

Desenvolvimento de FSP (*Friction Stir Processing*) em fresadora convencional

FSP (*Friction Stir Processing*) development in conventional milling machine

RESUMO

O presente artigo buscou desenvolver novas ferramentas, a fim de obter melhores resultados na realização do Friction Stir Processing. Para tanto, o processo foi realizado com três ferramentas, visando estudar a influência da geometria de cada uma delas na alteração das propriedades mecânicas das ligas de Alumínio processadas. Para cada uma delas, fixou-se a velocidade de rotação da fresadora em 2100 rpm e variou-se as velocidades de avanço em 30-45-60-80-90-160 mm/s. As amostras processadas foram analisadas macroscopicamente através do *software ImageJ*, onde foram detectados defeitos do tipo *wormhole* em algumas das condições. O desenvolvimento das novas ferramentas tomou como base as geometrias que obtiveram melhores resultados nos ensaios realizados.

PALAVRAS-CHAVE: *Friction Stir Welding*, Ferramenta FSP, Alumínio.

ABSTRACT

This article intended to develop new tools, which goal was obtain better results in Friction Stir Processing. Therefore, the process was carried out with three tools and the aim was to study the tool's geometry influence and then show up the effects in an Aluminum alloy processed. For each of them the tool rotating speed was 2100 rpm and the speed travel varied around 30-45-60-80-90-160 mm/s. Those processed samples were macroscopically analyzed using ImageJ software, detecting wormhole defects in some conditions. The new tools development was based on geometries that obtained the best results in the tests.

KEYWORDS: Friction Stir Welding. FSP tool. Aluminum.

Eduardo Maier Eurich
eduardo.maier@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Luciano Augusto Lourençato
lalouren@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Hipólito Domingo Carvajal Fals
hipolitofals@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Roger Navarro Verastegui
rogerverastegui@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Devido às dificuldades em se realizar a união de ligas de alumínio através de processos de soldagem por fusão, novas técnicas surgiram com o objetivo de realizar a junção com maior eficiência. Na Inglaterra, no Instituto de Soldagem (*The Welding Institute- TWI*), em 1991, foi desenvolvida uma técnica inovadora de soldagem no estado sólido, o *Friction Stir Welding (FSW)*.

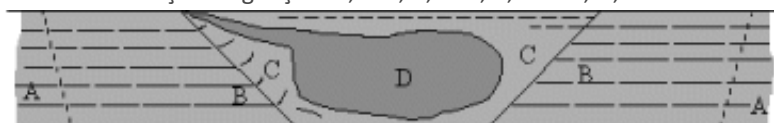
Em processos de fabricação de ligas de alumínio, busca-se, cada vez mais, por técnicas alternativas e inovadoras para a melhoria das propriedades mecânicas. Entre estas técnicas, destaca-se o processo denominado *Friction Stir Processing (FSP)*, adaptada dos conceitos de FSW. Esta adaptação ocorreu a partir dos estudos de Mishra et al. (1999), que observaram, após realizar a união de ligas 7075 Al, uma importante diminuição do tamanho de grão na zona processada.

Netto et al. (2020) definiram o FSP como um processo termomecânico para modificar, localizadamente, a microestrutura por refino dos grãos cristalinos e, com isso, gerar uma melhoria nas propriedades mecânicas superficiais. Segundo Sharma et al. (2015) o FSP ocorre, assim como o FSW, e consiste na ação da 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.

Durante a realização do FSP existem parâmetros que, a partir de suas variações, influenciam na qualidade final do processo. São eles: velocidade de rotação, velocidade de avanço, geometria da ferramenta e a profundidade do avanço axial. Estes parâmetros são amplamente estudados, com o intuito de minimizar os defeitos causados pelo processo. Rai et al. (2013) estudaram a influência da geometria da ferramenta e observaram que a taxa de geração de calor e o fluxo de material são afetados pela geometria e pelas dimensões do ombro e do pino.

