

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO EM UMA LIGA DE ALUMÍNIO

Analysis of the Parameters of Friction Welding Process of an Aluminum Alloy

OLIVIECKI, N. J.
BESKOW, A. B.

Recebimento: 11/04/2013 - Aceite: 17/06/2013

RESUMO: Desenvolvido na década de 1990, na Inglaterra, o processo de soldagem por fricção, conhecido como *Friction Stir Welding* (FSW), foi uma das inovações tecnológicas mais importantes na área da metalurgia da soldagem desde então. A solda por fricção é um processo de junção de materiais em que acontece a baixa temperatura, no estado sólido dos metais, abaixo do seu ponto de fusão. O processo é baseado em uma ferramenta rotativa com perfil característico, que penetra na linha de junção das peças previamente fixas e pressionadas uma contra a outra, deslocando-se ao longo desta linha. O calor gerado pelo atrito da ferramenta a alta rotação faz com que o material base tenha sua ductilidade aumentada e escoe no sentido do centro da ferramenta, causando assim, a mistura mecânica, sendo o ombro da mesma responsável pelo forjamento final deste material já em resfriamento. O grande desafio do processo está em aperfeiçoar os parâmetros do equipamento que realiza a soldagem, juntamente com um perfil satisfatório da ferramenta. Estes fatores são dependentes uns dos outros, além de influenciarem na geração de calor no processo e, por conseguinte, no aparecimento ou não de defeitos, ocasionados pelo escoamento do material aquecido. O escopo do trabalho está focado na análise e otimização dos parâmetros de soldagem do processo, realizado em um centro de usinagem CNC, utilizando uma ferramenta previamente pesquisada em literaturas, que tende a proporcionar uma soldagem na liga de alumínio AA5083 com 6,60 mm de espessura e o monitoramento da temperatura durante o processo de soldagem.

Palavras-chave: Solda por Fricção. FSW. Alumínio. CNC.

ABSTRACT: The friction welding process, developed in the 1990s in England, known as Friction Stir Welding (FSW), has been, since then, one of the most important technological innovations in the field of welding metallurgy. The friction welding is a process of joining materials at low temperature and

occurs in the solid state of the metals, below its melting point. The process is based on a rotating tool with a characteristic profile, which penetrates into the border of the pieces to be joined that are previously fixed and pressed against each other, moving along the border line. The heat generated by the friction of the tool at high rotational speed makes the base material increase its ductility, flowing towards the center of the tool, causing the mechanical mixing of the base metal pieces, pressed by the shoulder of the tool, responsible for the final forging at the cooling stage of the metal. The big challenge is to refine the process parameters of the equipment that performs the welding, together with a satisfactory profile of the tool. Because these factors are dependent on each other, and of the influence of the generation of heat in the process, defects caused by the flow of heated material can appear or not. The scope of this work is focused on the analysis and optimization of welding parameters of the process, performed with a CNC machining center using a tool previously studied in literature that tends to provide a welding in aluminum alloy AA5083 with 6.60 mm thickness and monitoring the temperature during the welding process.

Keywords: Friction Stir Welding. FSW. Aluminum. CNC.

Introdução

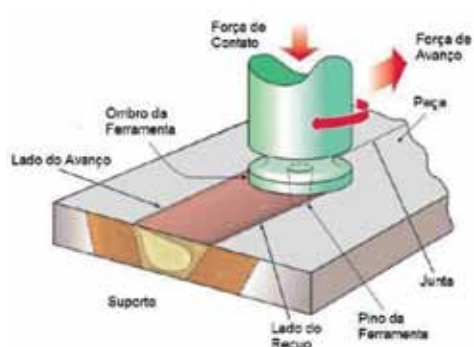
A geração de diversos defeitos, como trincas, porosidades e perdas nas propriedades mecânicas ocorridas nos processos mais difundidos de soldagem do alumínio através de arco elétrico, torna seu emprego pouco atrativo para a indústria automobilística e de aviação, por exemplo. Logo, um processo de soldagem que não necessite da fusão dos materiais para realizar uma solda, mas que realiza união através da mistura mecânica do metal base, torna o processo de solda por fricção e mistura mecânica *Friction Stir Welding* (FSW), um processo muito promissor.

Por não gerar fusão localizada do material base, muitos dos problemas metalúrgicos associados à fase líquida causada por processos de soldagem por fusão, não são observados em soldas executadas pelos processos de soldagem no estado sólido (GIPIELA, 2007).

