 g/m ²
Massa específica da matriz	1,35 g/m ²
Fração volumétrica de resina	34%
Espessura da camada consolidada	0,14 mm

Fonte: Adaptado de *Teijin* (2024).

Figura 14 - PPS/Fibra de carbono



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a produção dos *buckypapers* foram utilizados nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) em pó, fornecidos pela empresa *Nanografi*. A Tabela 3 resume as principais propriedades deste nanomaterial.

Tabela 3 - Principais propriedades do MWCNT.

Propriedade	MWCNT
Densidade	2,4 g/cm ³
Pureza	92% em massa
Diâmetro interno	8-10 nm
Diâmetro externo	5-15 nm
Comprimento	1-3 µm
Área específica de superfície	290 m ² /g
Condutividade elétrica	98 S/cm

Fonte: Adaptado de *Nanografi* (2024)

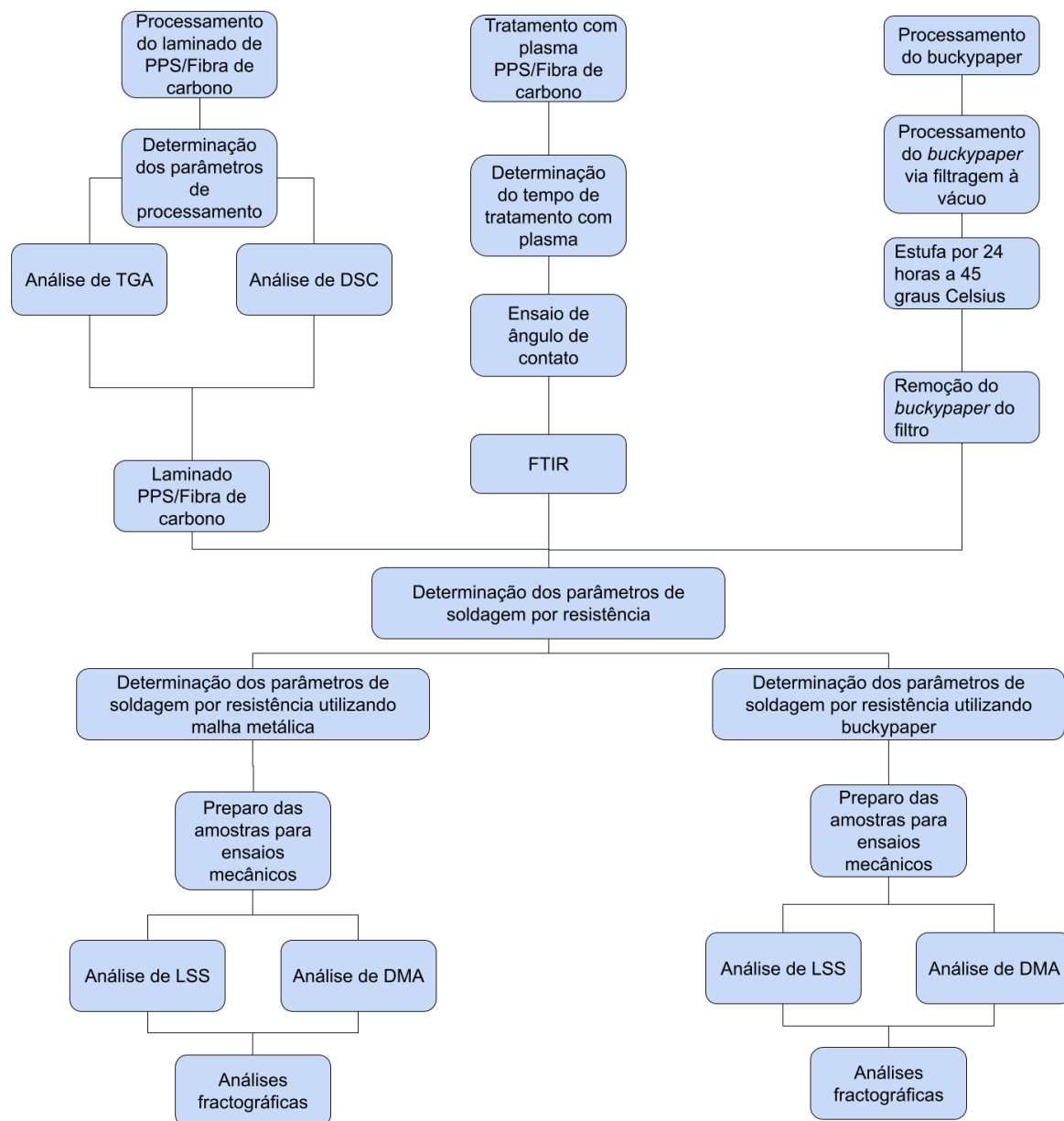
Para evitar a aglomeração das nanopartículas durante o processamento do *buckypaper* foi utilizado o surfactante Triton X-100, fornecido pela empresa *Labsynth*. Este surfactante apresenta pH entre 6,0 e 8,0, temperatura de ebulição de 200 °C e densidade de 1,07g/cm³.

Por fim, para a soldagem por resistência convencional foi usado uma malha metálica de aço inoxidável (Al 304 -200 mesh) que apresenta uma abertura de diâmetro de fio de 0,03 mm e abertura de 0,03 mm (ANA, 2015).

3.2 MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 15 apresenta as etapas realizadas nesta pesquisa.

Figura 15 - Fluxograma de atividades



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1 Termogravimetria (TGA)

A termogravimetria (TGA) foi realizada com o principal objetivo de avaliar a temperatura de degradação do material em estudo. Para isso, o ensaio foi realizado em uma faixa de temperatura de 25 °C a 1000 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e em atmosfera oxidante (ar sintético com fluxo de 20 mL/min). O processo foi realizado em uma única camada do pré-impregnado de PPS/FC, utilizando uma massa aproximada de 2,8 mg.

3.2.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi utilizada com o objetivo de determinar os eventos térmicos do PPS/FC, como suas temperaturas de transição vítrea, de cristalização e a de fusão da matriz. Para isso, a análise foi realizada em um intervalo de temperatura de 25 °C a 350 °C, em atmosfera de nitrogênio a 100 mL/min, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e resfriamento de 10 °C/min. Posteriormente, foi realizada uma segunda análise, onde a taxa de aquecimento foi mantida e a taxa de resfriamento foi alterada para 20°C/min.

Esta análise foi realizada com taxas de resfriamento distintas com o objetivo de evidenciar a influência desta taxa na cristalização do material. Para isso, foi calculado o percentual de cristalização, utilizando a equação 2 (COSTA *et al.*, 2008).

$$\%cristalinidade = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_{100\%}(1 - W_f)} \quad (2)$$

Onde: ΔH_f – entalpia de fusão

$\Delta H_{100\%}$ - entalpia do material 100% cristalino (150,4 J/g) (COSTA *et al.*, 2008).

W_f – porcentagem em massa de fibra de carbono

3.2.3 Processamento por moldagem por compressão a quente

O processamento dos compósitos foi realizado em uma prensa hidráulica da série Monarch, Carver, modelo CMV100H-15-X, que possui controle de aquecimento e resfriamento (Figura 16).

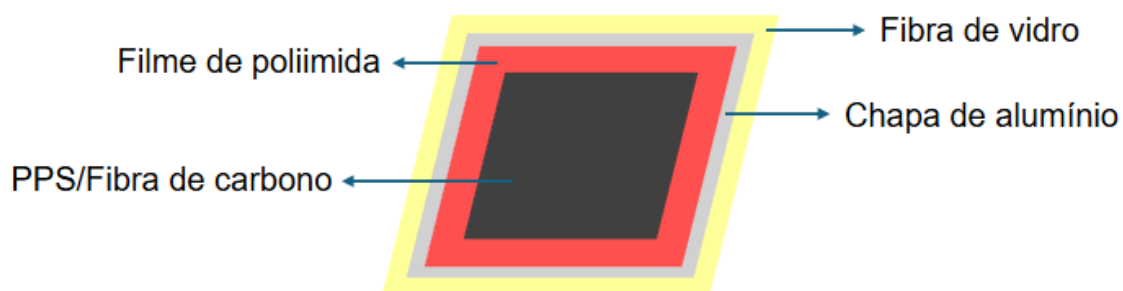
Figura 16 - Prensa hidráulica utilizada no processamento dos compósitos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Laminados com dimensões específicas de (300 x 300) mm foram preparados a partir do empilhamento de 12 camadas de *tape*, previamente preparado com desmoldante líquido e filmes de poliimida, conforme apresentado na Figura 17. Vale ressaltar que foram utilizadas 3 camadas de fibras de vidro abaixo da chapa de alumínio com o objetivo de garantir a homogeneidade de pressão por todo o material.

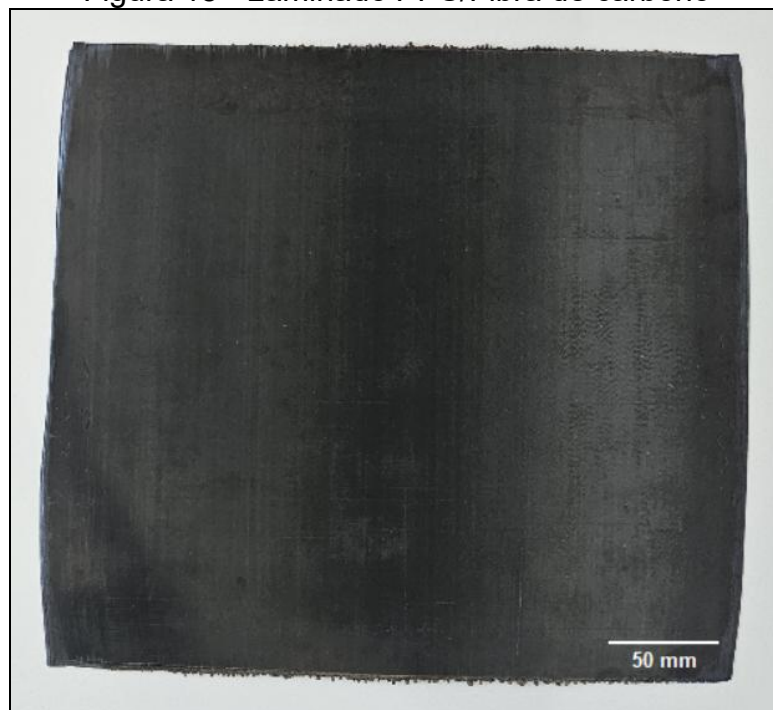
Figura 17 - Esquema de moldagem por compressão a quente



Fonte: Elaborado pelo autor

Este conjunto foi aquecido até 330 °C e mantido nessa condição por 30 min para garantir a estabilização da temperatura do processo. Após esse patamar, aplicou-se uma pressão de 0,55MPa, visando a compactação e consolidação do laminado. Por fim, o material foi resfriado até a temperatura ambiente, resultando no laminado apresentado na Figura 18. O método descrito foi baseado em uma série de testes prévios usando como base o *datasheet* do material, garantindo integridade estrutural dos compósitos produzidos, além do controle preciso das condições de processamento. Esse procedimento é essencial para obter laminados com propriedades mecânicas e térmicas homogêneas, que atendam aos rigorosos padrões de qualidade exigidos para aplicações avançadas.

Figura 18 - Laminado PPS/Fibra de carbono



Fonte: Elaborado pelo autor

A qualidade do ciclo de processamento dos laminados foi avaliada por meio de duas técnicas: a microscopia óptica e a inspeção por ultrassom.

A microscopia óptica foi realizada em um microscópio óptico da Zeiss, Imager Z2M, com o intuito de verificar a secção transversal dos laminados e identificar a presença de defeitos como delaminações, regiões com concentrações de resinas e poros. É importante ressaltar que, para estas análises, as amostras passaram por

preparo prévio, sendo cortadas em uma máquina com disco diamantado, lixadas e polidas com pasta de diamante.

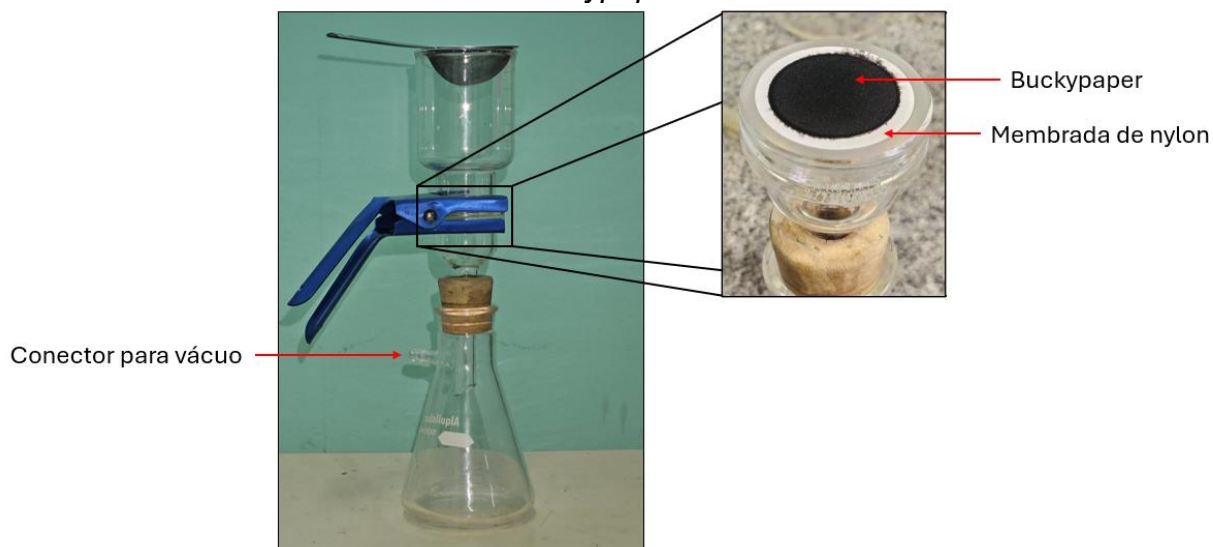
A inspeção por ultrassom foi conduzida em parceria com o Laboratório de Estruturas Leves (LEL) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Nessa análise foi utilizado um equipamento da Olympus, modelo OmniScan SX, e equipado com *probe* monocristal de 5 MHz.

3.2.4 Processamento dos *Buckypapers*

O processamento dos *buckypapers* ocorreu com a produção inicial de uma suspensão aquosa contendo nanotubos de carbono e surfactante (Triton X-100). Vale ressaltar que a fração volumétrica de MWCNT para a obtenção dos *buckypapers* foi definida a partir de uma série de testes preliminares.

Para o processamento do *buckypaper* de nanotubos de carbono, a suspensão contendo 85 g de nanopartículas e 1 g de surfactante em 300 mL de água deionizada foi submetida a uma ponteira ultrassônica (UP400St, Hielscher) por 40 minutos e, posteriormente, enviada à centrifuga (Kasvi, modelo K 14-4000) a 4000 rpm durante 30 minutos. Em seguida, foi realizada a filtração à vácuo da suspensão em um sistema de filtração à vácuo, como exemplificado na Figura 19. Ao fim do processo, os nanotubos de carbono ficaram depositados sobre a membrana de nylon. Após a filtração, foi realizada a lavagem do *buckypaper* com álcool isopropílico e acetona para remover o excesso de surfactante residual.

