

# DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE MATRIZ DE ALUMÍNIO REFORÇADO COM FERRO FUNDIDO POR FRICÇÃO E AGITAÇÃO

BOMFIM, Mateus<sup>1</sup>

TRAIANO, Denner<sup>2</sup>

**RESUMO:** Este estudo abordou a incorporação de cavacos de ferro fundido em matrizes de alumínio utilizando o processo de fricção e agitação (FSP). O objetivo principal foi avaliar a distribuição das partículas de cavaco e as mudanças nas propriedades mecânicas e microestruturais do compósito. As análises microestruturais revelaram que o método FSP resultou em uma dispersão eficiente de partículas em algumas áreas, mas a distribuição das partículas foi não homogênea, com a presença de cavacos maiores nas bordas da amostra. A investigação demonstrou que o processo pode melhorar a resistência ao desgaste e à corrosão do material, potencializando suas características para aplicações industriais. O estudo também destacou a importância da otimização do processo para garantir maior uniformidade nas partículas e, conseqüentemente, melhores propriedades do compósito formado. A pesquisa mostrou ser um passo importante para a reutilização de resíduos industriais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cavaco de ferro fundido, Composto metálico, Fricção e agitação.

**ABSTRACT:** This study focused on the incorporation of cast iron chips into aluminum matrices using the *Friction Stir Processing (FSP)* method. The main objective was to evaluate the distribution of chips and the effects on the mechanical and microstructural properties of the composite. Microstructural analysis revealed that the FSP method led to an efficient dispersion of particles in certain areas, although particle distribution was non-homogeneous, with larger chips present at the sample's edges. The investigation demonstrated that the process could enhance wear and corrosion resistance, improving the material's characteristics for industrial applications. The study also highlighted the importance of optimizing the process to ensure a more uniform distribution of particles, leading to better properties of the formed composite. This research is an important step towards the reutilization of industrial waste materials.

**KEYWORDS:** Cast iron chips, Composite material, Friction Stir Processing.

## 1 INTRODUÇÃO

O cavaco de metal gerado na indústria representa um problema ambiental significativo, pois, na maioria das vezes, é descartado sem uma reutilização adequada. Esse resíduo não possui muitas fontes de reaproveitamento, resultando em desperdício de material e impactos negativos no meio ambiente (OKON RECYCLING, 2025). No entanto, uma possível solução é a reutilização do cavaco,

---

<sup>1</sup> Graduando de Engenharia mecânica no Centro Universitário Campo Real.  
Engmmateusbomfim@camporeal.edu.br

<sup>2</sup> Especialista em Engenharia Gerenciamento e Controle de Manutenção. Mestre em Engenharia Mecânica.  
Professor no Centro Universitário do campo Real. prof\_dennertraiano@camporeal.edu.br

incorporando-o a uma matriz metálica como material de reforço, como cita Aslan *et al.* (2018).

A aplicação do processo de fricção e agitação, conhecido como *Friction Stir Processing (FSP)*, oferece uma abordagem inovadora para incorporar esses cavacos em uma nova matriz metálica, permitindo a produção de compósitos com propriedades aprimoradas (SHCHERBAKOVA *et al.*, 2024). O uso do FSP é vantajoso, pois ele possibilita a inserção do cavaco na matriz de forma eficiente, sem necessidade de fusão do material, o que resulta em materiais mais resistentes e duráveis. Segundo El-Zathry *et al.* (2025), o FSP é eficaz na modificação das propriedades de materiais metálicos, promovendo melhorias significativas em sua resistência à corrosão e ao desgaste, além de garantir a homogeneização da matriz.

A questão central desta pesquisa reside em entender como o cavaco pode ser adequadamente incorporado ao processo de FSP para melhorar a resistência mecânica e outras propriedades do material resultante. De acordo com Singhal *et al.* (2025), a adição de partículas reforçadoras, como o cavaco metálico, pode proporcionar um aumento considerável nas propriedades mecânicas do material, contribuindo para o seu desempenho em ambientes exigentes. A distribuição homogênea dessas partículas na matriz é um fator determinante para o sucesso do processo, o que é destacado por Traiano *et al.* (2023), que comprovam que a eficácia do FSP depende da geometria da ferramenta e dos parâmetros de processamento.

Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade do uso de cavacos metálicos como material de reforço em matrizes de alumínio, utilizando a técnica de fricção e agitação (FSP). Segundo Singh e Sing (2018), o FSP apresenta grande potencial para modificação microestrutural e a incorporação de partículas reforçadoras em ligas de alumínio, possibilitando ganhos significativos em desempenho. Nesse sentido, a proposta busca não apenas verificar a incorporação eficiente desses resíduos à matriz metálica, mas também analisar de que forma o processo pode contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas e tribológicas do compósito formado. Além disso, o trabalho visa demonstrar o potencial de aproveitamento de resíduos de usinagem, Ribeiro *et al.* (2016) ressaltam que a reciclagem de resíduos industriais representa um avanço para a sustentabilidade na indústria de materiais compósitos.

A pesquisa se concentrará na análise dos parâmetros do processo, na distribuição do cavaco na matriz e nas propriedades mecânicas do compósito final. A hipótese investigada é que o FSP pode melhorar significativamente as propriedades dos materiais, promovendo uma distribuição uniforme de cavaco e, conseqüentemente, aumentando a resistência ao desgaste e à corrosão. A importância de ajustar os parâmetros do processo de FSP, como a velocidade de rotação e o avanço da ferramenta, para otimizar a distribuição das partículas foi enfatizada por Feddal, Chairi e Di Bella (2025), que observaram que essas variáveis impactam diretamente na qualidade do material obtido.

A investigação busca apontar como o método FSP pode ser otimizado para proporcionar melhores resultados, favorecendo a reutilização de resíduos metálicos de forma eficaz, Gurulakshmi *et al.* (2024) destacam que a utilização de cavacos metálicos como reforço em compósitos de alumínio pode aumentar significativamente a dureza, resistência à tração e ao desgaste do material. Abordagem também discutida por Mehdi *et al.* (2025), que destacam o potencial da técnica de FSP em tornar materiais mais sustentáveis e de alto desempenho, ampliando suas aplicações industriais.

A relevância desta pesquisa está relacionada à reutilização de cavacos metálicos, resíduos comumente gerados em processos de usinagem que, na maioria das vezes, ainda enfrentam limitações quanto às alternativas de reciclagem. Estudos sugerem que esses resíduos podem ser reaproveitados por meio de métodos de processamento sólido, como a metalurgia do pó e consolidação mecânica, resultando em materiais com características melhoradas e reduzindo os efeitos negativos no meio ambiente (AYDIN; ŞAHIN, 2019; ASLAN *et al.*, 2018). Portanto, a utilização de cavacos de ferro fundido como reforço em matrizes de alumínio representa uma estratégia sustentável e economicamente viável, auxiliando na transformação de um subproduto industrial em matéria-prima para novos materiais.

