

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE UMA
FRESADORA PARA REALIZAR SOLDAGEM POR
FRICÇÃO EM POLICARBONATO**

**DAVI GOMES DOS SANTOS
JOÃO VITOR DE SOUZA**

**Pindamonhangaba - SP
2025**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE UMA
FRESADORA PARA REALIZAR SOLDAGEM POR
FRICÇÃO EM POLICARBONATO**

**DAVI GOMES DOS SANTOS
JOÃO VITOR DE SOUZA**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Mecânica – Processo de
Soldagem.

Orientador: Prof. Dr Edilon de Oliveira
França

**Pindamonhangaba - SP
2025**

S237e

Santos, Davi Gomes dos.

Estudo da viabilidade do uso de uma fresadora para realizar soldagem por fricção em policarbonato / Davi Gomes dos Santos; João Vitor de Souza / FATEC Pindamonhangaba, 2025.
48f.: il.

Orientador Professor Dr. Edilon de Oliveira França
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba. 2025

1. Soldagem por fricção. 2. Policarbonato. 3. Ensaio de tração. 4. Fresadora. 5. FSW. I. Santos, Davi Gomes dos. II. Souza, João Vitor de. III. França, Edilon de Oliveira. IV. Título.

CDD 621

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**“ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE UMA
FRESADORA PARA REALIZAR SOLDAGEM POR
FRICÇÃO EM POLICARBONO”.**

**Davi Gomes dos Santos
João Vitor de Souza**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Mecânica: Processos de
Soldagem.

Comissão Examinadora



Orientador – Prof. Dr. Edilon de Oliveira França



Membro – Prof. Dr. Emerson Augusto Raymundo



Membro – Tecnólogo Rener Washington Mariano dos Santos

Pindamonhangaba, 12 de dezembro de 2025.

DEDICATÓRIA

DAVI GOMES

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pela força, sabedoria, proteção e saúde concedidas em cada etapa desta jornada.

Dedico também à minha família, pelo amor incondicional, pelo incentivo diário e pelo apoio constante, acreditando no meu potencial mesmo nos momentos em que os desafios pareciam impossíveis.

Com todo o meu carinho, dedico este trabalho à minha namorada, que esteve ao meu lado desde o começo, me incentivando a ser melhor todos os dias, acreditando em mim quando eu mesmo duvidava e sendo meu refúgio diante das dificuldades. Sua motivação, paciência, apoio e amor foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Por fim, dedico este trabalho a mim mesmo, pela dedicação, pela coragem de continuar mesmo quando o caminho parecia difícil e por nunca ter desistido dos meus objetivos.

JOÃO VITOR

Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e me ensinaram o valor da dedicação e do esforço.

À minha família, que esteve ao meu lado em cada etapa desta caminhada, oferecendo apoio, compreensão e amor incondicional.

Dedico também este trabalho ao meu orientador, Prof. Dr. Edilon de Oliveira França, pelo incentivo, paciência e confiança ao longo do desenvolvimento deste projeto. Sua orientação foi essencial para minha evolução acadêmica e profissional.

E, por fim, dedico a mim mesmo, pela persistência, por não desistir diante das dificuldades e por acreditar que cada desafio traz aprendizado e crescimento.

AGRADECIMENTO

DAVI GOMES

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e saúde para chegar até aqui.

Agradeço à minha família, pelo amor, incentivo e suporte em todos os momentos, acreditando no meu potencial mesmo quando os desafios pareciam difíceis.

Agradeço com muito carinho à minha namorada, pela parceria, amor, paciência e apoio constante. Sua motivação diária, sua confiança em mim e sua presença ao meu lado foram essenciais durante todo este percurso.

Agradeço também aos professores que contribuíram para a minha formação, em especial ao professor Edilon, pela orientação, paciência e dedicação ao longo deste Trabalho de Graduação.

Agradeço aos colegas que estiveram presentes nessa caminhada, pela parceria e pela troca de conhecimentos.

Por fim, agradeço à instituição de ensino e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

JOÃO VITOR

A Deus, por me dar força, saúde e sabedoria em todos os momentos desta jornada.

Aos meus pais, que me proporcionaram todas as condições necessárias para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigado pelo apoio, carinho, compreensão e por nunca deixarem que eu desistisse dos meus sonhos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edilon de Oliveira França, pelos ensinamentos, orientação segura e incentivo contínuo durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação e profissionalismo foram fundamentais para o sucesso deste estudo.

Aos colegas de classe e amigos, que tornaram esta caminhada mais leve, compartilhando conhecimentos, desafios e conquistas.

À Fatec Pindamonhangaba e ao corpo docente, pela formação de qualidade e pela oportunidade de aprendizado.

Meu sincero agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“O conhecimento é a riqueza que ninguém pode tirar, e o sucesso floresce nos pequenos esforços repetidos diariamente. Afinal, cada dia que passa nos desafia a sermos melhores do que ontem.”

Davi Gomes dos Santos

"A inovação nasce quando alguém decide fazer diferente aquilo que sempre foi feito da mesma forma."

João Vitor de Souza

SANTOS, Davi Gomes; SOUZA, João Vitor. **Estudo da Viabilidade do Uso de uma Fresadora para Realizar Soldagem por Fricção em Policarbonato**. 2025. 48p. Trabalho de Graduação (Curso de Mecânica- Processo de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a viabilidade da utilização de uma fresadora convencional para realizar soldagem por fricção (Friction Stir Welding – FSW) em policarbonato. A pesquisa envolveu a adaptação da fresadora, a fabricação de dispositivos de fixação e ferramentas específicas, além da execução de soldagens variando parâmetros como: velocidade de rotação 600, 700 e 800 RPM, avanço fixo de 45 mm/minutos e pressão axial de 03mm e 0,4mm. A qualidade das juntas foi avaliada por meio de ensaios: visual, rugosidade e tração, permitindo analisar a influência dos parâmetros na resistência mecânica das amostras. Os resultados indicaram que o processo é viável e capaz de produzir juntas com desempenho satisfatório, destacando-se o corpo de prova CP4, que apresentou a maior tensão máxima. As análises mostraram que condições inadequadas de calor prejudicam a integridade da solda, enquanto parâmetros equilibrados favorecem a consolidação da junta. O estudo demonstra que o FSW aplicado a polímeros é uma alternativa promissora, especialmente quando realizado em fresadora, representando uma solução econômica e tecnicamente eficaz.

Palavras-chave: Soldagem por fricção. Policarbonato. Fresadora. FSW. Ensaio de tração.

SANTOS, Davi Gomes; SOUZA, João Vitor. **Feasibility Study of Using a Milling Machine to Perform Friction Welding on Polycarbonate**. 2025. 48p. Undergraduate Thesis (Mechanical Engineering - Welding Process). Faculty of Technology of Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

ABSTRACT

This work presents a study on the feasibility of using a conventional milling machine to perform friction stir welding (FSW) on polycarbonate. The research involved adapting the milling machine, manufacturing specific clamping devices and tools, and performing welds varying parameters such as: rotation speed of 600, 700, and 800 RPM, fixed feed of 45 mm/minute, and axial pressure of 0.3 mm and 0.4 mm. The quality of the joints was evaluated through visual, roughness, and tensile tests, allowing analysis of the influence of the parameters on the mechanical resistance of the samples. The results indicated that the process is viable and capable of producing joints with satisfactory performance, highlighting specimen CP4, which presented the highest maximum stress. The analyses showed that inadequate heat conditions impair the integrity of the weld, while balanced parameters favor joint consolidation. The study demonstrates that FSW applied to polymers is a promising alternative, especially when performed on a milling machine, representing an economical and technically effective solution.

Keywords: Friction weld. Polycarbonate. Milling machine. FSW. Tensile test.

