



## Influência da Modificação Superficial por Fricção e Agitação na Resistência ao Desgaste por atrito da Liga Al12Si Influence of Surface Modification by Friction and Agitation on Friction-Wear Resistance of Al12Si Alloy

Anquises Costa Portes<sup>1</sup>, Denner Traiano<sup>2</sup>, José Augusto Liberato Ribeiro da Silva<sup>3</sup>, Luciano Augusto Lourençato<sup>4</sup>, Simone do Rocio Ferraz Sabino<sup>5</sup> e Hipolito Domingo Carvajal Fals<sup>6</sup>.

### RESUMO

Neste trabalho foi avaliada a resistência ao desgaste por atrito da liga AL12Si após o processo de modificação superficial por fricção e agitação. Foi estudado a influência dos parâmetros de rotação (n) e velocidade avanço (vê), nas condições de 700 rpm por 16 mm/min, 850 rpm por 22 mm/min e 1100 rpm por 28 mm/min. Na zona de modificação comprovou-se a formação de uma região do núcleo, e outra termomecânica afetada (ZTMA), onde originou a fragmentação e homogeneização de partículas intermetálicas de ferro AlFeMnSi-Fe- $\alpha$ , AlFeSi-Fe- $\beta$ , e das partículas de silício. Ocorrendo homogeneização e distribuição dessas partículas. A modificação superficial utilizando o parâmetro 700 rpm por 16 mm/min, resultou em melhores resultados de refinamento dos grãos, além do melhor resultado no coeficiente de desgaste médio e maior microdureza quando comparadas com a liga em estado fundida.

**PALAVRAS CHAVES:** Al12Si liga, fricção agitação, microdureza, coeficiente de atrito

### ABSTRACT

In this work, the frictional wear resistance of the Al12Si alloy was evaluated after the surface modification by friction stir processing. The influence of rotation (n) and forward speed (vf) parameters were studied under the conditions of 700 rpm for 16 mm/min, 850 rpm for 22 mm/min and 1100 rpm for 28 mm/min. In the modification zone, the formation of a nugget region and another thermomechanically affected region (ZTMA) was confirmed, which led to the fragmentation and homogenization of intermetallic iron particles AlFeMnSi-Fe- $\alpha$ , AlFeSi-Fe- $\beta$ , and silicon particles. Occurring homogenization and distribution of these particles. The surface modification using the parameter 700 rpm for 16 mm/min, resulted in better grain refinement results, in addition to the best result in the average wear coefficient and higher microhardness, when compared to the as cast alloy in a state fused.

**KEY WORDS:** Al12Si alloy, friction stir processing, microhardness, friction coefficient

### INTRODUÇÃO

As ligas de Al-Si, possuem grande demanda em aplicações nas indústrias automotiva e aeronáutica. Estas ligas, de forma geral, mostram boa resistência ao desgaste, no entanto, na condição como fundida a resistência ao desgaste é inferior, devido aos defeitos

<sup>1</sup> Bolsista da FA. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: portes@alunos.utfpr.edu.br. Lattes ID: 5967948366521207

<sup>2</sup> Mestrando da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: dtraiano127@gmail.com Lattes ID: 5134649877126348

<sup>3</sup> Bolsista da UTFPR AF. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: joseaugusto@alunos.utfpr.edu.br Lattes ID: 2737222756716818

<sup>4</sup> Docente no Curso de Engenharia Mecânica/ DAMEC/ PPGEM. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: lalouren@utfpr.edu.br. ID Lattes: 3421117431876101

<sup>5</sup> Bolsista técnico, Fundação Araucária (AF) do C2MMa. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta-Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: mone.sab@hotmail.com. ID Lattes: 1428171771155660

<sup>6</sup> Docente do PPGEM. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: hipolitofals@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8883136649448444

como poros e vazios, à microestrutura dendrítica heterógena com partículas de silício e fases intermetálicas de Fe, em forma de agulhas. A modificação da microestrutura através de tratamentos térmico e ou termomecânico, é uma solução adequada para melhorar as



propriedades tribológicas. Nesse sentido, Yasmin et al., (2004) observaram que a esferoidização de partículas de silício por tratamento térmico de solubilização tende a aumentar a resistência ao desgaste de uma liga Al - 7% Si.

