



# Modificação superficial da liga de alumínio AA1040 por processo de fricção agitação

## *Surface modification of AA1040 aluminum alloys by friction stir processing*

Victor Santos Watanabe, Denner Traiano, Silvia do Nascimento Rosa Luciano Augusto Lourençato, Hipólito Domingo Carvajal Fals

### RESUMO

Neste trabalho realizou-se a modificação superficial de chapas de alumínio da liga AA1040 através do processo de fricção e agitação. Para o processamento do material utilizou-se um centro de usinagem, e uma ferramenta com pino cilíndrico reto, de aço ferrítico inoxidável. No trabalho variou-se a rotação da ferramenta e a velocidade de avanço, dessa forma verificou-se a influência de tais fatores na formação de defeitos e na rugosidade da região modificada. O processo FSP é uma importante ferramenta para modificação superficial no estado sólido de ligas de alumínio AA1040, e gerou a formação de uma região de grãos finos homogêneos e recristalizados. Comprovou-se que para mais altas rotações e velocidades de avanço as amostras apresentaram menor quantidade de defeitos e menor rugosidade na zona modificada. A geometria da ferramenta e os parâmetros do processo influenciaram na formação de defeitos tipo túnel.

Palavras-chave: Modificação superficial, Ligas de alumínio, Processo de fricção agitação

### ABSTRACT

In this work, the surface modification of aluminum sheets of the AA1040 alloy was carried out through the process of friction stir processing. To process the material, a machining center and a tool with a straight cylindrical pin, made of stainless ferritic steel, were used. The work varied the tool rotation and feed rate, thus verifying the influence of such factors on the formation of defects and on the roughness of the modified region. The FSP process is an important tool for surface modification in the solid state of AA1040 aluminum alloys, and generated the formation of a homogeneous and recrystallized fine grain region. It was proven that for higher rotations and advance speeds, the samples had a smaller number of defects and less roughness in the modified zone. Tool geometry and process parameters influenced the formation of tunnel-type defects.

**Keywords:** Surface modification, Aluminum alloys, Friction stir processing

## 1 INTRODUÇÃO

Em meio a diversos problemas no processo de fabricação de metais, a indústria constantemente buscou alternativas de otimização. Uma delas, devido as dificuldades de soldar ligas de alumínio por processos de fusão, surgiu a soldagem por fricção agitação (*Friction Stir Welding -FSW*), uma técnica que permite unir chapas no estado sólido através do atrito de uma ferramenta com a sua superfície. Tal técnica se mostrou-se eficaz para diversos materiais, e no processo não se atinge as temperaturas de fusão, produzindo assim uma região com alta deformação plástica (NZ), uma região termo mecanicamente afetada (ZTMA) e uma zona termicamente afetada (ZTA) menor, evitando ainda diversos problemas associados à fusão do material da junta.



Ao longo dos anos este processo sofreu adaptações e atualmente é uma importante ferramenta na modificação superficial de ligas. Em meio a tais adaptações, destaca-se o *Friction Stir Processing* (FSP) que tem como principal objetivo melhorar as propriedades da superfície de alguns metais, além de oferecer a correção de diversos defeitos ocasionados por outros processos de fabricação, como poros e inclusões. Outra vantagem é que este processamento é capaz de proporcionar aumento da dureza e maior resistência a corrosão.

O processo FSP consiste em um tratamento termomecânico para modificar, localizadamente, a microestrutura por refino dos grãos cristalinos e, com isso, gerar uma melhoria nas propriedades mecânicas superficiais (Netto, 2020). Segundo (Zhama, 2015) o FSP ocorre, assim como o FSW, e consiste na ação de rotação de uma ferramenta sobre a superfície do material base (peça). A ferramenta não é consumível, e é composta por: um ombro, que gera aquecimento por atrito; e um pino, que realiza movimentos de avanço axial (“mergulho”) e promove deformação plástica.

Este trabalho tem como objetivo realizar a modificação superficial de chapas de alumínio da liga AA1040 através do processo de fricção agitação, e avaliar a influência da rotação e velocidade de avanço da ferramenta na rugosidade e na formação de defeitos da zona modificação.

## 2 MÉTODODOLOGIA

### 2.1 Amostras

Como objeto de estudo, selecionamos chapas de alumínio AA1040 com 300 x 400 x 4 mm de dimensões, comprimento, largura e espessura, respectivamente. Utilizou-se no experimento 9 chapas ao todo, pois para cada processo um parâmetro foi alterado, seja na rotação da ferramenta ou a velocidade de avanço. A tabela 1 destaca as amostras, com suas nomenclaturas, e os parâmetros avaliados.

