FRICTION STIR WELDING EM LIGAS DE ALUMÍNIO

Aluminum alloys Friction Stir Welded

Marcio José Cuccolo ROSALES
Faculdade de Jaguariúna

João Luis Bilia LOPES
Universidade Federal de São Carlos

Resumo: O processo de soldagem FSW promove a formação de juntas de alta qualidade. As soldas produzidas no estado sólido geram menor aporte térmico e, como consequência, reduzem alterações microestruturais e degradações das propriedades mecânicas associadas aos ciclos térmicos durante a soldagem. Quando comparado com os processos convencionais de soldagem, o processo FSW garante vantagens em função da elevada produtividade. Entre as principais aplicações, destacam-se com potencial para implantação a indústria automotiva, aeroespacial, ferroviária e de produção energética, principalmente na soldagem de ligas leves, de baixo ponto de fusão e juntas do tipo dissimilares (de diferentes materiais).
Palavras-chave: Soldagem, *Friction Stir Welding*, FSW, Ligas de Alumínio.

Abstract: Solid-state joining techniques such as Friction Stir Welding (FSW) are a natural choice to produce weld low heat input, limited slight distortion and low microstructural and mechanical degradation. Great effort has currently been devoted to the joining of Al alloys because of their high strength, improved formability, and application in airframe structures. FSW is a continuous, hot shear, autogenous process involving a non-consumable and rotating tool plunged between two abutting workpieces. Compared to conventional arc welding techniques, FSW guarantees high productivity. FSW is a plausible process applied mainly for automotive and aerospace industries, including light weight alloys, specially low melting point materials and dissimilar joints.
Keywords: Welding, Friction Stir Welding, FSW, Aluminum Alloys.

1. Introdução

O alumínio e as suas ligas têm importantes aplicações na indústria automotiva e aeronáutica, uma vez que a combinação de baixa densidade com alta resistência mecânica e excelente conformabilidade a quente garantem sua utilização em escala industrial. Entretanto, as dificuldades de soldagem das ligas de Al por processos convencionais de fusão a arco elétrico têm limitado as suas aplicações. A soldagem por *Friction Stir Welding* (FSW) é uma alternativa que evita os problemas relacionados com a solidificação como porosidades e trincas a quente, além de

reduzir as distorções da peça, a degradação da microestrutura e das propriedades mecânicas. É uma técnica de soldagem no estado sólido, na qual o aporte de calor garante ciclos de temperatura inferiores ao ponto de fusão do material.

O processo FSW consiste em uma ferramenta rotativa não consumível que é inserida no material e avança de modo contínuo, consolidando uma junta de alta qualidade. Durante a soldagem, a resistência do material diminui nas vizinhanças da ferramenta, pois o atrito e a força axial aplicadas geram calor para facilitar o escoamento viscoplástico do material. O controle da temperatura é importante, uma vez que modifica a morfologia dos precipitados e muitas propriedades das ligas de Al, tais como resistência mecânica, tenacidade, fluência e corrosão sob tensão.

2. *Friction Stir Welding*

FSW é um processo de soldagem no estado sólido, patenteado e desenvolvido pelo *The Welding Institute* (TWI) em 1991, na Inglaterra. O processo consiste em uma ferramenta cilíndrica não consumível, composta por duas partes distintas: 1) *shoulder* e 2) pino, que está conectado ao *shoulder*. A ferramenta é rotacionada para formar uma região no material termomecanicamente deformada, que resulta na união da junta. A ação combinada de rotação e força axial promove o aquecimento e a diminuição da resistência à deformação plástica do material. A principal função da ferramenta é, portanto, movimentar o material nas regiões adjacentes ao centro da junta, como pode ser observado na Figura 1 [1].