O Processo por Fricção e Agitação (FSP-*Friction Stir Processing*) é uma técnica derivada de um procedimento de soldagem por atrito (FSW-*Friction Stir Welding*), desenvolvido pelo conjunto de pesquisadores do TWI (*The Welding Institute*), no Reino Unido, em 1991. No ano 1999, Mishra et al (1999), publicou pela vez primeira as características do processamento por fricção e agitação (FSP). Neste processo, ocorrem deformações plásticas localizadas, através do calor gerado pelo atrito entre a ferramenta de trabalho e a superfície de tratamento (MA, 2008).

O processo de Fricção e Agitação aplicado na modificação superficial das ligas Al12Si, tem notável desempenho na fragmentação de estruturas dendríticas, fração de formações intermetálicas de ferro e manganês, além da quebra de aglomerados de silício na fase eutética, assim como a redistribuição e dispersão de precipitados na matriz de alumínio, contribuindo para o refinamento de grãos e homogeneização da microestrutura (MOEINI *et al.*, 2020; SUN, YANG, JIN, 2017).

Neste trabalho, foi avaliada a influência dos parâmetros do processo de modificação superficial por fricção e agitação na resistência ao desgaste por atrito da liga AL12Si.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A liga Al12Si foi recebida em forma de lingotes fundidos da empresa Metalúrgica Frenobrás. Para as análises de composição do material, foi utilizado o ensaio de fluorescência por raios X, num espectrômetro modelo OXFORD INSTRUMENTS. Na Tabela 1 mostra a composição química das ligas de Al12Si.

Tabela 1 - Composição química dos elementos das ligas Al12Si e Al14Si (% peso)

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al12Si	11,61	0,41	1,22	0,34	0,88	0,05	0,06	0,12	84,35

Fonte: Autoria própria (2023)

Para a preparação das amostras para modificação superficial, os lingotes fundidos foram processados por corte e usinagem.

O processo de modificação superficial por fricção agitação foi realizado, em um centro de usinagem vertical ROMI D 600, com comando numérico computadorizado FANUC, com uma rotação máxima de aproximadamente 8000 rpm e potência de 20 cv. A ferramenta utilizada, de aço inoxidável do tipo ferrítico, com pino cônico com 6 mm na base e altura de 3 mm e um ombro côncavo com 15 mm de diâmetro.

Para a caracterização das amostras, foram retirados corpos de prova da região modificada. As amostras permitem analisar a superfície modificada e a secção transversal em todas as áreas processadas, atingindo o metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA), zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA) e região do núcleo (RN).

Para a observação da macro e microestrutura da seção transversal as amostras foram cortadas na seção transversal, embutidas em baquelite, lixadas com lixas: 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh e polidas com pastas de diamante. Foi utilizado o reagente Osmond, que consistiu-se em 25 ml de água destilada, 25 ml de ácido nítrico, 25 ml de ácido clorídrico e 2,5 ml de ácido fluorídrico. O tempo de ataque foi de 3 segundos.

As imagens microestruturais foram avaliadas no microscópio óptico Olympus UC30 e processadas no software Stream Essentials. Também foi utilizado o Microscópio

Eletrônico de Varredura (MEV) marca Tescan Modelo Vega3 para obter imagens da microestrutura e o mapeamento da composição química que é feito pelo EDS acoplado ao MEV, além da verificação sobre a alteração dos tamanhos de grãos, refinamento dos grãos e precipitados de segunda fase.