Segundo Mishra e Mahoney (2007), o conceito básico de solda por fricção é relativamente simples, no qual uma ferramenta cilíndrica rotativa não consumível, possuindo

um pino e um ombro, é inserida nas bordas adjacentes das chapas metálicas a serem soldadas, percorrendo linearmente a extensão da junta. Na Fig. 1 pode ser observado o desenho esquemático do processo FSW. Neste trabalho, foram analisados os parâmetros de soldagem por FSW adaptado a equipamentos disponíveis na indústria, tais como centros de usinagem e fresas, sem envolver custos elevados para aplicação do processo, que poderá se difundir em escala industrial, além do monitoramento das temperaturas durante o processo de soldagem.

Figura 1 - Desenho esquemático do processo FSW (HILLER, 2007).



Parâmetros do processo FSW

O processo de solda por fricção é realizado através de máquinas com programação CNC, os quais permitem o controle dos parâmetros que influenciam diretamente na soldagem pelo processo FSW, além de possuir características importantes, tais como elevada rigidez e potência adequada.

A velocidade de avanço ao longo da linha da junta, a velocidade de rotação da ferramenta, o sentido horário ou anti-horário, a força vertical sobre a ferramenta, o ângulo de inclinação da ferramenta e, um dos mais pertinentes, o desenho da ferramenta de soldagem propriamente dita, são as principais variáveis independentes utilizadas para controlar o processo de FSW (NANDAN et al. 2008).

Em suma, a intenção é otimizar o processo, tornando-o com características parametrizadas que atendam a todas as exigências a respeito das propriedades mecânicas do material a ser soldado e que a junta tenha características satisfatórias. Pequenas alterações nessas variáveis têm influência direta sobre o comportamento da junta, sua microestrutura e todo conjunto de propriedades relevantes ao material.

a) Velocidade de avanço

A velocidade de avanço ou de soldagem é a distância percorrida pela ferramenta por unidade de tempo (mm/min). Tem relação direta com a geração de calor durante o processo. Baixas velocidades de soldagem implicam maior geração de calor e temperaturas mais elevadas. Em contrapartida, altas velocidades de soldagem significam menor geração de calor por unidade de comprimento da solda.

b) Velocidade de rotação

A velocidade de rotação da ferramenta (rpm) está diretamente ligada à geração de ca-

lor durante o processo de soldagem. Quanto maior a velocidade de rotação, maior será a temperatura atingida durante o processo, devido ao aumento do aquecimento através do atrito da ferramenta com a peça de trabalho. A rotação da ferramenta resulta na movimentação e mistura do material ao redor do pino, fazendo o mesmo escoar da parte frontal para a parte posterior da ferramenta (MISHRA e MA, 2005). Segundo Aires (2007), a razão entre a velocidade de rotação da ferramenta e a velocidade de avanço é fator chave na otimização dos parâmetros de soldagem.

c) Força vertical de forjamento

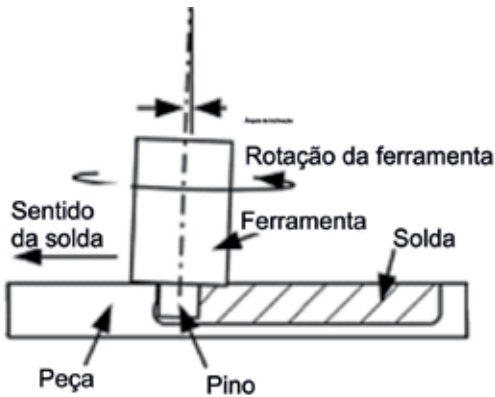
A força vertical de forjamento é um parâmetro que influencia diretamente no aporte de calor do processo e pode causar defeitos na junta soldada. Se o equipamento que está realizando a solda não tiver um controle ativo na aplicação da força, pode levar à perda de qualidade na junta, e também, ao aparecimento de defeitos na superfície. De acordo com Cruz (2009), verifica-se que o excesso de força vertical de forjamento pode ocasionar a formação de rebarba (flash), aderida na superfície da peça, defeito este que pode ser verificado visualmente. Ligado a essa formação de rebarba, está o fato da junta soldada ter sua seção transversal reduzida.

d) Ângulo de inclinação da ferramenta

A ferramenta que produz a união entre as chapas fica, em geral, ligeiramente inclinada no sentido da soldagem, formando um ângulo com a vertical, chamado de ângulo de inclinação, do inglês *tilt angle* (CERVEIRA, 2008).