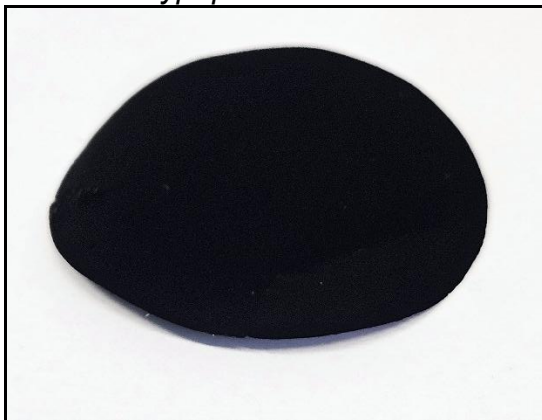
Figura 19 - Esquema de filtragem do *buckypaper*



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, o material foi levado para uma estufa por 24 horas a 45 °C. Após a secagem do material, o *buckypaper* foi removido da membrana, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 - *Buckypaper* de nanotubos de carbono



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.5 Avaliação dos *buckypapers*

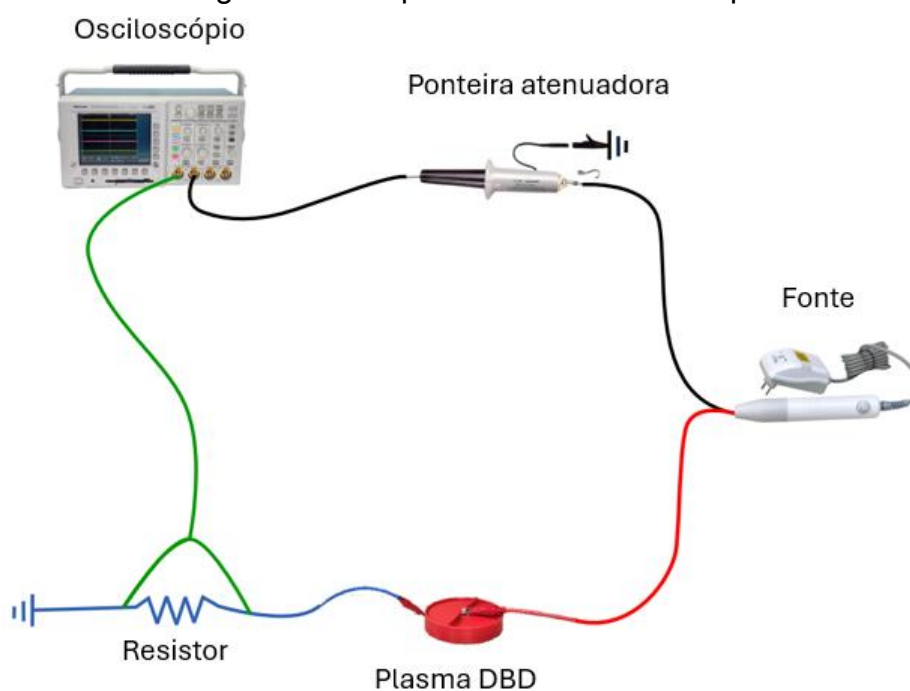
Os *buckypapers* foram caracterizados morfologicamente no Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da UNESP de Guaratinguetá, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Zeiss, modelo EVO LS-15 com filamento de tungstênio. A utilização dessa técnica teve como principal objetivo avaliar a

dispersão das nanopartículas no *buckypaper*, visto que este material apresenta um melhor desempenho mecânico e elétrico quando as nanopartículas estão dispersas de forma homogênea (PHAM *et al.*, 2008; ROJAS *et al.*, 2019).

3.2.6 Tratamento superficial à plasma

O tratamento superficial à plasma teve como principal objetivo aumentar a molhabilidade do compósito, a fim de garantir uma melhor adesão entre o elemento resistivo e o substrato (laminado). Dentre os procedimentos disponíveis o que se destaca é o tratamento a plasma em atmosfera padrão. Tal tratamento ocasiona um aumento de adesão, devido ao aumento da rugosidade da superfície do material. Com o aumento da rugosidade há uma maior presença de *interlocking* entre a matriz e o elemento resistivo, o que pode resultar em um material com melhores propriedades mecânicas na região soldada (IQBAL *et al.*, 2010). Este tratamento foram realizados em triplicata em amostras de 10x30mm utilizando o plasma DBD em atmosfera padrão com tempos de tratamento de 5, 10, 15 e 30 minutos (Figura 21). Por fim, foram realizados ensaios de ângulo de contato e FTIR.

Figura 21 - Esquema de tratamento à plasma



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.7 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de FTIR foi realizada no laminado utilizando o espectrofotômetro PerkinElmer, modelo Spectrum 100, para analisar as superfícies com e sem tratamento à plasma. Com o objetivo de identificar a composição de grupos funcionais nos materiais, foram realizadas 8 varreduras dentro da faixa de 400 a 4000 cm^{-1} .

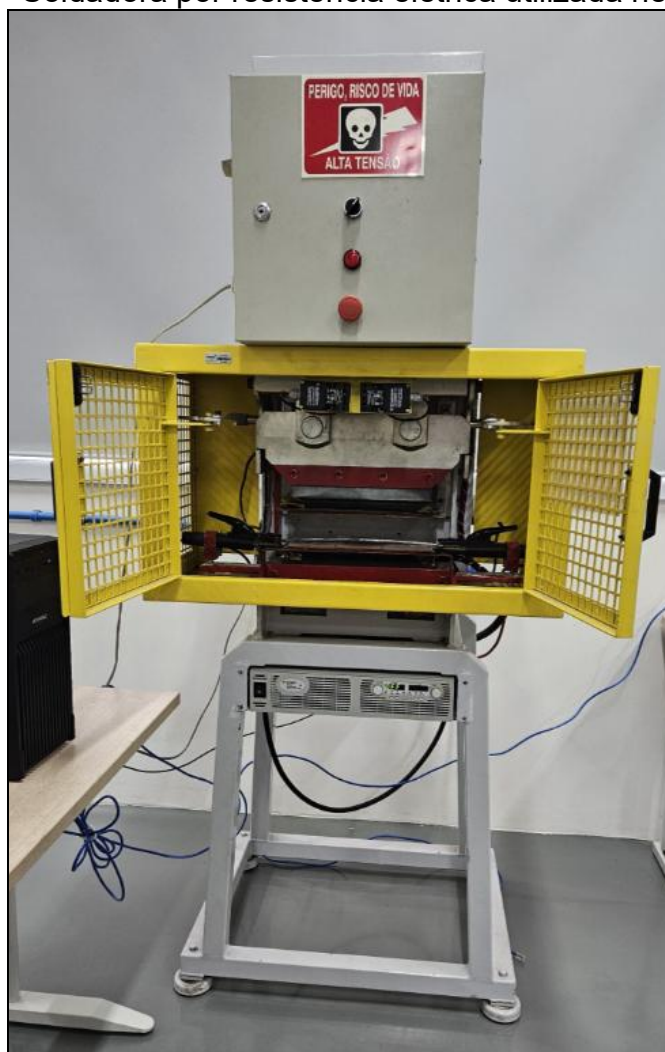
3.2.8 Análise de ângulo de contato

A molhabilidade da superfície com e sem tratamento à plasma foi medido por meio de uma análise de ângulo de contato, utilizando 1 μL de água deionizada em um goniômetro DAS 100S – Krüss. Este equipamento possui uma câmera que captura a imagem de uma gota depositada sobre a superfície do material e, com o auxílio de um *software*, realiza o cálculo do ângulo de contato.

3.2.9 Soldagem por resistência elétrica

O processo de soldagem por resistência elétrica foi realizado utilizando o equipamento apresentado na Figura 25 e consiste em aplicar uma determinada pressão no material enquanto este é aquecido por efeito Joule, a partir da passagem de uma corrente elétrica na interface de soldagem. O equipamento consiste em uma máquina de prensagem com conectores elétricos, que serão utilizados para fixar e aquecer o elemento resistivo. Enquanto o elemento resistivo gera o aquecimento, uma pressão é imposta no material.

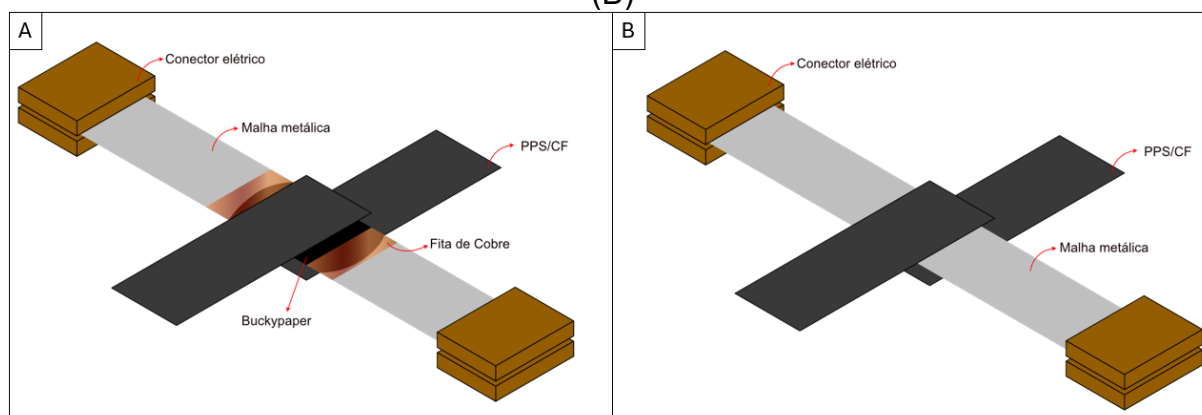
Figura 22 – Soldadora por resistência elétrica utilizada nesse estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao se tratar dos elementos resistivos utilizados, a malha metálica é fixada diretamente nos conectores elétricos enquanto o *buckypaper*, por ser um material frágil, necessita de uma adaptação para evitar que este seja rompido pela pressão exercida pelos conectores. Para utilizar o BP como elemento resistivo, foi necessário utilizar uma combinação entre malha metálica *mesh* 200 e fitas de cobre para garantir sua fixação nos conectores elétricos. O esquema de utilização dos elementos resistivos encontra-se apresentado na Figura 26.

Figura 23 - Uso do BP como elemento resistivo (A) e a malha metálica *mesh* 200 (B)



Fonte: Elaborado pelo autor

A determinação dos parâmetros para a soldagem por resistência elétrica utilizando tanto o *buckypaper* de nanotubos de carbono quanto a malha metálica como elemento resistivo foi realizada a partir de uma série de testes experimentais e de adaptações metodológicas fundamentadas nos trabalhos de Russello *et al.* (2023), Yu *et al.* (2023) e Souza *et al.* (2017). Vale ressaltar que, entre os trabalhos citados, somente o de Russello apresenta o uso de nanotubos de carbono como reforço do elemento resistivo, porém em compósitos com matriz de PEKK.

Para cada conjunto de ensaios inspirados nas metodologias desses autores, foram preparadas cinco amostras, submetidas ao ensaio de *lap shear* (LSS) e posteriormente avaliadas em microscópio óptico. As modificações nos parâmetros de soldagem foram realizadas de forma iterativa, considerando os resultados obtidos em cada etapa experimental. Por fim, os parâmetros escolhidos para a soldagem por resistência utilizando os dois elementos resistivos estudados estão evidenciados na Tabela 6.

Tabela 4 - Parâmetros de soldagem

	Malha metálica (<i>mesh</i> 200)	<i>Buckypaper</i> de nanotubos de carbono
Corrente (A)	35	9
Pressão (MPa)	1,2	1,7
Tempo de soldagem (s)	80	50
Tempo de consolidação (s)	80	50

Fonte: Elaborado pelo autor

A variação da pressão entre as amostras é consequência das diferenças morfológicas dos elementos resistivos. Para a malha metálica, utilizou-se uma

pressão de 1,2 MPa para promover o fluxo do polímero através das aberturas da malha sem que pudesse danificar as fibras do laminado. Já para o *buckypaper*, por se tratar de um material denso e poroso, foi necessário um aumento da pressão utilizada, com o objetivo de maximizar a molhabilidade do PPS na superfície densa do filme.

Já para os parâmetros elétricos de soldagem com *buckypaper*, a corrente foi fixada em 9 A após testes preliminares indicarem a ruptura do elemento resistivo em correntes iguais ou superiores a 10 A. Além disso, o tempo de soldagem foi restringido a 50 segundos, uma vez que a manutenção da corrente por 80 segundos provocou o surgimento de pontos de degradação térmica na matriz.

Para realizar um comparativo de eficiência energética entre os elementos resistivos, foi calculada a densidade de energia (J/cm^2) a partir dos dados obtidos no processo de soldagem (Tabela 7).

Tabela 5 - Dados do processo de soldagem por resistência escolhido

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Real (W)	Potência/Área (W/cm^2)
Malha metálica	33	35	1171	187
Buckypaper	23	9	212	34

Fonte: Elaborado pelo autor

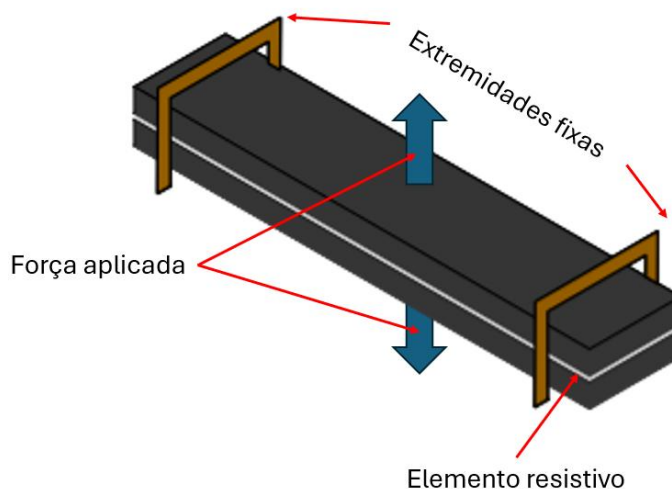
Foi possível observar que a soldagem com malha metálica e o *buckypaper* apresentaram uma densidade de corrente, respectivamente, de $15 \text{ kJ}/\text{cm}^2$ e $1,7 \text{ kJ}/\text{cm}^2$. Essa redução de aproximadamente 88% no consumo energético, evidenciam a elevada eficiência do *buckypaper* na geração de calor por efeito Joule.