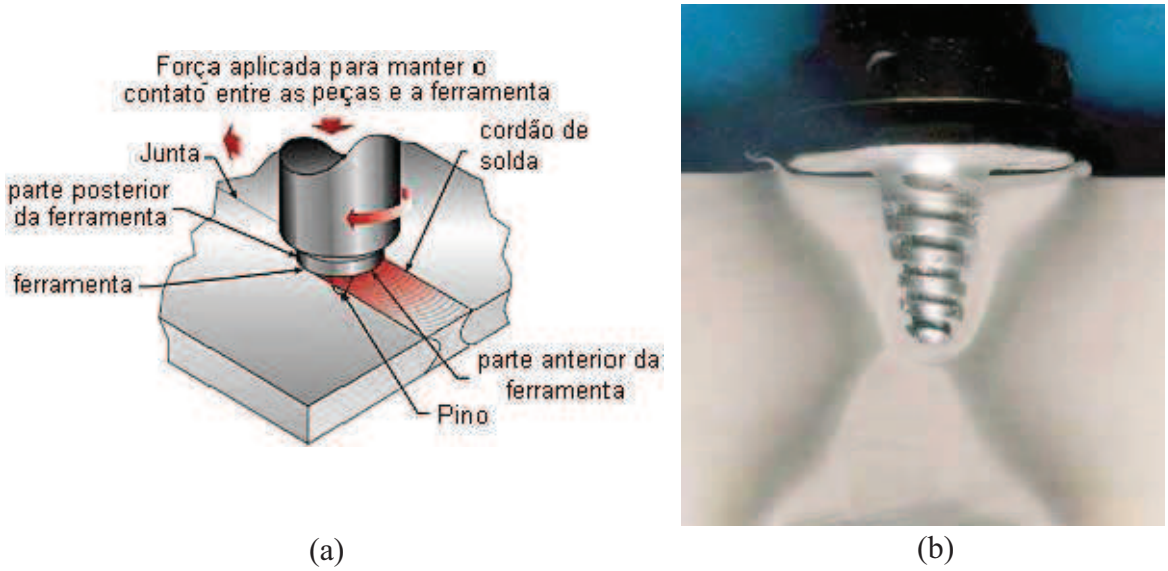


Figura 1 – Ilustração do processo FSW (a) representação esquemática do movimento da ferramenta e a consolidação do cordão de solda e (b) detalhe da ação do pino com roscas no interior da junta [2].

O processo FSW pode ser divido em três etapas. Inicialmente as chapas são fixadas e a ferramenta, que é comandada por um robô conectado a um Controle Numérico Computacional (CNC), é plugada no centro da junta. Em seguida, a ferramenta avança em velocidade transversal constante pela linha de centro da junta. Na parte posterior ao cordão consolidado do pino forma-se uma região deformada plasticamente. Por fim, a ferramenta se retrai e a solda é formada no estado sólido, sem que haja a fusão do metal [1].

A Figura 2 mostra em detalhe a ferramenta composta pelo *shoulder* e pino, de geometria definida, i.e. com roscas e facetado, para facilitar o escoamento do material. A soldagem ocorre através do calor gerado por atrito e deformação plástica principalmente pela ação do *shoulder*. O aquecimento localizado aumenta a ductilidade do material ao redor do pino e a combinação da rotação da ferramenta e o movimento de avanço provoca o deslocamento do material da frente do pino para trás, além do lado de retrocesso para o lado de avanço. Devido às diversas formas geométricas que pode assumir a ferramenta, o movimento do material ao redor do pino pode ser bastante complexo [3].

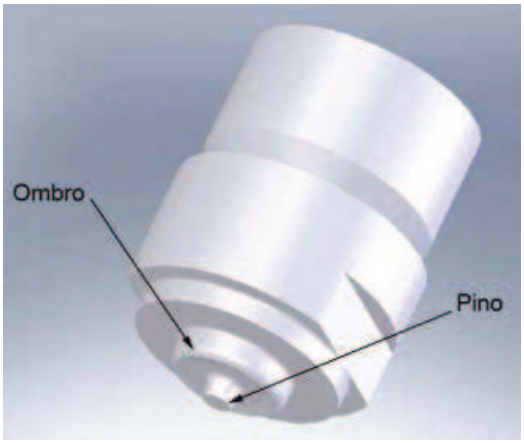


Figura 2 – Ferramenta de FSW típica [3]

No processo FSW a solda é realizada sem a ocorrência de fusão, pois a temperatura atinge no máximo 80% da temperatura de fusão. Por isso, evitam-se os problemas de solidificação e de trincas a quente – o que caracteriza vantagem quando comparado com processos convencionais de soldagem. Além disso, o calor mais baixo minimiza as distorções na peça [2].