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 Propriedade Base do Policarbonato (PC) | 31 |
| Tabela 2 Parâmetro de Soldagem e identificação das Amostras | 33 |
| Tabela 3 Medição da rugosidade..... | 40 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 (a) Ferramenta do processo FSW; (b) ilustração esquemática do processo.FSW; (c) sistema de fixação das placas. | 19 |
| Figura 2 máquina para fresamento convencional | 26 |
| Figura 3 Fresadora modelo <i>Nardini – Diplomat</i> FVF2500 | 30 |
| Figura 4 Chapa de policarbonato e instrumentos de medição..... | 31 |
| Figura 5 Ferramenta utilizada no processo FSW | 32 |
| Figura 6 Montagem das chapas na fresadora durante o ensaio..... | 33 |
| Figura 7 Rugosímetro Marca Mitutoyo Modelo Surftest SJ-210 | 34 |
| Figura 8 Cortadeira metalográfica marca Teclago modelo CM80..... | 35 |
| Figura 9 Corpo de prova de tração | 35 |
| Figura 10 Máquina de tração Marca UMIC Modelo GR012 capacidade Máxima de 100kN | 36 |
| Figura 11 CP 1 condições: profundidade de 03mm, velocidade da ferramenta de 600 RPM e avanço de 45mm/min..... | 37 |
| Figura 12 CP 2 condições: profundidade de 03mm, velocidade da ferramenta de 700RPM e avanço de 45mm/min. | 38 |
| Figura 13 CP 3 condições: profundidade de 03mm, velocidade da ferramenta de 800RPM e avanço de 45mm/min. | 38 |
| Figura 14 CP 4 condições: profundidade de 04mm, velocidade da ferramenta de 700 RPM e avanço de 45mm/min..... | 39 |
| Figura 15 CP 5 condições: profundidade de 04mm, velocidade da ferramenta de 600 RPM e avanço de 45mm/min..... | 39 |
| Figura 16 CP 6 condições: profundidade de 04mm, velocidade da ferramenta de 800RPM e avanço de 45mm/min. | 40 |
| Figura 17 rugosidade superficial (Ra e Rz) entre os corpos de prova. | 41 |
| Figura 18 Ensaio de tração todas as condições estudadas..... | 42 |
| Figura 19 corpo de provas com valores de tração mais baixo..... | 43 |
| Figura 20 corpo de provas com valores de tração mais alto | 44 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 PROBLEMA..... | 16 |
| 1.2 OBJETIVOS | 16 |
| 1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> | 16 |
| 1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> | 16 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 17 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 2.1 SOLDAGEM POR FRICÇÃO | 18 |
| 2.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO | 21 |
| 2.1.2 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS..... | 22 |
| 2.2 POLICARBONATO E SUAS PROPRIEDADES..... | 23 |
| 2.2.1 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO POLICARBONATO | 24 |
| 2.2.2 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE UNIÃO | 25 |
| 2.3 USO DE FRESADORAS EM PROCESSOS NÃO CONVENCIONAIS | 25 |
| 2.3.1 VANTAGENS DA ADAPTAÇÃO | 27 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| 3.1 ENSAIO VISUAL..... | 33 |
| 3.2 ENSAIO DE RUGOSIDADE | 34 |
| 3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO | 34 |
| 4. RESULTADO E DISCUSÃO 4.1 ENSAIO VISUAL DAS AMOSTRA | 37 |
| 4.2 ENSAIO DE RUGOSIDADE | 40 |
| 4.3 DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO | 41 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 46 |
| REFERÊNCIAS..... | 47 |

1 INTRODUÇÃO

A soldagem por fricção no estado sólido tem se destacado como uma alternativa eficiente à soldagem por fusão, especialmente na união de materiais termossensíveis. Entre os processos mais relevantes está o Friction Stir Welding (FSW), desenvolvido em 1991 pelo The Welding Institute (TWI), no Reino Unido. Esse método utiliza uma ferramenta não consumível que gira em contato com as superfícies dos materiais, gerando calor por atrito e promovendo a união sem fusão (THOMAS; DOLBY, 2002).

O FSW apresenta vantagens como menor distorção térmica, redução de defeitos, ausência de material de adição e viabilidade de automação (FREITAS, 2017). Inicialmente aplicado em metais, sua aplicação vem sendo expandida para polímeros, como o policarbonato, que possui propriedades favoráveis à soldagem por fricção (RODRIGUES, 2017). Essa expansão abre caminhos para inovações na indústria de plásticos de engenharia e representa um avanço no uso de processos sustentáveis. Além disso, o controle preciso dos parâmetros operacionais torna o FSW interessante para materiais com baixa resistência térmica (BARBOSA, 2021).

O policarbonato é um termoplástico de engenharia com alta resistência ao impacto, estabilidade térmica e transparência, usado amplamente nos setores automotivo, eletrônico e médico (MANO, 2000). Métodos convencionais de união, como colagem e fixadores, apresentam limitações mecânicas e estéticas, além de implicarem custos adicionais e maior tempo de produção. Por essa razão, a busca por técnicas de união mais limpas, resistentes e econômicas vem sendo intensificada (RODRIGUES, 2017; GIRARDI, 2015).

Nesse cenário, adaptar fresadoras para o processo FSW em polímeros surge como alternativa de baixo custo e alta aplicabilidade. Essa abordagem já demonstrou bons resultados em testes acadêmicos e industriais de pequeno porte, com potencial de replicação em diferentes contextos produtivos. A

simplicidade operacional das fresadoras e sua ampla disponibilidade tornam essa proposta tecnicamente viável (FREITAS, 2017; BARBOSA, 2021).

Além disso, essa adaptação favorece instituições de ensino e pequenas empresas, permitindo experimentação com infraestrutura acessível. Isso impulsiona o aprendizado técnico, reduz a dependência de equipamentos especializados e incentiva o desenvolvimento de soluções práticas, sustentáveis e alinhadas à realidade da indústria nacional (FREITAS, 2017; BARBOSA, 2021).

1.1 PROBLEMA

Como adaptar uma fresadora convencional para realizar a soldagem por fricção em policarbonato, garantindo juntas de boa qualidade e analisando a viabilidade técnica desse processo?

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a viabilidade da aplicação do processo FSW em policarbonato utilizando uma fresadora convencional, considerando os parâmetros de soldagem e qualidade das juntas obtidas.

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade da utilização de uma fresadora convencional para executar soldagem por fricção (FSW) em policarbonato, considerando os parâmetros do processo e a qualidade das juntas produzidas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar os fundamentos da soldagem por fricção e sua aplicação em materiais poliméricos;
- Analisar as propriedades térmicas e mecânicas do policarbonato que influenciam na soldagem;
- Testar variáveis de processo como rotação da ferramenta, velocidade de avanço e força axial;

- Avaliar a qualidade da solda por análise visual e parâmetros de conformidade;
- Verificar a viabilidade do uso de fresadora como equipamento alternativo para FSW.

1.3 JUSTIFICATIVA

O uso de métodos convencionais para união de polímeros, como adesivos e fixadores mecânicos, apresenta desvantagens significativas. Os adesivos podem comprometer a resistência estrutural da peça, enquanto os fixadores exigem furos que reduzem a área útil do componente (RODRIGUES, 2017). Além disso, processos como soldagem por ultrassom podem gerar zonas termicamente afetadas extensas e exigem equipamentos especializados (GIRARDI, 2015).

A soldagem por fricção, em especial o FSW, surge como uma alternativa eficiente, pois permite a união de materiais sem fusão, com boa integridade mecânica e sem emissão de vapores ou resíduos (THOMAS; DOLBY, 2002). O processo é considerado sustentável, pois não utiliza materiais de adição e apresenta menor consumo energético em comparação com métodos tradicionais (FREITAS, 2017).

A possibilidade de adaptar equipamentos convencionais, como fresadoras, para executar o FSW em materiais poliméricos torna a tecnologia acessível a instituições de ensino e pequenas empresas. Estudos já demonstraram a viabilidade dessa adaptação, com bons resultados em termos de qualidade de junta e controle de parâmetros (BARBOSA, 2021). Dessa forma, este trabalho busca contribuir para o avanço de soluções acessíveis e sustentáveis na soldagem de polímeros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma análise dos principais conceitos relacionados à soldagem por fricção, às propriedades do policarbonato e à viabilidade da utilização de fresadoras como alternativa para a realização deste tipo de soldagem em materiais poliméricos. O objetivo é fornecer uma base teórica que sustente o desenvolvimento experimental proposto neste trabalho.

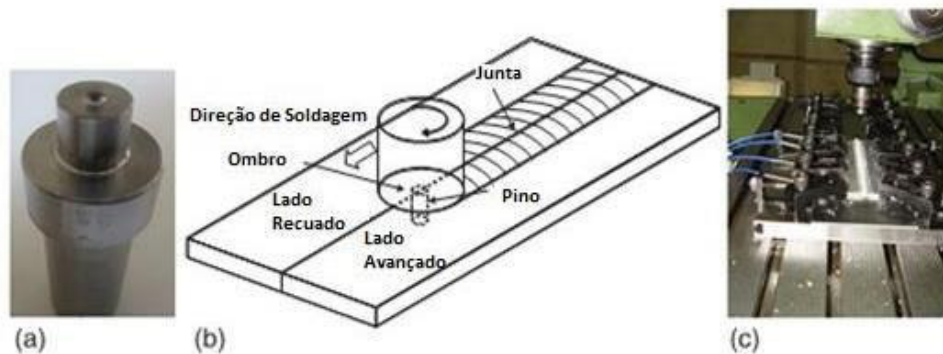
2.1 SOLDAGEM POR FRICÇÃO

A soldagem por fricção no estado sólido é uma técnica que realiza a união de materiais sem fusão completa, utilizando calor gerado por atrito e deformação plástica. Dentre os processos mais conhecidos, destaca-se o Friction Stir Welding (FSW), desenvolvido em 1991 pelo The Welding Institute (TWI), no Reino Unido. Sua criação representou uma inovação para a soldagem de ligas de alumínio e materiais sensíveis ao calor, inicialmente no setor aeronáutico (THOMAS; DOLBY, 2002).

O FSW emprega uma ferramenta composta por pino e ombro, ambos não consumíveis, que rotaciona em alta velocidade e avança linearmente sobre a junta a ser unida. O atrito entre o ombro da ferramenta e a superfície do material gera calor suficiente para plastificar o material ao redor do pino. Esse material plastificado se mistura ao longo da linha de solda, promovendo a coalescência dos metais em estado sólido (MISHRA; MAHONEY, 2007).

O calor gerado pela fricção faz com que o material amoleça, e permita que a ferramenta percorra a linha da junta, na figura 2 está representado a ferramenta utilizada no processo FSW (a), o esquema do processo FSW (b) e um sistema defixação das placas (c) (RODRIGUES, 2017).