**Tabela 1:** Nomenclaturas e parâmetros do processo

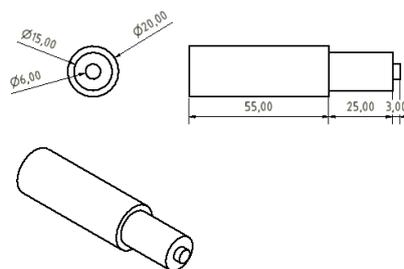
Nomenclatura	AM001	AM002	AM003	AM007	AM008	AM009	AM013	AM014	AM015
n (rpm)	750	750	750	1100	1100	1100	1500	1500	1500
vf (mm/min)	40	50	60	40	50	60	40	50	60

**Fonte:** Autoria própria (2021)

### 2.2 Ferramenta para modificação superficial

Para o processo de fricção agitação utilizou-se uma ferramenta de aço inoxidável do tipo ferrítico, que foi confeccionada em um torno convencional. A figura 1 mostra as dimensões da ferramenta, que apresenta um pino cilíndrico de 3 mm de altura e 6 de diâmetro e um ombro de 20 mm.

**Figura 1:** Representação isométrica e perspectivas da ferramenta



**Fonte:** Traiano (2021)



A figura 2 mostra a montagem das amostras num dispositivo no centro de usinagem utilizado, sendo este com CNC da linha ROMI D, com trabalho de rotação máximo de 8000 rpm a uma potência de 15 kW.

**Figura 2:** Centro de usinagem



**Fonte:** Autoria própria (2021)

### 2.3 Preparação das amostras

Para que as amostras fossem caracterizadas, utilizou-se a cortadora metalográfica CM 60, no qual há injeção de fluido durante o corte para evitar imperfeições na face seccionada. Os cortes foram padronizados respeitando a distância de 30 mm, partindo do zero da ferramenta. As amostras foram embutidas em resina baquelita com pressão e temperaturas já determinados.

Para o processo de lixamento foram escolhidas as lixas com 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, rotacionando em 90° a amostra em cada mudança de lixa para eliminação de possíveis imperfeições na superfície. Então, as amostras então foram condicionadas em um processo de ultrassom para que quaisquer partículas depositadas sobre a superfície fossem eliminadas, a fim de obter-se melhores condições para os ensaios. Após, as amostras foram submetidas ao processo de polimento com pasta de diamante de 3µm e 0,25µm.

### 2.5 Ataque químico

O ataque foi realizado através de uma solução inicialmente com 25 ml de água destilada no qual lentamente adicionou-se a mesma quantidade de ácido nítrico. Após, adicionou-se, também de forma lenta, 25 ml de ácido clorídrico e por fim, quantidade igual de ácido fluorídrico. É importante que essa solução seja preparada de forma lenta, pois durante o processo a temperatura e a coloração da solução podem variar, dessa forma, os solventes devem ser adicionados aos poucos para que não alterem as propriedades da solução.

Com a finalização da solução, o ataque ocorre a partir da imersão das amostras durante 3 segundos na solução, então enxagua-se em água corrente, borrifa-se álcool sobre a superfície e realiza-se a secagem com um soprador. Com este processo ocorre é possível visualizar a microestrutura de toda a região tratada e a estrutura do metal de base.

### 2.6 Análise da rugosidade

Utilizou-se um rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ-410 para a avaliação da rugosidade da superfície. Este ensaio consiste em uma aplicação de carga com uma pinça de diamante onde percorre-se toda a extensão da superfície, verificando alturas do perfil, altura máxima de pico, profundidade máxima do vale e altura total do perfil.

