

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA EM LIGAS DE ALUMÍNIO

Evaluation of the efficiency of the welding tool by friction and mechanical mixing in aluminum alloys

FRANCESCHINI, Francieli Gonçalves. MSc.; Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
francelifranci@hotmail.com

WESTPHAL JUNIOR, Tancredo. Dr.; Universidade Regional e Integrada do Alto Uruguai e
das Missões, tancredo@uri.edu.br

Resumo: A soldagem de alumínio e suas ligas apresenta algumas peculiaridades em relação à soldagem dos aços. O processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) é um processo que ocorre no estado sólido, essa característica apresenta um ótimo potencial para soldagem de alumínio. Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta para soldagem FSW, com ombro contendo estrias em espiral e diâmetro de 19 mm com chanfro de 1 mm x 45°, para soldagem de chapas de alumínio da liga AA 5083. A eficiência da ferramenta foi avaliada por inspeção visual da junta soldada, análises metalográficas e macrográficas e ensaios de tração uniaxial. A ferramenta desenvolvida foi eficiente para obtenção de soldas pelo processo FSW, entretanto a qualidade da solda obtida não atende aos requisitos mínimos para aprovação, visto que o maior valor obtido de resistência à tração foi 272,49 MPa, sendo este inferior ao valor do material base (297,18 MPa).

Palavras chave: Soldagem de Alumínio. Processo FSW. Geometria da ferramenta.

Abstract: The welding of aluminum and its alloys presents some peculiarities about the welding of steel. The process of friction welding and mechanical mixing (FSW) is a process that occurs in the solid-state, this characteristic has an excellent potential for welding aluminum. In this work, a tool for welding FSW was developed, with a shoulder containing spiral grooves and a diameter of 19 mm with a chamfer of 1 mm x 45°, for welding aluminum plates of AA 5083 alloy. The efficiency of the tool was evaluated by visual inspection of the welded joint, metallographic and macrographic analyzes, and uniaxial tensile tests. The tool developed was efficient for obtaining welds by the FSW process, however the quality of the weld obtained does not meet the minimum requirements for approval, since the highest value obtained for tensile strength was 272.49 MPa, which is lower than the value of the material base (297.18 MPa).

Keywords: Aluminum welding. FSW process. Tool geometry.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de alumínio e suas ligas têm demonstrado um grande crescimento devido a algumas de suas propriedades. Dentre outras, uma característica interessante desse metal é a ótima relação resistência mecânica/peso que pode ser obtida em suas ligas. Com o aumento da utilização de alumínio e suas ligas é necessário o desenvolvimento dos processos

de soldagem, pois devido a algumas características desse material existem certas peculiaridades associadas aos processos de soldagem convencionais do mesmo. Com isso, processos que envolvam menores temperaturas, como a soldagem por fricção, demonstram ser bastante promissores quando associado a ligas de alumínio.

O processo de soldagem por fricção e mistura mecânica ou *Friction Stir Welding* (FSW) é uma técnica de união no estado sólido que pode reduzir defeitos como trincas, porosidades, entre outros que usualmente são encontrados em processos de soldagem que envolvem fusão dos materiais. Além disso, devido ao seu menor aporte térmico esse processo provoca menores mudanças microestruturais, no caso do alumínio pode evitar o coalescimento ou dissolução de precipitados e até causar um refino da microestrutura, melhorando assim as propriedades da junta soldada em relação ao metal base (MISHRA e MAHONEY, 2007).

Apesar do processo de soldagem FSW aplicado as ligas de alumínio já estar bastante difundido internacionalmente, sendo encontrados muitos estudos e aplicações de algumas indústrias (GRIMM *et al.*, 2015), no Brasil esse processo ainda tem poucas pesquisas, além do baixo número de aplicações industriais.

Este trabalho tem por objetivo avaliar a eficiência de uma ferramenta com ombro contendo estrias em espiral e chanfro, na obtenção de soldas pelo processo FSW. Foram realizados experimentos para a união de chapas de alumínio da liga AA 5083 com 6,6 mm de espessura. O desempenho da ferramenta desenvolvida foi avaliado por meio de inspeção visual das juntas soldadas, análise metalográfica e macrográfica e ensaios de tração uniaxial.