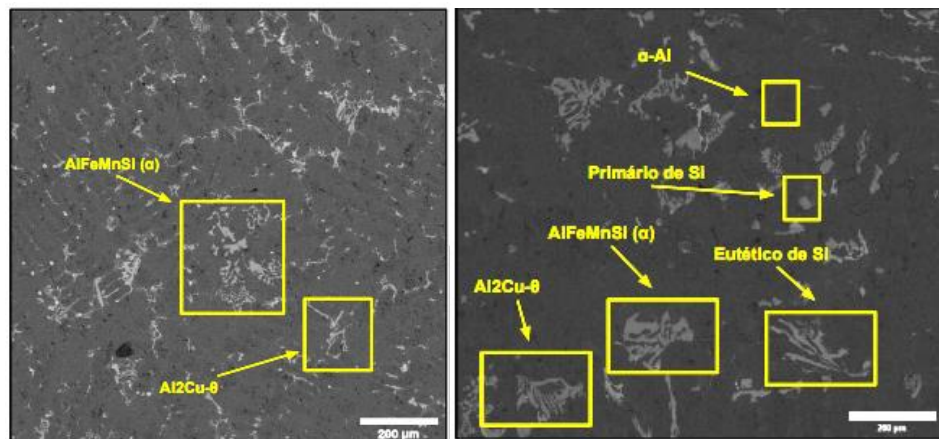
Para o processo de avaliação do desgaste, foi utilizado um tribômetro de desgaste linear Tribo1 da marca TTP localizado no Laboratório de Química da UTFPR-GP, com a utilização de indentadores de aço 52100 e os seguintes parâmetros: tempo de ensaio de 300 segundos, força de 5N, com uma frequência de 5 Hz, e trilha com 2 mm de comprimento.

## RESULTADOS E ANÁLISES

Na Figura 1, mostram-se as microestruturas da liga Al12Si, fundida. As fases formadas durante a solidificação das ligas, dependem da composição química, da velocidade de solidificação e da influência de agentes refinadores. As ligas fundidas também se caracterizam pela formação de poros, inclusões e defeitos superficiais, como foi observado por ARENDARCHUCK, (2022) e PEREIRA, (2017).

Como se constata na Figura 1, a liga Al12Si fundida apresentou as fases de Al $\alpha$  primário, Al-Si eutético, as fases intermetálicas de (AlFeMnSi-Fe $\alpha$ ) em forma de “escrita chinesa”, AlFeSi-Fe  $\beta$  em forma de “agulhas” e Al<sub>2</sub>Cu- $\theta$ , e partículas e aglomerados de silício. As fases intermetálicas de AlFeSi-Fe  $\beta$  pela morfologia e tamanho são as principais responsáveis pela deterioração das propriedades mecânicas da liga Al12Si, como já foi concluído por SUN, *et al* (2017) e REDDY and RAO, (2010).

Figura 1 – (Imagens MEV-EDS a) Microestrutura da liga Al12Si fundida



Fonte: Autoria própria (2023)

## ANÁLISES MICROESTRUTURAL DA ZONA DE MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL

Após a realização do processo de modificação superficial, foi possível a obtenção de superfícies modificadas com um alto refinamento de partículas de intermetálicos, quebra de estruturas dendríticas, fragmentação de intermetálicos, remoção de porosidades e formação de uma microestrutura homogênea e fina em comparação com a microestrutura fundida.

As modificações microestruturais que ocorrem têm relação com a temperatura e a severa deformação plástica atingida durante a técnica de processamento por fricção-agitação. Na Figura 2, mostra-se uma imagem representativa da zona modificada por

Fricção e Agitação na seção transversal para a liga Al12Si, neste caso utilizando os parâmetros de 700 rpm por 16 mm/min.

Figura 2 – Imagem macroscópica das amostras modificadas por fricção e agitação e suas respectivas áreas, nas condições a) 700 rpm e 16 mm/min b) 850 rpm e 22 mm/ c) 1100 rpm e 28 mm/min

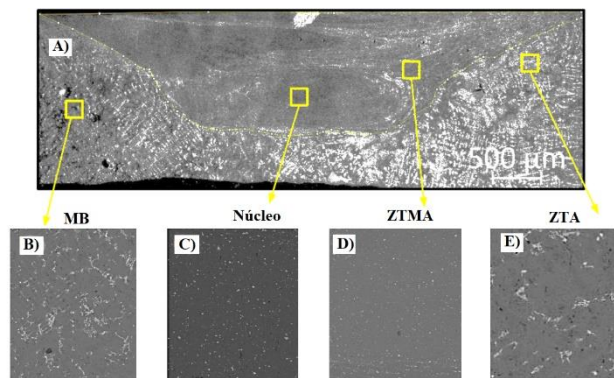


Fonte: Autoria própria (2023)

Se observa que a modificação formou bandas de deformação (*onions rings*), além da diminuição do tamanho dos grãos na zona do núcleo. A temperatura desenvolvida durante o processo, contribui na modificação da microestrutura, afetando diretamente o tamanho das partículas, a dissolução e re-precipitação de fases, a recristalização dos grãos e a extensão da ZTMA e da ZTA. As condições do processo comprovaram que diferentes parâmetros, utilizados desenvolvem zonas de diferentes tamanhos e microestruturas diversas.