Além do benefício ambiental, o estudo é justificado pelo progresso tecnológico possibilitado pelo método de *Friction Stir Processing (FSP)*, que pode aprimorar a microestrutura e integrar partículas de reforço de forma eficaz. Revisões recentes mostram que o FSP pode ser usado para produzir compósitos de alumínio reforçados com vários tipos de partículas, incluindo materiais reciclados, o que pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas e tribológicas (KONDOFF; ZAEKOVA;

MANILOVA, 2021; ALTHARAN *et al.*, 2024). Neste cenário, esta pesquisa combina sustentabilidade e inovação tecnológica, auxiliando na produção de compósitos de alto desempenho enquanto diminui o desperdício de resíduos metálicos.

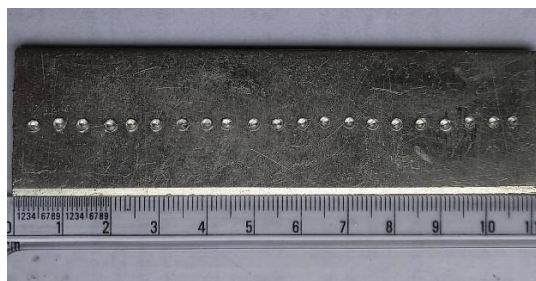
## 2 METODOLOGIA

A presente pesquisa utilizou abordagem qualitativa, com o objetivo de compreender os efeitos da técnica de fricção e agitação na fabricação de compósitos de matriz de alumínio. Inicialmente, foi realizada uma revisão literária através de artigos disponíveis nas bases de dados Periódicos Capes, Google Acadêmico e Scielo. As palavras-chave utilizadas foram: fricção e agitação, compósitos de alumínio, microdureza, desgaste e resistência à corrosão. Como critério de inclusão, foram selecionados estudos que abordaram diretamente a aplicação da técnica de fricção e agitação em ligas de alumínio com inserção de reforços cerâmicos ou metálicos.

### 2.1 Preparação das amostras

Após a etapa teórica, foi conduzida a fase experimental, cujo objetivo consistiu em processar ligas de alumínio por meio da técnica de fricção e agitação (*Friction Stir Processing – FSP*), incorporando ferro fundido às amostras. Para esse fim, utilizou-se uma ferramenta especialmente desenvolvida, composta por ombro côncavo e pino cônico.

Figura 1: Amostra de alumínio



Fonte: Autor (2025)

As amostras foram confeccionadas em alumínio fundido, previamente usinado e preparado com dimensões padronizadas, de modo a garantir repetibilidade nos ensaios. O compósito empregado como material de reforço foi o ferro fundido,

escolhido por suas propriedades características e potencial de interação com a matriz metálica.

## 2.2 Materiais e métodos

O desenvolvimento do trabalho contou com a pesquisa em artigos científicos para fundamentar a definição de testes, orientar as simulações e planejar os experimentos práticos. A partir dessas informações, foram conduzidos simulações e experimentos que permitiram avaliar o desempenho dos materiais estudados, assegurando maior confiabilidade aos resultados e contribuindo para o aprimoramento das técnicas aplicadas.

Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem vertical Power Compumaq modelo ZX – 7550 WZ, aplicando diferentes combinações de velocidade de rotação e velocidade de avanço da ferramenta. Após a submissão das amostras a um único passe da ferramenta, estas foram embutidas em resina e submetidas ao processo de lixamento, utilizando-se lixas de granulações 80, 120, 200, 400, 600, 800, 1200, 2000 e 3000. O lixamento foi uma etapa essencial, pois garantiu uma superfície adequada para a análise microestrutural, removendo impurezas e imperfeições que poderiam prejudicar os resultados (Shcherbakova *et al.*, 2024).

Após o lixamento, realizou-se o ataque químico com o reagente Osmond, deixando cada amostra por 15 segundos em contato direto e, em seguida, limpando-a em água corrente, dessa maneira facilitando a visualização das micropartículas. As trilhas obtidas foram caracterizadas por meio de análise microestrutural e testes de corrosão, possibilitando uma avaliação detalhada do desempenho do material resultante (Feddal *et al.*, 2025).

O ensaio de corrosão foi realizado utilizando solução de NaCl a 3,5% para avaliar a resistência das amostras processadas. As amostras foram imersas na solução e comparadas ao metal base, permitindo verificar a influência do processo de fricção e agitação (FSP) na resistência à corrosão e no comportamento do material em ambiente corrosivo (Singhal *et al.*, 2025). O teste de desgaste foi realizado utilizando um tribômetro de desgaste linear Tribo1 da marca TTP, com a utilização de indentador de aço 52100, método que é eficaz para a avaliação do desempenho tribológico de materiais (Singh & Singh, 2018).

## 2.3 Suporte da amostra

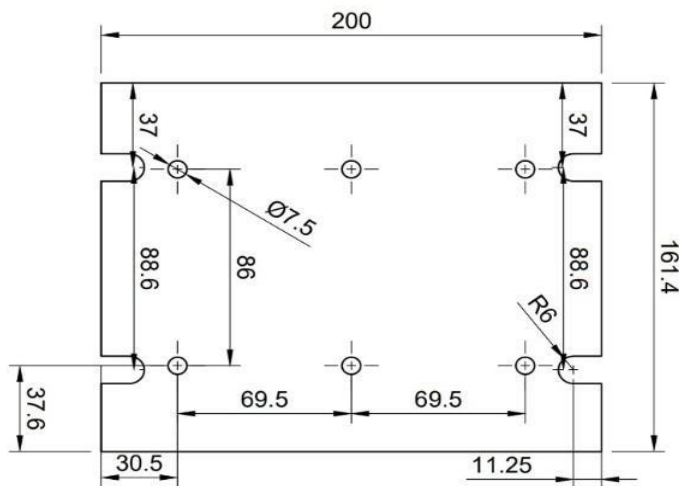
Para garantir que a chapa de alumínio permanecesse fixa durante o processo de fricção e agitação (FSP), foi necessário desenvolver um suporte exclusivo para este experimento. Sua principal função é manter o corpo de prova firmemente posicionado, evitando movimentos indesejados ou vibrações que poderiam comprometer tanto a qualidade do processamento quanto a confiabilidade dos resultados obtidos.

O desenvolvimento do suporte iniciou-se com a coleta das medidas da matriz de alumínio, bem como das dimensões da fresadora disponível no espaço maker (laboratório), etapa fundamental para garantir a compatibilidade do suporte e da mesa, afim de eliminar qualquer desalinhamento ou vibração que possa ocorrer durante o processo experimental.

O projeto foi elaborado no software Fusion 360, o que permitiu a visualização tridimensional, o planejamento estrutural e a definição com precisão dos pontos de fixação necessários para assegurar estabilidade. O suporte é composto por quatro partes principais: a base, as travas da base, a chapa fixa e a chapa móvel.

A base do suporte representada na Figura 2, foi elaborada de modo exclusivo para atender as demandas do método de fricção e agitação, ela conta com quatro pontos de apoio elaborados para mantê-la presa na mesa da fresadora, dispõem também de 6 furos com medida de 8 milímetros para possibilitar a fixação da trava fixa e da trava móvel que seguram a matriz de alumínio.