Figura 1 (a) Ferramenta do processo FSW; (b) ilustração esquemática do processo.FSW; (c) sistema de fixação das placas.



Fonte: Lopes (2024).

O processo se diferencia por eliminar a formação da poça de fusão, comum nos processos de soldagem tradicionais, o que reduz a ocorrência de defeitos como trincas a quente, porosidades e contrações irregulares. Além disso, proporciona melhor acabamento superficial, menor distorção térmica e aumento na resistência mecânica da junta soldada, tornando-o ideal para aplicações estruturais (FREITAS, 2017).

As zonas típicas formadas durante o processo FSW incluem a Zona Termicamente Afetada (ZTA), a Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA) e a Zona de Núpcia (ZN). A ZTA é caracterizada pela influência do calor sem deformação, enquanto a ZTMA sofre deformação plástica moderada. A ZN, localizada no centro da junta, é a região onde o material foi mais intensamente plastificado e misturado, resultando em uma microestrutura refinada (BARBOSA, 2021).

Entre as aplicações industriais do FSW, destacam-se as áreas aeroespacial, automotiva, naval e ferroviária, onde a alta integridade das juntas é exigida. O processo é amplamente utilizado para unir painéis de alumínio em estruturas de fuselagem, compartimentos de carga e trilhos de trens de alta velocidade. Também é empregado na fabricação de radiadores, tanques de combustível e sistemas de dissipação térmica (ARAUJO; SCHNEIDER, 2023).

Outro ponto positivo do FSW é sua capacidade de unir materiais dissimilares, como alumínio com cobre ou alumínio com aço galvanizado, o que seria inviável com processos de soldagem por fusão. Essa característica tem sido explorada para a produção de componentes híbridos com vantagens térmicas e mecânicas complementares, além de permitir economia de material e leveza estrutural (GIRARDI, 2015).

Nos últimos anos, o processo FSW passou a ser estudado também para aplicação em polímeros, especialmente termoplásticos de engenharia. Esses materiais apresentam desafios adicionais, como a baixa condutividade térmica, maior sensibilidade à degradação térmica e ausência de ponto de fusão definido, o que exige ajustes específicos no processo, como controle mais rigoroso da rotação, avanço e pressão axial (RODRIGUES, 2017).

Em polímeros como o policarbonato, o controle térmico é essencial para evitar que a temperatura ultrapasse o ponto de transição vítrea e atinja níveis de degradação. Para isso, modificações na geometria da ferramenta são adotadas, como uso de pinos com roscas, canais helicoidais e extremidades arredondadas, que permitem melhor fluxo do material e menor geração localizada de calor (BARBOSA, 2021).

Estudos práticos apontam que é possível alcançar juntas com boa aparência superficial e resistência satisfatória mesmo sem a utilização de material de adição ou aquecimento externo. Resultados preliminares indicam que, quando bem ajustado, o FSW em policarbonato é capaz de manter boa parte da resistência mecânica original do material, tornando-se uma solução promissora para diversas aplicações (RODRIGUES, 2017).

Por fim, destaca-se que o processo FSW, ao ser adaptado para polímeros, amplia significativamente seu campo de aplicação. Sua natureza limpa, controlável e automatizável o torna atraente não apenas para indústrias de alta tecnologia, mas também para instituições acadêmicas e pequenas empresas que buscam inovação acessível, sustentável e tecnicamente eficiente (FREITAS, 2017).

2.1.1 Princípio de Funcionamento

O processo Friction Stir Welding (FSW) opera por meio de uma ferramenta não consumível composta por duas partes principais: o pino (ou pino de agitação) e o ombro. O pino penetra na junta entre duas peças posicionadas lado a lado, enquanto o ombro permanece em contato com a superfície dos materiais. A ferramenta gira em alta rotação e se desloca ao longo da linha de solda, gerando calor pelo atrito e pela deformação plástica. Esse calor amolece o material sem atingir seu ponto de fusão, possibilitando a união dos componentes no estado sólido (THOMAS; DOLBY, 2002).

Durante o processo, o material plastificado é movimentado pela ação mecânica da ferramenta, o que promove a mistura na região de junta. O pino atua como elemento de agitação, transportando o material de uma lateral para outra da linha de solda, enquanto o ombro fornece contenção e calor adicional. A pressão axial aplicada à ferramenta ajuda a consolidar a solda e eliminar espaços ou falhas internas. Após a passagem da ferramenta, o material se resfria, formando uma junta sólida e contínua (MISHRA; MAHONEY, 2007).

A eficácia do processo depende diretamente de uma série de parâmetros, como rotação da ferramenta, velocidade de avanço, força axial, inclinação da ferramenta e geometria do pino. A combinação adequada desses fatores garante a geração de calor suficiente, o fluxo ideal do material plastificado e a formação de uma junta livre de defeitos. Valores inadequados desses parâmetros podem resultar em falhas, como falta de penetração, porosidades ou fragilidade na região da solda (GIRARDI, 2015).

No caso de materiais poliméricos, como o policarbonato, esses parâmetros precisam ser cuidadosamente ajustados. Devido à menor resistência térmica dos polímeros em relação aos metais, o controle da temperatura é ainda mais sensível. A rotação excessiva pode provocar degradação térmica, bolhas ou manchas superficiais, enquanto uma velocidade muito baixa pode causar queima

do material e falhas na união. Por isso, o desenvolvimento de ferramentas específicas e a otimização dos parâmetros são etapas fundamentais na adaptação do FSW para polímeros (BARBOSA, 2021).

Além do controle dos parâmetros, a fixação das peças a serem unidas é outro fator crítico para o sucesso do processo. O FSW exige que as peças estejam rigidamente fixadas para evitar deslocamentos durante a soldagem, o que comprometeria a qualidade da junta. Dispositivos de fixação robustos, com apoio inferior e superior, são geralmente utilizados para garantir estabilidade, principalmente quando se trabalha com materiais mais sensíveis à deformação, como os polímeros (RODRIGUES, 2017).

2.1.2 Aplicações Industriais

Desde sua criação, o processo Friction Stir Welding (FSW) tem sido amplamente adotado em setores industriais que exigem elevada resistência mecânica e qualidade estrutural nas juntas soldadas. A indústria aeroespacial foi a primeira a utilizar essa técnica em grande escala, principalmente para a união de painéis de alumínio em fuselagens e estruturas pressurizadas, onde defeitos como porosidades e trincas são inaceitáveis (THOMAS; DOLBY, 2002).

A indústria automotiva também passou a incorporar o FSW em seus processos de fabricação, especialmente em componentes estruturais leves, como chassis, portas e tampas de motor. Com a crescente demanda por veículos mais leves e eficientes, o uso de ligas de alumínio vem se tornando comum, e o FSW apresenta-se como solução ideal para unir essas peças com alta resistência e baixo impacto térmico, além de permitir maior controle dimensional e menor retrabalho (ARAUJO; SCHNEIDER, 2023).

Outro setor beneficiado pela aplicação do FSW é a indústria naval. A técnica é utilizada na construção de cascos de navios, painéis estruturais e compartimentos de carga, proporcionando maior integridade mecânica e menor suscetibilidade à corrosão, já que o processo preserva a microestrutura original do material ao evitar fusão. Além disso, a soldagem por fricção gera menor

distorção térmica, o que facilita o alinhamento e a montagem de grandes estruturas (FREITAS, 2017).

A ferrovia também adotou o processo FSW em trilhos e carrocerias de trens de alta velocidade, garantindo a integridade estrutural com ganho de desempenho mecânico e eficiência no processo produtivo. Aplicações em tanques de combustível, dissipadores de calor e até caixas de bateria em veículos elétricos vêm crescendo nos últimos anos. A possibilidade de automação do processo e sua elevada repetibilidade contribuem para sua aceitação em linhas de produção contínua (GIRARDI, 2015).

Nos últimos anos, o FSW vem sendo adaptado para a soldagem de materiais não metálicos, como os polímeros. Apesar dos desafios térmicos e mecânicos envolvidos, pesquisas indicam que o processo é viável para termoplásticos de engenharia, como o policarbonato e o polipropileno, desde que parâmetros específicos sejam controlados. Isso amplia consideravelmente o campo de aplicação do FSW, especialmente em setores que buscam soluções sustentáveis, limpas e com menor geração de resíduos (BARBOSA, 2021).

Além de aplicações industriais em grande escala, o FSW vem sendo cada vez mais estudado em ambientes acadêmicos e institucionais, por meio de adaptações em máquinas-ferramenta convencionais, como fresadoras. Essa abordagem tem permitido que centros de pesquisa e faculdades explorem o processo com baixo custo, contribuindo para a difusão tecnológica e a capacitação de profissionais na área de manufatura avançada (RODRIGUES, 2017).

2.2 POLICARBONATO E SUAS PROPRIEDADES

O policarbonato (PC) é um termoplástico de engenharia conhecido por suas propriedades mecânicas superiores, estabilidade térmica e alta transparência. Essas características o tornam um material estratégico em setores como segurança, transporte, eletrônica e saúde, onde resistência ao impacto e leveza são fundamentais. Estruturalmente, o PC é composto por cadeias de

grupos carbonato interligadas por anéis aromáticos, o que lhe garante rigidez e capacidade de absorção de energia (MANO, 2000).

