

SOLDAGEM DE CHAPAS DE ALUMÍNIO PELO PROCESSO FSW – ENSAIOS EXPERIMENTAIS E CARACTERIZAÇÃO

Rangel Ferreira Soares¹ (IC), Bruno Silva Cota (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira

Palavras-chave: Friction Stir Welding. Ligas de alumínio. Parâmetros FSW.

Introdução

Friction Stir Welding (FSW) é um processo de soldagem por atrito com pino não consumível, inventado por Wayne Thomas no início da década de 1990 em Cambridge, no Reino Unido. O processo tem como aplicações industriais de materiais metálicos leves (com baixa temperatura de fusão) como: ligas de alumínio e magnésio, como na construção de aeronaves, automóveis entre outros setores de manufatura.

A soldagem por fricção é uma técnica de união permanente de matérias em estado sólido. O material é submetido a uma deformação plástica, a partir do calor gerado pelo atrito da peça com a ferramenta de trabalho.

O trabalho teve como objetivo realizar ensaios experimentais na liga de alumínio ASTM/ABNT 1200, utilizou-se o equipamento de Comando Numérico Computadorizado (CNC) para realizar o procedimento de soldagem por fricção a partir de parâmetros pré-determinados em outros estudos, efetuou-se uma análise visual e também a caracterização da resistência mecânica das juntas soldadas comparando sua eficiência.

Metodologia

Durante essa etapa foi importante realizar uma breve revisão e entendimento sobre o assunto. Baseado em pesquisas de outros autores, como, Cota & Bracarense (2017; 2020) e Araújo (2020), com o foco na definição dos parâmetros de soldagem para a liga de alumínio, análise da ferramenta utilizada, optando pelo pino cônico e quadrado que se adequava ao material da liga de alumínio, testes de parâmetros de soldagem e análise visual, avaliando também a eficiência a partir de testes mecânicos. Diante disso, foi construído uma base de referências que foram utilizadas para a delimitação e a análise sobre o processo FSW.

A ferramenta utilizada na soldagem *Friction Stir Welding* foi de aço série AISI H13. Esse material apresenta boa estabilidade dimensional nas temperaturas

de soldagem e propriedades mecânicas suficientes para a realização da solda (ROSATO, 2003).

O pino da ferramenta tem controle e influência direta sobre a profundidade de deformação e velocidade interferindo no fluxo de material plastificado e afetando o comportamento da junta soldada (INFANTE e VIDA, 2014). O seu diâmetro deve ser da mesma ordem de espessura da chapa a ser soldada e o seu comprimento precisa ser cerca de 3 a 5 décimos menor para soldas com penetração total (THOMAS et al.,1999). Na Figura 1, é apresentado a exemplificação do ombro e do pino.

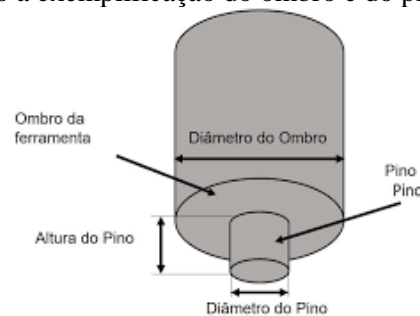


Figura 1 - Exemplificação da ferramenta (THOMAS et al.,1999).

Inicialmente, foi analisado qual ferramenta seria utilizada, optou-se por dois modelos com geometria simples, pino cônico e pino quadrado, ambos com dimensões de 70 mm de comprimento o ombro da ferramenta e 2.7 mm o pino. Determinou esse modelo de ferramenta pela facilidade de fabricação. (Figura 2).

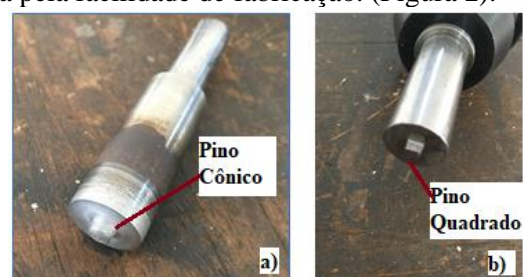


Figura 2 - (a) ferramenta de pino cônico; (b) ferramenta de pino quadrado.

Para a realização da validação do sistema foi utilizada a liga Al 1200 H14 de 3 mm de espessura, sendo

um material que possui aplicações em diferentes setores produtivos, passando por produtos que variam desde a construção de aeronaves, automóveis, setores de manufatura, como, placas de sinalização, navios e embarcações. As propriedades mecânicas do material são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do Al 1200 H14.