O ângulo de inclinação da ferramenta exerce um fator importante na FSW, pois auxilia na movimentação do material da frente para trás do pino, e também, na consolidação do material plastificado após a passagem do mesmo, devido à maior pressão existente nesta região (SEGATTI, 2011). Na Fig. 2, pode-se observar o ângulo de inclinação e outras variáveis do processo.

Figura 2 - Ângulo de inclinação para ferramenta FSW (CERVEIRA, 2008).



e) Penetração da ferramenta

A penetração da ferramenta é uma função do comprimento do pino e do ângulo de inclinação adotado e define a pressão que é exercida sobre o material na parte posterior da ferramenta durante o processo de soldagem. Quando o comprimento do pino é superior à espessura da chapa, o ombro da ferramenta não tem muito contato com a chapa a ser soldada, diminuindo a temperatura de soldagem e reduzindo a pressão do ombro sobre a chapa, resultando frequentemente em soldas defeituosas.

f) Geometria da ferramenta

A geometria da ferramenta é o aspecto de maior influência no desenvolvimento do processo de FSW, sendo responsável por promover o aquecimento e o escoamento do material plastificado ao redor do pino (CAPELARI, 2006).

Segundo Capelari (2006), a maior parcela do calor gerado durante o processo provém do atrito entre o ombro e a peça a ser soldada. O ombro da ferramenta é a parte também responsável por restringir a expulsão do material da região de solda, além de favorecer o escoamento do material ao redor do pino. A função principal do pino é forçar a movimentação do material amolecido na peça de

trabalho, que estará em um estado altamente plastificado, em ambas as direções, de cima para baixo e da parte frontal para a parte posterior da ferramenta. Além disso, o pino pode fragmentar e dispersar qualquer óxido ou outra impureza da linha da junta, quando a soldagem é feita no alumínio.

Dentre as geometrias de ferramentas utilizadas para realização de soldas por FSW, pode-se citar a ferramenta de ombro plano com estrias em espiral. Essa configuração de ombro não tem a necessidade do ângulo de ataque da ferramenta, como já pesquisado pelo *The Welding Institute* (TWI), o que facilita a implantação do processo de soldagem por fricção em máquinas mais simples, que não tem o recurso angular no seu eixo árvore, tais como centros de usinagens e fresas universais (ANDRADE, 2009). A profundidade que o ombro penetra na peça é em torno de 0,1 a 0,25 mm, sendo que o excesso de profundidade produz muitas rebarbas (MISHRA e MAHONEY, 2007). O efeito das estrias é suficiente para dirigir o material para o interior do ombro no sentido do pino, reduzindo a formação de rebarba e providenciando um correto nível de forjamento do material. Na Fig. 3, pode-se observar a configuração do ombro.

Figura 3 - Ferramenta de ombro plano com estrias em espiral (AIRES, 2007).



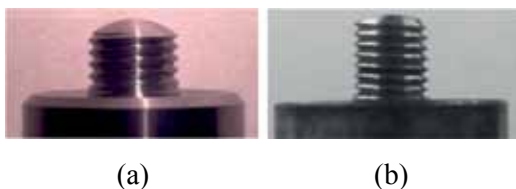
Nas ferramentas para soldagem por FSW, também é bastante comum a utilização de pinos cilíndrico com rosca com a ponta arre-

dondada ou reta. O pino cilíndrico roscado de ponta arredondada que foi citado na patente original da FSW é mostrado na Fig. 4a.

Existem, também, ferramentas com pino cilíndrico roscado com face reta, como mostrado na Fig. 4b. A rosca do pino pode ser direita ou esquerda, independentemente do formato do ombro. Outro parâmetro importante é o tipo de rosca que será usada, com a quantidade de fios por polegada, podendo ser variada, influenciando em uma maior ou menor mistura do material pré-aquecido e na quantidade de material a ser agitado pelo pino.

Baseando-se em estudos anteriores, Capelari (2006) sugere que o comprimento do pino deve ser ligeiramente inferior à espessura da chapa, já que a região soldada abaixo da ponta do pino estende-se apenas por uma pequena região. Além disso, o diâmetro do ombro deve corresponder a, aproximadamente, três vezes o diâmetro maior do pino.

Figura 4 - (a) Ferramenta de pino cilíndrico com a face arredondada (CAPELARI, 2006), (b) Ferramenta de pino cilíndrico com a face reta (MISHRA e MAHONEY, 2007).