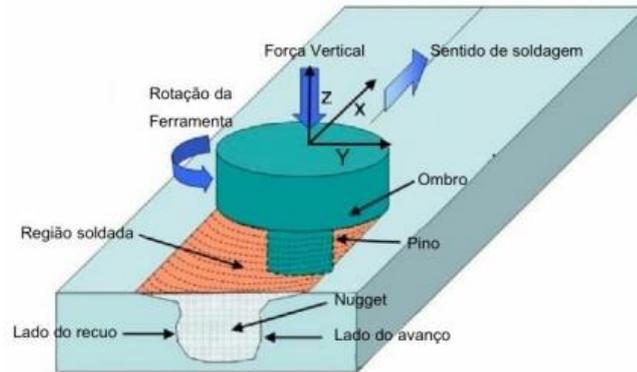
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A soldagem por fricção e mistura mecânica ou *Friction Stir Welding* (FSW) é um processo que foi inventado em 1991 no Reino Unido mais precisamente no *The Welding Institute* (TWI) (THOMAS *et al.*, 1997). Esse processo é energeticamente eficiente, ambientalmente amigável e versátil. Particularmente, bastante utilizado para ligas de alumínio endurecidas por precipitação as quais há maiores dificuldades em utilizar processos de soldagem convencionais (MISHRA e MAHONEY, 2007).

O conceito do processo FSW é baseado na união com o uso de uma ferramenta rotativa, não consumível e com um design apropriado. A maioria das ferramentas utilizadas no mercado é caracterizada por conter uma redução na sua extremidade, sendo denominados por pino e ombro. Com a ferramenta em rotação o pino é inserido entre duas chapas ou componentes a serem unidos até a altura do ombro. Após a entrada da ferramenta é realizado o movimento transversal aos mesmos. A ferramenta tem duas funções principais e fundamentais: o aquecimento das peças e promover a mistura dos materiais a fim de consolidar a união. O calor é fornecido através da fricção da ferramenta com o material e a deformação plástica do mesmo. O calor localizado plastifica o material em torno do pino e a

combinação da rotação com o movimento transversal da ferramenta faz com que o material flua da frente para a parte posterior do pino. Como resultado deste processo é consolidada uma junta no estado sólido (MISHRA e MAHONEY, 2007). A Figura 1 apresenta uma representação esquemática do processo FSW.

Figura 1 – Representação esquemática do processo FSW.

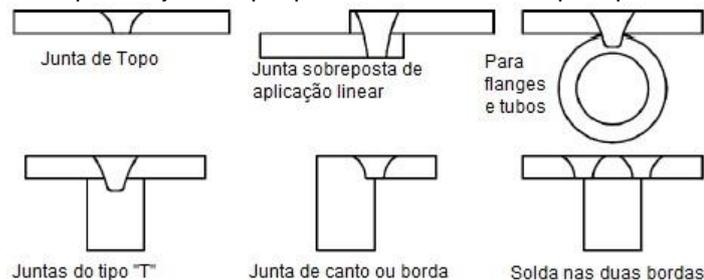


Fonte: Adaptado de (MISHRA e MAHONEY, 2007).

Durante o processo o material é submetido a uma intensa deformação plástica a uma temperatura elevada o que resulta em uma microestrutura refinada e recristalizada. Essa microestrutura gerada promove boa resistência mecânica às juntas desse processo (MISHRA e MAHONEY, 2007).

O processo FSW aplicado a ligas de alumínio tem sido o foco principal, por isso possui muitos estudos e pesquisas na área, sendo esse material um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento do processo e, portanto, atualmente, o mais utilizado (KUMBHAR; DEY, 2011). Geralmente as juntas de topo são as mais utilizadas, até mesmo para questões de estudo, mas esse processo pode ser implantado nas mais diversas configurações de junta, tais como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Tipos de juntas que podem ser realizadas pelo processo FSW.



Fonte: OLIVIECKI, 2012, pág. 29.

O processo de soldagem FSW envolve diversas variáveis como: tipo de junta, natureza dos materiais, características da máquina operatriz, características da ferramenta de soldagem e parâmetros de processo. As variáveis, segundo Rosato (2003), possuem

influência na microestrutura resultante da soldagem e, conseqüentemente, no comportamento geral da junta.