Após o processamento da superfície, pode-se identificar quatro áreas, como se observa na Figura 1. As zonas se distinguem principalmente pela morfologia dos grãos cristalinos no material: a zona de *nugget (NZ)*, em que a ferramenta provoca uma intensa deformação plástica e onde os grãos podem ser totalmente recristalizados; a zona termomecanicamente afetada (ZTMA), em que, por influência do calor e da deformação plástica, o grão é alongado e, com isso, favorece a plasticidade do material; a zona afetada pelo calor (ZTA), que sofre modificações na microestrutura devido ao ciclo térmico ao qual a região está submetida; e o material base (BM), que é a região não afetada pelo processo, ou seja, o material da peça em suas condições iniciais.

Figura 1. Regiões microestruturais na seção transversal de um material soldado por fricção e agitação. A, BM; B, ZTA; C, ZTMA; D, NZ.



Fonte: Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney (2007).

Muitas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de averiguar, em processos de FSP, as alterações das propriedades mecânicas da superfície da peça à medida em que ocorre o refinamento do grão cristalino. Santella et al. (2005) concluíram que o valor de dureza na zona processada se mantém constante quando comparado aos valores medidos no material base, no entanto, em alguns casos, os valores de resistência ao escoamento aumentam. Chang et al. (2007), por sua vez, estudaram os efeitos do FSP em uma liga Mg-Al-Zn e foram capazes de produzir uma zona processada com um tamanho de grão menor que 500 nm, o que acarretou em um aumento da dureza de 50HV para 120HV. Frente a isto, observa-se a importância deste processo na melhoria de algumas propriedades mecânicas, podendo acarretar maior vida útil das peças e, conseqüentemente, melhor relação entre custo e benefício.

Mesmo frente a todos estes avanços tecnológicos, detectou-se um ponto pouco explorado no quesito de detectar a influência das ferramentas na qualidade do processo de FSP. Portanto, o objetivo geral do presente trabalho é avaliar e fabricar uma ferramenta para o processo FSP que garanta a melhoria das propriedades mecânicas de peças de alumínio da liga AA1050.

MATERIAIS E MÉTODOS

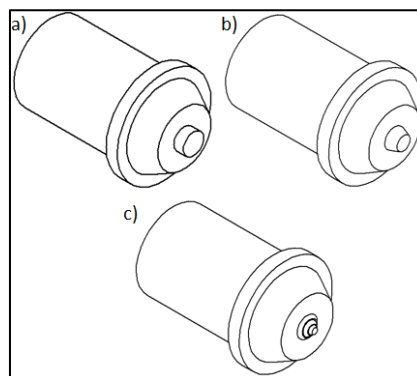
MATERIAIS

Nesta seção, serão expostas as características dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento da presente pesquisa, a saber: ferramentas, metal base e máquina ferramenta.

Ferramentas

Três ferramentas semelhantes, porém, com geometrias diferentes, foram selecionadas para os experimentos. Portanto, estabeleceu-se: ferramenta A com pino cilíndrico; ferramenta B com pino cônico e; ferramenta C com pino cônico com degraus. Na Figura 2 podem ser observadas as geometrias das ferramentas utilizadas.

Figura 2. a) Ferramenta A; b) Ferramenta B; c) Ferramenta C.



Fonte: autoria própria (2020).

As três ferramentas possuem valores de diâmetro de encaixe idênticos (20 mm). Frente a isto, foi possível utilizar-se do mesmo sistema cone-morsa para a fixação destas ferramentas na máquina ferramenta (fresadora, neste caso).

Metal base

Os processos de FSP foram realizados em chapas de alumínio 1050 cujas dimensões são: 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 5 mm de espessura. A composição química do material base, foi caracterizada pela técnica de espectrometria de emissão óptica. O ensaio foi realizado no equipamento do fabricante Shimatzu, modelo PDA-7000, pertencente ao Centro de Transformação de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa (UTFPR-PG). Analisando os dados da espectrometria, dispostos na Tabela 1, conclui-se que o alumínio 1050 utilizado como metal base dos experimentos apresenta uma pureza de 99,21% de alumínio.

Tabela 1. Valores de composição química obtidos por espectrometria de emissão óptica.

Elemento Químico	Composição Química (% em peso)
Alumínio	99,210%
Ferro	0,47915%
Silício	0,17359%

Fonte: autoria própria (2020).