Figura 2 – Base do Suporte

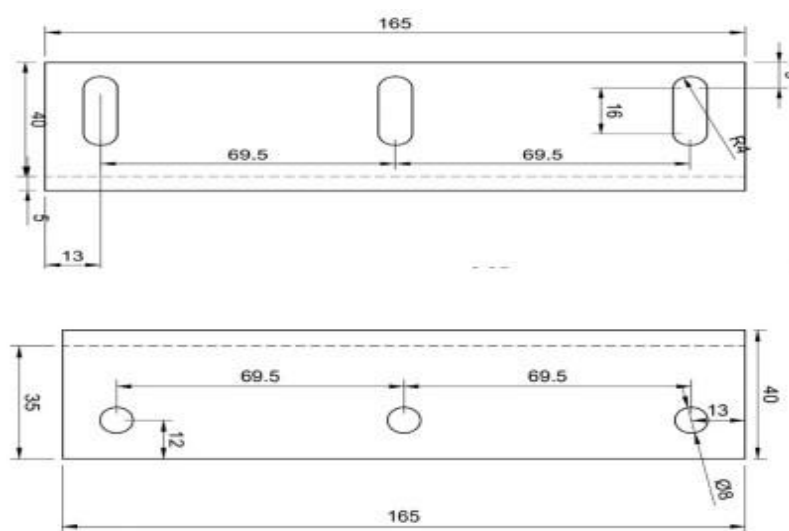


Fonte: Autor (2025).

Para sua fabricação utilizou se uma chapa de aço carbono, com espessura de 10 milímetros, medida necessária para que o calor gerado no processo de fricção não danifique a mesma, mantendo o a rigidez estrutural necessária para o experimento.

Na Figura 3 é representado as travas responsáveis pela fixação da matriz na base, foram desenvolvidas com proposito funcional e prático, garantindo estabilidade durante o processo, permitindo a montagem e desmontagem do experimento de forma eficiente, dessa maneira reduzindo o tempo dos ensaios e também garantindo a segurança durante o processo.

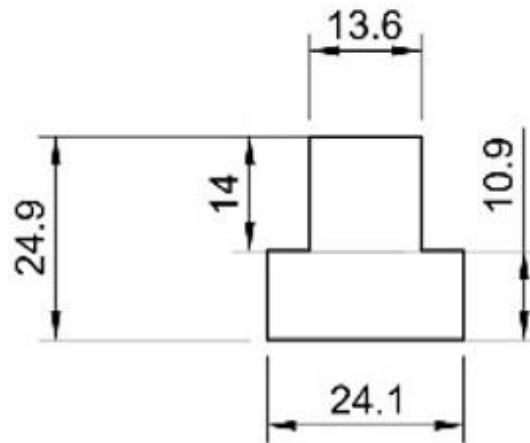
Figura 3 – Trava fixa e móvel da matriz de alumínio.



Fonte: Autor (2025).

Para a fabricação das travas foram utilizadas chapas de aço carbono, com espessura de 5 milímetros. A trava fixa com 165 milímetros de comprimento e 35 milímetros de largura. A trava móvel conta com 165 milímetros de largura e 40 milímetros de largura garantindo, medidas que garantem segurança e rigidez estrutural. Para assegurar a fixação do conjunto na mesa da fresadora, foi necessário o desenvolvimento de pinos em formato de “T”, como mostra a Figura 4, estes foram essenciais para garantir o travamento e estabilidade requerida pelo experimento.

Figura 4 - Travas da base

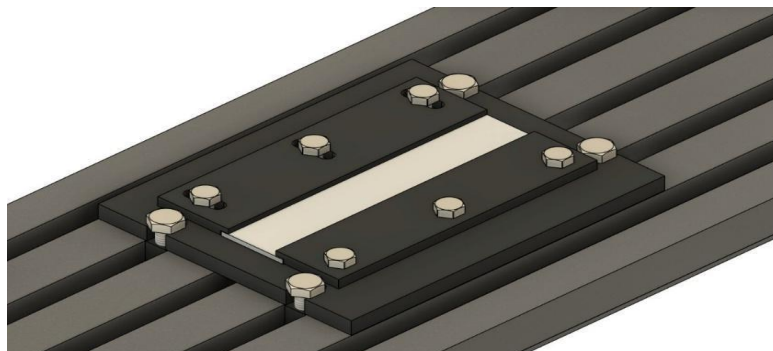


Fonte: Autor (2025).

Afim de possibilitar a fixação dos pinos na base, foram criados furos centralizados e posteriormente feito o processo de rosca, possibilitando o travamento da base no pino com o auxílio de parafusos. Essas peças foram fabricadas em chapa de aço carbono, com espessura de 10 milímetros, robusto o suficiente para aguentar a vibração existente durante o experimento de fricção.

As peças desenvolvidas, foram utilizadas para realizar a montagem final no software como representado na Figura 5. Esta etapa é importante para a ajustes dimensionais, a definição da disposição dos furos e o posicionamento dos pinos da base. A simulação permite a visualização tridimensional do suporte como um todo, permitindo identificar e corrigir qualquer interferência geométrica antes da fabricação física do suporte.

Figura 5 - Montagem final do suporte no software Fusion 360



Fonte: Carvalho e Traiano (2025).

Após o projeto pronto as peças foram fabricadas com corte a laser seguindo as dimensões definidas, este método foi escolhido por garantir precisão milimétrica e bom acabamento, dessa forma assegurando peças alinhadas, de qualidade e fácil montagem.

Com todas as peças prontas, foi possível montar o suporte na mesa da fresadora, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Suporte montado e fixado na mesa da fresadora



Fonte: Autor (2025).

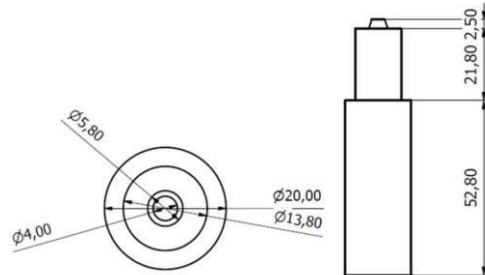
Além de cumprir a função de fixação, o suporte foi projetado para ser resistente e de fácil montagem, características que permitem sua reutilização em experimentos futuros e asseguram a repetibilidade dos ensaios.

### **2.3.1 Ferramenta**

Após o estudo sobre a ferramenta, a mesma foi desenvolvida no software fusion 360 para atender as necessidades específicas do experimento. O material escolhido para sua fabricação foi o aço inoxidável AISI, pois possui boa resistência mecânica, durabilidade e boa usinabilidade.

Na Figura 7 é possível observar o desenho técnico da ferramenta, com todas as suas dimensões. O projeto desempenha um papel fundamental no processo de fabricação, a partir dele se garante a execução detalhada da peça.

Figura 7 - Desenho técnico da ferramenta



Fonte: Autor (2025).