3 METODOLOGIA

Para realização das soldas pelo processo FSW foi utilizado um centro de usinagem de três eixos da *Deb'Maq*, série *Diplomat*, modelo *Skybull 600*. As peças de testes utilizadas para soldagem foram confeccionadas de uma chapa comercial da liga AA 5083, com espessura nominal de 6,6 mm, nas dimensões de 100 x 300 mm. Esta liga possui boa soldabilidade e usinabilidade, além de elevada resistência à corrosão, sendo aplicada basicamente na indústria naval. A composição química nominal desta liga pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química nominal da liga de alumínio AA 5083.

Liga	Elementos de liga - % em peso								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
AA 5083	0.4	0.4	0.1	0.4-0.1	4-4.9	0.05-0.25	-	0.25	0.15

Fonte: SEGATTI, 2011, pág. 29.

Os parâmetros de processo utilizados para a soldagem FSW estão apresentados na Tabela 2.

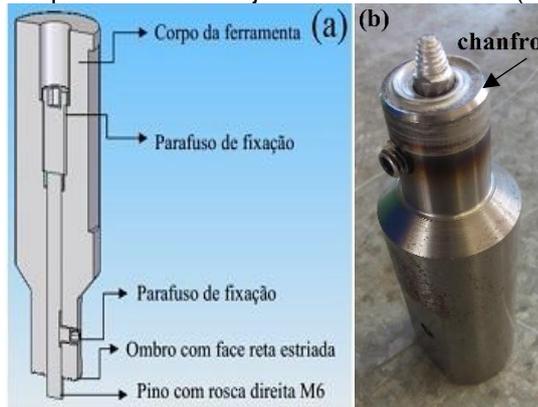
Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados no experimento.

Ângulo de Inclinação [°]	Velocidade de Rotação [rpm]	Velocidade de Avanço [mm/min]	Penetração do Ombro [mm]	Tempo de Aquecimento [s]	Altura do Pino [mm]	Sentido de Rotação
0	1450	20	-0,4	60	6,2	Anti-horário

Fonte: elaborado pelos autores.

O material utilizado na fabricação do pino e do ombro da ferramenta foi o aço AISI VC 131 normalizado. O pino possui formato cônico roscado, com diâmetro de 6 mm, já que as chapas a serem soldadas tem 6,6 mm de espessura, sendo segundo a literatura o diâmetro mais indicado para tal. O pino com rosca tem a função de diminuir a relação de volume de material deslocado pela ferramenta e a conicidade diminui a força e conseqüentemente a potência necessária da máquina. O ombro da ferramenta possui face reta com estrias em espiral, que facilitam o forjamento do material e conduzem o material extrudado para o centro do pino, reduzindo consideravelmente a formação de rebarbas e providenciando um correto nível de forjamento. Este tipo de ombro elimina a necessidade de ângulo de ataque da ferramenta. Sendo o ombro da ferramenta o principal responsável pela geração de calor no processo, neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de 19 mm com chanfro de 1 mm x 45° na borda da ferramenta. A utilização de chanfro na borda do ombro da ferramenta tem por objetivo a eliminação ou redução da formação de rebarbas. Na Figura 3 pode-se observar o desenho esquemático do conjunto da ferramenta, bem como a ferramenta construída.

Figura 3 – (a) Desenho esquemático do conjunto da ferramenta e (b) ferramenta construída.



Fonte: elaborado pelos autores.

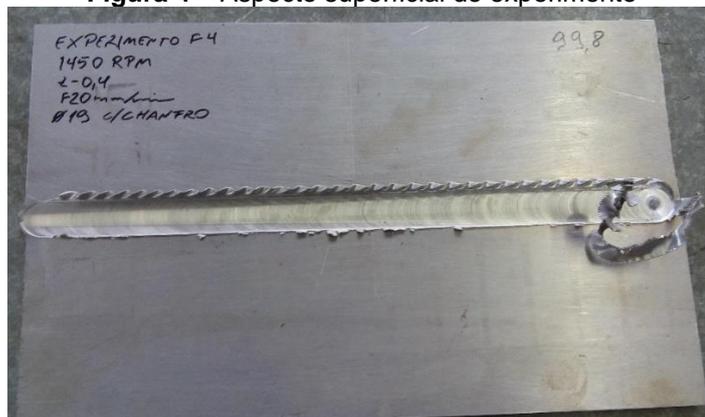
Para realização das análises metalográficas, foram realizadas cortes na seção transversal das soldas, as amostras foram preparadas segundo os procedimentos padrões de lixamento e polimento, seguidos por ataque químico com reagente água régia (um terço de água destilada, um terço de ácido nítrico (HNO_3) e um terço de ácido clorídrico (HCl)). Após a preparação metalográfica, foram realizadas análises macrográficas, sendo que as imagens das macrografias foram registradas com a utilização de um scanner.