### 3 RESULTADOS

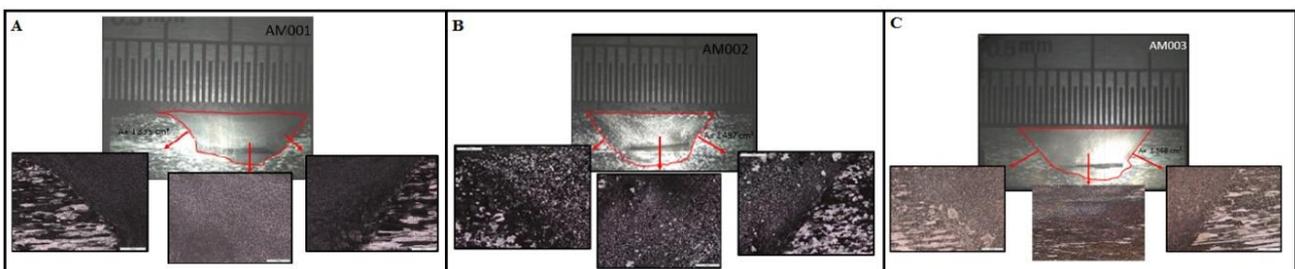
#### 3.1 Análises da composição química

Foram realizadas análises química por energia dispersiva (EDS) por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras antes e após o processo de modificação superficial e foi comprovado que a chapa da liga de alumínio 1040, usada no trabalho, apresentava 99,4% de Al e 0,6% de outros elementos em sua composição. Após a realização dos ensaios, percebeu-se que na zona modificada a composição química foi alterada, onde apresentou-se 97,5% de Al e 2,0% de Si e 0,6% de Fe. Como percebeu-se, provavelmente a alteração na composição química na região ocorreu em função da ferramenta utilizada.

#### 3.2 Análise metalográfica

Na Figura 3, se mostram os resultados da análise metalográfica das zonas modificadas pelo processo de fricção agitação. Nesta figura pode-se perceber a área de tratamento (imagem centralizada de maior dimensão), e as regiões microestruturais (imagens de menor dimensão), em locais com variações importantes na microestrutura das amostras.

**Figura 3:** Análise na amostra (A) AM001; (B) AM002; (C) AM003



**Fonte:** Traiano (2021)

Nas imagens da esquerda, é possível visualizar uma região grosseira, com grãos alongados e não homogêneos e uma região formada pelo processo termomecânico, que separa a estrutura do metal base e a microestrutura do material pós-tratamento. Essa separação ocorre devido a deformação plástica e a geração de calor durante o processo.

A região de nugget, constitui-se do local com grãos finos recristalizados e homogêneos. Essa região pode ser visualizada nas imagens centrais da Figura 3, onde há quebra dos grãos alongados do processo de laminação.

As imagens da direita referem-se ao sentido de tratamento, ou seja, o sentido no qual a ferramenta se deslocou para a realização do ensaio. Nessas imagens verifica-se a presença do metal base na extrema direita de cada uma das figuras, sendo caracterizados por grãos alongados e não homogêneos.

As áreas modificadas das amostras podem ser visualizadas na tabela 2, onde realizou-se a medição das regiões através das análises das imagens obtidas por microscopia ótica, com utilização do software ImageJ:

**Tabela 2:** Área modificada das amostras em cada condição de processamento

Amostras	AM001	AM002	AM003	AM007	AM008	AM009	AM013	AM014	AM015
Área (cm <sup>2</sup> )	1,335	1,497	1,568	1,551	1,625	1,212	1,220	1,379	1,471

**Fonte:** Autoria própria (2021)

Engenharia mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil;

victorwatanabe@utfpr.alunos.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; lalouren@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; hipolitofals@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava; denner\_traiano9@outlook.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava; silviarosa@utfpr.edu.br

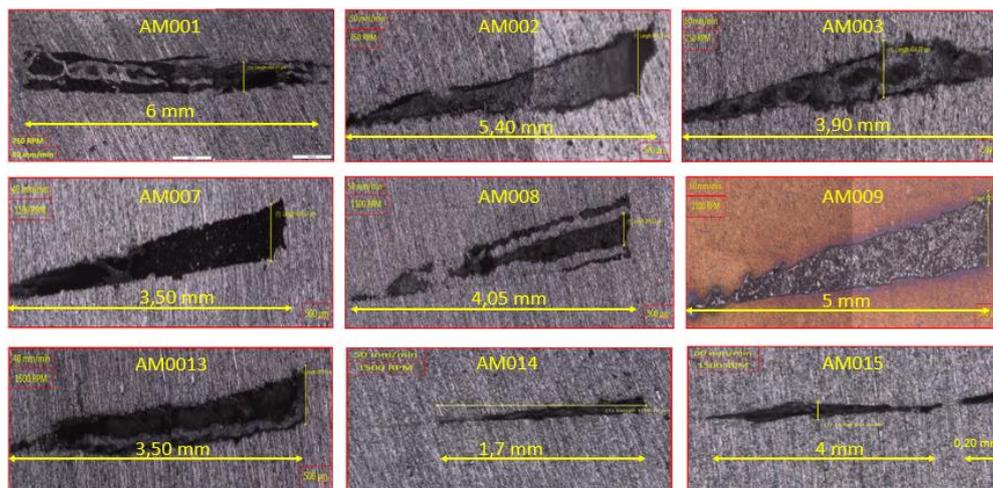
As amostras AM008, AM003 e AM007 tiveram maior variação de área, isso ocorreu devido a menores taxas de avanço e rotações, pois nestes casos ocorreu um aumento significativo do calor e consequentemente maior área termo mecanicamente tratada.