A ferramenta pode ser dividida em três partes principais: o pino central, com diâmetro de 5,8 mm, que realiza o contato inicial com o material e atua como guia durante o processo; o ombro, com diâmetro de 13,8 mm, responsável pela geração do atrito e pela homogeneização do compósito com a matriz; e a base da ferramenta, com diâmetro de 20 mm, cuja função é garantir a fixação segura e estável na fresadora.

Figura 8 - Ferramenta usinada



Fonte: Autor (2025).

Para a confecção da ferramenta foi utilizado um tarugo de inox com 70 milímetros de comprimento e 22 milímetros de diâmetro. O método utilizado para a fabricação foi o torneamento realizado em no torno mecânico disponível no laboratório Maker, o que possibilitou precisão dimensional e acabamento superficial adequados.

### 2.3.2 Preparação do metal base

As amostras utilizadas neste experimento foram confeccionadas a partir de chapas do mesmo material, alumínio AA 1040, garantindo a homogeneidade do material ao ser processado.

O corte das chapas foi realizado com o auxílio de uma guilhotina mecânica, procedimento escolhido para evitar o aquecimento excessivo do material e, conseqüentemente, prevenir alterações indesejadas em sua microestrutura. Esse cuidado foi fundamental para assegurar a repetibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

A imagem da Figura 9 apresenta as dimensões adotadas para os corpos de prova foram de 30 mm de largura, 110 mm de comprimento e 3 mm de espessura. Tais medidas foram definidas considerando as limitações físicas do equipamento disponível, de modo a possibilitar uma fixação segura no suporte e garantir a atuação eficiente da ferramenta durante o processo de *Friction Stir Processing (FSP)*.

Figura 9 - Matriz de alumínio com furação



Fonte: Autor (2025).

Para garantir melhor fixação do compósito de ferro fundido na matriz de alumínio, foram realizados furos de 2 mm de diâmetro e 2 mm de profundidade, distribuídos a cada 5 mm de distância. Essa disposição estratégica teve como finalidade ampliar a interação entre o ferro fundido e a matriz metálica, favorecendo a ancoragem do material de reforço e possibilitando uma análise mais criteriosa da homogeneização resultante do processo.

### **2.3.3 Compósito de ferro fundido**

O cavaco de ferro fundido utilizado neste estudo foi obtido durante o processo de usinagem de um disco de freio automotivo, especificamente na etapa de faseamento da

peça. A coleta direta durante a operação garantiu a obtenção de partículas com características representativas do material, preservando suas propriedades originais e evitando possíveis contaminações externas. Nesse contexto, vale destacar que um compósito é um material formado pela combinação de duas ou mais fases distintas — tipicamente uma matriz e um reforço — que permanecem separadas e identificáveis, resultando em propriedades mecânicas, químicas ou físicas superiores às dos componentes isolados. No presente trabalho, o cavaco atua como fase de reforço a ser incorporada à matriz de alumínio por meio do processo de FSP.

O cavaco coletado passou pelo processo de seleção granulométrica, realizado com o auxílio de uma peneira metálica com abertura de 300 micrômetros, assegurando maior uniformidade no tamanho das partículas, conforme representado na Figura 10. Essa etapa foi fundamental para padronizar a granulometria do material de reforço, favorecendo a homogeneidade do compósito durante a sua incorporação à matriz metálica no processamento por fricção e agitação.

Figura 10 - Cavaco de ferro fundido



Fonte: Autor (2025).

A escolha desse tipo de resíduo justifica-se pela ampla disponibilidade de ferro fundido no setor automotivo e pelo potencial de sua reutilização como reforço em compósitos metálicos, contribuindo para a redução de desperdícios industriais e agregando valor a um subproduto de usinagem.

### **2.3.4 Teste de rotação e avanço**

Após a realização de diversos testes preliminares, foi necessário ajustar os parâmetros de avanço e de velocidade de rotação da ferramenta para estabilizar o processo. Esses ajustes tiveram como objetivo eliminar falhas observadas nas primeiras passagens, como descontinuidades e irregularidades na superfície das amostras, garantindo um melhor controle do atrito e da penetração da ferramenta durante o ensaio.

Depois de definidos os parâmetros ideais, a fresadora foi configurada para operar com avanço de 80 mm/min e velocidade de rotação de 1356 rpm. Esses valores mostraram-se adequados para produzir amostras sem defeitos visuais, assegurando uma boa conformação do material e uma distribuição uniforme do calor gerado durante o processo de fricção e agitação.

### **2.3.5 Preparação metalográfica**

A metalografia é a área da ciência dos materiais dedicada ao estudo da microestrutura de metais e ligas por meio de técnicas específicas de preparação e análise. A partir de procedimentos como corte, lixamento, polimento e ataque químico, é possível revelar detalhes internos da amostra, permitindo a observação de fases, tamanhos de grão, inclusões e defeitos estruturais, aspectos fundamentais para compreender o comportamento do material (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

A importância da metalografia está na sua capacidade de auxiliar na avaliação da qualidade de materiais destinados a aplicações industriais, identificando falhas de fabricação, tratamentos inadequados ou heterogeneidades que possam comprometer o desempenho do componente. Além disso, sua aplicação é essencial em processos de controle de qualidade, pesquisa e desenvolvimento, contribuindo para a otimização de parâmetros de processamento, soldagem e tratamentos térmicos, garantindo maior confiabilidade e segurança aos produtos finais (CALLISTER; RETHWISCH, 2016)

As amostras, após o embutimento em resina, passaram por um processo de lixamento sequencial utilizando lixas de granulações 80, 120, 220, 320, 400, 600, 1200, 2000 e 3000. Essa etapa teve como objetivo eliminar irregularidades superficiais, riscos e marcas provenientes do corte, garantindo uma superfície plana e

uniforme para análise posterior. Durante o lixamento, manteve-se o mesmo sentido entre as etapas, assegurando a remoção completa dos riscos de granulação anterior e proporcionando um acabamento superficial aprimorado.

Figura 11: Amostra metálica com cavaco de ferro fundido



Fonte: Autor (2025).

Na etapa seguinte, aplicou-se o reagente Osmod para o ataque químico das amostras, permitindo a revelação das microestruturas do material. O tempo de ataque manteve-se controlado para evitar corrosão excessiva e preservar os detalhes estruturais da liga metálica.

Figura 12: Reagente para análise (HF + HNO<sub>3</sub> + HCl)



Fonte: Autor (2025).

Após o ataque, as amostras passaram por lavagem e secagem, preservando a integridade da superfície preparada. As imagens obtidas foram inseridas em software ImajeJ, possibilitando a identificação, medição e interpretação das características microestruturais observadas.

## **2.4 Análise microestrutural**

A análise microestrutural foi realizada com o intuito de avaliar a eficiência do processo de fricção e agitação (FSP) na incorporação do compósito de ferro fundido à matriz de alumínio. As amostras foram observadas por meio de imagens obtidas no microscópio e processadas no software ImageJ, permitindo uma avaliação detalhada da homogeneidade e da distribuição das partículas na matriz metálica. Essa etapa teve papel fundamental na verificação da qualidade do material obtido, possibilitando identificar possíveis variações na morfologia das partículas e regiões com diferentes graus de mistura.