Propriedades	Limete a resistência [máx e mín]	Média	Desvio Padrão	Valores mínimos
σ_{esc} [Mpa]	110-145	127,5	24,748	110
$\sigma_{máx}$ [Mpa]	95	95		
ϵ [%]	3	3		

Para a realização dos pré-testes, utilizou-se um Comando Numérico Computadorizado (CNC) da marca Yunnan Machine Tool Works, modelo CY – VMC 580 (Figura 3).



Figura 3 - Equipamento CNC – Yunnan Machine Tool Works.

Para obter um bom aspecto visual, assim como boa penetração, realizou-se ajustes nos parâmetros determinados inicialmente nos pré-testes, a escolha dos parâmetros foi baseada em outros estudos, escolhendo um parâmetro que se aproximasse do material base e, assim, variando para encontrar valores finais para a pesquisa. O parâmetro escolhido para os testes finais é apresentado na Tabela 2. O parâmetro apresentou bom aspecto visual, ausência de sulcos ou vazios ao longo da linha de soldagem.

Tabela 2 - Parâmetros finais para soldagem da liga de alumínio ASTM/ABNT 1200.

Velocidade de Avanço [mm/min/	Velocidade de Rotação [rpm]	Penetração	Tempo de imersão [s]
100	1100	2,9	14

Realizou-se soldas em 5 chapas diferentes, usando os parâmetros apresentados na Tabela 2. Foram realizados 3 testes utilizando o pino cônico e 2 testes utilizando o pino quadrado. Os testes apresentaram bons resultados, com bom aspecto visual e ausência de

sulcos. Após a realização da soldagem, retirou-se amostras para a realização do ensaio destrutivo e não destrutivos para caracterização de juntas. Para cada solda realizada nos testes definitivos, foram retiradas três amostras para o ensaio de tração em que as dimensões foram realizadas conforme a norma DIN EM ISO 4136:2013 “*Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test*”, sendo obtidas na direção transversal à solda para determinar o limite de resistência a ruptura, escoamento e o alongamento percentual do material. (Figura 4).

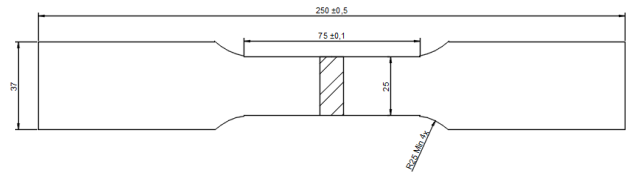


Figura 4 - Dimensões do corpo de prova soldados para o ensaio de tração.

Resultados e discussão

Para a realização dos pré-testes no equipamento de Comando Numérico Computadorizado (CNC) foi necessário realizar um ajuste na base de fixação da mesa, para que os esforços da máquina durante o processo não interferissem na fixação da chapa. Utilizou-se grampos de fixação e uma barra chata para deixar a chapa imóvel, conforme apresentado na Figura 5.

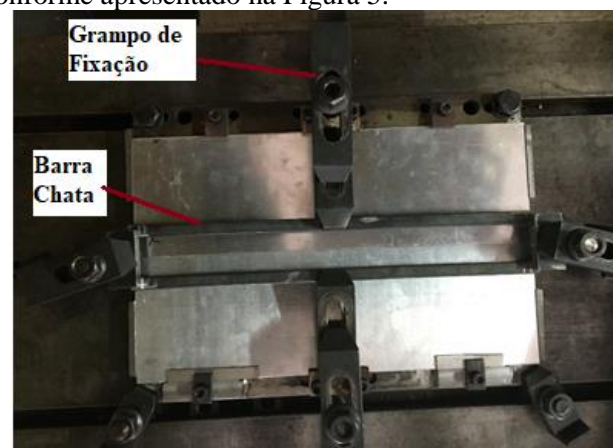


Figura 5 - Fixação da chapa da liga Al 1200 H14.

Após a fixação das chapas, realizou-se os primeiros testes que apresentaram resultados como: falhas no cordão, temperatura excessiva, falta de padrão e falta de penetração, apresentadas na Figura 6.

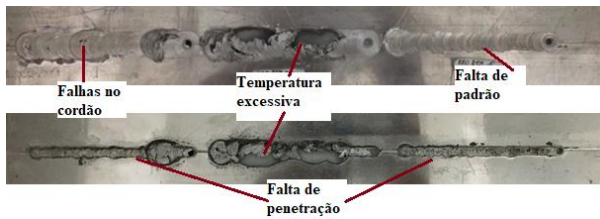


Figura 6 - (a) falhas identificadas no cordão; (b) falhas na raiz da solda.