Máquina ferramenta

Os ensaios de FSP foram realizados em uma fresadora convencional modelo FC-30 do fabricante Cardoso, localizada no Laboratório de Conformação da UTFPR-PG. Como trata-se de uma fresadora convencional, os parâmetros utilizados nos ensaios foram condicionados aos valores de rotação e velocidade de avanço (ou avanço da mesa) disponibilizados pelo equipamento. Cabe salientar que os valores disponibilizados são: rotação (rpm): 180, 300, 390, 500, 600, 1200 e 2100; velocidade de avanço (mm/s): 30, 45, 60, 80, 90 e 160.

Foi necessário ainda fabricar e adaptar um sistema prensa-chapa para a fixação das chapas de metal base na mesa da máquina fresadora. Para isto, levou-se em conta as dimensões do Metal Base.

MÉTODOS

Planejamento experimental

Para a execução dos experimentos, fez-se necessário estabelecer uma matriz experimental, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Planejamento experimental.

Número da condição	Rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Profundidade Axial (mm)	Ferramenta
1	2100	30	2,575	A
2	2100	45	2,575	A
3	2100	60	2,575	A
4	2100	80	2,575	A
5	2100	90	2,575	A
6	2100	160	2,575	A
7	2100	30	2,575	B
8	2100	45	2,575	B
9	2100	60	2,575	B
10	2100	80	2,575	B
11	2100	90	2,575	B
12	2100	160	2,575	B
13	2100	30	2,075	C
14	2100	45	2,075	C
15	2100	60	2,075	C
16	2100	80	2,075	C
17	2100	90	2,075	C
18	2100	160	2,075	C

Fonte: autoria própria (2020).

Nota-se então que os ensaios foram conduzidos mantendo constante os valores de rotação e fazendo uso de seis valores de velocidade de avanço para cada uma das ferramentas, totalizando 18 condições.

Após a realização dos experimentos, as seções transversais das chapas de alumínio foram analisadas para se avaliar as alterações micro estruturais.

Realização dos ensaios de FSP

O processo de FSP foi realizado através de um único passe para cada condição. Cabe salientar que, após selecionar e acionar a rotação da ferramenta, ocorre a penetração da ferramenta no material base e antes do início do avanço, a ferramenta manteve-se no lugar por dez segundos, com o intuito único de aquecimento da mesma antes de iniciar o passe.

Os experimentos foram realizados apenas uma vez para cada condição, visto que a réplica foi impossibilitada devido às restrições impostas pelo COVID-19.

Análise dos dados obtidos no ensaio

Para a realização das análises da geometria das zonas processadas, foi necessária a realização de algumas etapas:

- Corte das seções transversais de cada uma das condições utilizadas;
- Lixamento das amostras seguindo a seguinte sequência de lixas: #100, #200, #300, #450, #600;
- Ataque químico em solução de *Marble* (4g CuSO₄ + 20ml HCl + 20ml H₂O);
- Inspeção utilizando o *software* de análises de imagens (*ImageJ*).

Desenvolvimento de novas ferramentas

Após a realização da inspeção através do *software ImageJ*, pôde-se observar quais ferramentas se destacaram na realização do processo. A partir disto, determinaram-se as melhores geometrias para a realização do FSP.

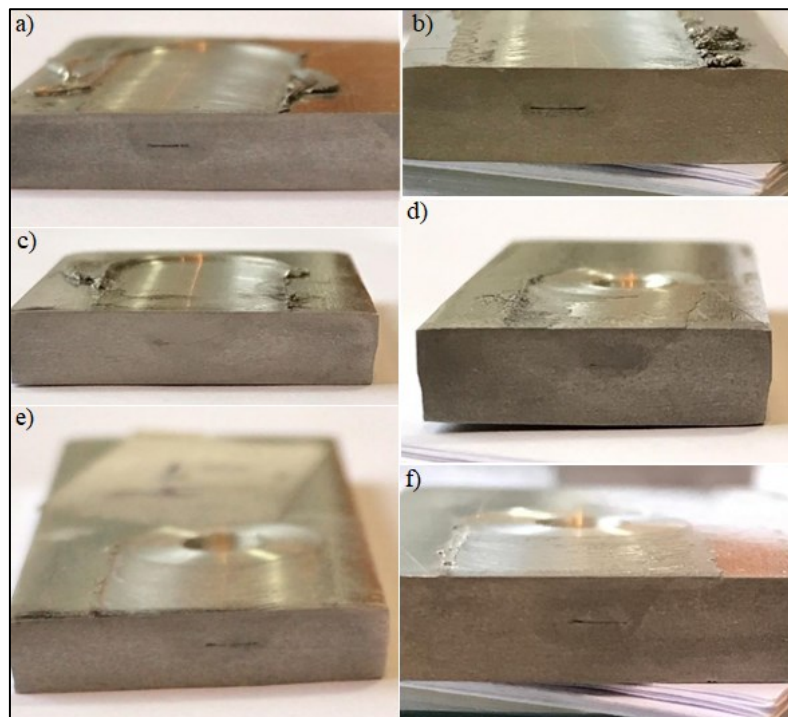
O desenvolvimento das novas ferramentas foi realizado através do *software Solid Edge 2020*, baseado na geometria e dimensões das ferramentas que se destacaram no estudo realizado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão serão discutidos e analisados os resultados encontrados a partir da realização do FSP com a metodologia citada anteriormente.