3.2.10 Análise Dinâmico Mecânica (DMA)

A análise dinâmico mecânica foi realizada em um equipamento DMS 6100, SII Nanotechnology – SEIKO, com base nos procedimentos descritos na norma ASTM D7028. Contudo, os parâmetros utilizados, foram: modo de flexão *dual cantilever*, em atmosfera de nitrogênio com fluxo de $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, em uma faixa de temperatura de 25 a 250°C , frequência de 1 Hz, amplitude de $10 \mu\text{m}$, taxa de aquecimento de $3^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ e amostras com dimensões de $(55 \times 10 \times 3,5) \text{ mm}$. Este ensaio tem como

objetivo avaliar as propriedades viscoelásticas da região soldada, para isso, o corpo de prova utilizado foi processado conforme mostrado na Figura 24 abaixo

Figura 24 - Corpo de prova para o ensaio de DMA



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.11 *Lap Shear* (LSS)

O ensaio mecânico de *lap shear* (LSS) é utilizado para avaliar a resistência ao cisalhamento de uniões, além de ser comumente empregado para investigar a eficiência da soldagem por resistência elétrica em compósitos. Este ensaio foi conduzido conforme a norma ASTM D1002 e consistiu na aplicação de uma força de tração longitudinal ao corpo de prova até que ocorresse a ruptura na região soldada. Vale ressaltar que foram ensaiadas 10 amostras, onde cada substrato a ser soldado tinha dimensões de (108 x 25 x 3) mm e a área soldada um dimensionamento de (12 x 25) mm.

3.2.11.1 **Análise estatística dos resultados de LSS**

Para verificar a influência do tratamento a plasma na tensão de ruptura do material, os dados obtidos foram submetidos a uma análise estatística. Foi utilizado o teste T de Student para amostras independentes, considerando uma distribuição bicaudal, com o objetivo de comparar as médias dos dois grupos experimentais, sem tratamento e com tratamento à plasma.

Neste caso, o nível de confiança estabelecido foi de 95% ($\alpha=0,05$), com a seguinte hipótese nula: O tratamento a plasma não produz efeito significativo na propriedade avaliada, ou seja, não há diferença real entre as condições analisadas.

O valor de T foi calculado de acordo com a Equação (3).

$$t = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (3)$$

Onde:

x_1 e x_2 são as médias amostrais dos grupos sem e com tratamento, respectivamente;

s_1^2 e s_2^2 são as variâncias amostrais;

n_1 e n_2 são os tamanhos das amostras.

O valor - p foi obtido via *software* a partir do valor de t calculado, considerando os graus de liberdade do sistema. O critério de decisão adotado estabelece que, se o valor - p calculado for menor que o nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$), rejeita-se a hipótese nula, confirmando o efeito do tratamento.

3.2.12 Fractografia

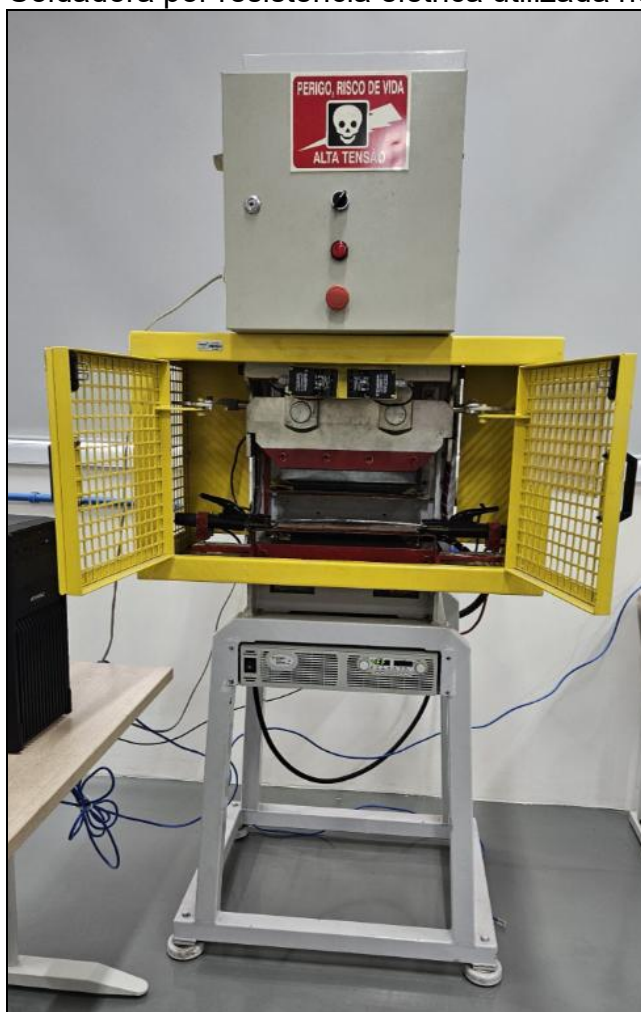
Para avaliar a influência dos diferentes elementos resistivos e do tratamento superficial com plasma nos modos de falha do compósito, realizou-se um estudo fractográfico com o auxílio de um microscópio óptico da Zeiss, modelo Imager Z2M e um microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss e modelo EVO LS-15. Vale ressaltar que as amostras não passaram por um preparo prévio, a fim de proteger a superfície de fratura.

3.2.13 Soldagem por resistência elétrica

O processo de soldagem por resistência elétrica foi realizado utilizando o equipamento apresentado na Figura 25 e consiste em aplicar uma determinada pressão no material enquanto este é aquecido por efeito Joule, a partir da passagem

de uma corrente elétrica na interface de soldagem. O equipamento consiste em uma máquina de prensagem com conectores elétricos, que serão utilizados para fixar e aquecer o elemento resistivo. Enquanto o elemento resistivo gera o aquecimento, uma pressão é imposta no material.

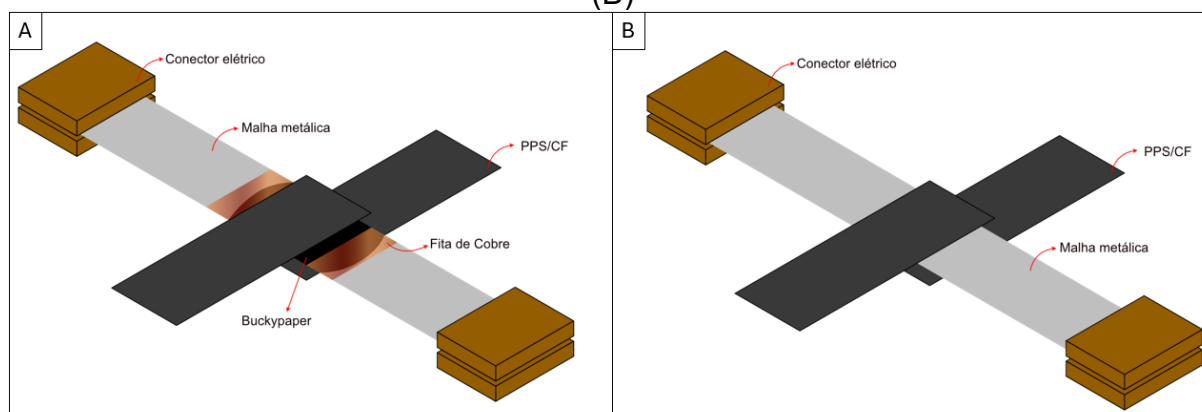
Figura 25 – Soldadora por resistência elétrica utilizada nesse estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao se tratar dos elementos resistivos utilizados, a malha metálica é fixada diretamente nos conectores elétricos enquanto o *buckypaper*, por ser um material frágil, necessita de uma adaptação para evitar que este seja rompido pela pressão exercida pelos conectores. Para utilizar o BP como elemento resistivo, foi necessário utilizar uma combinação entre malha metálica *mesh* 200 e fitas de cobre para garantir sua fixação nos conectores elétricos. O esquema de utilização dos elementos resistivos encontra-se apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Uso do BP como elemento resistivo (A) e a malha metálica *mesh* 200 (B)



Fonte: Elaborado pelo autor

A determinação dos parâmetros para a soldagem por resistência elétrica utilizando tanto o *buckypaper* de nanotubos de carbono quanto a malha metálica como elemento resistivo foi realizada a partir de uma série de testes experimentais e de adaptações metodológicas fundamentadas nos trabalhos de Russello *et al.* (2023), Yu *et al.* (2023) e Souza *et al.* (2017). Vale ressaltar que, entre os trabalhos citados, somente o de Russello apresenta o uso de nanotubos de carbono como reforço do elemento resistivo, porém em compósitos com matriz de PEKK.

Para cada conjunto de ensaios inspirados nas metodologias desses autores, foram preparadas cinco amostras, submetidas ao ensaio de *lap shear* (LSS) e posteriormente avaliadas em microscópio óptico. As modificações nos parâmetros de soldagem foram realizadas de forma iterativa, considerando os resultados obtidos em cada etapa experimental. Por fim, os parâmetros escolhidos para a soldagem por resistência utilizando os dois elementos resistivos estudados estão evidenciados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de soldagem

	Malha metálica (<i>mesh</i> 200)	<i>Buckypaper</i> de nanotubos de carbono
Corrente (A)	35	9
Pressão (MPa)	1,2	1,7
Tempo de soldagem (s)	80	50
Tempo de consolidação (s)	80	50

Fonte: Elaborado pelo autor

A variação da pressão entre as amostras é consequência das diferenças morfológicas dos elementos resistivos. Para a malha metálica, utilizou-se uma

pressão de 1,2 MPa para promover o fluxo do polímero através das aberturas da malha sem que pudesse danificar as fibras do laminado. Já para o *buckypaper*, por se tratar de um material denso e poroso, foi necessário um aumento da pressão utilizada, com o objetivo de maximizar a molhabilidade do PPS na superfície densa do filme.

Já para os parâmetros elétricos de soldagem com *buckypaper*, a corrente foi fixada em 9 A após testes preliminares indicarem a ruptura do elemento resistivo em correntes iguais ou superiores a 10 A. Além disso, o tempo de soldagem foi restringido a 50 segundos, uma vez que a manutenção da corrente por 80 segundos provocou o surgimento de pontos de degradação térmica na matriz.

Para realizar um comparativo de eficiência energética entre os elementos resistivos, foi calculada a densidade de energia (J/cm^2) a partir dos dados obtidos no processo de soldagem (Tabela 7).

Tabela 7 - Dados do processo de soldagem por resistência escolhido

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Real (W)	Potência/Área (W/cm^2)
Malha metálica	33	35	1171	187
Buckypaper	23	9	212	34

Fonte: Elaborado pelo autor

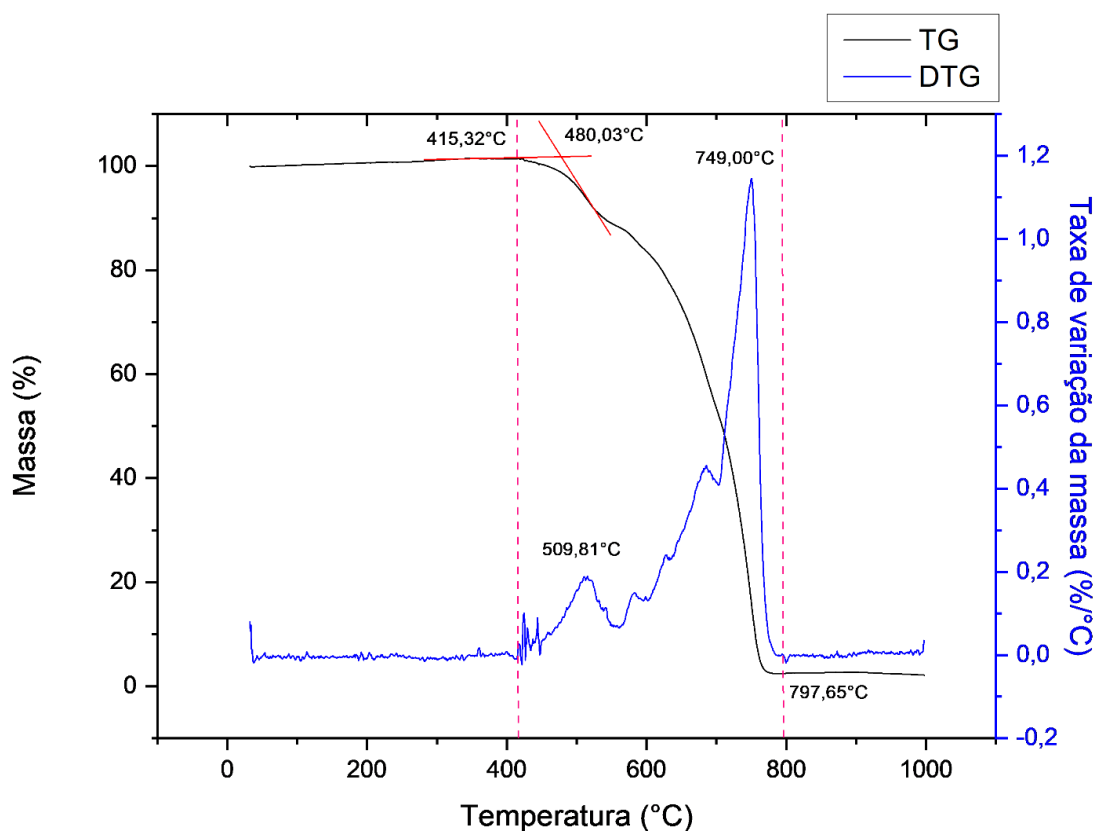
Foi possível observar que a soldagem com malha metálica e o *buckypaper* apresentaram uma densidade de corrente, respectivamente, de $15 \text{ kJ}/\text{cm}^2$ e $1,7 \text{ kJ}/\text{cm}^2$. Essa redução de aproximadamente 88% no consumo energético, evidenciam a elevada eficiência do *buckypaper* na geração de calor por efeito Joule.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO SEMIPREG DE PPS/FIBRA DE CARBONO

Como apresentado anteriormente, a termogravimetria (TGA) tem como principal objetivo avaliar a temperatura de degradação do material. A partir das curvas obtidas (Figura 27), foi observado dois eventos térmicos consecutivos no material, resultando em uma perda de massa de aproximadamente 100% do PPS/FC a 797 °C. O início da degradação ocorreu em 415 °C, com uma T_{onset} de 480 °C e temperatura de término do evento térmico em aproximadamente 798°C. As temperaturas de pico de degradação nos dois eventos térmicos foram de 510 °C e 749 °C, respectivamente. O primeiro evento pode estar associado a cisão das cadeias poliméricas do material enquanto o segundo pode estar relacionado a despolimerização do radical. Esse comportamento é semelhante ao observado no trabalho de Khan *et al.* (2016).