Aplicando variações de parâmetros com base em outros estudos, chegou-se em um resultado onde obteve o melhor aspecto visual, apresentado na Tabela 2 deste documento. Uma vez definido o parâmetro, com bom aspecto visual, penetração total e uma solda sem descontinuidade, apresentado na Figura 7, foram realizados testes finais com base nos parâmetros definidos.



Figura 7 - (a) topo da solda com o parâmetro escolhido; (b) raiz da solda com o parâmetro escolhido.

Segundo Kozminski a formação de rebarbas pode estar ligada ao comprimento pequeno do pino que permite maior penetração por não se aproximar da raiz da solda, favorecendo a expulsão do material.

Foram realizados testes finais em 5 chapas diferentes, sendo 3 utilizando o pino cônico e 2 pinos quadrados (Figura 8). Os testes “a” “b” e “c” foram realizados com o pino cônico, em que apresentaram uma solda com um bom aspecto visual ausência de sulcos ou vazios ao longo da linha de soldagem, também, foram os únicos testes com a presença de rebarbas, que pode indicar uma existência de heterogeneidade nos corpos ensaiados. Os testes “d” e “e”, foram realizados com pino quadrado, em que o primeiro apresentou um bom aspecto visual, com ausência de sulcos ou vazios ao longo da linha de soldagem, o segundo teste realizado com pino quadrado, apresentou bom aspecto visual e ausência de sulcos ou vazios ao longo da linha de soldagem, porém, no final do cordão de solda, foi possível observar uma falha, ocasionada por um desnível na base de apoio, que fez com que a ferramenta se elevasse ao final do processo.

Para verificar a eficiência da junta soldada obtida pelo processo FSW, foram retirados corpos de provas dos testes, sendo 3 corpos de prova em cada chapa, no início, meio e final da junta soldada. A eficiência da junta

soldada tabelas é apresentada na Tabela 3 e foi calculada tomando como base os valores médios do limite de escoamento, do limite de resistência e do alongamento que são respectivamente 127,5 Mpa, 95 Mpa e 3% de alongamento. Verificou-se também que a solda apresentou baixo índice de eficiência, ficando abaixo de 23%, em outros estudos, observou-se resultados superiores a 50%. As tabelas mostram as propriedades mecânicas obtidas com a soldagem FSW da liga Al 1200 H14. A eficiência mínima encontrada para o limite de escoamento foi de 13,70% no corpo de prova número 4, em que a solda foi realizada com o pino quadrado e máxima de 23,92% no corpo de prova de número 3, solda realizada com o pino cônico, o que é considerado baixa de acordo com pesquisas apresentadas em outros estudos.

Figura 8 - (a), (b) e (c) teste final com pino cônico; (d) e (e) teste final com pino quadrado.

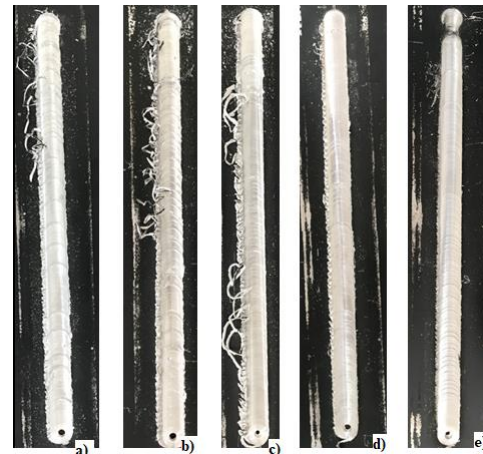


Tabela 3 - Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Al 1200 H14.

Propriedades Mecânicas	TR1	TR2	TR3	Média	Desvio Padrão	Eficiência
Corpo de Prova 1						
σ_{esc} [Mpa]	23,45	19,95	17,52	19,95	2,9821	15,64%
$\sigma_{máx}$ [Mpa]	25,32	20,28	17,53	28,28	3,9535	15,90%
ϵ [%]	4,605	2,147	1,768	2,84	3424	
Corpo de Prova 2						
σ_{esc} [Mpa]	22,86	20,35	29,51	22,86	4,7297	17,93%
$\sigma_{máx}$ [Mpa]	23,53	23,18	38,18	25,53	8,5596	18,46%
ϵ [%]	2,486	5,305	4,771	4,187	1,4974	
Corpo de Prova 3						
σ_{esc} [Mpa]	69,1	26,31	18,13	26,31	27,37	20,64%
$\sigma_{máx}$ [Mpa]	72,45	30,5	19,39	30,5	27,985	23,92%
ϵ [%]	3,84	4,512	3,145	3,832	0,6835	
Corpo de Prova 4						
σ_{esc} [Mpa]	41,86	0	17,47	17,47	21,027	13,70%
$\sigma_{máx}$ [Mpa]	44,66	7,738	19,3	19,3	18,88	15,14%
ϵ [%]	4,806	5,305	4,771	4,961	0,2987	
Corpo de Prova 5						
σ_{esc} [Mpa]	23,33	0	26,61	23,33	14,51	18,30%
$\sigma_{máx}$ [Mpa]	31,33	4,679	16,44	16,44	13,354	12,89%
ϵ [%]	7,49	1,008	6,162	4,887	3,424	