Durante a etapa da inspeção por meio do *software ImageJ*, foi possível identificar defeitos causados em algumas das amostras processadas, conforme o observado na Figura 3.

Figura 3. Defeitos tipo wormhole: a) condição 2; b) condição 3; c) condição 10; d) condição 13; e) condição 4; f) condição 1.

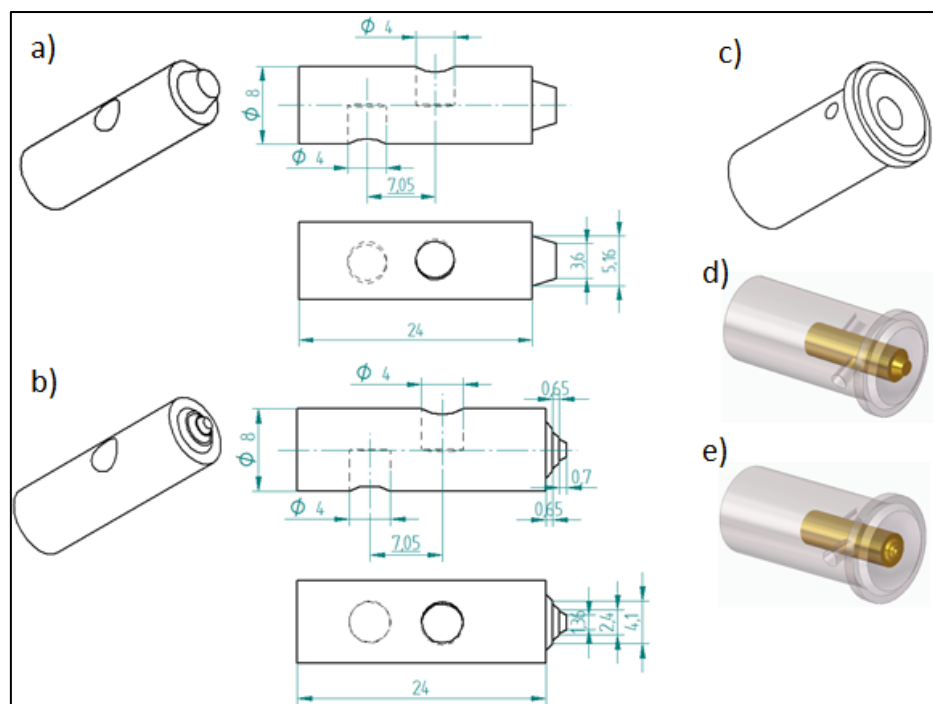


Fonte: autoria própria (2020).

Entre as 18 condições utilizadas, 6 delas apresentaram defeito nas regiões processadas. Como pode-se observar nas imagens da Figura 3, as condições que geraram defeito foram: condições 1, 2, 3 e 4, em que se fez uso da ferramenta A; condição 10, em que se fez uso da ferramenta B e; condição 13, em que se fez uso da ferramenta C. Nota-se ainda que o tipo de defeito foi o mesmo para estas condições, do tipo *wormhole* (buraco de minhoca), um defeito característico pela ausência de material no volume da amostra. Por fim, nota-se que a ferramenta A