Obteve-se melhores resultados nas amostras AM014 e AM015, onde apresentou-se melhor recristalização da microestrutura, além da grande homogeneidade proporcionada ao alumínio e a formação bem definida de cada região do tratamento.

### 3.3 Defeitos

Como consequência do processo de modificação superficial por fricção agitação, surgiram defeitos macroestruturais nas amostras, sendo a falta de material o principal deles, na zona inferior do nugget, exatamente do lado de retrocesso da ferramenta. A figura 4 mostra as dimensões e a geometria destes defeitos:

**Figura 4:** Análise dos defeitos



**Fonte:** Traiano (2021)

Percebeu-se que os maiores defeitos ocorreram nas amostras processadas com rotação de 750 rpm e avanço de 40 mm/min, em contra partida, os menores defeitos ocorreram nas amostras processadas com 1500 rpm de rotação. Como dito, tais defeitos são consequência da geometria da ferramenta, que influencia no aporte de calor, e por consequência no escoamento do fluxo do material, acarretando em defeitos do tipo túnel.

### 3.4 Análises da Rugosidade da Zona do Nugget

Na figura 5 se mostram na forma gráfica, os valores e rugosidade média da zona processada por fricção agitação. Analisando os resultados obtidos, verificou-se que ocorreu menor rugosidade nas amostras processadas com maior velocidade avanço e maior rotação. Dessa forma possibilitou um grande escoamento de material plastificado, não gerando grandes deformações na superfície nem imperfeições. Já as amostras com menor avanço e rotação, apresentaram valores maiores de rugosidade devido à baixa temperatura gerada pelo processo, o que dificulta escoamento do metal plastificado, causando maiores rugosidades na superfície e gerando muitas rebarbas.

**Figura 5:** Análise dos defeitos



Fonte: Traiano (2021)

## 4 CONCLUSÕES

O processo FSP é uma importante ferramenta para modificação superficial no estado sólido de ligas de alumínio AA1040, e gerou a formação de uma região de grãos finos homogêneos e recristalizados. Comprovou-se que para mais altas rotações e velocidades de avanço as amostras apresentaram menor quantidade de defeitos e menor rugosidade na zona modificada, em contra partida, para rotações mais baixas houve diminuição da microdureza quando comparado com o metal base antes da modificação. A geometria da ferramenta e os parâmetros do processo influenciaram na formação de defeitos tipo túnel, principalmente no lado de retrocesso da ferramenta na parte inferior da ZM. Assim, para futuros estudos, para obtenção de melhores resultados aconselha-se rotações entre 1100 e 1500 rpm, conferindo neste intervalo menor ocorrência de defeitos, menor taxa de corrosão e aumento considerável da dureza.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos professores e colegas pela tutoria e ajuda, à UTFPR, pela disponibilização das estruturas da universidade e por todo o suporte. Ao CNPq, pelo apoio financeiro na conceção da bolsa de Iniciação Científica.

## 5 REFERÊNCIAS

- TRAIANO, Dener; “**Relatório das análises do pré-teste realizado em liga de alumínio AA1040 utilizando processo de fricção e mistura**”, 2021.
- NETTO, Nelson; Zhaoa, Lv; Soete, Jeroen; Pyka, Grzegorz; Simar, Aude; “**Manufacturing high strength aluminum matrix composites by friction stir processing: An innovative approach**”, 2020.
- SHARMA, Vipin; PRAKASH, Ujjwal; MANOJ KUMAR, B.V.; “**Surface composites by friction stir processing: A review**” 2015.
- MISHRA, R.; MA, Z.; “**Friction stir welding and processing**”, Materials Science and Engineering, R 50, 1-78, 2005.
- KURT, A. y I. Uygur “**Surface modification of aluminium by friction stir processing**”. Journal of Materials Processing Technology, 211, 313-317, 2011.
- NASCIMENTO, F.; SANTOS, T.; VILACA, P.; MIRANDA, R.; QUINTINO, L.; “**Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys**”. Mater Science and Engineering, A506, 16–22, 2009.
- BUSSU, G.; IRVING, P.; “**The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints**”, International Journal of Fatigue, 25(1), 77-88, 2003.

Engenharia mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil;  
victorwatanabe@utfpr.alunos.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; lalouren@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; hipolitofals@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava; denner\_traiano9@outlook.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava; silviarosa@utfpr.edu.br