Ensaio de tração uniaxial foram realizados, utilizando a máquina universal de ensaios da Shimadzu, com o objetivo de comparar a resistência mecânica do material base em relação às amostras soldadas pelo processo FSW. O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da norma ASTM E8: “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”, na direção transversal à solda para determinação do limite de resistência à tração, escoamento e o alongamento das uniões soldadas.

4 RESULTADOS

Durante a soldagem o consumo de potência da máquina manteve-se constante do início ao fim em 21% da capacidade total da máquina. Na Figura 4 é apresentado o aspecto superficial da solda obtida.

Figura 4 – Aspecto superficial do experimento



Fonte: elaborado pelos autores.

Houve formação de rebarba sempre maior na região de retrocesso, devido ao sentido de rotação da ferramenta. A solda apresenta bom aspecto, não houve formação de vazios e nem descontinuidades ao longo da junta. A fim de realizar uma melhor avaliação da qualidade da solda e buscar possíveis defeitos internos, foram seccionados corpos de prova (CP's) com 22 mm de largura e submetidos ao lixamento metalográfico e ataque químico com reagente água régia, cujas macrografias são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Macrografias do experimento



Fonte: elaborado pelos autores.

Por meio da Figura 5, é possível perceber que no CP 1 existem vazios, porém este defeito ocorreu nos primeiros 50 mm de solda, que segundo a Norma ISO 25239:2011 devem ser descartados, nos demais CP's não se evidenciam vazios no núcleo da solda. A partir do CP 03, a 50 mm de distância a partir do ponto de início da soldagem, o perfil do núcleo da solda estabilizou-se e se manteve constante ao longo de todo o cordão de solda, esta alteração pode ocorrer em função da quantidade de alumínio que permanece aderida ao pino e ao ombro da ferramenta, e não indica perdas ou ganhos na qualidade da solda.

Após a análise macrográfica, os CP's foram usinados para realizar os ensaios de tração. Inicialmente foi realizado o fresamento da face para remover as rebarbas e reduzir a espessura da seção de teste para 6,2 mm, compensando o degrau de 0,4 mm causado pela penetração do ombro. Em seguida foram usinados os CP's 03, 06, 09 e 12 para os ensaios de tração. Na Figura 6 é apresentada uma fotografia dos CP's submetidos aos ensaios de tração, sendo que apenas o CP 03 rompeu fora da região da solda.

As propriedades mecânicas da liga AA 5083 (material base) foram obtidas por meio de ensaios de tração, realizados em doze corpos de prova, cujos valores médios obtidos estão apresentados no gráfico da Figura 7, este gráfico também apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração da junta soldada, bem como seus valores médios (para fins de comparação com o material base (MB)). A tensão de escoamento média dos CP's ensaiados ficou em 118,15 MPa, aproximadamente 9% abaixo da tensão de escoamento do MB, sendo está redução aceitável pelo fato de a chapa ter passado por aquecimento durante a soldagem,

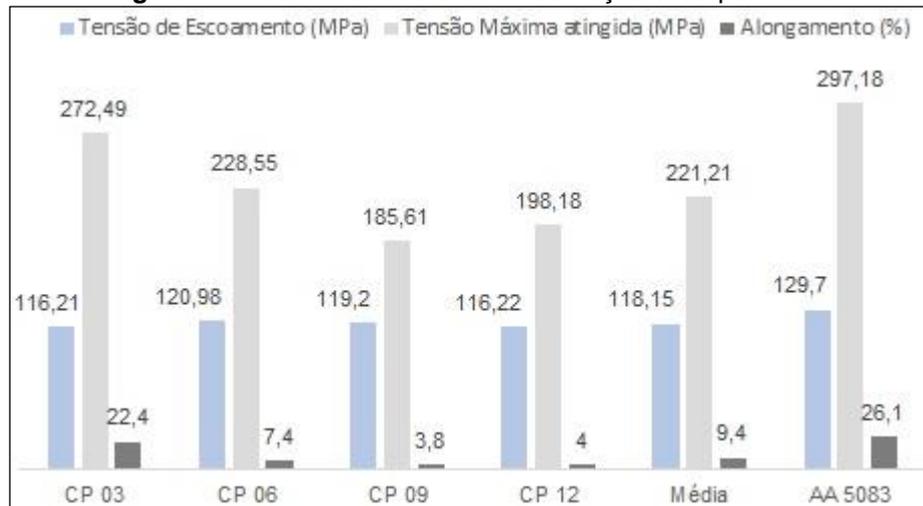
reduzindo sua resistência mecânica. O CP 03 que rompeu fora da região da solda, apresentou alongamento de 22,4%, muito próximo ao do MB, e tensão máxima de 272,49 MPa. Em contrapartida, os demais CP's apresentaram baixo percentual de alongamento e baixa tensão máxima.