A partir das imagens, foi possível comparar as amostras do metal base com aquelas submetidas ao processo de fricção e agitação, observando as modificações estruturais decorrentes da incorporação do reforço. O uso do software possibilitou mensurar características como o tamanho médio das partículas, a uniformidade da distribuição e a presença de zonas termicamente afetadas. Esses resultados forneceram informações essenciais para a compreensão do comportamento microestrutural do compósito, permitindo correlacionar as condições de processamento com a qualidade final do material obtido.

## **2.5 Análise tribológica**

Para a avaliação do desgaste, foi utilizado um tribômetro de desgaste linear modelo Tribo1, da marca TTP, instalado no Laboratório de Química da UTFPR–GP. O equipamento foi selecionado por oferecer elevada estabilidade e repetibilidade durante os ensaios, contribuindo para a obtenção de resultados confiáveis ao analisar o comportamento do material. No contexto deste estudo, é importante destacar que tribologia é a área da engenharia que investiga os fenômenos relacionados ao atrito, desgaste e lubrificação entre superfícies em contato. Essa disciplina permite

compreender como diferentes materiais respondem ao contato mecânico, possibilitando avaliar sua durabilidade, eficiência e adequação a aplicações industriais.

Os testes foram realizados com um indentador de aço 52100, seguindo parâmetros previamente definidos para garantir condições de operação uniformes em todas as amostras. O ensaio teve duração de 300 segundos, com força de 5 N, frequência de 5 Hz e deslocamento de 2 mm, parâmetros adequados para observar o desgaste de maneira controlada. A necessidade de realizar esse tipo de ensaio está associada à importância de compreender a resistência ao desgaste do material processado, uma vez que o comportamento tribológico influencia diretamente sua vida útil, desempenho em serviço e capacidade de suportar solicitações mecânicas em aplicações reais.

### **3 RESULTADO E DISCUSSÕES**

Os resultados obtidos nos ensaios permitiram estabelecer correlações diretas entre os parâmetros de processamento adotados como a rotação de 1356 rpm e avanço de 80 mm/min com as modificações observadas na microestrutura das ligas AA1040. Esses valores, previamente definidos após testes preliminares, mostraram-se adequados para promover um refinamento significativo das regiões processadas, favorecendo a fragmentação das estruturas dendríticas grosseiras e a homogeneização do material ao longo da zona afetada.

A aplicação desses parâmetros resultou em intensa ação térmica e mecânica na região central das amostras, o que contribuiu para a redução de porosidades, a diminuição do tamanho dos grãos e a redistribuição das partículas de segunda fase. A morfologia mais fina e uniforme observada nessa região indica que o processo de fricção e agitação, quando operado em 1356 rpm e 80 mm/min, é capaz de promover dispersão eficiente do material de reforço e refino microestrutural consistente.

Os efeitos desses ajustes também se refletiram nos ensaios de microestrutura e corrosão com NaCl 3,5%, nos quais as amostras processadas apresentaram comportamento superior quando comparadas ao metal base. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que os parâmetros adotados desempenharam papel fundamental na melhoria das propriedades do compósito, evidenciando a importância

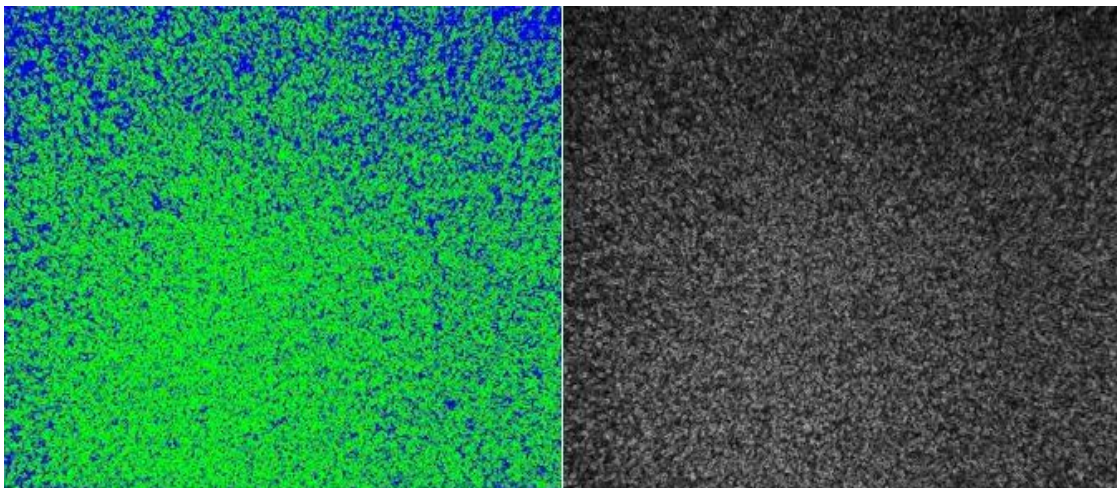
do controle adequado da rotação e do avanço para otimizar o desempenho funcional das ligas estudadas.

### 3.1 Resultado microestruturais do metal base

O metal base utilizado neste estudo é uma liga de alumínio que apresenta baixa dureza e resistência ao desgaste, características comuns desse tipo de material quando não há adição de elementos de reforço. Apesar dessas limitações, trata-se de uma liga estável, com boa uniformidade estrutural e propriedades adequadas para aplicações que exigem leveza e boa condutividade térmica.

A análise microestrutural foi realizada com o auxílio do software ImageJ, que permitiu identificar e avaliar as partículas presentes na amostra como representado na Figura 13. O material mostrou uma estrutura homogênea, composta por partículas de tamanhos e formas semelhantes, bem distribuídas na matriz metálica. Essa uniformidade demonstra a boa qualidade do metal base e reforça a eficiência das etapas de preparação metalográfica executadas.

Figura 13 - Análise microestrutural do metal base



Fonte: Autor (2025).

A padronização observada nas partículas indica que o alumínio utilizado como matriz metálica possui uma estrutura estável e bem distribuída, essa característica contribui para a consistência dos resultados obtidos nos ensaios de microestrutura e corrosão, sendo importante destacar que as grandes partículas, embora dispersas, ainda mantêm a homogeneidade do material. Além disso, a ausência de variações

significativas na morfologia das partículas mostra que o lixamento e o ataque químico foram realizados de forma adequada, garantindo uma superfície limpa e representativa para a análise microscópica.

### 3.2 Amostra com FSP

Após a caracterização inicial do metal base, as amostras foram submetidas ao processo de Fricção e agitação (FSP). Por se tratar de uma técnica realizada no estado sólido, o FSP aplica intensa ação mecânica e térmica sobre a região processada, o que promove o refinamento da microestrutura e possibilita a incorporação das partículas de reforço. Na Figura 14 é possível observar uma amostra com apenas um passe de ferramenta e sem a presença de defeitos que possam vir a comprometer as análises seguintes.

Figura 14 - Amostra modificada e sem defeito



Fonte: Autor (2025).