Na Figura 3, se mostram de forma representativa as ampliações das regiões da ZM, sendo o Núcleo, a ZTMA, a ZTA e o MB, obtidas na zona modificada com parâmetros de 700 rpm por 16 mm/min.

Figura 3 - Regiões de modificação por fricção e agitação liga Al12Si



Fonte: Autoria própria (2023)

De forma geral observou-se, que o processo de modificação provocou a quebra e dispersão de fases intermetálicas e ainda das partículas de Si, provocou também o refinamento e a recristalização dos grãos, em todas as regiões como explicou ZYKOVA et al., 2020, e como se constata na Figura 3.

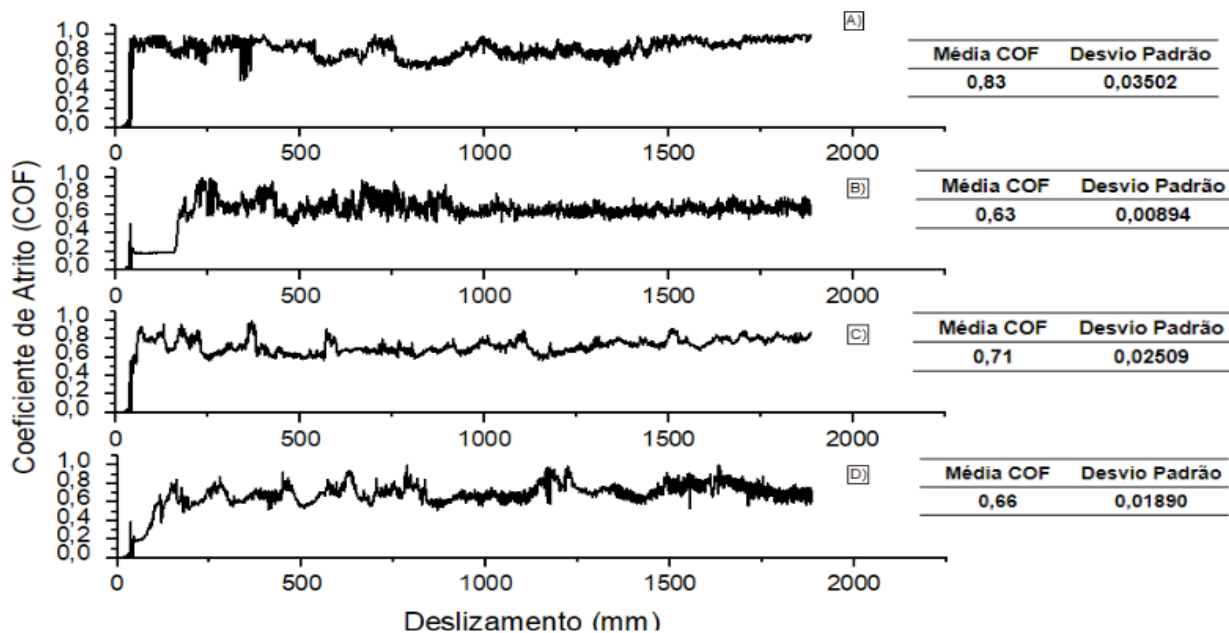
## INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL POR FRICÇÃO E AGITAÇÃO NO COEFICIENTE DE ATRITO

Os valores do coeficiente de atrito (COF), foram obtidos para todas as condições experimentais, através de testes de riscamento. Na Figura 4, é apresentado o gráfico da variação do coeficiente de atrito por deslizamento e os valores médios para cada condição de processamento. De forma geral se observa que nas amostras modificadas pelo processo de Fricção e Agitação, ocorreu uma diminuição do coeficiente de atrito (COF).