Cota & Bracarense avaliaram que o alto desvio padrão encontrado para os valores de ruptura das amostras, indicam uma existência de heterogeneidade nos corpos ensaiados. Esse fato pode ser explicado pela maior formação de rebarbas no cordão de solda, conforme observado na Figura 14. Além disso, neste trabalho, foi necessário o uso de força excessiva para retirar o material soldado, da chapa de apoio. Utilizou-se forças combinadas e repetitivas para a retirada da chapa soldada da base do CNC, a combinação de forças resultou na fadiga na raiz de solda, contribuindo para um baixo índice de eficiência encontrado nos testes.

Conclusões

Este trabalho avaliou as juntas da liga de alumínio 1200 soldadas pelo processo *Friction Stir Welding*, que é uma proposta inovadora para o ramo da fabricação. A partir dos resultados e discussões apresentadas neste trabalho, tem-se como conclusões:

1. O sistema projetado para ser a base de fixação apresentou falhas precisando ser ajustado para atender a demanda do processo de soldagem FSW;
2. O resultado do teste de tração encontrado, foi de eficiência abaixo dos 24%, o que é considerado um índice baixo de acordo com outros estudos.
3. Os parâmetros de solda atenderam às expectativas se tratando de aspectos visuais, ausência de sulcos ou vazios ao longo da linha de soldagem, atingindo uma penetração total.

A partir dos resultados obtidos, é esperado que eles possam servir de partida para estudos futuros, analisando detalhadamente as influências das ações de esforços forçados para a retirada da chapa, possa servir para obter melhores resultados.

Agradecimento

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, a minha família e amigos por todo apoio prestado e por sempre apoiar as minhas decisões.

Ao professor Dr. Bruno Silva Cota pelo apoio, confiança, pela ajuda e paciência durante toda a pesquisa, e claro, também pela oportunidade de realizar o estudo.

Ao CNPQ, pelo auxílio financeiro, ele foi de extrema importância para a realização da pesquisa.

Aos técnicos dos laboratórios da Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, por estarem dispostos a auxiliar em todos os testes realizados dentro do campus, vocês foram importantes para o andamento da pesquisa.

A Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira pelo ensino e equipamentos utilizados, sem eles não seria possível realizar o estudo

Aos demais orientados do professor Dr. Bruno Silva Cota por ajudarem nas ideias, dando dicas e ajuda técnica, em especial, um agradecimento ao Wilson José Majjela Silva.

Referências

ALMEIDA DT. Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) da liga de alumínio 5182-O [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2015

COTA, B. S.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem Dissimilar da Liga de Alumínio 5052 H34 e do Aço SAE 1020 pelo Processo Hybrid Friction Stir Welding Assistido por Plasma: Análise da Resistência Mecânica, do Desgaste da Ferramenta e dos Esforços de Soldagem. *Soldagem & Inspeção*, 2020.

COTA, B. S.; BRACARENSE, A. Q. Validation of a newly developed robotic system for friction stir welding process by joining and characterizing joints of aluminum alloy 5052 H34. *Soldagem & Inspeção*, v. 22, n. 4, p. 494-510, 2017.

FIORAVANTI AS. Soldagem por FSW de ligas de alumínio Alcad AA2024-T3 e AA7075-T6 [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2008.

INFANTE, V.; VIDA, C. Tool and welding design. Elsevier Limited, Lisboa, 2014. SUEVEGES, J. M. C. ESTUDO ACERCA DA DETECÇÃO DE DANOS ES ESTRUTURAS VIA MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2014. 96 p.

International Standard Organization. DIN EN ISO 4136: destructive tests on welds in metallic materials - transverse tensile test. Genebra, Suíça: ISO; 2013.

KOZMINSKI ELO. Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) do aço inoxidável duplex UNS S31803 [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2015.

ROSATO, A. Estrutura Integral por Soldagem por Atrito "Friction Stir Welding - FSW" Requisitos básicos para o projeto estrutural. São José dos Campos, SP, Brasil. 2003.

THOMAS, W. M., MINUS, I., SMITH, P. T. Friction Stir Welding of an Aluminum Alloy - Effects of Tool Geometry. England: Rep. n 668, 1999.