foi aquela com o pior desempenho, já que 80% de suas condições revelaram amostras com defeitos. As ferramentas B e C, por outro lado, apresentaram defeito em uma de suas condições apenas e, portanto, foram as ferramentas mais eficientes nos ensaios. A partir disso, tomou-se como base as geometrias das ferramentas com melhor performance (B e C) para a fabricação das novas ferramentas (D e E). Buscando facilitar a utilização de diferentes geometrias de pino, a nova ferramenta foi desenvolvida em dois componentes: suporte de ferramenta, que funciona como um cabeçote em que a ferramenta, ou pino, é fixada e já apresenta o ombro em sua geometria, e; o pino, que é inserido e fixado no suporte de ferramenta. Desta forma, estabeleceu-se: pino A fixado no suporte de ferramenta constituem a Ferramenta D e; pino B fixado no suporte de ferramenta constituem a Ferramenta E. Sendo assim, cabe salientar que o mesmo suporte de ferramenta pode ser utilizado com ambos os pinos (A e B). As imagens da Figura 4 ilustram o suporte de ferramenta, os pinos A e B e as ferramentas D e E.

Figura 4. a) Pino A; b) Pino B; c) Suporte de ferramenta; d) Ferramenta D; e) Ferramenta E.



Fonte: autoria própria (2020).

CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos, foi possível concluir que a geometria da ferramenta tem grande importância na qualidade do processo.

No que diz respeito às ferramentas, a que obteve os piores resultados foi a Ferramenta A e, por isto, a geometria da mesma foi descartada para o estudo do desenvolvimento das novas ferramentas. As ferramentas B e C obtiveram um resultado satisfatório, visto que apresentaram defeito em apenas uma condição e, portanto, conclui-se que são ideais para a realização do processo.

Por fim, sugere-se a fabricação de novas ferramentas (D e E), tomando como base e adaptando as geometrias das ferramentas B e C. Com isto, almeja-se alcançar um melhor resultado no processo de *Friction Stir Processing*.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por ceder espaço para a pesquisa, a Fundação Araucária de Apoio ao desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná e ao DIRPPG pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

CHANG, C.I.; DU, X.H.; HUANG, J.C. Achieving ultrafine grain size in Mg–Al–Zn alloy by friction stir processing. **Scripta Materialia**, v. 57, n. 3, p. 209-212, ago. 2007. Elsevier BV. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.04.007>. Acesso em: 08 out. 2020.

SANTELLA, M.L.; ENGSTROM, T.; STORJOHANN, D.; PAN, T.-Y. Effects of friction stir processing on mechanical properties of the cast aluminum alloys A319 and A356. **Scripta Materialia**, v. 53, n. 2, p. 201-206, jul. 2005. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.03.040>. Acesso em: 08 out. 2020.

NETTO, Nelson; ZHAO, Lv; SOETE, Jeroen; PYKA, Grzegorz; SIMAR, Aude. Manufacturing high strength aluminum matrix composites by friction stir processing: an innovative approach. **Journal Of Materials Processing Technology**, v. 283, set. 2020. Elsevier BV. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116722>. Acesso em: 08 out. 2020.

RAI, R; A DE; BHADSHIA, H K D H; DEBROY, T. Review: friction stir welding tools. **Science And Technology Of Welding And Joining**, v. 16, n. 4, p. 325-342, maio 2011. Informa UK Limited. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1179/1362171811y.0000000023>. Acesso em: 08 out. 2020.

MISHRA, R.S; MAHONEY, M.W; MCFADDEN, S.X; MARA, N.A; MUKHERJEE, A.K. High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy. **Scripta Materialia**, v. 42, n. 2, p. 163-168, dez. 1999. Elsevier BV. Disponível em:

[http://dx.doi.org/10.1016/s1359-6462\(99\)00329-2](http://dx.doi.org/10.1016/s1359-6462(99)00329-2). Acesso em: 08 out. 2020.

MISHRA, R.s.; MA, Z.y. Friction stir welding and processing. **Materials Science And Engineering: R**, v. 50, n. 1-2, p. 1-78, ago. 2005. Elsevier BV. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>. Acesso em: 08 out. 2020.

SHARMA, Vipin; PRAKASH, Ujjwal; KUMAR, B.V. Manoj. Surface composites by friction stir processing: a review. **Journal Of Materials Processing Technology**, v. 224, p. 117-134, out. 2015. Elsevier BV. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.019>. Acesso em: 08 out. 2020.