Além de sua resistência mecânica, o policarbonato apresenta excelente estabilidade dimensional e resistência à propagação de trincas, mesmo sob variações térmicas. O fato de ser um polímero amorfo contribui para sua transparência e para a uniformidade de suas propriedades ópticas. Por essas razões, o PC é utilizado em aplicações críticas como painéis blindados, visores industriais, carenagens e dispositivos médicos, onde o desempenho do material não pode ser comprometido (RODRIGUES, 2017).

2.2.1 Comportamento Térmico do Policarbonato

A aplicação do FSW ao policarbonato exige conhecimento preciso de seu comportamento térmico. Um dos principais parâmetros é sua temperatura de transição vítrea (T_g), que gira em torno de 147 °C. Acima dessa temperatura, o material entra em estado borrachoso, tornando-se maleável sem atingir fusão, o que é ideal para processos de união no estado sólido como o FSW (BARBOSA, 2021).

Por outro lado, o PC começa a sofrer degradação térmica em temperaturas superiores a 280 °C. Isso significa que, embora o material possa ser plastificado sem fundir, a margem de segurança térmica é estreita. Portanto, o processo FSW deve ser cuidadosamente controlado para gerar calor suficiente, sem ultrapassar o limite que comprometeria a integridade do polímero (FREITAS, 2017).

A geometria da ferramenta de FSW é outro fator crucial. Pinos com canais helicoidais ou extremidades arredondadas são preferíveis para materiais poliméricos, pois facilitam o fluxo do material plastificado e distribuem o calor de forma mais equilibrada. Além disso, o uso de ferramentas fabricadas em materiais com baixa condutividade térmica ajuda a evitar superaquecimento localizado (GIRARDI, 2015).

Quando bem controlado, o processo de FSW no policarbonato pode gerar juntas com aparência uniforme, sem queima superficial e com boa resistência

mecânica. Ensaio realizado por Rodrigues (2017) demonstram que, com os parâmetros corretos, é possível obter juntas com até 80% da resistência do material original. Esses resultados confirmam o potencial do FSW como método eficiente para unir esse tipo de polímero (RODRIGUES, 2017).

2.2.2 Métodos Convencionais de União

Tradicionalmente, o policarbonato é unido por técnicas como adesivagem, encaixes mecânicos e soldagem por ultrassom ou resistência elétrica. Cada um desses métodos possui vantagens, mas também limitações importantes. A colagem, por exemplo, requer preparo de superfície, tempo de cura e pode afetar a transparência da peça. Além disso, a aderência depende de variáveis ambientais e da composição exata do adesivo (GIRARDI, 2015).

Fixadores mecânicos, como parafusos ou rebites, comprometem a área útil do material, pois exigem perfuração. Isso gera concentrações de tensão e diminui a resistência global da peça. Além disso, o uso desses fixadores pode interferir na estética do produto final, o que é uma limitação em aplicações onde o aspecto visual é relevante (RODRIGUES, 2017).

A soldagem por ultrassom, embora eficiente em muitos casos, exige alto investimento em equipamento e conhecimento técnico para o controle da energia aplicada. A soldagem por resistência elétrica também é restrita a peças com geometria simples e demanda contato direto com eletrodos, o que pode deixar marcas na superfície da peça (BARBOSA, 2021).

Em contraste com essas técnicas, o FSW apresenta diversas vantagens: é um processo limpo, automatizável, com boa repetibilidade e que não requer materiais de adição nem superfícies perfeitamente preparadas. Além disso, a possibilidade de adaptar fresadoras para executar o processo em laboratórios ou oficinas torna a tecnologia acessível para pesquisa e aplicação em pequenas produções (FREITAS, 2017).

2.3 USO DE FRESADORAS EM PROCESSOS NÃO CONVENCIONAIS

As fresadoras são máquinas-ferramenta amplamente utilizadas na indústria para operações de usinagem, como fresamento, perfuração e rasgo de canais. Sua estrutura robusta e capacidade de movimentação em múltiplos eixos tornam esses equipamentos extremamente versáteis. Nos últimos anos, pesquisadores e técnicos passaram a explorar o uso de fresadoras para outras aplicações, entre elas, processos de união como o Friction Stir Welding (FSW), especialmente em contextos acadêmicos e industriais de pequeno porte (FREITAS, 2017).

Figura 2 máquina para fresamento convencional



FONTE: Becker, (2017).

A ideia de adaptar uma fresadora para executar soldagem por fricção baseia-se na similaridade entre os esforços mecânicos envolvidos no processo de usinagem e no FSW. A rotação da ferramenta, o avanço controlado e a força de penetração exigidos no FSW são compatíveis com os movimentos e capacidades

das fresadoras convencionais. Assim, a adaptação consiste basicamente na substituição da ferramenta de corte por uma ferramenta de FSW e na criação de dispositivos auxiliares para fixação das peças e controle térmico (BARBOSA, 2021).

Estudos demonstram que essa adaptação é viável e pode gerar resultados satisfatórios, especialmente quando se trabalha com materiais de baixa dureza, como os polímeros. Além disso, a possibilidade de utilizar equipamentos já existentes em oficinas mecânicas, laboratórios de ensino e pequenas indústrias representa uma solução de baixo custo e alta aplicabilidade para o desenvolvimento de novas técnicas de união (GIRARDI, 2015).

O uso de fresadoras em processos não convencionais também estimula o aprendizado prático em ambientes acadêmicos. Ao adaptar máquinas já disponíveis em escolas técnicas e universidades, os alunos têm a oportunidade de estudar o processo FSW com recursos acessíveis. Essa abordagem promove o desenvolvimento de competências em manufatura avançada e estimula a pesquisa aplicada, sem a necessidade de investir em centros de usinagem especializados (FREITAS, 2017).

2.3.1 Vantagens da Adaptação

Uma das principais vantagens na adaptação de fresadoras para FSW é a possibilidade de controlar com precisão os parâmetros do processo, como rotação da ferramenta, velocidade de avanço e profundidade de penetração. A familiaridade dos operadores com a interface da fresadora facilita a operação e o treinamento técnico. Além disso, a estrutura rígida da máquina garante estabilidade durante a soldagem, reduzindo a ocorrência de vibrações ou desalinhamentos na junta (BARBOSA, 2021).

A reutilização de máquinas-ferramenta já disponíveis nas instituições de ensino e empresas também representa economia significativa, já que evita a necessidade de aquisição de equipamentos de soldagem específicos, que costumam ter alto custo. Isso viabiliza o desenvolvimento de protótipos, ensaios

experimentais e projetos de pesquisa mesmo em ambientes com orçamento limitado (RODRIGUES, 2017).

A flexibilidade da fresadora também permite a execução de FSW em diferentes espessuras e geometrias de peças, desde que sejam projetados dispositivos de fixação apropriados. Essa adaptabilidade amplia a gama de aplicações possíveis e permite que o processo seja testado em materiais variados, como alumínio, ligas leves e termoplásticos, incluindo o policarbonato (GIRARDI, 2015).

2.3.2 Desafios Técnicos

Apesar das vantagens, a adaptação de fresadoras para FSW apresenta alguns desafios técnicos importantes. Um dos principais é o controle da geração de calor. Ao contrário dos centros de usinagem modernos, muitas fresadoras convencionais não possuem sistemas integrados de monitoramento de temperatura, o que exige o uso de sensores externos ou controle indireto por meio dos parâmetros de processo (FREITAS, 2017).

Outro desafio é a fixação adequada do material, especialmente quando se trabalha com polímeros, que são mais sensíveis à deformação térmica. O uso de dispositivos de fixação mal projetados pode levar à fuga de material plastificado, desalinhamento da junta ou instabilidade durante o processo. Por isso, é necessário projetar suportes robustos e compatíveis com a geometria das peças a serem unidas (BARBOSA, 2021).

A precisão na regulagem da inclinação da ferramenta e na profundidade de penetração também é fundamental. Pequenas variações nesses parâmetros podem comprometer a qualidade da junta, provocando falta de penetração ou sobreaquecimento localizado. Além disso, como a fresadora não foi originalmente projetada para realizar soldagem, o desgaste de seus componentes pode ser acelerado, exigindo manutenção preventiva mais frequente (RODRIGUES, 2017).