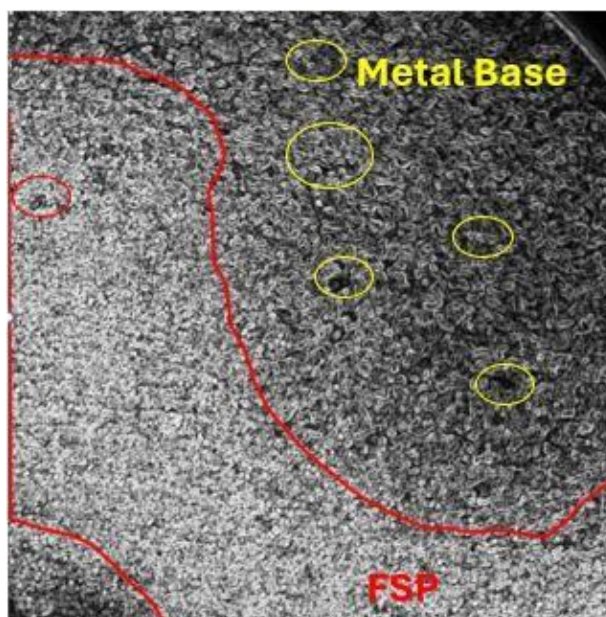
Após os testes de rotação e avanço, foi possível obter amostras sem defeitos, necessárias para dar continuidade no estudo, pois qualquer defeito poderia alterar significativamente os próximos experimentos.

#### 3.2.1 Análise microestrutural da amostra de FSP

Na imagem obtida por microscopia representada na Figura 15, é possível observar diferentes granulometrias distribuídas ao longo da amostra. Na região

central, as partículas apresentam dimensões menores e maior homogeneidade, característica que indica a área diretamente afetada pelo processo de fricção e agitação. Nas regiões periféricas, nota-se uma transição gradual para partículas de maior tamanho, o que reflete a diminuição da intensidade térmica e mecânica conforme aumenta a distância da zona de processamento (TRAIANO, 2023).

Figura 15- Amostra modificada por FSP



Fonte: Autor (2025).

Essa variação microestrutural demonstra a eficiência do método aplicado, uma vez que o atrito intenso e o calor gerado durante o processo favoreceram o refinamento dos grãos e a dispersão mais uniforme do material de reforço. O resultado evidencia que o processo de Friction Stir Processing foi eficaz em modificar a estrutura original, contribuindo para uma microestrutura mais fina e homogênea, essencial para o aprimoramento das propriedades mecânicas do material.

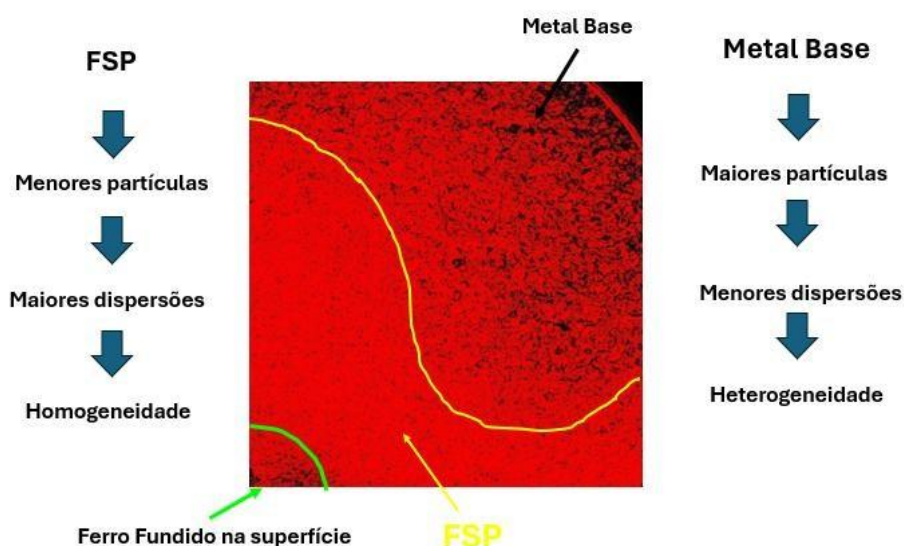
A diferença observada entre as partículas maiores nas regiões periféricas e as menores no centro reforça a eficiência do método em promover uma microestrutura mais uniforme e otimizada para melhorar as propriedades mecânicas do compósito.

### 3.2.2 Indicativo de materiais

A partir da análise realizada no software ImageJ, foi possível gerar a imagem apresentada na Figura 16, na qual as partículas da matriz metálica aparecem

destacadas em vermelho, enquanto as partículas do compósito são mostradas em preto. Essa separação visual permitiu observar com mais clareza como os materiais se distribuíram após o processamento.

Figura 16 - Indicativo de materiais e tamanho de partículas



Fonte: Autor (2025).

Com base nessa visualização, nota-se que a mistura entre a matriz de alumínio e o compósito ocorreu de forma eficiente. As partículas encontram-se bem distribuídas ao longo da região processada, indicando uma dispersão adequada e um bom nível de homogeneização. Esses resultados mostram que o processo de fricção e agitação conseguiu integrar os materiais de maneira consistente, favorecendo a qualidade microestrutural do compósito obtido.

### 3.3 Corrosão com NaCl 3,5%

Com a análise de corrosão, foi possível observar que a matriz metálica incorporou o compósito de maneira efetiva. Por ser um material não ferroso, a matriz de alumínio normalmente não apresenta a formação de *pits* característicos de processos corrosivos localizados, conforme ilustrado na Figura 17, que representa o metal base. Entretanto, na amostra processada, foram identificados diversos pontos de corrosão, como mostrado na Figura 18, indicando que a presença do compósito altera o comportamento eletroquímico do material frente ao meio agressivo.

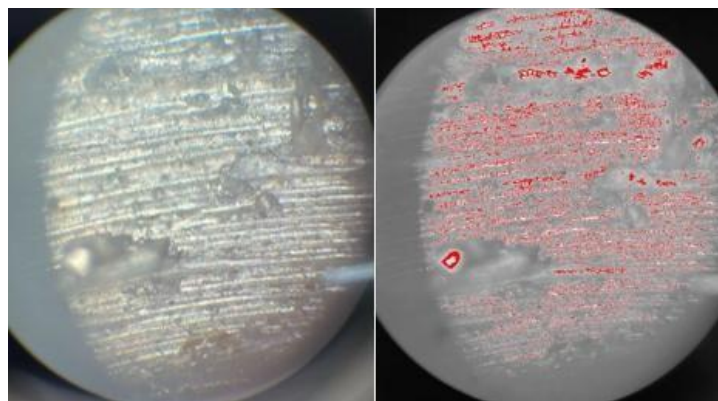
Figura 17: metal base após ataque com NaCl 3,5%



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 18, é possível notar que a presença do compósito influenciou o comportamento eletroquímico do material. Esses indícios sugerem que a incorporação do reforço modificou a resposta da superfície ao meio corrosivo, possivelmente devido à diferença de potencial entre as fases presentes ou à heterogeneidade gerada durante o processamento

Figura 18 - Análise de corrosão



Fonte: Autor (2025).