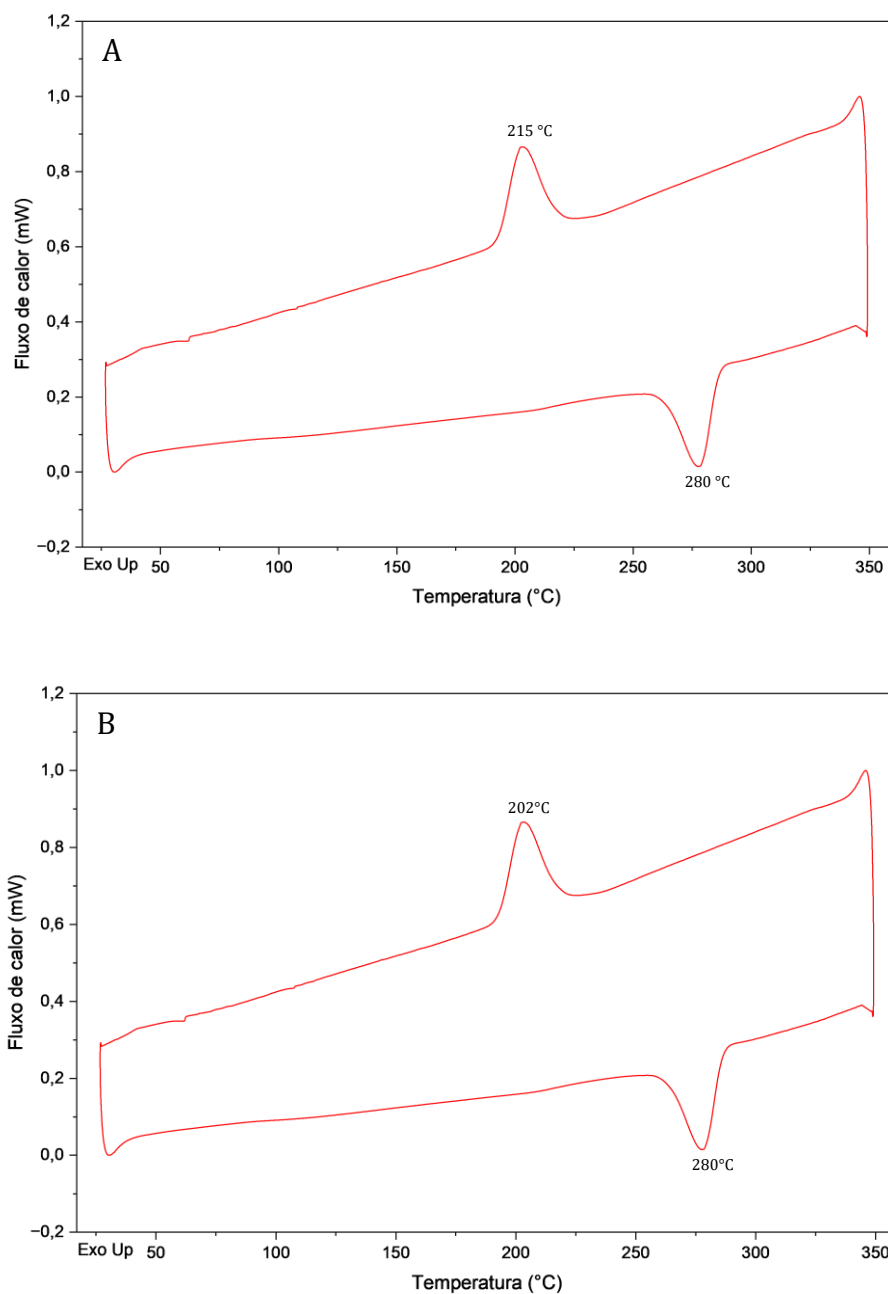
Figura 27 - TGA do PPS/Fibra de carbono



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos a partir da análise de DSC (Calorimetria Exploratória Diferencial) são apresentados na Figura 28 e compilados na Tabela 8. Observa-se a influência da taxa de resfriamento sobre a temperatura de cristalização, o que sugere que o material submetido a uma taxa de resfriamento mais lenta apresentou uma temperatura de cristalização (T_c) de aproximadamente 12 °C superior em comparação às condições de resfriamento mais acelerado. Além disso, por meio da equação 1, foram calculados os percentuais de cristalinidade do material, resultando em valores de 13,15% e 14,00% para as amostras resfriadas a 10 °C/min e 20 °C/min, respectivamente. A diferença observada no grau de cristalinidade, da ordem de 0,85%, sugere que a variação na taxa de resfriamento durante o processamento do material não exerce um impacto significativo sobre sua cristalinidade final. Essa conclusão indica que, dentro das condições analisadas, a taxa de resfriamento não constitui um fator determinante para a modificação da estrutura cristalina do material em estudo.

Figura 28 - Análise de DSC com taxa de resfriamento de 10°C/min (A) e 20°C/min (B)

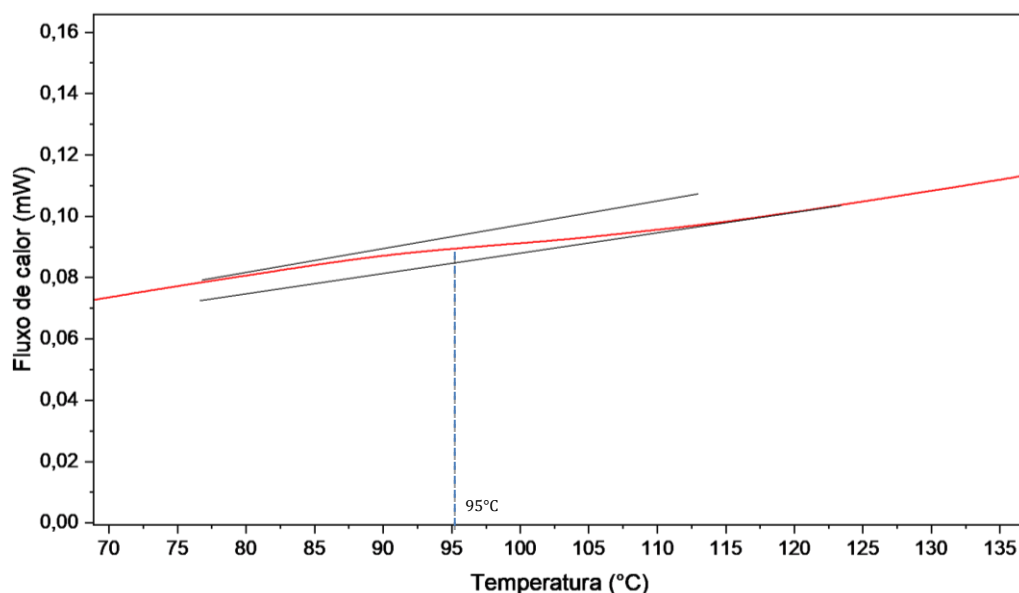


Fonte: Elaborado pelo autor

A temperatura de transição vítrea (T_g) não foi possível de ser definida, com exatidão, nas análises de DSC, sendo necessária a realização de uma terceira análise, alterando os seguintes fatores: a massa da amostra foi alterada para 5,4 mg, as taxas de aquecimento e resfriamento foram definidas para 20 °C/min. O

resultado dessa nova análise pode ser visto na Figura 29, permitindo identificar com clareza a temperatura de transição vítrea em 95 °C. Este valor próximo a T_g indicada pelo *datasheet* do material (90°C), conforme apresentado na Tabela 2.

Figura 29 - Determinação da TG por DSC



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 - Temperaturas e entalpias de fusão e cristalização obtidas por DSC com taxa de resfriamento de 10°C/min (A) e 20°C/min (B)

	A	B
$T_{\text{CRISTALIZAÇÃO}}$	215 °C	202 °C
$T_{\text{FUSÃO}}$	280 °C	280 °C
Entalpia de cristalização	-16,16 J/g	-13,78 J/g
Entalpia de fusão	13,06 J/g	13,89 J/g

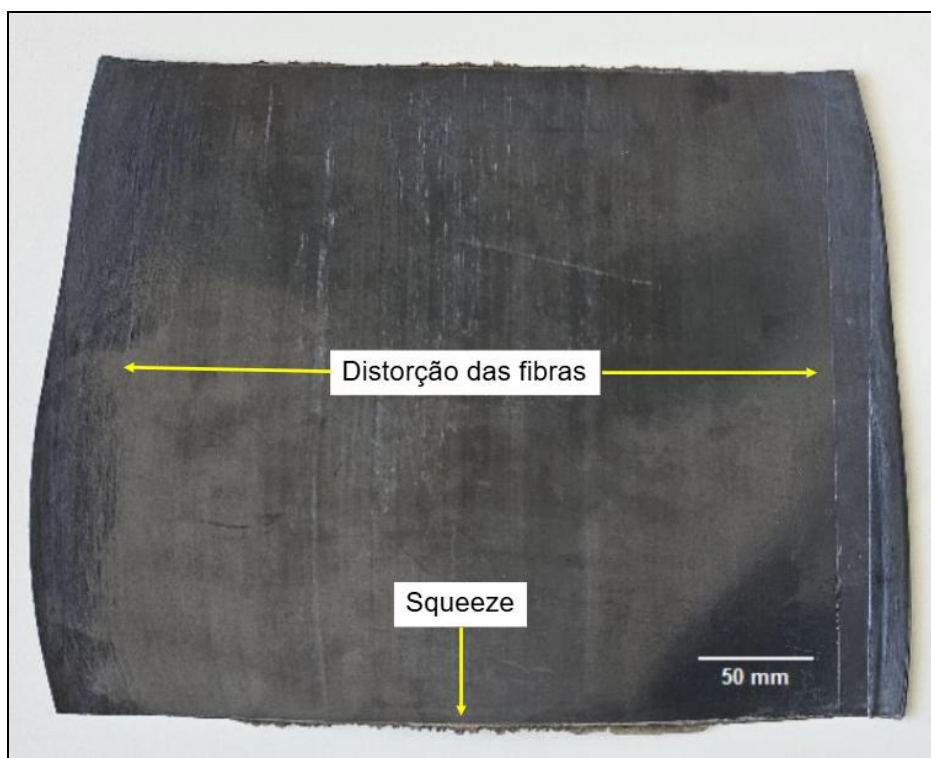
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 MOLDAGEM POR COMPRESSÃO A QUENTE

Os parâmetros de processamento do processo de moldagem por compressão a quente foram estabelecidos com base nos resultados iniciais das análises de TGA e DSC e a partir de uma série de ensaios preliminares, além do uso do *datasheet* do material fornecido pela empresa Teijin. Inicialmente, foi realizada uma inspeção visual no laminado processado, com o objetivo de avaliar se a distribuição das fibras

pelo laminado estava adequada, sem a presença de distorções significativas. A princípio, foi utilizada a pressão recomendada pelo fornecedor (20 Bar), o que ocasionou distorções na fibra e *squeeze* da matriz, conforme apresentado na Figura 30.

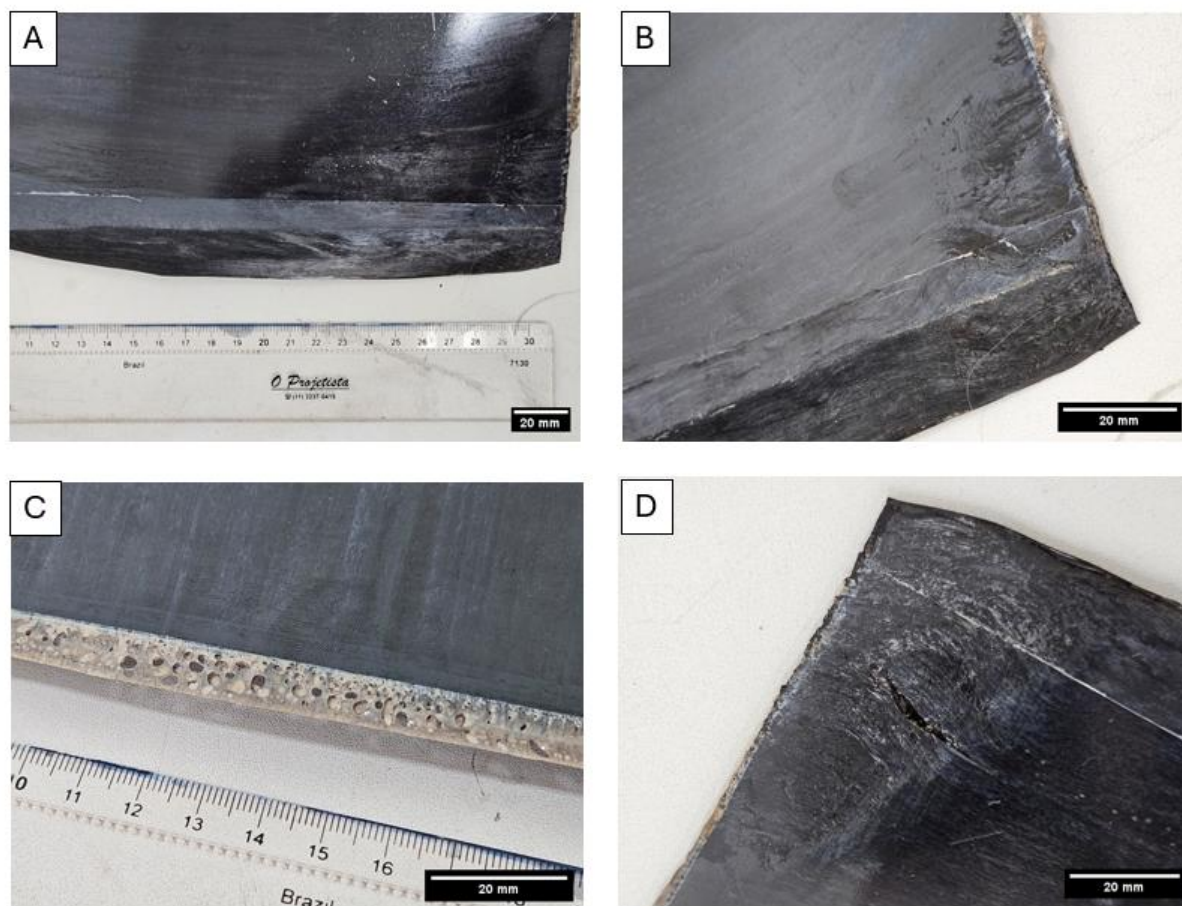
Figura 30 - Laminado processado com pressão de 20 Bar



Fonte: Elaborado pelo autor

Objetivando contornar o problema destacado na Figura 30, a pressão foi reduzida para 10 toneladas (1,10 MPa), contudo o problema persistiu, como pode ser observado em detalhes na Figura 31. Nota-se a presença de fibras distorcidas (Figura 31A) e de *squeeze* da matriz (Figura 31C), além da degradação do material nas extremidades do laminado (Figura 31B e Figura 31D).