Por fim, é importante destacar que a repetibilidade do processo pode ser limitada em fresadoras mais antigas ou com folgas excessivas nos eixos. A

ausência de sistemas automatizados de controle pode dificultar a padronização de parâmetros entre diferentes ciclos de soldagem, o que afeta diretamente a qualidade final das juntas obtidas (GIRARDI, 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

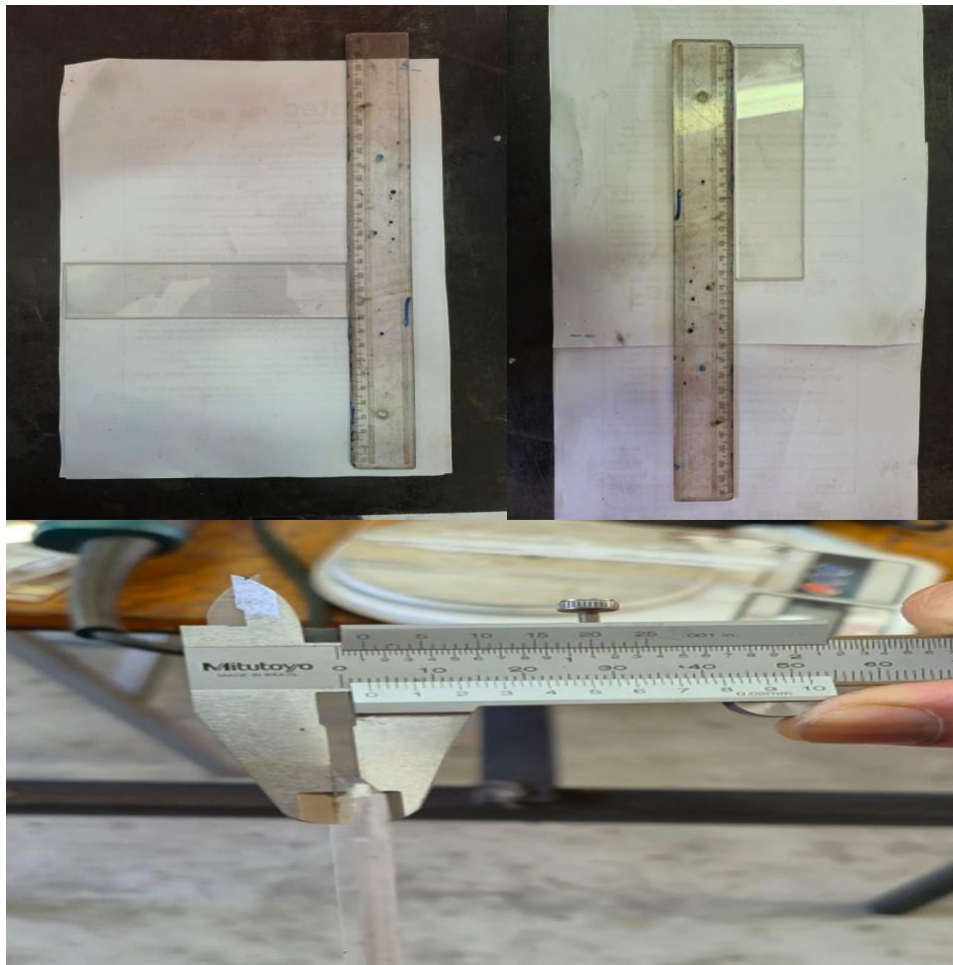
Este trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios da Fatec Pindamonhangaba, para realizar a soldagem por fricção em polímero e foi utilizado a fresadora da marca *Nardini*, modelo *Diplomat* da marca FVF2500, ilustrada na Figura 3, foram realizadas soldas de topo reto entre duas chapas de policarbonato maciço marca comercial BOLD com as seguintes dimensões: 150mm x 40mm x 3mm ilustrada na Figura 3, As principais propriedades do material estão apresentadas na Tabela 1.

Figura 3 Fresadora modelo *Nardini* – *Diplomat* FVF2500



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 Chapa de policarbonato e instrumentos de medição



Fonte: Elaborado pelos autores.

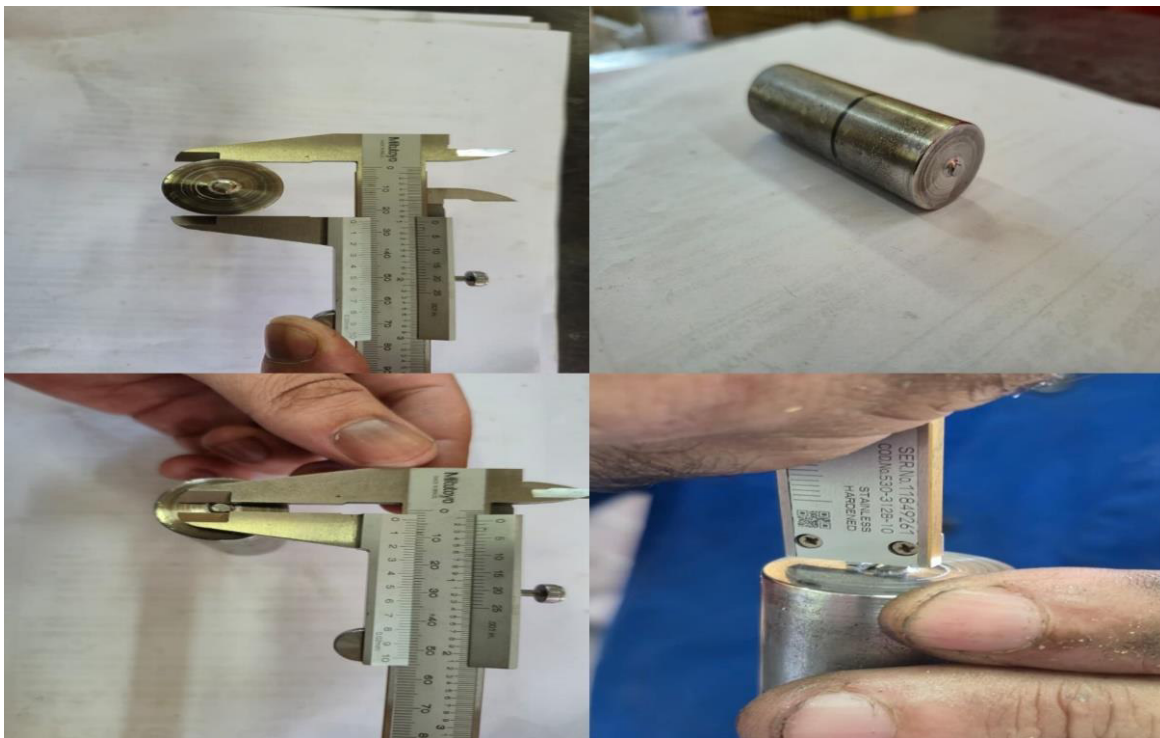
Tabela 1 Propriedade Base do Policarbonato (PC)

| Propriedade | Policarbonato (PC) |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Material base | Compacto (sólido) |
| Densidade | ~1,20 g/cm ³ |
| Transmissão de luz | 88–90% (incolor) |
| Resistência ao impacto | 200–250 vezes maior que o vidro comum |
| Temperatura de serviço contínuo | -40 °C a +120 °C |
| Proteção UV | Em ambas as faces |
| Espessura utilizada | 4,0 mm |
| Coefficiente de dilatação térmica | $6,5 \times 10^{-5}$ m/m·°C |
| Ponto de amolecimento (Vicat) | ~150 °C |
| Chapa de 3mm limite máximo de tração | 78 Mpa |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para realizar a união das duas chapas de policarbonato foi instalada uma ferramenta circular confeccionada em aço SAE 1045, composta por um ombro de 25,4 mm de diâmetro e um pino cilíndrico de 3,7 mm de diâmetro e 1,4 mm de comprimento, com ponta reta (plana). Essa geometria foi selecionada por permitir boa mistura do material plastificado e controle térmico adequado para o policarbonato a solda. Como demonstrada na Figura 5.

Figura 5 Ferramenta utilizada no processo FSW



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os parâmetros testados foram baseados nas melhores condições obtida por Lopes (2024) e foi determinado que a profundidade iria variar de 0,3mm a 0,4mm, rotação da ferramenta de 600, 700 e 800 RPM e o deslocamento da ferramenta foi de 45mm/min para todas as condições estudadas, gerando 6 condições diferente e foram identificadas como amostra de 1 a 6 como ilustrada na Tabela 2.

Foram preparadas seis amostras de soldagem, além de uma amostra de sacrifício utilizada para calibração inicial e ajuste da ferramenta à linha de união das chapas.

As etapas experimentais foram: fixação das chapas, centralização da

ferramenta, soldagem por fricção, controle de parâmetros e registro de observações. A ferramenta foi mantida perpendicular à superfície do material

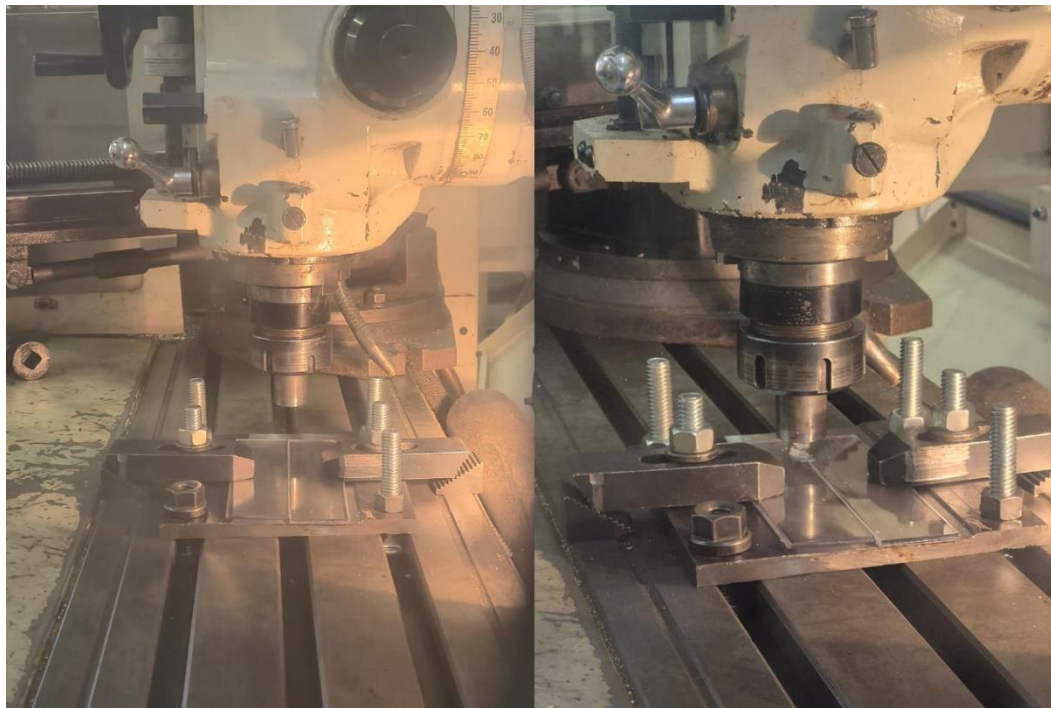
Tabela 2 Parâmetro de Soldagem e identificação das Amostras