### 3.4 Dispersão do cavaco na amostra

A Figura 19 mostra a microestrutura do compósito, onde é possível observar algumas partículas maiores dispersas na matriz de alumínio. Essas partículas

representam os cavacos de ferro fundido adicionados ao material, evidenciando uma boa distribuição dentro da matriz metálica.

Figura 19 - Distribuição de cavacos de ferro fundido na matriz de alumínio - Amostra 1



Fonte: Autor (2025).

O contraste entre as partículas de ferro fundido e o alumínio pode ser observado devido ao seu tamanho maior e coloração diferenciada.

Na Figura 20, é possível evidenciar a presença das partículas de cavaco de ferro fundido, especialmente nas regiões mais centrais da amostra. O método de fricção e agitação promoveu a dispersão dessas partículas de forma eficiente, o que é fundamental para melhorar as propriedades mecânicas e tribológicas do compósito.

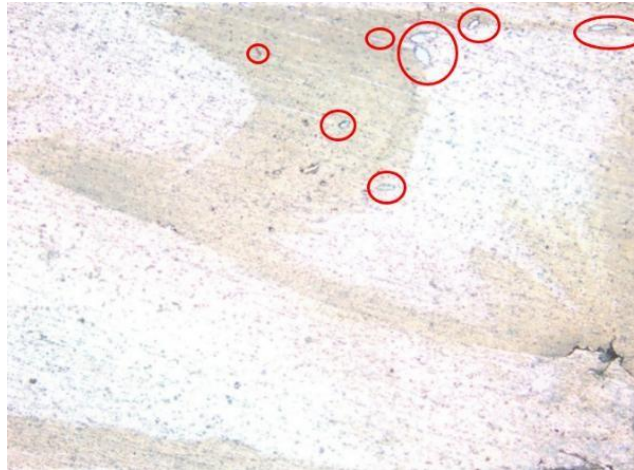
Figura 20 - Presença de cavacos de ferro fundido e microestrutura do compósito - Amostra 2



Fonte: Autor (2025).

A Figura 21 revela uma região onde as partículas de cavaco de ferro fundido estão visivelmente presentes em maior quantidade, especialmente nas bordas da amostra.

Figura 21 - Cavacos de ferro fundido na borda da matriz de alumínio –  
Amostra 3



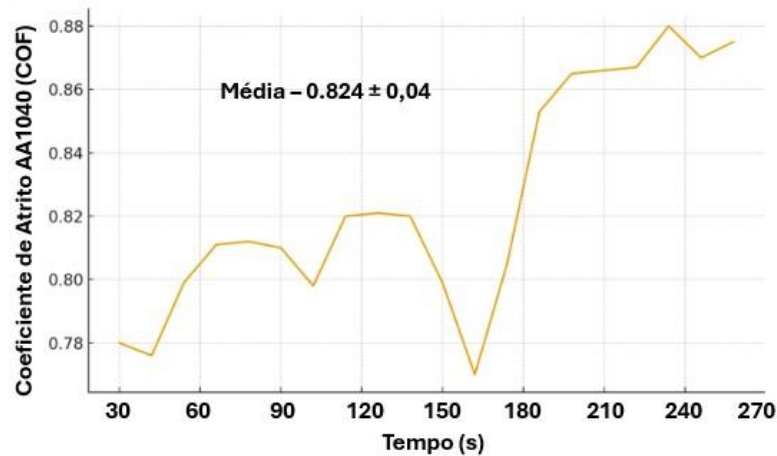
Fonte: Autor (2025).

Isso sugere que, enquanto o método de fricção e agitação resultou em uma distribuição eficiente do cavaco em algumas áreas, outras podem necessitar de mais ajustes no processo para garantir uma maior homogeneização das partículas.

### 3.5 Análise tribológica

A média do coeficiente de atrito do metal base representado no gráfico da Figura 22 foi de  $0,824 \pm 0,04$ , indicando um comportamento relativamente estável, embora sujeito a variações moderadas ao longo do tempo. Essas oscilações refletem a interação natural entre os materiais em contato, típica de ligas de alumínio, que apresentam superfície menos resistente ao desgaste e maior sensibilidade às condições tribológicas.

Figura 22 – Gráfico metal base

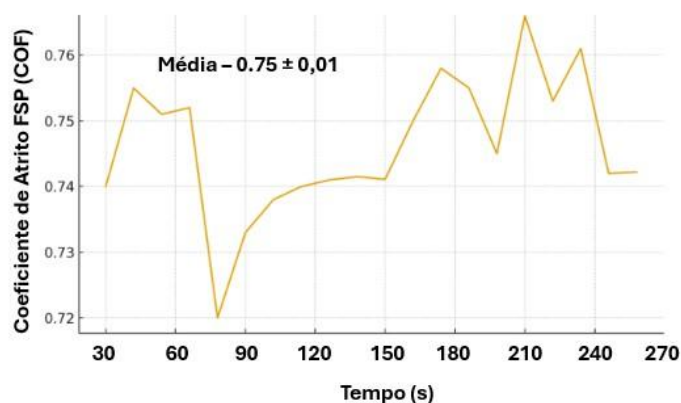


Fonte: Autor (2025)

De forma geral, o gráfico evidencia que o metal base mantém um nível de atrito consistentemente elevado, o que é característico de materiais não modificados, que tendem a apresentar maior aderência e menor estabilidade superficial durante o ensaio de desgaste.

A amostra processada por FSP manteve um comportamento bastante estável ao longo do ensaio. Na maior parte do tempo, o coeficiente de atrito permaneceu entre 0,74 e 0,76 como mostra o gráfico representado na Figura 23, isso sugere regularidade no contato entre as superfícies.

Figura 23 – Amostra com FSP



Fonte: Autor (2025).

A única oscilação mais acentuada ocorre próximo dos 60 segundos, quando o valor atinge cerca de 0,72, mas logo retorna ao patamar anterior. A média obtida, 0,75

$\pm 0,01$ , reforça que o processamento promoveu uma superfície mais uniforme, resultando em menor variação do atrito e maior consistência durante o desgaste.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho teve como propósito avaliar a incorporação de cavacos de ferro fundido à matriz de alumínio por meio do processo de fricção e agitação (FSP), bem como analisar as alterações microestruturais e o comportamento do material quando submetido ao desgaste em solução de NaCl a 3,5% e teste de riscamento. Os parâmetros escolhidos para o processamento com rotação de 1356 rpm e avanço de 80 mm/min mostraram-se adequados para promover modificações significativas na região afetada pela ferramenta.

A análise microestrutural revelou que o FSP foi eficiente em refinar a região processada. Foi possível observar a fragmentação das estruturas originais, além de uma boa dispersão do compósito de ferro fundido ao longo da matriz de alumínio. A análise no software ImageJ ajudou a visualizar de forma clara essa interação entre os materiais, confirmando que o reforço foi incorporado de maneira satisfatória e resultou em uma microestrutura mais homogênea.