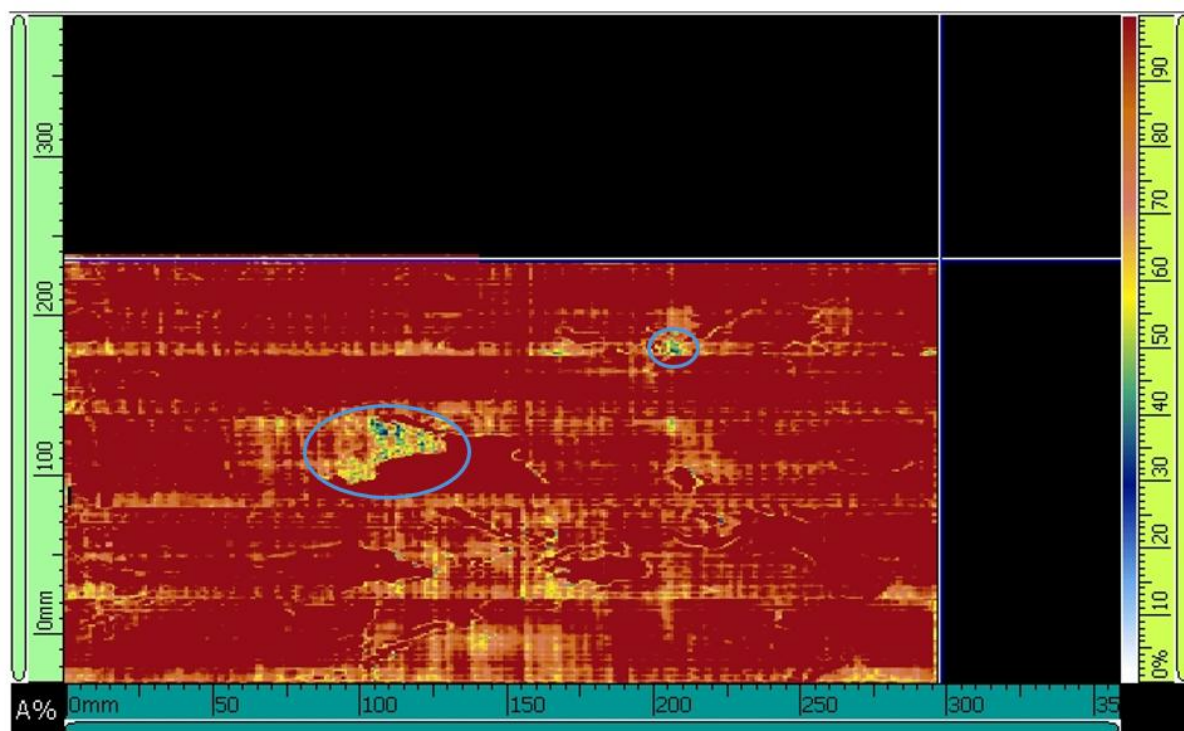
Figura 31 - Detalhes do laminado processado a 10ton, mostrando a distorção das fibras (A), *squeeze* (C) e regiões com degradação (B) e (D)



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, foi utilizada a pressão de 5 toneladas (0,55 MPa), resultando em um material uniforme, sem distorções significativa de fibras e sem *squeeze* excessivo da matriz. Em seguida, realizou-se a inspeção por ultrassom neste material (Figura 32) no qual foi possível observar que o laminado se encontra homogêneo. A escala de porcentagem de retorno de sinal também é apresentada na figura, na qual as cores branca e azul representam baixo retorno e qualidade de consolidação (0%-30%), enquanto as cores vermelho e laranja (70%-100%) indicam um maior retorno do sinal e melhor qualidade de consolidação. Portanto, a partir do resultado obtido, verifica-se que o laminado produzido apresenta boa qualidade de compactação, exceto nas regiões destacadas em azul que possuem baixo retorno do sinal.

Figura 32 - Resultado da inspeção por ultrassom do laminado de PPS/FC consolidado com a pressão de 0,55 MPa

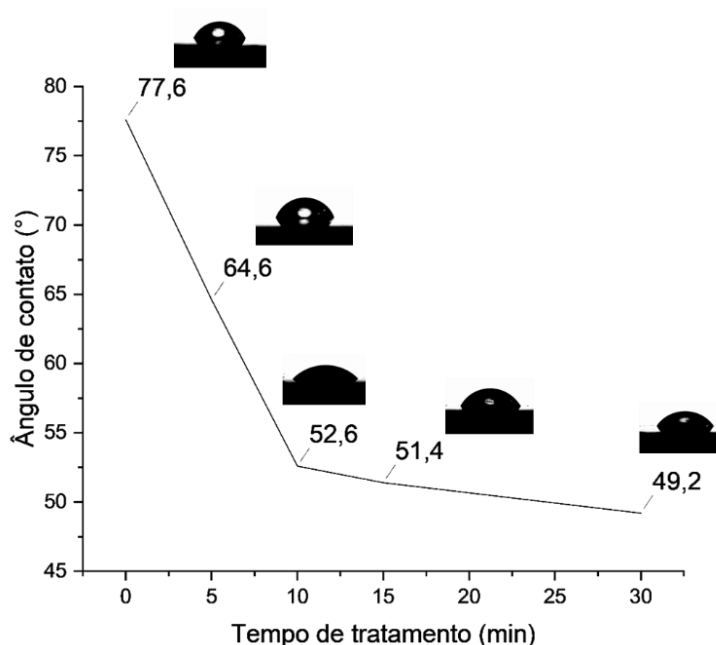


Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 TRATAMENTO À PLASMA NA SUPERFÍCIE DO COMPÓSITO PPS/FIBRA DE CARBONO

Inicialmente, a medição do ângulo de contato foi realizada para avaliar a influência do plasma na molhabilidade do material. Ao todo, foram realizadas 10 medidas em triplicada para cada tempo de tratamento. Os resultados obtidos foram compilados no gráfico apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Resultados das medições do ângulo de contato dos substratos de PPS/CF.



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados obtidos, observa-se uma diminuição significativa dos valores do ângulo de contato entre a amostra padrão (0 min) e a amostra tratada com plasma por 10 minutos, resultando em uma diminuição de aproximadamente 32%. O aumento do tempo de tratamento de 15 e 30 minutos manteve a tendência de redução do ângulo de contato, embora de forma menos expressiva (Tabela 9). Dessa forma, o tempo de tratamento selecionado para a continuidade da pesquisa foi de 10 minutos.

Tabela 9 - Dados do ângulo de contato

	Média	Desvio Padrão
Padrão	77,60	± 5,69
5 minutos	64,69	± 5,58
10 minutos	52,67	± 5,75
15 minutos	51,48	± 5,91
30 minutos	49,28	± 5,25

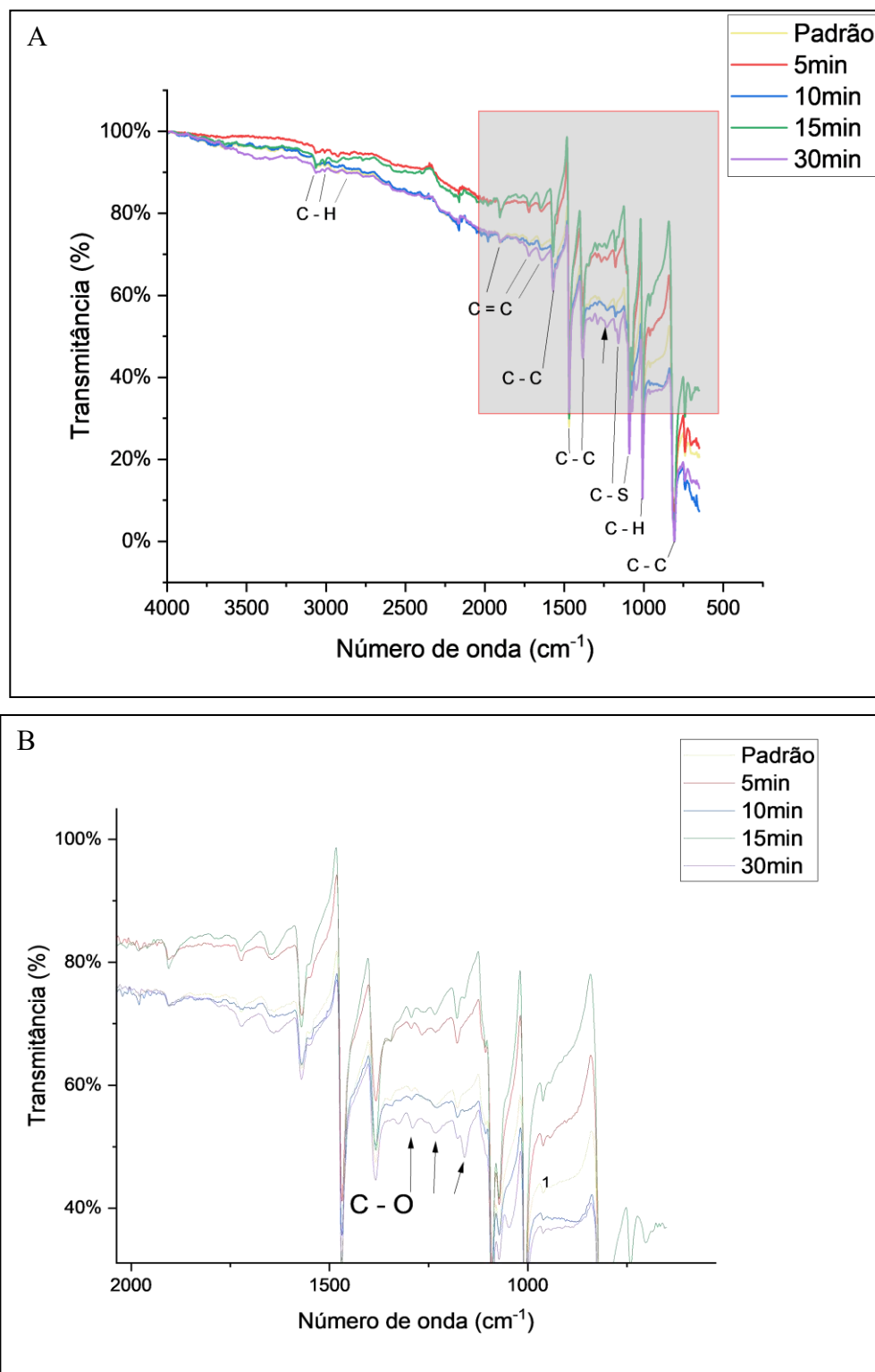
Fonte: Elaborado pelo autor

A

Figura 34 apresenta os principais resultados obtidos por meio da análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). A

Figura 34B evidencia a região destacada na
Figura 34A.

Figura 34 - FTIR do laminado PPS/CF sem e com tratamento à plasma (A) e região
destacada do gráfico A (B)



Fonte: Elaborado pelo autor

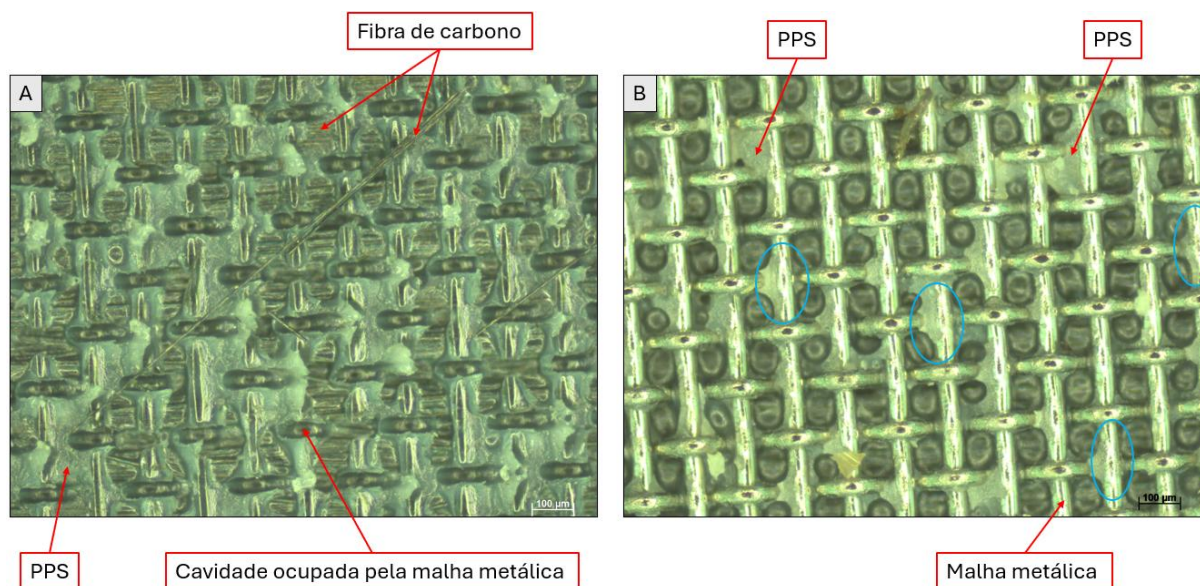
A partir da análise da Figura 34, observa-se que o tratamento superficial à plasma resultou em um aumento na intensidade das bandas características de determinados grupos funcionais, evidenciando alterações no espectro entre a amostra padrão e as amostras tratadas. Destaca-se, em especial, a região evidenciada onde as bandas apresentaram uma mudança significativa. Além disso, o espectro obtido condiz com as bandas características do PPS puro, apresentando bandas em comprimentos de onda de aproximadamente 1100 cm^{-1} , atribuídos à vibração da ligação C – S, além de bandas referentes a vibração da ligação C – C em números de onda situados no intervalo entre 1300 e 1600 cm^{-1} . Por fim, foram observadas bandas referentes às ligações entre carbono e hidrogênio nos anéis de benzeno, localizados próximos a 800 cm^{-1} (XING *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2024).

As bandas em torno de 1600 a 1800 cm^{-1} podem ser atribuídas ao alongamento da ligação C=O, enquanto as bandas em torno de 1100 a 1300 cm^{-1} podem estar associadas às ligações C-O, formadas durante a oxidação. Além disso, após a oxidação, surgiram bandas referentes ao alongamento de $\text{--SO}_2\text{--}$ e --SO-- localizados em aproximadamente 1000 e 1100 cm^{-1} , respectivamente. Portanto, após o tratamento superficial à plasma, foi identificado um aumento nas bandas de grupos funcionais C=O, C-O, --SO-- e $\text{--SO}_2\text{--}$, o que pode favorecer a adesão (XING *et al.*, 2018).