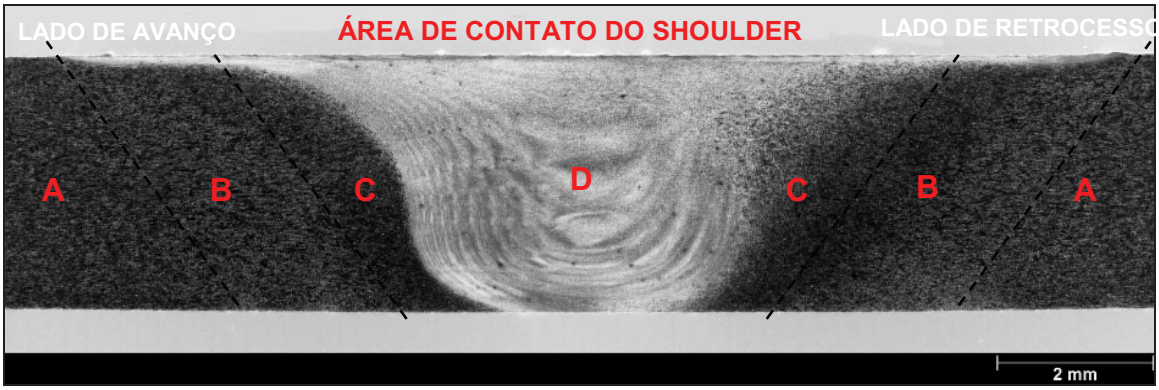
Na soldagem por FSW ocorre uma complexa movimentação do material e deformação plástica. Portanto, os parâmetros do processo exercem grande importância na qualidade da junta soldada. Geometria da ferramenta, formato da junta e parâmetros de soldagem, como pressão aplicada, velocidade de rotação e de avanço, são as principais variáveis, pois causam grandes efeitos na movimentação e no aquecimento do metal que influem na evolução da microestrutura. Os parâmetros devem assegurar o balanço entre massa e volume para o material possa escoar sem formar defeitos [4].

Em função do baixo aporte térmico, os índices de empenamento e rejeição são reduzidos. Além de permitir a soldagem tanto de ligas similares quanto dissimilares, o processo FSW não necessita de metal de adição ou proteção gasosa e não gera respingos, fumaça e radiação ultravioleta, como os métodos convencionais de soldagem por fusão. Entretanto, necessita de um sistema altamente rígido de fixação das chapas devido às forças envolvidas. Entre as

principais desvantagens do processo, há a formação de um furo no final de cordão de solda e a dificuldade na soldagem de materiais com alto ponto de fusão [3].

2.1. Microestrutura da junta Soldada

A microestrutura dos materiais soldados por FSW pode ser dividida em quatro regiões distintas: material de base, zona afetada termicamente - ZAT, zona afetada termo-mecanicamente – ZATM e zona dinamicamente recristalizada, ou lente de soldagem (*nugget* ou *Stir zone*). Estas regiões microestruturais características do processo FSW podem ser observadas na Figura 3 [1].



A Metal Base **(MB)**

B Zona Termicamente Afetada **(ZTA)**

C Zona Termomecanicamente Afetada **(ZTMA)**

D *Stir Zone* **(SZ)**

Figura 3 - Representação das regiões microestruturais formadas do processo FSW [1].

A) Material de base

Essa região fica suficientemente longe do cordão de solda para não ser afetada pelo calor e pela deformação decorrente do processo. Por isso, não existem alterações na microestrutura [1].

B) Zona Afetada Termicamente – ZAT

Na ZAT a microestrutura é modificada apenas pelos ciclos térmicos induzidos pelo processo FSW e não por deformação mecânica. Apesar de manter a mesma estrutura de grão do material base ocorre alteração da densidade de linhas de discordância, reações de dissolução, precipitação de partículas endurecedoras e coalecimento dos precipitados [1].

C) Zona Afetada Termo-mecanicamente – ZATM

A ZATM é região de transição entre a ZAT e a lente de soldagem. Essa zona transfere calor para a ZAT, influenciando a microestrutura. A temperatura gera ciclos térmicos que serão responsáveis pela aceleração do envelhecimento (superenvelhecimento) e processo de recuperação que resultam em piores propriedades mecânicas [4].