Os ensaios de corrosão em solução de NaCl 3,5% mostraram que a presença do compósito alterou o comportamento do material frente ao meio corrosivo, a amostra processada exibiu diferentes pontos de corrosão. Isso indica que a interação entre a matriz e o ferro fundido influencia o desempenho eletroquímico da superfície, possivelmente devido às diferenças de potencial entre as fases e às heterogeneidades formadas durante o processamento.

No teste de riscamento, usado para verificar como a superfície da amostra reage ao desgaste, foi possível observar com mais clareza o comportamento tribológico e comparar o desempenho entre as condições estudadas. O metal base apresentou valores de atrito mais altos e irregulares ao longo do ensaio, com oscilações grandes e picos que chegam a ultrapassar 0,88. Já o material processado por FSP manteve o atrito em níveis menores e bem mais estáveis, concentrados principalmente entre 0,74 e 0,76. Essa diferença evidencia que o FSP deixou a superfície mais uniforme, o que contribuiu para um comportamento tribológico mais regular e previsível durante o desgaste.

Com base nesses resultados, verificou-se que o processo de fricção e agitação representa uma alternativa promissora tanto para o reaproveitamento de cavacos metálicos quanto para a produção de compósitos com características microestruturais modificadas. No entanto, também se evidencia a necessidade de estudos complementares sobre o comportamento corrosivo desses materiais, especialmente em ambientes agressivos.

Por fim, o trabalho demonstra o potencial do FSP como método sustentável e tecnicamente eficiente, ao mesmo tempo em que abre caminho para investigações futuras envolvendo novas combinações de parâmetros, múltiplas passadas da ferramenta e diferentes reforços metálicos, visando ampliar a compreensão e o alcance industrial desses compósitos.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se investigar múltiplas passadas da ferramenta e diferentes combinações de parâmetros do FSP, a fim de aprimorar a homogeneidade microestrutural e a dispersão do reforço. Avaliar outros tipos de partículas, bem como aprofundar os estudos de corrosão em meios mais agressivos, pode ampliar a compreensão do comportamento do compósito. Além disso, a realização de ensaios mecânicos adicionais e análises próximas às condições reais de aplicação contribuirá para avaliar de forma mais completa o potencial do material para uso industrial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ALTHARAN, Yahya M.; SHAMSUDIN, S.; AL-ALIMI, Sami; SAIF, Yazid; ZHOU, Wenbin.** A review on solid-state recycling of aluminum machining chips and their morphology effect on recycled part quality. *Heliyon*, [S.l.], v. 10, n. 14, p. e34433, jul. 2024. Disponível em: [10.1016/j.heliyon.2024.e34433](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34433). Acesso em: 14 set. 2025.

**ASLAN, A.; GÜNEŞ, A.; SALUR, E.; ŞAHİN, Ö. S.; KARADAĞ, H. B.; AKDEMİR, A.** Mechanical properties and microstructure of composites produced by recycling metal chips. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, v. 25, n. 9, p. 1070–1079, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1658-8>. Acesso em: 16 set. 2025.

**AYDIN, H. D.; ŞAHİN, Ö. S.** Recycling and characterization of metallic chips using powder metallurgy. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, v. 5, n. 2, p. 21–25, 2019. Disponível em: <https://www.ijcesen.com/index.php/ijcesen/article/view/106>. Acesso em: 14 set. 2025.

**CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.** *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

**CARVALHO, Felipe Vieira de; TRAIANO, Denner.** Aplicação de polímero PET em matriz metálica de alumínio por *Friction Stir Processing*. 2025. Trabalho de Iniciação Científica – Centro Universitário Campo Real, 2025. Acesso em: 15 nov. 2025.

**EL-ZATHRY, Noah E. et al.** Técnicas baseadas em agitação por fricção: uma visão geral. *Welding in the World*, v. 69, p. 327–361, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-024-01847-w>. Acesso em: 10 jun. 2025.

**FEDDAL, Ikram; CHAIRI, Mohamed; DI BELLA, Guido.** Análise de soldagem por fricção e agitação de ligas de alumínio. *Metals*, v. 15, n. 5, p. 532, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/15/5/532>. Acesso em: 10 jun. 2025.

**GURULAKSHMI, S.; RAJENDRAN, R.; KUMAR, P.; SHANMUGAM, S.** Steel Chips Reinforcement in Aluminum-Based Composites: Revolutionizing Manufacturing via Stir Casting Technique. *Materials Today: Proceedings*, [S.l.], 2024. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/379415334\\_Steel\\_Chips\\_Reinforcement\\_in\\_Aluminum-Based\\_Composites\\_Revolutionizing\\_Manufacturing\\_via\\_Stir\\_Casting\\_Technique](https://www.researchgate.net/publication/379415334_Steel_Chips_Reinforcement_in_Aluminum-Based_Composites_Revolutionizing_Manufacturing_via_Stir_Casting_Technique). Acesso em: 16 set. 2025.

**KONDOFF, C.; ZAEKOVA, R.; MANILOVA, M.** Aluminum based composites obtained by FSP (Review). *Environment. Technology. Resources*, v. 2, n. 1, p. 56–61, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.17770/etr2021vol2.6640>. Acesso em: 14 set. 2025.

**MEHDI, Husain et al.** Uma revisão abrangente dos desenvolvimentos progressivos e desafios na soldagem dissimilar de ligas de alumínio e magnésio por soldagem por fricção e agitação. *International Journal of Welding Science*, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01694243.2025.2483266>. Acesso em: 10 jun. 2025.

**OKON RECYCLING.** What is the environmental impact of scrap metal? [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.okonrecycling.com/industrial-scrap-metalrecycling/steel-and-aluminum/environmental-impact-scrap-metal/>. Acesso em: 13 set. 2025.

**RIBEIRO, M. C. S. et al.** Recycling Approach towards Sustainability Advance of Composite Materials' Industry. *Recycling*, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 178–193, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling1010178>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-4321/1/1/178>. Acesso em: 16 set. 2025.

**SHCHERBAKOVA, E. P. et al.** Iron-added aluminum matrix composites prepared by friction stir processing: structure, mechanical and tribological properties. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, [S.l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13632-024-01085-y>. Acesso em: 13 set. 2025.

**SINGHAL, Varun et al.** Study of the influence of nanoparticle reinforcement on the mechanical and tribological performance of aluminum matrix composites—A review. *Lubricants*, v. 13, n. 2, art. 93, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4442/13/2/93>. Acesso em: 10 jun. 2025.

**SINGH, H.; SINGH, R.** A review study of friction stir processing of aluminum alloys. *Asian Review of Mechanical Engineering*, v. 7, n. 1, p. 25–32, 2018. Disponível em: <https://armejournal.org/index.php/arme/article/view/2448?utm.com>. Acesso em: 14 set. 2025.

**TRAIANO, Denner et al.** Avaliação de três geometrias de pinos de ferramentas para o processo de fricção e agitação. *XIV Seminário de Extensão e Inovação & XXIX Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR*, 29 out.–01 nov. 2024, Francisco Beltrão, PR. Disponível em: <https://www.utfpr.edu.br>. Acesso em: 10 jun. 2025.