| CP | Rotação (RPM) | Profundidade (mm) | Avanço (mm/min) |
|----|---------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 600 | 0,3 | |
| 2 | 700 | 0,3 | |
| 3 | 800 | 0,3 | |
| 4 | 700 | 0,4 | 45 |
| 5 | 600 | 0,4 | |
| 6 | 800 | 0,4 | |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Durante os ensaios, foi necessário realizar ajustes no posicionamento das chapas sobre a mesa da fresadora, principalmente após o primeiro teste, de modo a garantir o correto alinhamento da ferramenta com a linha de união. Como demonstrada na Figura 6.

Figura 6 Montagem das chapas na fresadora durante o ensaio



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1 Ensaio Visual

A avaliação inicial das soldas foi realizada por análise visual com foco na

integridade da junta e aparência superficial.

3.2 Ensaio de Rugosidade

Medição de rugosidade superficial, na região próxima da solda onde teve o contato com o ombro da fermenta, para cada amostra estudada foi realizada três medições e utiliza-se um rugosímetro portátil Marca Mitutoyo Modelo SurfTest SJ-210, conforme a norma ABNT NBR ISO 4287 que está ilustrado na Figura 7.

O equipamento possui resolução mínima de $0,01 \mu\text{m}$, faixa de medição de até $360 \mu\text{m}$ e apalpador com ponta de diamante, sendo amplamente empregado em medições de acabamento superficial.

As medições foram realizadas com filtro de corte $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ e comprimento de avaliação de 4 mm , com passada perpendicular à direção da solda. Foram avaliados os parâmetros R_a (rugosidade média aritmética) e R_z (diferença média entre picos e vales). Para cada corpo de prova (CP), foram realizadas quatro leituras: uma em cada lado da solda e duas nas extremidades opostas. Antes das medições, o equipamento foi calibrado sobre uma amostra de sacrifício. Os valores obtidos foram tratados estatisticamente, considerando média e desvio-padrão.

Figura 7 Rugosímetro Marca Mitutoyo Modelo SurfTest SJ-210



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 Ensaio de Tração

Foi realizado ensaio mecânico de Tração em cada condição estudada,

cada amostra soldada foi cortada utilizando uma cortadeira Metalográfica marca Teclago CM80 Ilustrada na Figura 6 e gerado 3 Cps de tração com a seguinte dimensões: 40mmx80mmx3mm que está ilustrada na Figura 8.

Figura 8 Cortadeira metalográfica marca Teclago modelo CM80



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 9 Corpo de prova de tração



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para realizar o ensaio de tração foi utilizado-se a máquina de tração marca UMIC modelo GR012 que está ilustrada na Figura 10, do laboratório de ensaios mecânicos da Universidade de São Paula (USP) de Lorena.

Figura 10 Máquina de tração Marca UMIC Modelo GR012 capacidade Máxima de 100kN



Fonte: Elaborado pelos autores.

4. RESULTADO E DISCUSÃO

4.1 ENSAIO VISUAL DAS AMOSTRA

Da Figura 11 a 16 são os corpos de provas produzidos pelo processo de soldagem de fricção e foi realizado a análise visual de cada condição ensaiada.

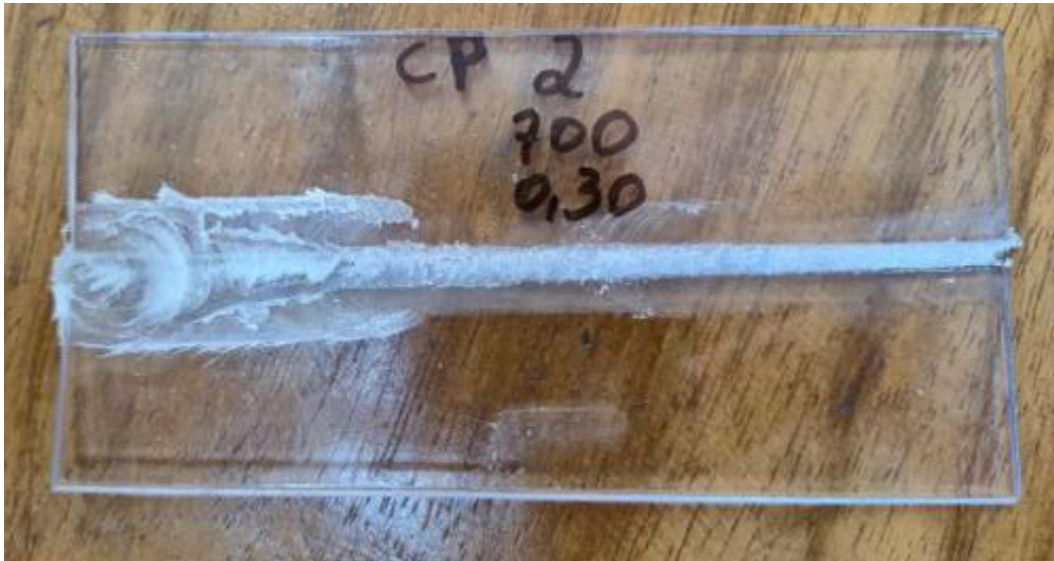
Durante os testes, observou-se que profundidades inferiores a 0,3 mm não formaram solda adequada. O aumento de rotação para 700 rpm resultou em melhor uniformidade e acabamento. A 800 rpm, a fusão foi irregular no início, sugerindo a necessidade de controle térmico. Com 0,4 mm de profundidade, observou-se melhor consolidação da junta.

Figura 11 CP 1 condições: profundidade de 03mm, velocidade da ferramenta de 600 RPM e avanço de 45mm/min.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 12 CP 2 condições: profundidade de 03mm, velocidade da ferramenta de 700RPM e avanço de 45mm/min.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 13 CP 3 condições: profundidade de 03mm, velocidade da ferramenta de 800RPM e avanço de 45mm/min.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 14 CP 4 condições: profundidade de 04mm, velocidade da ferramenta de 700 RPM e avanço de 45mm/min.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 15 CP 5 condições: profundidade de 04mm, velocidade da ferramenta de 600 RPM e avanço de 45mm/min.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 16 CP 6 condições: profundidade de 04mm, velocidade da ferramenta de 800RPM e avanço de 45mm/min.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 ENSAIO DE RUGOSIDADE

A Tabela 3 apresenta os valores médios obtidos de rugosidade para cada corpo de prova (CP). Foram considerados válidos apenas os resultados consistentes, descartando-se leituras anômalas (outliers).

Tabela 3 Medição da rugosidade

| | Ra (μm) | Rz (μm) | Classificação da Superfície |
|-----|----------------------|----------------------|--|
| CP1 | 3,73 | 17,07 | Rugosidade média, acabamento intermediário |
| CP2 | 13,69 | 65,04 | Superfície rugosa, irregular |
| CP3 | 2,67 | 16,66 | Superfície lisa/intermediária |
| CP4 | 2,98 | 16,28 | Superfície de rugosidade média-baixa |
| CP5 | 4,06 | 18,60 | Rugosidade média, boa uniformidade |
| CP6 | 3,06 | 15,36 | Superfície de rugosidade média a lisa |