Figura 6 – Corpos de prova submetidos aos ensaios de tração.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 7 – Resultados dos ensaios de tração do experimento



Fonte: elaborado pelos autores.

Analisando as medidas dos CP's concluiu-se que o ombro da ferramenta não teve a penetração desejada (0,4 mm), a penetração foi cerca de 0,2 a 0,3 mm, tanto é que a capacidade de potência utilizada pela máquina foi de apenas 21%, ressaltando que o esforço de soldagem e pressão do ombro contra a chapa era pequeno. Apesar deste diâmetro de ombro ser o mais recomendado pela literatura, como a penetração do ombro foi menor, este experimento não atingiu os resultados esperados para sua aprovação. Existe também a possibilidade de o chanfro que está sendo realizado na borda do ombro, 1 mm x 45°, seja muito pequeno, o que está acarretando, ainda, em uma formação excessiva de rebarbas, fato que dificulta a consolidação da solda.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização da soldagem pelo processo FSW, em chapas de alumínio da liga AA 5083, com 6,6 mm de espessura, empregando-se uma ferramenta projetada e fabricada

em aço AISI VC 131, com os parâmetros de soldagem previamente selecionados, chegou-se à obtenção de algumas conclusões:

- Os parâmetros do processo selecionados foram escolhidos adequadamente, pois as juntas soldadas apresentaram uma boa qualidade superficial;
- A análise macrográfica mostrou-se como uma técnica confiável para detecção de descontinuidades do tipo vazio no interior das juntas soldadas;
- Os valores das tensões de escoamento, tensão máxima atingida e percentual de alongamento das juntas soldadas ficaram bem abaixo dos apresentados pelo material de base;
- O desempenho da ferramenta com geometria de pino cônico roscado e ombro com diâmetro de 21 mm contendo estrias em espiral e chanfro de 1 mm x 45°, mostrou-se eficiente na obtenção da solda, entretanto, com a realização dos ensaios de tração, houve rompimento da junta soldada, não podendo validar este experimento.
- Os resultados obtidos mostram que a soldagem por FSW é capaz de produzir juntas de excelente qualidade, desde que utilizada uma combinação adequada de parâmetros de soldagem e geometria da ferramenta.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. 2013.

GRIMM, A. et al. **Friction Stir welding of Light Metals for Industrial Applications**. Materials Today: Proceedings, v. 2, p. 169–178. 2015.

KUMBHAR, N. T.; DEY, G. K. **Friction Stir Welding of Aluminum Alloys**. Research article. BARC Newsletter. n. 321, p. 11–17, 2011.

ISO 25239:2011. **Friction Stir Welding – Aluminum**. International Standard Organization. Suisse, Geneva, 15 dec. 2011.

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

OLIVIECKI, N. J. **Análise dos Parâmetros do Processo de Solda por Fricção em Liga de Alumínio**. 2012. Trabalho de Final de Curso. Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da URI, Erechim, 2012.

ROSATO Júnior, A. **Estrutura integral por soldagem por atrito friction stir welding – FSW – requisitos básicos para o projeto estrutural**. São José dos Campos – SP: ITA, 262 p. Dissertações de Mestrado. 2003.

SEGATTI, F. **Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica: Avaliação dos Parâmetros de Processo Através da Análise do Perfil de Temperatura ao Longo da Solda, Microestrutura e Propriedades Mecânicas de uma Liga de Alumínio**. 2011. Trabalho de Final de Curso. Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da URI, Erechim, 2011.

THOMAS, M.W.; NICHOLAS, E.D., NEEDHAM, J.C., MURCH, M.G., TEMPLESMITH, P. and DAWES, C.J. **International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8**, UK Patent Office, London, December 6, 1991.