Entende-se que as variações dos valores do COF, está relacionada com a microestrutura e propriedades mecânicas do material. Portanto a formação de partículas grandes de silício na fase eutética, assim como o agrupamento de partículas intermetálicas:  $AlFeSiMn-Fe\alpha$ ,  $AlFeSi-Fe\beta$ , fragilizam o material e influenciam no COF. Após o processo de Fricção e Agitação, a zona modificada (ZM) núcleo, apresentou uma microestrutura fina e com partículas de intermetálicos finas e dispersas, comparado com o metal da liga Al12Si fundida. Como consequência desse processo houve o aumento da dureza na região processada. O aumento da dureza, então tem correlação direta com a resistência ao desgaste. Nesse sentido, a perda de material, ou seja, o volume retirado, está ligado inversamente à dureza do material e a capacidade de deformação do mesmo (ARCHARD, 1953; MAHDAVI et al., 2020).

Figura 4 - Variação do coeficiente de atrito - A) Metal Base B) 700 rpm por 16 mm/min C) 850 rpm por 22 mm/min D) 1100 por 28 mm/min



Fonte: Autoria própria (2023)

Outro ponto que foi avaliado é a influência dos parâmetros utilizados para a modificação superficial do material. A amostra, modificada com 700 rpm e 16 mm/min, apresentou a menor área de desgaste crítico e com isso também obteve a segunda menor extensão de área desgastada. Quando foi usada esta combinação de parâmetros foram obtidos os menores tamanhos de partículas de Si e de intermetálicos de ferro e melhor distribuição consequentemente menor COF e área de desgaste.

## CONCLUSÕES

Foram avaliadas as mudanças microestruturais e de microdureza na liga Al12Si, quando modificada pelo processo de Fricção e Agitação, e ainda determinado o COF em função de combinação dos parâmetros do processo. Desse modo observou-se que:



- Comprovou-se a formação de grãos equiaxiais finos, recristalizados na zona modificada. As fases intermetálicas  $\text{AlFeMnSi}(\text{Fe}\alpha)$  e  $\text{AlFeSi}(\text{Fe}\beta)$  e as partículas de Si da liga fundida, foram quebradas e dispersas na matriz de alumínio.
- O processo de modificação superficial melhorou o COF da liga AL12Si fundida. Os parâmetros do processo influenciaram no COF, atingindo o valor menor (0,63) com 700 rpm e 16 mm/min.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a UTFPR, laboratório multiusuários de Caracterização de Materiais (C2MMA) que contribuíram para a realização do trabalho, e ao CNPQ pelos recursos no formato de bolsa e auxílio financeiro.

### REFERÊNCIAS

Mishra, R., Mahoney, M., McFadden, S., Mara, N., Mukherjee, A., 1999. High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy. *Scr. Mater.* 42, 163–168, [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00329-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00329-2).

Yasmin, T., Khalid, A.a., Haque, M.M.M., 2004. Tribological (wear) properties of aluminum–silicon eutectic base alloy under dry sliding condition. *J. Mater. Process. Technol.* 153-154, 833–838, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.147>

Reddy, G.M., Rao, K.S., 2010. Enhancement of wear and corrosion resistance of cast A356 aluminium alloy using friction stir processing. *Trans. Indian Inst. Met.* 63, 793–798. Ma, Z.Y. Friction Stir Processing technology. *Metallurgical and Materials Transactions*, v. 39, p. 642-658, 2008.

MOEINI, G.; *et al.* Effect of Friction Stir Processing on microstructural, mechanical, and corrosion properties of Al-Si12 Additive Manufactured Components. *Metals*, v. 10, n. 1, p. 85, 2020

Sun, H.; *et al.*; Improvement of Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Cast Al-12Si Alloy by Friction Stir Processing. *Transactions of the Indian of Metal*, v.71, n. 4, p.985-991, 2017.

Zykova, A.; *et al.* Microstructure of in-situ Friction Stir Processed Al-Cu transition zone. *Metals*, v. 10, n. 6, p. 818, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/met10060818>

Archard, J. Contacts and Rubbing of flat surface. *J appl Phys.* 1953; 24: 981-988.

Mahdavi, S.; *et al.* Effect of alumina particle size on characteristics, corrosion, and tribological behavior of Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings. *Ceramics International*, v. 46, n. 4, p. 5351-5359, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.289>.