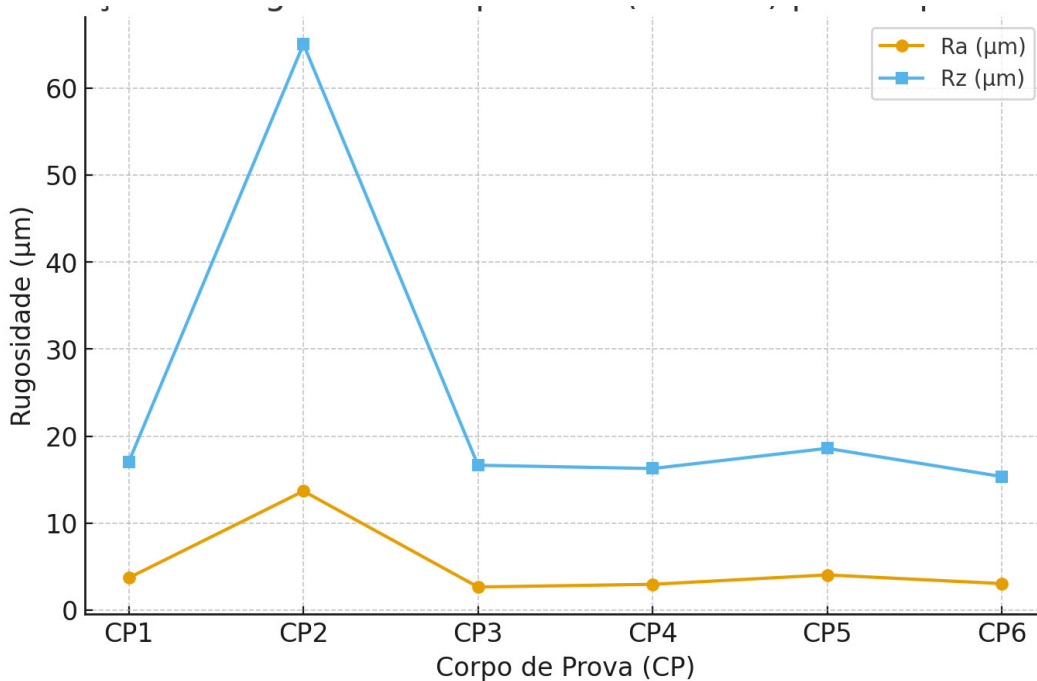
Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao observar a Figura 17 verifica-se que os valores de rugosidade apresentaram tendência decrescente ao longo dos corpos de prova, indicando aprimoramento do acabamento superficial à medida que o processo foi otimizado. O CP2 apresentou os maiores valores de rugosidade ($Ra \approx 13,7 \mu\text{m}$; $Rz \approx 65 \mu\text{m}$), enquanto o CP6 apresentou os menores ($Ra \approx 3,0 \mu\text{m}$; $Rz \approx 15 \mu\text{m}$),

representando uma superfície mais uniforme e lisa.

Essa tendência sugere que os parâmetros de soldagem, como velocidade de rotação e profundidade, influenciam diretamente na qualidade superficial. Valores mais equilibrados de energia térmica resultaram em plastificação mais homogênea do material e menor rugosidade final.

Figura 17 rugosidade superficial (Ra e Rz) entre os corpos de prova.



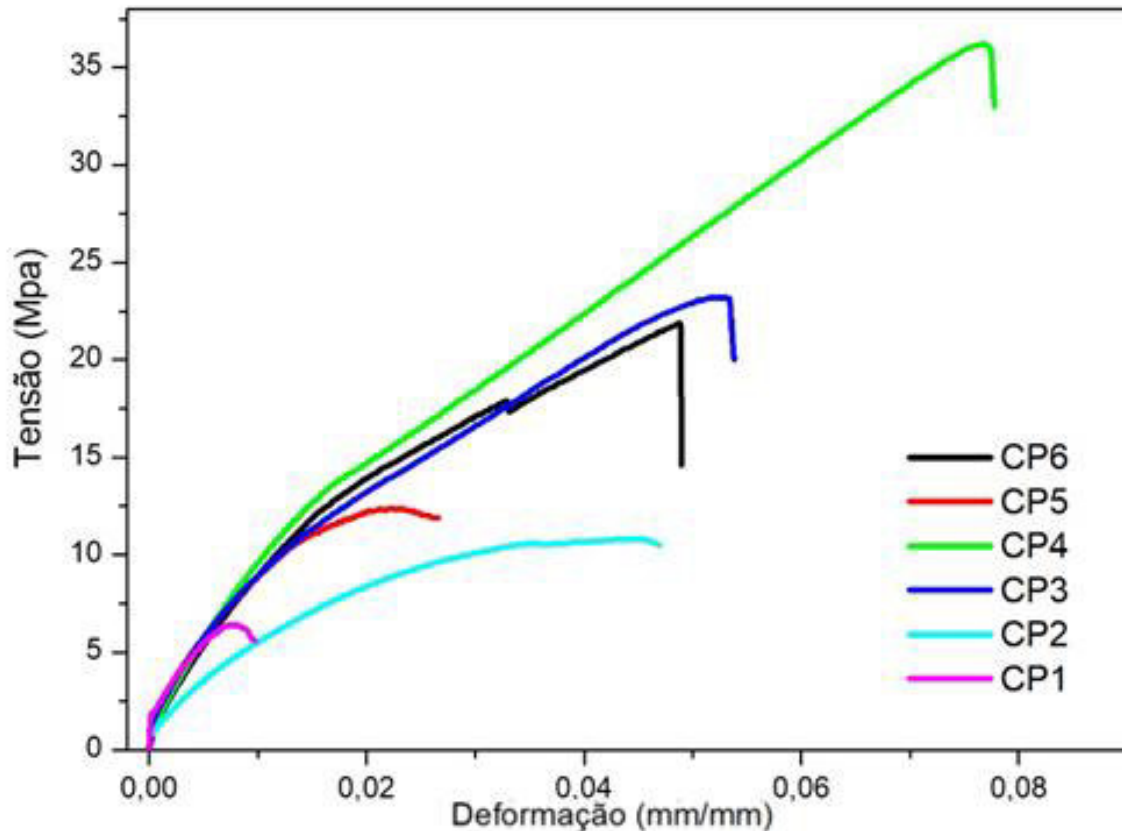
Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3 DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração realizados permitiram avaliar de maneira comparativa o comportamento mecânico dos corpos de prova soldados por fricção, possibilitando identificar a influência dos diferentes parâmetros de soldagem na resistência final das juntas de policarbonato. A Figura 18 apresenta a sobreposição das curvas tensão–deformação de todos os corpos de prova, permitindo uma visualização geral das diferenças de desempenho entre as amostras. Observa-se que as curvas apresentam perfis bastante distintos,

reforçando que o processo FSW aplicado ao policarbonato é altamente sensível às condições de operação, sobretudo à geração de calor e à estabilidade da pressão axial durante a soldagem.

Figura 18 Ensaio de tração todas as condições estudadas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

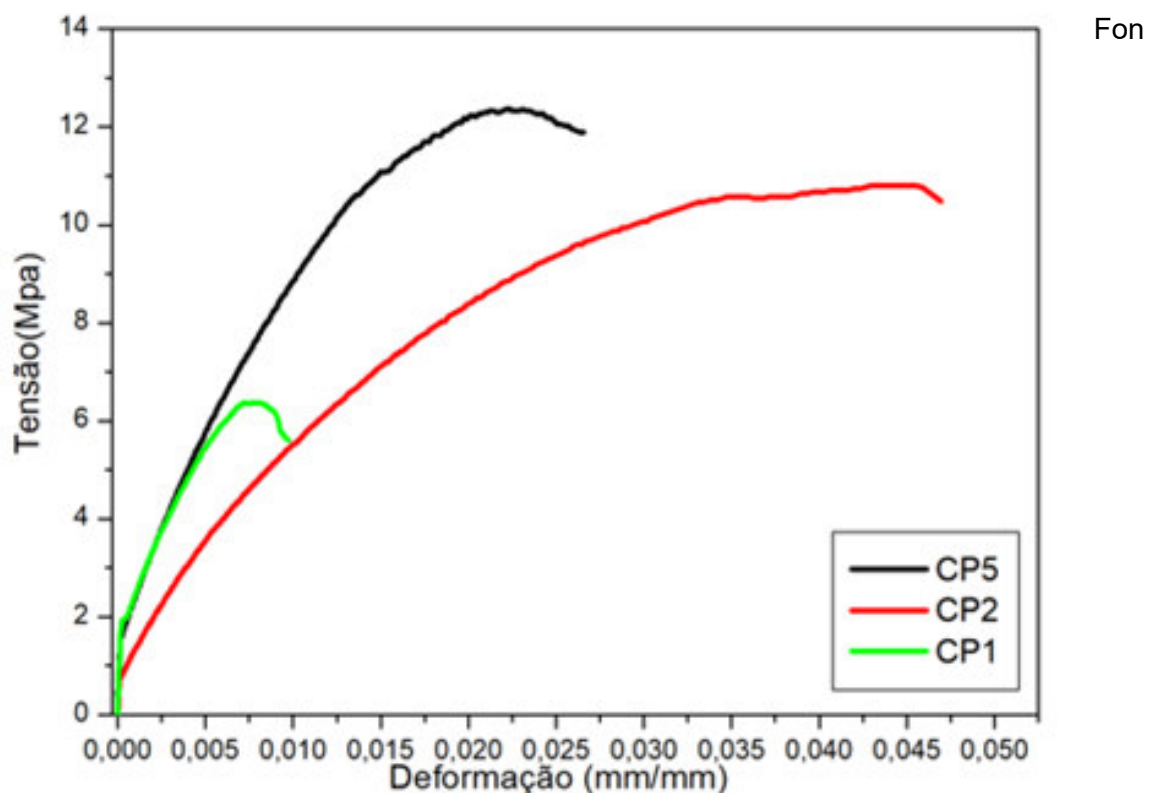
De maneira geral, observou-se que o CP4 (rotação de 700 RPM e profundidade de 0,4 mm) apresentou o melhor comportamento mecânico entre todas as amostras, alcançando a maior tensão máxima, próxima de 35 Mpa e deformação máxima de 0,8 mm/mm, além de uma curva contínua e estável até a ruptura.