4.4 ENSAIO DE *LAP SHEAR* UTILIZANDO MALHA METÁLICA E *BUCKYPAPER* COMO ELEMENTO RESISTIVO.

Vale destacar que o ensaio de LSS referente ao material soldado com malha metálica apresentou uma resistência média de $9,38 \pm 2,69\text{ MPa}$. Este valor se aproxima com o encontrado na literatura, como mostrado por Da Yu e colaboradores (2024), onde a soldagem de PPS com malha metálica de *mesh* 200, resultou em uma pressão de ruptura de, aproximadamente, $10,5 \pm 0,5\text{ MPa}$. Além disso, foi realizado uma análise da região de fratura para avaliar a adesão entre a malha metálica e a matriz do compósito, conforme mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Microscopia óptica da região de fratura do compósito soldado com malha metálica. Superfície do compósito (A) e da malha metálica (B)

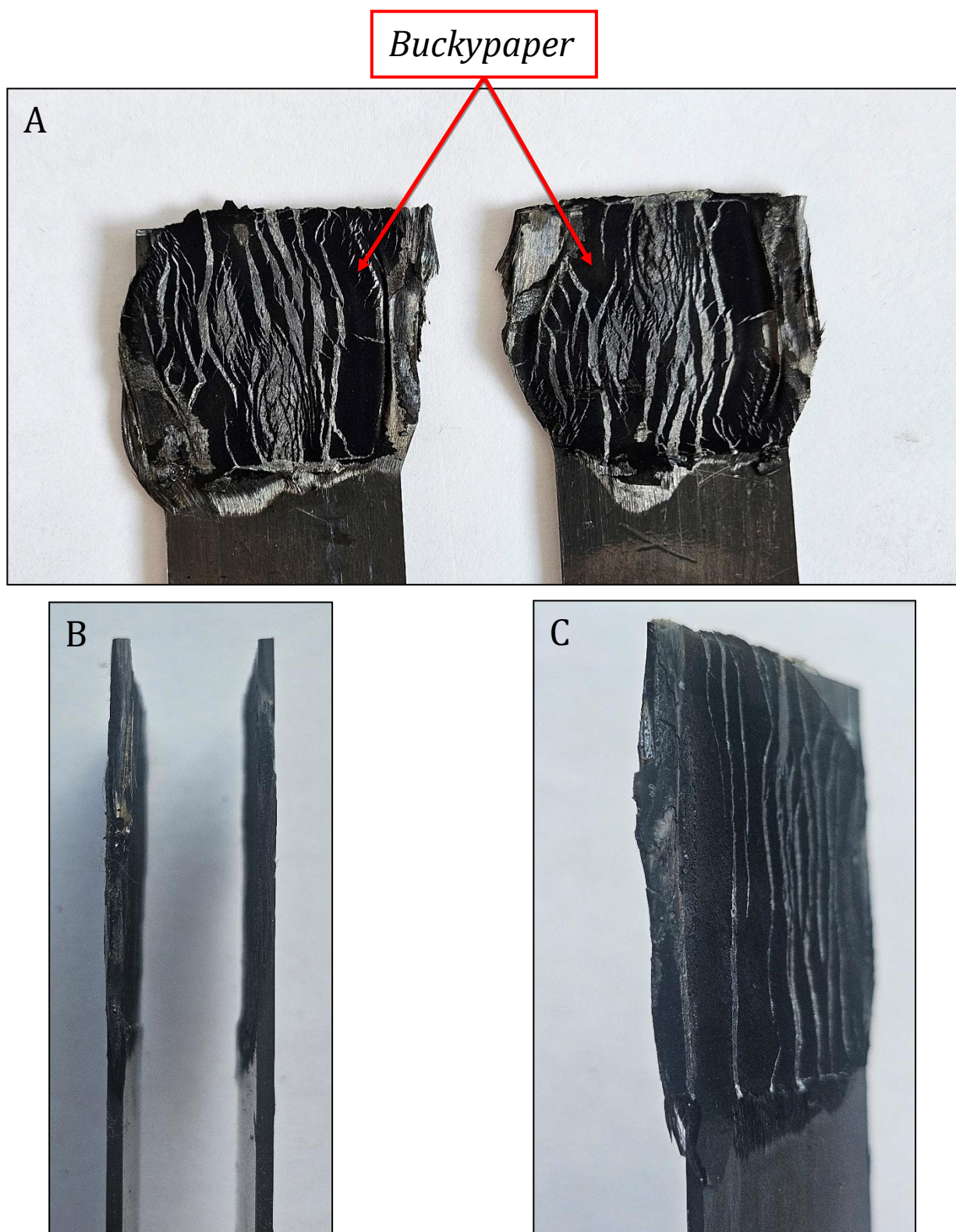


Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 35, nota – se que a fratura ocorreu na região de adesão entre a malha metálica e o laminado. Na Figura 35A, é possível notar a exposição das fibras de carbono na superfície de fratura, bem como a cavidade que a malha metálica ocupava. Em torno desta região, nota-se uma deformação plástica da matriz no sentido da tensão de cisalhamento. Já na Figura 35B, as regiões destacadas em azul, demonstram áreas em que há a presença de matriz polimérica sobre a malha metálica, indicando uma boa adesão entre a matriz e elemento resistivo, evidenciando que os parâmetros utilizados no processo de soldagem foram satisfatórios.

Já para o compósito soldado utilizando o BP de MWCNT como elemento resistivo, não foi possível encontrar na literatura padrão de referência, sendo assim, para avaliar os parâmetros de soldagem, foi realizado uma microscopia evidenciada na Figura 36, onde a Figura 36A e B representam a vista frontal e lateral da região de fratura, enquanto a Figura 36C evidencia o BP em detalhe.

Figura 36 - Região de fratura usando o BP como elemento resistivo



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao avaliar a Figura 36 nota-se que a ruptura ocorreu, em sua maioria, no *buckypaper*, evidenciando uma boa adesão entre elemento resistivo e matriz.

4.5 ANÁLISE DE *LAP SHEAR* E A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO À PLASMA

A média dos resultados obtidos com o ensaio de *lap shear* do material com e sem tratamento a plasma (puro) utilizando como elemento resistivo a malha metálica e o *buckypaper* estão apresentados na Tabela 10 e na Figura 37.

Tabela 10 - Resultado de LSS do material com e sem tratamento à plasma para as uniões soldadas com malha metálica e *buckypaper*.

	Sem tratamento à plasma (MPa)	Com tratamento à plasma (MPa)
Malha metálica	9,38 ± 2,69	14,33 ± 2,81
Buckypaper	3,05 ± 1,15	3,45 ± 0,89

Fonte: Elaborado pelo autor

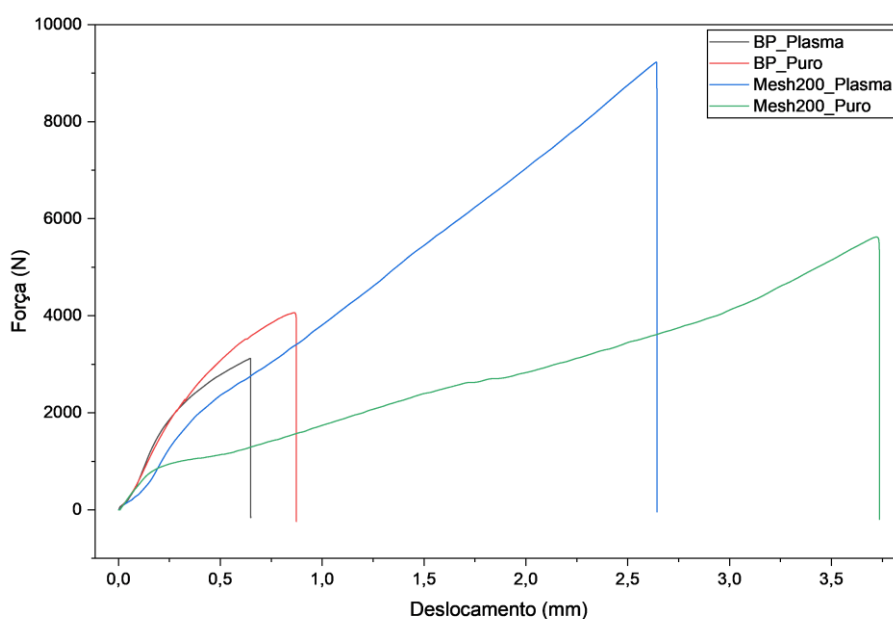
Com base nos resultados obtidos, observa-se que o tratamento à plasma aumentou em 53% as propriedades mecânicas da junta soldada com malha metálica. Ao aplicar o teste T de Student, obteve-se um valor-p de 0,02, inferior ao nível de significância de 0,05. Logo, rejeita-se a hipótese nula, indicando que o tratamento à plasma promoveu um aumento significativo na tensão de ruptura do material. Este resultado sugere uma melhora efetiva na adesão interfacial ou na integridade estrutural promovida pelo tratamento.

Por outro lado, a união soldada utilizando o BP como elemento resistivo, apesar do aumento observado na média absoluta, não houve um aumento significativo. Conforme evidenciado na aplicação do teste T de Student, onde foi observado o valor-p de 0,11, superior ao nível de significância estabelecido, indicando que não há evidências suficientes para afirmar que o tratamento a plasma alterou a resistência do material.

A superfície de fratura utilizando o BP como elemento resistivo, está evidenciada na Figura 36, onde nota-se um mecanismo de fratura predominantemente coesivo. Sendo assim, a influência do tratamento superficial à plasma não pôde ser avaliada, uma vez que a ruptura não ocorreu na interface de adesão entre o elemento resistivo e o laminado, mas sim no próprio material.

Já com o uso da malha metálica como elemento resistivo, a fratura ocorre na região de adesão, sendo possível notar a influência do tratamento à plasma na propriedade mecânica da junta soldada. Dessa forma, observa-se que a resistência mecânica das juntas soldadas com *buckypaper* é limitada pela resistência intrínseca do próprio material, não sendo diretamente beneficiada pelo tratamento superficial.

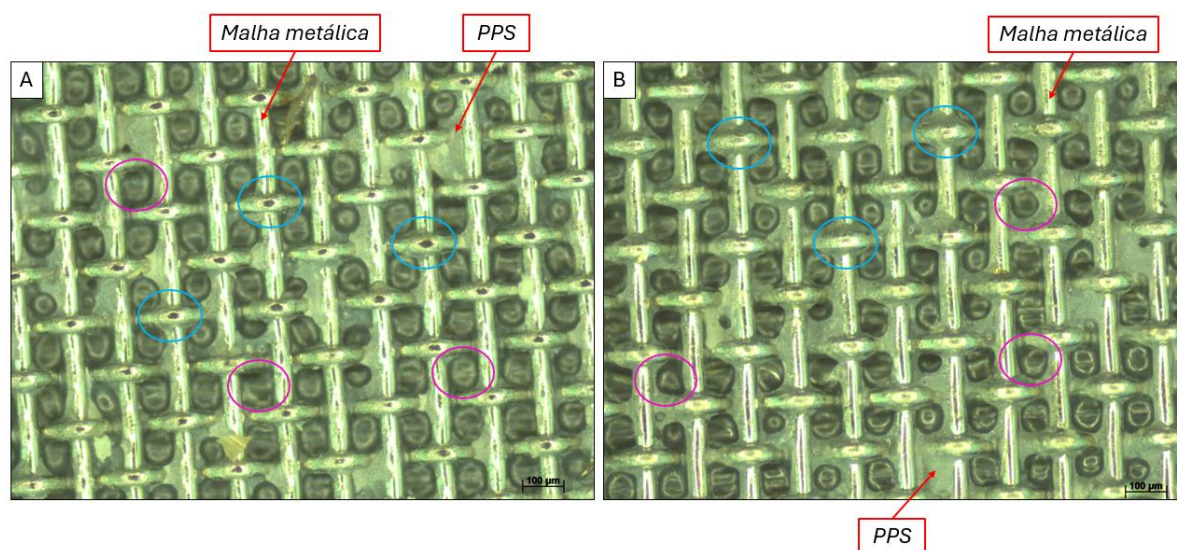
Figura 37 – Resultados obtidos a partir do ensaio de LSS para as juntas soldadas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Após os ensaios mecânicos foi realizada a análise fractográfica dos conjuntos estudados. No material soldado com malha metálica ocorreu uma fratura adesiva, sendo possível avaliar a influência do plasma na adesão entre o laminado e o elemento resistivo, conforme evidenciado na Figura 38.

Figura 38 - Região de fratura com malha metálica sem tratamento à plasma (A) e com tratamento à plasma (B)



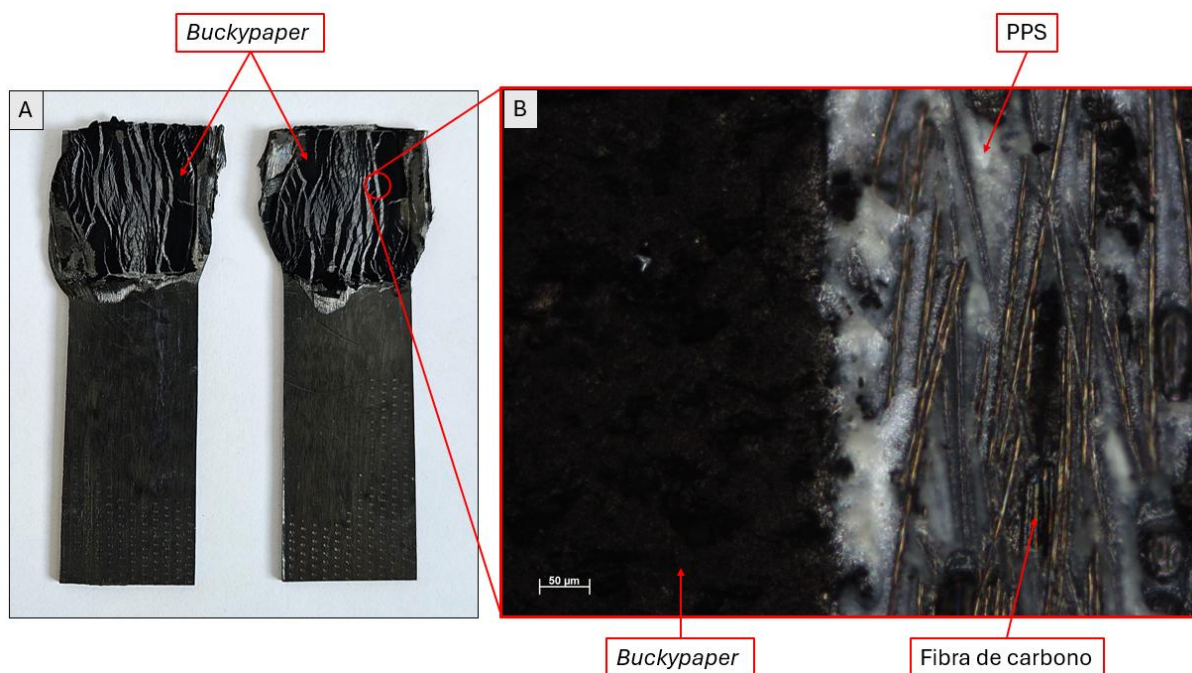
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 38A observa-se que determinadas regiões da malha metálica, destacados em azul, não apresentam recobrimento pela matriz polimérica, o que pode desfavorecer a adesão. Além disso, verifica-se que as lacunas da malha, evidenciadas em lilás, exibem preenchimento heterogêneo: algumas regiões apresentam elevada concentração da matriz, enquanto outras revelam baixa presença do polímero.

Ao submeter o material ao tratamento a plasma, nota-se uma mudança significativa da adesão entre a malha metálica e a matriz, conforme Figura 38B. Os trechos destacados em azul, evidenciam uma maior presença da matriz polimérica sobre a malha metálica. Por fim, as regiões destacadas em lilás indicam que as lacunas da malha metálica foram melhor preenchidas pelo polímero, favorecendo mecanismos de adesão, como o *interlocking*.

Já no material soldado com BP, a fratura ocorre, em sua maior parte, no elemento resistivo, conforme mostrado na Figura 39. Tal fato justifica o aumento não significativo da pressão de ruptura durante o ensaio de LSS, uma vez que o plasma não exerceu influência direta na maior parte da região da fratura.