D) Lente de soldagem (*Stir Zone*)

O material da lente de soldagem geralmente é completamente recristalizado, com tamanho de partículas menor que 10 μm, pois essa região sofre intensa deformação plástica durante o processo a elevadas temperaturas. A forma e o tamanho da lente variam com o tamanho da ferramenta, tipo de liga e parâmetros de soldagem adotados. Os grãos estão separados por contornos de alto ângulo e há um decréscimo na densidade de linhas de discordância, ou seja, não fica evidenciada a presença de subgrãos [4]

As ligas de alumínio quando soldadas por FSW podem apresentar coalecimento ou dissolução de precipitados na matriz dependendo do tipo de liga e das temperaturas atingidas no processo [5]. Por outro lado, devido a deformação plástica que o material sofre, há um endurecimento causado pelo aumento da densidade das linhas de discordância. Contudo esse endurecimento não é tão

efetivo quanto o promovido pela presença do precipitados [6]. Por isso de modo geral para melhorar as propriedades mecânicas da solda é necessário o controle dos ciclos térmicos, a fim de minimizar os efeitos do superenvelhecimento.

2.2. Condições térmicas do fluxo de calor

Considera-se que o calor gerado durante o processo é proveniente da combinação dos efeitos da força normal aplicada sobre a chapa e o atrito entre a ferramenta e as chapas. Porém, a contribuição de calor proveniente da deformação plástica que causa a diminuição da resistência do material que é deslocado pela rotação do pino também precisa ser contabilizada no processo.

Os principais parâmetros que influenciam na geração de calor são a velocidade de rotação da ferramenta, a força normal aplicada e a velocidade de avanço. Isso somado com a condutividade do material, da ferramenta e do *backing bar,* determinam o aporte térmico e, portanto a transferência de calor. A complexidade da distribuição da temperatura faz com seja muito difícil obter equações que descrevam adequadamente o processo. Entre as variáveis que influenciam a transferência de calor para das chapas durante o processo de soldagem, podem-se citar o coeficiente de atrito que varia com a temperatura, as elevadas taxas de deformação, os diferentes parâmetros (velocidade de rotação e translação, força normal aplicada), a geometria da ferramenta e a própria composição química do material [1].

Diferentes materiais apresentam condições de escoamento distintas, pois o fluxo de material e de calor depende das propriedades físicas do material. Portanto, o desenho das zonas dependerá tanto das variáveis do processo quanto de como o calor é distribuído [7].

3. Considerações Finais

O processo FSW quando comparado aos processos convencionais de soldagem por fusão causa menos distorções, tensões residuais, mudanças na metalurgia e nas propriedades mecânicas. Por isso, as soldas possuem alta qualidade e baixo índice de rejeitos, o que torna o processo muito atraente para a indústria.

As aplicações desse processo crescem em vários segmentos da indústria. Além do setor aeroespacial, as indústrias naval, ferroviária, automotiva e de produção de energia elétrica apresentam potencial para implantação da soldagem FSW. Por esse motivo, fica evidente a necessidade de trabalhos cientifico que visam um melhor entendimento das características da soldagem por FSW.

Referências Bibliográficas

1. Rosales, M. C. Heat generation and heat transfer as influenced by changes to backing bar material when FSW aerospace grade aluminium alloys. JOINTECH-Friction Stir Welding Joining Technology Group, August 2007;

2. Mishra, R. S. Ma, Z. Y. “Friction stir welding and processing”, Materials Science and Engineering R 50 (2005) 1-78;

3. Fioravanti, A. S. Soldagem por FSW de ligas de aluminio ALCLAD AA2024-T3 e AA7075-T6. 2008. 85 pp. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008;

4. CARLETTI, C. B. Propriedades mecânicas de juntas sobrepostas da liga AL 6061 soldadas por FSSW.. São Carlos: UFSCar, 2002. 83 p. Mestrado-UFSCar. CCET - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. CEM;

5. Threadgill, P. Friction Stir Welds in aluminum alloys- preliminary microstructural assessment. TWI-Buletin, cidade, Cambridge, maio. 1997;

6. Chao, Y.J. Qi, X. Heat transfer and thermo-mechanical analysis of friction stir joining of AA6061 –T6 plates. In: Intenation Symposium on Friction Stir Welding, 1., 199, California. Proceeding;

7. Zetler, R. Lomolino, S. dos Santos, J. F. Donath, T. Beckmann, F. Lippman, T. Lohwasser, D. “ A Study on Material Flow in FSW of 2024-T351 and AA6056-T4 Alloys”, in 5th International FSW Symposium, Metz, France, September 2004.