Em contraste, os corpos de prova CP1 (rotação de 600 RPM e profundidade de 0,3 mm) e CP2 (rotação de 700 RPM e profundidade de 0,3 mm) apresentaram o pior desempenho, como mostrado na Figura 19, caracterizado por baixas tensões de ruptura e ausência de um aumento significativo na resistência mecânica ao longo da curva de tração. Essas amostras exibiram

comportamento frágil e ruptura precoce, sugerindo insuficiência térmica durante o processo de soldagem.

Quando a energia gerada é baixa, o material não atinge a plastificação necessária, resultando em uma junta mal consolidada e propensa a falhas. Essa interpretação é coerente com Freitas (2017), que demonstrou que parâmetros inadequados podem gerar descontinuidades e falta de mistura adequada entre as superfícies em contato.

Figura 19 corpo de provas com valores de tração mais baixo

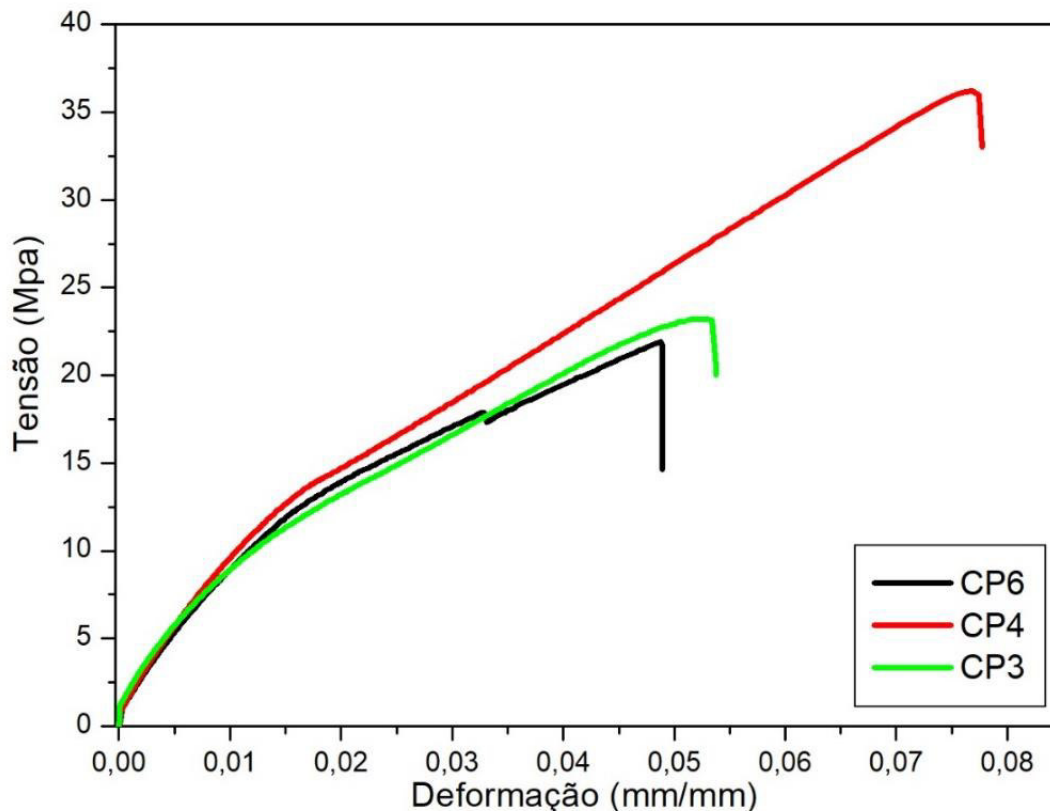


Fonte: Elaborado pelos autores.

A curva do CP4, evidenciada na Figura 20, mostra um comportamento mais próximo do esperado para soldas bem consolidadas, com boa adesão entre as partes e distribuição homogênea das tensões. Esse desempenho indica que os parâmetros utilizados nesse corpo de prova proporcionaram um balanço adequado entre o calor gerado e o fluxo plástico do material, mantendo o policarbonato dentro da faixa térmica ideal para plastificação sem degradação.

Estudos como os de Rodrigues (2017) e Barbosa (2021) apontam resultados semelhantes, reforçando que parâmetros intermediários tendem a gerar as melhores condições de soldagem em polímeros.

Figura 20 corpo de provas com valores de tração mais alto



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os corpos de prova CP3 (rotação de 800 RPM e profundidade de 0,3 mm) e CP6 (rotação de 800 RPM e profundidade de 0,4 mm), também mostrados na Figura 20, apresentaram desempenho intermediário. O CP6 (rotação de 800 RPM e profundidade de 0,4 mm) apresentou boa ductilidade, mas resistência inferior ao CP4, indicando possível excesso localizado de calor, que pode ter causado degradação superficial ou redução do módulo do material. Já o CP3 (rotação de 800 RPM e profundidade de 0,3 mm), embora com comportamento mecânico coerente com uma solda aceitável, não atingiu a resistência observada no CP4, sugerindo que seus parâmetros, apesar de adequados, não representaram a condição ideal.

A análise conjunta das Figuras 18, 19 e 20 evidencia que a soldagem por fricção aplicada ao policarbonato depende diretamente do equilíbrio entre rotação, avanço e pressão axial. Quando o calor é insuficiente (CP1 e CP2), a solda permanece frágil; quando é excessivo (possivelmente CP6), podem ocorrer alterações térmicas negativas. Entretanto, quando parâmetros equilibrados são aplicados, como no CP4, a junta resultante apresenta excelente desempenho mecânico.

De maneira geral, a avaliação dos ensaios de tração demonstra que a aplicação do processo FSW em policarbonato utilizando uma fresadora convencional é tecnicamente viável, desde que se mantenha rigoroso controle dos parâmetros operacionais. Os resultados confirmam que ajustes relativamente simples são capazes de alterar significativamente a qualidade da solda, validando a importância da análise experimental para a definição das condições ideais de união.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a viabilidade da utilização de uma fresadora convencional para a realização do processo de soldagem por fricção (FSW) em chapas de policarbonato, investigando a influência dos parâmetros operacionais na qualidade das juntas produzidas. A partir dos ensaios e análises realizadas, foi possível verificar que o processo é tecnicamente viável, desde que conduzido com controle adequado da rotação, avanço e pressão axial.

Os resultados mostraram que o CP4 foi a condição mais eficiente, apresentando a maior resistência mecânica entre as amostras, o que indica que seus parâmetros promoveram uma plastificação adequada e boa consolidação do material. Em contrapartida, CP1 e CP2 apresentaram baixíssima resistência, reforçando que a insuficiência de calor e a má plastificação podem comprometer significativamente o desempenho da solda. Assim, conclui-se que o sucesso do FSW em policarbonato depende diretamente da combinação ideal entre geração de calor e mistura mecânica do material.

A utilização da fresadora se mostrou uma alternativa prática e eficiente, especialmente para ambientes acadêmicos e de pequeno porte industrial, permitindo a execução do processo com baixo custo e boa repetibilidade. O estudo também aponta que ferramentas específicas, dispositivos adequados de fixação e calibração cuidadosa dos parâmetros são elementos essenciais para garantir bons resultados em soldagens de polímeros.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de análises térmicas mais detalhadas, estudos microestruturais da região soldada, variações mais amplas de parâmetros de processo e comparação com outros materiais termoplásticos, visando ampliar o conhecimento e consolidar o FSW como uma alternativa competitiva para união de polímeros de engenharia.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, A. W.; SCHNEIDER, M. **Avaliação da soldagem dissimilar a ponto por fricção agitação em ligas de alumínio e aço galvanizado**. Guarapuava: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2023.

BARBOSA, C. E. C. **Avaliação da soldagem por fricção e mistura mecânica em uniões do tipo topo de chapas de polipropileno**. 2021. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2021.

BECKER, A. **Estudo do fresamento de cabeçotes de motor mistos de alumínio e aço com diferentes ferramentas de corte**. 2017. 50 p. Trabalho de Diplomação de Tecnologia em Fabricação Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

FREITAS, P. V. H. **Adaptação do processo de soldagem Friction Stir Welding para uma fresadora convencional**. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

GIRARDI, D. i Z. **Estudo preliminar de soldagem através do processo Friction Stir Welding de uma junta sobreposta dissimilar das ligas alumínio 6060 T5 e cobre C110 com duplo recuo**. Alegrete: Universidade Federal do Pampa, 2015.

RODRIGUES, R. M. **Soldagem de placas de policarbonato pelo processo Friction Stir Welding (FSW): fabricação do dispositivo de fixação, ferramentas e testes preliminares**. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2017.

LOPES, N. V. **Soldagem por fricção em placas de polímeros de policarbonato em fresadora**. 2024. 44p. Trabalho de Graduação (Curso de Mecânica – Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2024.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 3. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. **Friction Stir Welding and Processing**. Ohio: ASM International, 2007.

THOMAS, W. M.; DOLBY, R. E. **Friction stir welding developments**. In: 6th International Conference on Trends in Welding Research, 15-19 Apr. 2002,

Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia. Proceedings... Ohio: ASM International, 2002.

ABNT. NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) — Rugosidade: Método do perfil — Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

MITUTOYO CORPORATION. **Surftest SJ-210/310 Series – Surface Roughness Tester User’s Manual**. Japão, 2017.

FERNANDES, L. M.; SOARES, M. M. Soldagem por fricção em polímeros: análise da rugosidade superficial e integridade da junta. *Revista Matéria*, v. 26, n. 4, 2021.