Figura 39 – Corpo de prova do material soldado com BP (A) e região de fratura do material soldado com BP (B)

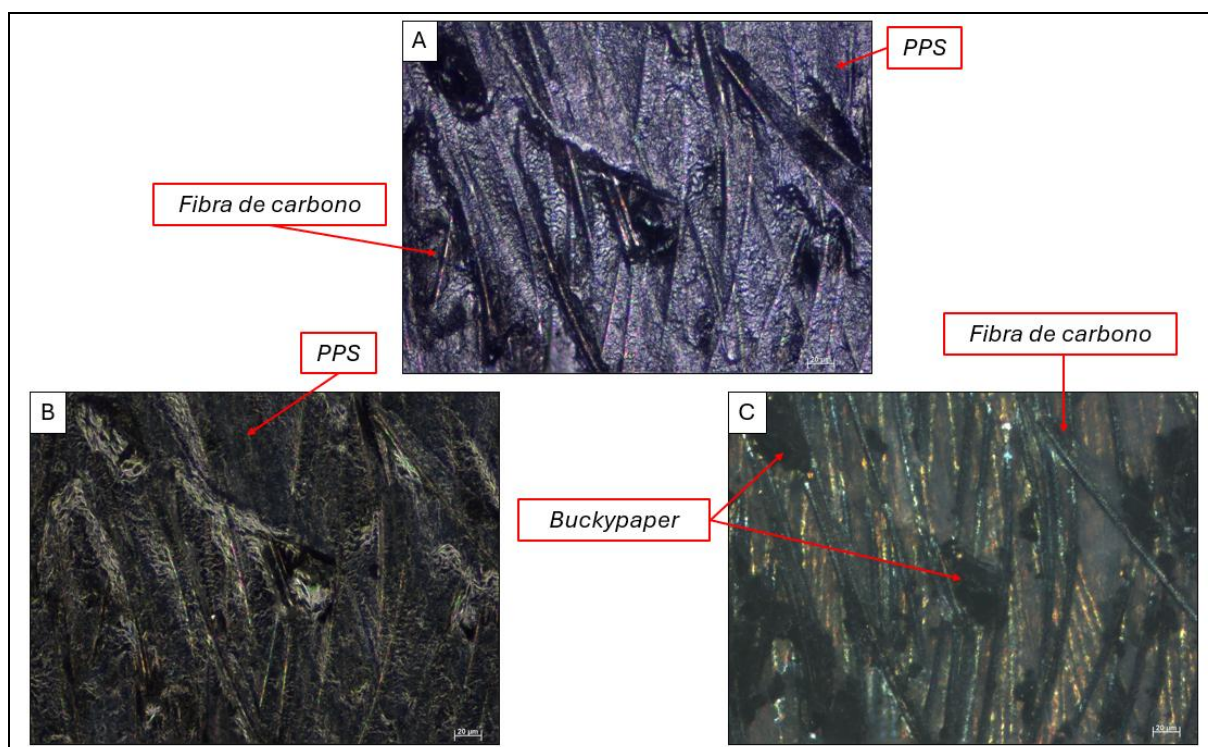


Fonte: Elaborado pelo autor

Vale ressaltar a região de fratura destacada na Figura 39B, que evidencia uma área onde a fratura ocorreu na região de interface. Nessa região, é possível observar a exposição das fibras de carbono unidirecionais, o que indica boa adesão entre matriz e *buckypaper*.

A comparação entre superfícies de fratura revelou que o material tratado a plasma apresenta um comportamento morfológico semelhante ao material sem tratamento. Em razão dessa semelhança, foi realizada uma investigação focada especificamente na região de fratura da interface. A Figura 40 apresenta uma sequência de micrografias da mesma região mencionada, obtidas com objetiva de 20x sob diferentes técnicas de iluminação. Inicialmente, utilizou-se o campo claro para contextualização e localização da área; em seguida, o campo escuro foi empregado para evidenciar a topografia e os mecanismos de fratura da matriz; por fim, aplicou-se a microscopia de contraste de interferência diferencial (DIC), o que permitiu uma análise detalhada da região de fratura.

Figura 40 - Análise da região de interface em campo claro (A), campo escuro (B) e DIC (C)



Fonte: Elaborado pelo autor

Os baixos valores de LSS obtidos refletem a natureza das ligações internas do material, predominantemente fracas (ligações de van der Waals) em comparação às ligações covalentes presentes na interface. Como consequência, a falha ocorre, preferencialmente, no interior do BP. A análise fractográfica reforça essa interpretação, uma vez que na Figura 40C notam-se as fibras de carbono unidirecionais e a presença do BP na região de fratura. Já na Figura 40B há a presença de estrias típicas de fratura dúctil em termoplásticos. Além disso, a superfície rugosa indica que a interface entre o elemento resistivo e a matriz manteve boa adesão, restringindo a falha à estrutura interna do compósito

4.6 ANÁLISE DE DMA E A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO À PLASMA

Os resultados obtidos a partir da análise de DMA dos materiais soldados com malha metálica, com e sem tratamento a plasma, encontram-se na Figura 41, enquanto os dados compilados estão apresentados na Tabela 9. Inicialmente, em ambas as condições, observa-se um comportamento típico de compósitos

termoplásticos: redução do módulo de armazenamento com o aumento da temperatura e aumento de $\tan \delta$ até a relaxação principal (transição vítrea), seguido de decréscimo após o pico

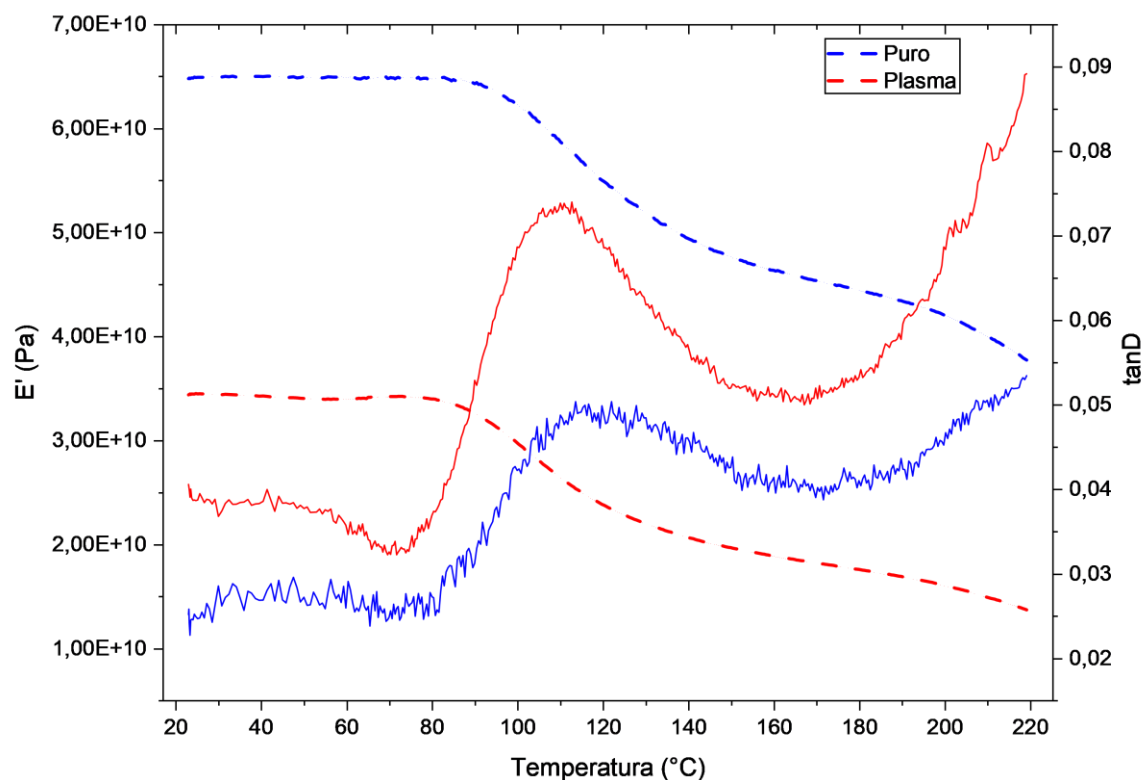
Na região vítrea (platô até aproximadamente 70 °C), o laminado soldado sem tratamento a plasma apresentou E' superior ao tratado (~53%), indicando maior rigidez efetiva nessa faixa. A partir de ~80 a 130 °C ocorre a transição associada à relaxação α do PPS (T_g), evidenciada pela queda acentuada de E' e pelo pico de $\tan \delta$. A T_g estimada pelo pico de $\tan \delta$ apresenta diferença pequena entre as condições (ordem de poucos °C, cerca de 5% de diferença), sugerindo que o plasma não altera de forma relevante a relaxação principal do segmento amorfo do PPS.

Esse comportamento está associado ao aumento da mobilidade molecular das cadeias poliméricas, em decorrência da maior energia fornecida com a elevação da temperatura. O acréscimo de energia térmica no sistema favorece a movimentação segmentar das cadeias, fenômeno relacionado ao movimento browniano nos polímeros. Assim, o comportamento viscoelástico torna-se mais pronunciado nessa faixa de temperatura, na qual grande parte da energia fornecida é dissipada, caracterizando a região de transição vítrea.

Ressalta-se que, o tratamento a plasma resulta em valores de $\tan \delta$ mais elevados (pico mais intenso e maior amortecimento em parte da faixa térmica), o que sugere maior dissipação de energia e possível aumento de contribuições interfaciais, como microatrito/ deslizamento, e/ou diferenças na qualidade/heterogeneidade da zona soldada (defeitos na região soldada; matriz menos cristalina na zona soldada ou ainda degradação superficial/oxidação/cisão por plasma reduzindo integridade local).

Com base no exposto, verifica-se que o tratamento a plasma, embora não influencie significativamente a temperatura de relaxação principal (transição vítrea) do do PPS, contribui de forma efetiva para o comportamento mais dissipativo na região solda/interface aumentando sua capacidade de amortecimento.

Figura 41 - Curva de DMA do material soldado com malha metálica como elemento resistivo com e sem tratamento à plasma



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11 - Resultados de DMA do material soldado com malha metálica como elemento resistivo

	PPS/FC com malha metálica sem tratamento à plasma (Puro)	PPS/FC com malha metálica com tratamento à plasma
E' (GPa)	6,47	3,44
E'' (GPa)	2,89	2,05
Tan δ	0,052	0,073
T _g (°C)	116	110

Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste estudo permitem concluir que o *buckypaper* de nanotubos de carbono como elemento resistivo no processo de soldagem por resistência, os resultados demonstram potencial promissor. A técnica possibilitou a realização da solda de forma mais eficiente, com redução de 62% no tempo de soldagem e diminuição de 74% na corrente aplicada em comparação à soldagem com malha metálica. Além disso, observou-se boa adesão entre o *buckypaper* e o compósito, uma vez que a fratura ocorreu no próprio *buckypaper* e não na região de interface entre os materiais. Entretanto, é importante destacar que o desempenho mecânico foi inferior devido à fragilidade do *buckypaper*, já que a ruptura se deu no elemento resistivo.

Além disso, o laminado produzido por moldagem por compressão a quente não apresentou a presença de vazios, conforme verificado por inspeção ultrassônica. Adicionalmente, o tratamento superficial realizado com plasma DBD em atmosfera padrão promoveu maior molhabilidade do compósito PPS/fibra de carbono, favorecendo a adesão entre o compósito e a malha metálica (mesh 200). Essa melhoria foi confirmada pelo ensaio de LSS, no qual o material tratado apresentou incremento de 53% na resistência a ruptura. A análise de DMA também evidenciou que a ativação dos grupos funcionais na superfície do compósito aumentou a mobilidade das cadeias poliméricas, resultando em uma redução da temperatura de transição vítrea de 5 °C.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um estudo aprofundado da fratura do compósito soldado, abrangendo outros ensaios mecânicos como o ensaio de resistência interlaminar (ILSS) e o ensaio viga dupla em balanço (DCB) com o objetivo de avaliar a eficiência dos parâmetros de soldagem
- Realizar a soldagem com filmes à base de grafeno e filme mistos, ou seja, à base de nanotubos de carbono e grafeno.
- Realizar um comparativo com outros métodos de soldagem, como a soldagem por indução.

REFERENCIAS

AFRIN, R.; SHAH, N. Room temperature gas sensors based on carboxyl and thiol functionalized carbon nanotubes buckypapers. **Diamond and Related Materials**, Amsterdam, v. 60, p. 42-49, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.10.010>. Acesso em: 12 fev. 2026.

AGEORGES, C. *et al.* Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Amsterdam, v. 32, n. 6, p. 839-857, 2001. Disponível em: www.elsevier.com/locate/composites. Acesso em: 13 fev. 2026.

ABRAHÃO, A. **Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/fffab4bd-71a1-4d2b-9c75-9701416ae12a>. Acesso em: 19 abr. 2025.

AVCI, R. *et al.* Effect of atmospheric plasma treatment and wet blast on adhesion characteristics of carbon fiber reinforced LM-PAEK thermoplastic composites. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 278, p. 111394, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111394>. Acesso em: 11 fev. 2025.

AYAZ, A. *et al.* Influence of air DBD plasma treatment on the shear and flexural strength of adhesively bonded glass fiber reinforced epoxy composite joints. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, Amsterdam, v. 17, n. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.100929>. Acesso em: 22 nov. 2025.

BALDAN, A. *et al.* Adhesion phenomena in bonded joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Londres, v. 38, p. 95-116, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.04.007>. Acesso em: 22 nov. 2025.

BARATTA, M. *et al.* Carbon nanotubes buckypapers: A new frontier in wastewater treatment technology. **Science of the Total Environment**, Londres, v. 924, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171578>. Acesso: 22 nov. 2025 .

BRASSARD, D.; DUBÉ, M.; TAVARES, J. Modelling resistance welding of thermoplastic composites with a nanocomposite heating element. **Journal of Composite Materials**, Londres, v. 55, n. 5, p. 625-639, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021998320957055> Acesso em: 12 dez. 2025.

BRASSARD, D.; DUBÉ, M.; TAVARES, J. Resistance welding of thermoplastic composites with a nanocomposite heating element. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 165, n. 5, p. 779-784, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.038>. Acesso em: 12 dez. 2025.

CANDOĞAN, K. *et al.* Authentication and quality assessment of meat products by fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy. **Food Analytical Methods**, Nova lorque, v. 13, p. 66-91, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09251-y>. Acesso em: 19 out. 2025.

CHEN, G. *et al.* Progress in research and applications of polyphenylene sulfide blends and composites with carbons. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 209, p. 108553, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108553>. Acesso em: 27 mar. 2025.

COOLS, P. *et al.* Surface Treatment of Polymers by Plasma. **Surface Modification of Polymers: Methods and Applications**, Norwalk, v. 2, p. 31-65, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9783527819249.ch2>. Acesso em: 22 ago. 2025.

CORAZZA, M. *et al.* Assessment of functionalized carbon nanotubes aiming at the development of preconcentration methods of metallic ions and determination by spectrometric and electroanalytical techniques. **Química Nova**, São Paulo, v. 43, n. 8, p. 1086-1103, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170583>. Acesso em: 4 mar. 2025.

DA COSTA, G. *et al.* Avaliação do ciclo térmico de conformação por compressão de peças em poli(sulfeto de fenileno) reforçado com fibras contínuas de carbono. **Polímeros**, São Carlos, v. 18, n. 1, p. 81-86, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282008000100016. Acesso em: 16 maio 2024.

DÍEZ-PASCUAL, A. *et al.* Poly (phenylene sulphide) and poly (ether ether ketone) composites reinforced with single-walled carbon nanotube buckypaper: II - Mechanical properties, electrical and thermal conductivity. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Oxford, v. 43, n. 6, p. 1007-1015, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.003>. Acesso em: 5 jun. 2025.

DIMITRAKELLIS, P. *et al.* Plasma Surface Modification of Epoxy Polymer in Air DBD and Gliding Arc. **Processes**, Basel, v. 10, n. 104, p. 1-13, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/1/104>. Acesso em: 7 ago. 2025.

DUBÉ, M. *et al.* Metal mesh heating element size effect in resistance welding of thermoplastic composites. **Journal of Composite Materials**, Londres, v. 46, n. 8, p. 911-919, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021998311412986>. Acesso em: 7 set. 2025.

GAO, Y. *et al.* Polyphenylene Sulfide-Based Membranes: Recent Progress and Future Perspectives. **Membranes**, Basel, v. 12, n. 10, p. 924-947, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/membranes12100924>. Acesso em: 14 ago. 2025.

GARG, A. *et al.* Estimation of carbon nanotubes and their applications as reinforcing composite materials—An engineering review. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 272, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114234>. Acesso em: 09 ago. 2025.

GHOBEIRA, R. *et al.* Chemical characterization of plasma-activated polymeric surfaces via XPS analyses: A review. **Surfaces and Interfaces**, Amsterdã, v. 31, p. 102087, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102087>. Acesso em: 12 ago. 2025.

GRACE, J.; GERENSER, L. Plasma treatment of polymers. **Journal of Dispersion Science and Technology**, Nova Iorque, v. 24, n. 3, p. 305-341, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1081/DIS-120021793>. Acesso em: 15 mar. 2025.

HERBST, M.; MACÊDO, M.; ROCCO, A. Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n. 6, p. 986-992, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000600025>. Acesso em: 12 ago. 2025.

HERAKOVICH, C. *et al.* Mechanics of composites: a historical review. **Mechanics Research Communications**, Oxford, v. 41, p. 1-20, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2012.01.006>. Acesso em: 16 jun. 2025.

HSISSOU, R. *et al.* Polymer composite materials: a comprehensive review. **Composite Structures**, Oxford, v. 262, p. 113640, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>. Acesso em: 5 set. 2025.

IQBAL, H.; BHOWMIK, S.; BENEDICTUS, R. Surface modification of high performance polymers by atmospheric pressure plasma and failure mechanism of adhesive bonded joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Londres, v. 30, n. 6, p. 418-424, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.02.007>. Acesso em: 9 ago. 2025.

KHAN, F.; KAUSAR, A.; SIDDIQ, M. A Review on properties and fabrication techniques of polymer/carbon nanotube composites and polymer intercalated buckypapers. **Polymer - Plastics Technology and Engineering**, Nova Iorque, v. 54, n. 14, p. 1524-1539, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1021486>. Acesso em: 9 ago. 2025.

KHAN, Z. *et al.* A review of graphene oxide, graphene buckypaper, and polymer/graphene composites: Properties and fabrication techniques. **Journal of Plastic Film & Sheeting**, Londres, v. 55, n. 6, p. 559-581, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1098693>. Acesso em: 15 jul. 2025.

KHOMUTOVA, U. *et al.* Nitrogen plasma treatment of composite materials based on polylactic acid and hydroxyapatite. **Polymers**, Basel, v. 16, n. 5, p. 627-640, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16050627>. Acesso em: 18 jul. 2025.

KLOCKE, F. *et al.* Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium- and nickel-based alloys for aero engine components. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 6, p. 368-372, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.040>. Acesso em: 17 out. 2025.

KONDOH, E. Influence of plasma surface treatment of polyimide on the microstructure of aluminum thin films. **Coatings**, Toronto, v. 12, n. 3, p. 334-343,

2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings12030334>. Acesso em: 17 out. 2025.

KUMAR A. *et al.* Polymer matrix composites: a state of art review. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 57, p. 2330-2333, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.592>. Acesso em: 19 out. 2025.

LAMBIASE, F. *et al.* A state-of-the-art review on advanced joining processes for metal-composite and metal-polymer hybrid structures. **Materials**, Basel, v. 14, n. 8, p. 1890-1914, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14081890>. Acesso em: 17 set. 2025.

LAPENA, M. H.; LOPES, C. M. A. Improvement of aerospace thermoplastic composite adhesion to coating with dielectric barrier discharge atmospheric pressure plasma surface treatment. **Plasma Processes and Polymers**, Weinheim, v. 20, n. 1, p. 1-14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppap.202200081>. Acesso em: 17 set. 2025.

LEVCHENKO, I. *et al.* Plasma and polymers: recent progress and trends. **Polymers**, Basel, v. 26, n. 13, p. 4091-4120, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules26134091> . Acesso em: 8 ago. 2025.

LI, X. *et al.* Enhanced adhesion between PEEK and stainless-steel mesh in resistance welding of CF/PEEK composites by various surface treatments. **High Performance Polymers**, Londres, v. 33, n. 8, p. 892-904, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/09540083211001115>. Acesso em: 10 out. 2025.

MAHESWARAN, R.; SHANMUGAVEL, B. P. A Critical Review of the Role of Carbon Nanotubes in the Progress of Next-Generation Electronic Applications. **Journal of Electronic Materials**, Nova Iorque, v. 51, p. 2786 - 2800, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09516-8>. Acesso em: 10 out. 2025.

PARVEEZ, B. *et al.* Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review. **Polymers**, Basel, v. 14, n. 22, p. 5007-5020, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14225007>. Acesso em: 7 abr. 2025.

PEREIRA, M. A. R. *et al.* Joining of fibre-reinforced thermoplastic polymer composites by friction stir welding—A Review. **Polymers**, Basel, v. 12, n. 5, p. 2744-2760, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12052744>. Acesso em: 8 abr. 2025.

PHAM, G. T. *et al.* Mechanical and electrical properties of polycarbonate nanotube buckypaper composite sheets. **Nanotechnology**, Bristol, v. 19, n. 32, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/32/325705>. Acesso em: 5 ago. 2025.

RAHATE, A. S.; NEMADE, K. R.; WAGHULEY, S. A. Polyphenylene sulfide (PPS): state of the art and applications. **Reviews in Chemical Engineering**, Berlim, v. 29, n. 6, p. 471-489, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/revce-2012-0021>. Acesso em: 8 set. 2025.

RANI, M. *et al.* Recent advancement and challenges in multifunctional carbon nanotube buckypaper and its composites for energy storage and conversion applications. **Journal of Energy Storage**, Amsterdam, v. 73, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109063>. Acesso em: 25 ago. 2025.

RATHINAVEL, S.; PRIYADHARSHINI, K.; PANDA, D. A review on carbon nanotube: an overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application. **Materials Science and Engineering: B**, Wilmington, v. 268, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115095>. Acesso em: 15 jul. 2025.

RAVICHANDRAN, B.; BALASUBRAMANIAN, M. Joining methods for Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites – a critical review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Oxford, v. 186, p. 108394, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108394>. Acesso em: 18 ago. 2025.

REIS, J. P.; DE MOURA, M.; SAMBORSKI, S. Thermoplastic composites and their promising applications in joining and repair composites structures: A review. **Materials**, Basel, v. 13, n. 24, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13245832>. Acesso em: 07 jul. 2025.

ROHART, V.; LABERGE LEBEL, L.; DUBÉ, M. Improved adhesion between stainless steel heating element and PPS polymer in resistance welding of thermoplastic composites. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 188, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107876>. Acesso em: 8 set. 2025.

ROJAS, J. A. *et al.* Optimization of Triton X-100 removal and ultrasound probe parameters in the preparation of multiwalled carbon nanotube buckypaper. **Materials and Design**, Dartford, v. 166, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107612>. Acesso em: 28 jun. 2025.

RUSSELLO, M. *et al.* Resistance welding of carbon fibre reinforced PEKK by means of CNT webs. **Journal of Composite Materials**, Londres, v. 57, n. 1, p. 79-94, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/00219983221138952>. Acesso em: 7 jan. 2026.

SALMORIA, G. V.; MARTINS, W. F. M.; FÚCIO, D. M. Tratamento da superfície de cateteres de poliamida 11 por plasma de oxigênio. **Polímeros**, São Carlos, v. 23, n. 4, p. 565-569, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/polimeros.2013.046>. Acesso em: 15 jul. 2025.

SCARSELLI, G. *et al.* Adhesion improvement of thermoplastics-based composites by atmospheric plasma and UV treatments. **Applied Composite Materials**, Dordrecht, v. 28, n. 1, p. 71-89, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10443-020-09854-y>. Acesso em: 15 jul. 2025.

SHOUKAT, R.; KHAN, M. I. Carbon nanotubes: a review on properties, synthesis methods and applications in micro and nanotechnology. **Microsystem Technologies**, Heidelberg, v. 27, p. 4183-4192, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00542-021-05211-6>. Acesso em: 4 ago. 2025.

SHVYDYUK, K. O. *et al.* Review of ceramic composites in aeronautics and aerospace: a multifunctional approach for TPS, TBC and DBD applications. **Ceramics**, Herts, v. 6, n. 1, p. 195-230, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ceramics6010012>. Acesso em: 21 dez. 2025.

SILVA, L. R. R. *et al.* Polymer joining techniques state of the art review. **Welding in the World**, Heidelberg, v. 65, p. 2023-2045, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01143-x>. Acesso em: 15 jan. 2026.

STANKIEWICZ, K. *et al.* Resistance welding of thermoplastic composites, including welding to thermosets and metals: a review. **Polymers**, Basel, v. 17, n. 19, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17194797>. Acesso em: 22 fev. 2025.

STAVROV, D.; BERSEE, H. E. N. Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Oxford, v. 36, n. 1, p. 39-54, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.06.030>. Acesso em: 1 fev. 2025.

SUN, Z. *et al.* Effect of polyphenylene sulphide particles and films on the properties of polyphenylene sulphide composites. **Materials**, Basel, v. 15, n. 21, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15217616>. Acesso em: 15 mar. 2025.

TETI, R. Machining of Composite Materials. **CIRP Annals**, Amsterdam, v. 51, n. 2, p. 611-634, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61703-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61703-X). Acesso em: 16 ago. 2025.

TOTLA, H. S. *et al.* Resistance welding analysis of thermoplastic composite structures in aeronautical applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 20, n. 4, p.1-13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01151-1>. Acesso em: 18 ago. 2025.

TRZEPIECIŃSKI, T. *et al.* New advances and future possibilities in forming technology of hybrid metal-polymer composites used in aerospace applications. **Materials**, Basel, v. 5, n. 8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs5080217>. Acesso em: 14 set. 2025.

UŞAK, A. C. **Plasma surface treatment of PPS/CF thermoplastic composite laminates to improve their film adhesive joining performance**. 2023. Dissertação (Mestrado em Metalurgia e Engenharia de Materiais) – Middle East Technical University, Middle East Technical University, Çankaya, 2023. Disponível em: <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/104832>. Acesso em: 23 out. 2025.

WANG, M. *et al.* High-sensitive flexural sensors for health monitoring of composite materials using embedded carbon nanotube (CNT) buckypaper. **Composite Structures**, Londres, v. 261, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113280>. Acesso em: 13 jul. 2025.

WANG, X. *et al.* Tensile strain sensing of buckypaper and buckypaper composites. **Materials and Design**, Dartford, v. 88, p. 414-419, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.035>. Acesso em: 14 abr. 2025.

XING, J.; XU, Z.; DENG, B. Enhanced oxidation resistance of polyphenylene sulfide composites based on montmorillonite modified by benzimidazolium salt. **Polymers**, Basel, v. 10, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym10010083>. Acesso em: 13 mar. 2025.

XIONG, X. *et al.* Resistance welding technology of fiber reinforced polymer composites: a review. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, Londres, v. 35, p. 1593-1619, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1856514>. Acesso em: 4 fev. 2025.

XU, Z. *et al.* Insights into the influence of welding energy on the ultrasonic welding of glass fibre-reinforced PPS composites. **Composites Science and Technology**, Londres, v. 256, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110767>. Acesso em: 29 out. 2025.

XU, X. *et al.* Material performance, manufacturing methods, and engineering applications in aviation of carbon fiber reinforced polymers: A comprehensive review. **Chinese Journal of Aeronautics**, Pequim, v. 209, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112899>. Acesso em: 22 ago. 2025.

YU, D. W. *et al.* Response Surface Methodology Optimization of Resistance Welding Process for Unidirectional Carbon Fiber/PPS Composites. **Materials**, Basel, v. 17, n. 10, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17102176>. Acesso em: 24 set. 2025.

YUDHANTO, A.; ALFANO, M.; LUBINEAU, G. Surface preparation strategies in secondary bonded thermoset-based composite materials: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Oxford, v. 147, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106443>. Acesso em: 15 set. 2025.

ZHAO, Y. *et al.* The Effect of Surface Treatment on the Resistance Welding Technology for Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites. **Applied Composite Materials**, Dordrecht, v. 31, n. 1, p. 201-221, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10165-1>. Acesso em: 19 out. 2025.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	GABRIEL DAMASCENO FERES 19/10/1996
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	Feres, Gabriel Damasceno Feres, GD.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/5264785286446230
ORCID	https://orcid.org/0000-0002-6892-642X
outro identificador	Não de aplica
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2018/2023	Formação acadêmica (Engenharia de Materiais, Bacharel) Universidade Estadual Paulista, UNESP, Guaratinguetá
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
FERES GD, <i>et al.</i> Study of the influence of carbon nanotubes, graphene, and hybrid buckypaper on the mechanical behavior of PAEK/carbon fiber composites. <i>Polymer Composites</i>, v. 46, n. 9, p. 8674-8685, jan. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1002/pc.29519. Acesso em: 22 abr. 2026. FERES GD, <i>et al.</i> A influência dos <i>buckypapers</i> de nanotubos de carbono, óxido de grafeno e híbrido no processo de soldagem por resistência em compósitos de PPS/fibras de carbono. <i>In: VIII WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA - ENGENHARIA E INOVAÇÃO</i>, 8., 2024, Guaratinguetá. Anais [livro eletrônico] Guaratinguetá: UNESP, p. 83. FERES GD, <i>et al.</i> Influence of plasma treatment in resistance welding of PPS/carbon fiber composite. <i>In: 18º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS (CBPOL) 18.</i>, 2025, Campos do Jordão. Anais [livro eletrônico] Campos do Jordão: Associação Brasileira de Polímeros, p. 161 – 165.	
PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES	
Bancas de trabalhos de conclusão	
Não se aplica	

Orientações
Não se aplica
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS
VIII WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA - ENGENHARIA E INOVAÇÃO 8., 2024, (Guaratinguetá). A influência dos <i>buckypapers</i> de nanotubos de carbono, óxido de grafeno e híbrido no processo de soldagem por resistência em compósitos de PPS/fibras de carbono. 2024 (Banner). IX WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA – INOVAÇÃO, SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. 9., 2025, (Guaratinguetá). A Influência Do Tratamento A Plasma No Processo De Soldagem Por Resistência De Um Compósito De PPS/Fibra De Carbono. 2025 (Banner). 18º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS (CBPOL) 18., 2025, (Campos do Jordão). Influence of plasma treatment in resistance welding of PPS/carbon fiber composite. 2025. (Banner)