(a)

(b)

g) Material da ferramenta

Uma vez que o ombro e o pino desempenham funções diferentes, eles podem ser fabricados de materiais diferentes. Neste caso, deve-se ter cuidado no projeto da ferramenta, em relação à conseqüente diferença de expansão térmica. Na soldagem FSW de ligas de alumínio, têm sido usados, comumente, aços ferramenta para trabalho a quente, como o AISI H13 (HILLER, 2007). Outros aços ferramenta podem ser utilizados, tais como aços VC 130 e VC 131.

Vantagens e desvantagens do processo FSW

Uma das principais vantagens que a FSW tem em relação a outros processos de soldagem convencionais, é o fato de a mesma ocorrer no estado sólido, abaixo do ponto de fusão do material.

Por não utilizarem arco elétrico, as soldas por fricção não produzem fumos, altamente prejudiciais à saúde ocupacional do soldador ou operador. Outro fator importante é que, na FSW, o operador não é exposto à radiação característica dos processos que utilizam arco elétrico.

No entanto, o processo apresenta algumas restrições, como apontado por Souza (2010): as peças precisam ser fixadas com elevada rigidez, com placa de apoio (*backing bar*) para unir cada tipo de junta; o equipamento de soldagem é de baixa flexibilidade, alto custo e não é portátil, como nos casos MIG e TIG; as ferramentas do processo são exclusivas para cada tipo de junta, deixando um furo no final de cada soldagem, problema este que pode ser solucionado com ferramentas, equipamentos ou procedimentos de soldagem alternativos. Outro fator relevante é que a velocidade de soldagem é um pouco menor do que a utilizada nos processos convencionais por fusão.

Aplicações do processo FSW

O processo de FSW foi utilizado comercialmente, pela primeira vez, no ano de 1997, pela indústria naval. Uma empresa norueguesa realizava soldas por fricção em painéis de alumínio com cerca de 6 m² de área superficial, com espessura de 3,15 mm. No ano de 1999, a empresa Boeing investiu 15 milhões de dólares na soldagem por FSW do tanque de combustível do foguete de lançamento Delta (POTOMATI, 2006). No

mês de setembro de 2012, a Honda Motor Corporation do Japão anunciou a utilização do processo de FSW para soldagem contínua de diferentes metais, como aço e alumínio, aplicado, pela primeira vez no mundo, na produção em massa de um veículo na linha de produção. Trata-se do sub-chassi do novo Honda Accord modelo 2013, um componente essencial para estrutura do corpo do veículo, como pode ser observado na Fig. 5. Com esta nova tecnologia obtém-se uma redução de até 25% no peso em relação ao sub-chassi convencional, que era soldado pelo processo MIG, contribuindo para a economia de combustível (WORLD HONDA, 2012).

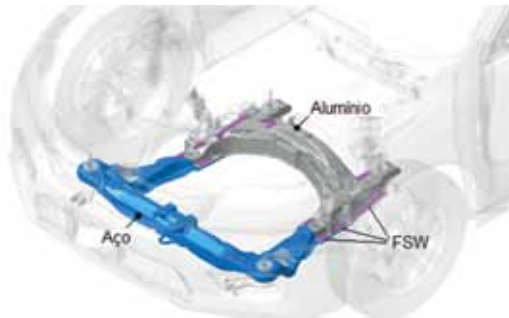
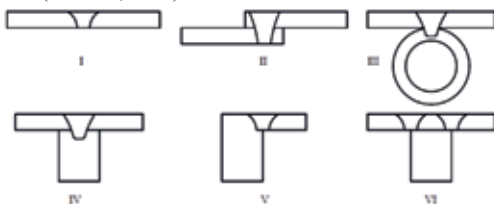


Figura 5 - Sub-chassi Honda Accord modelo 2013 soldado por FSW (WORLD HONDA, 2012).

Tipos de juntas soldadas por FSW

No processo de solda por fricção, geralmente as juntas de topo são as mais utilizadas, até mesmo para questões de estudo. Mas este processo pode ser implantado nas mais diversas configurações de junta, como pode ser observado na Fig. 6 (SOUZA, 2010).

Figura 6 - Tipos de junta que podem ser realizadas por FSW (SOUZA, 2010).



Descrição de cada tipo de junta da Fig. 6:

- I - Junta de topo, de aplicação em chapas planas, perfis planos, soldagem circunferencial de tubos e união de diferentes espessuras de material;
- II - Sobreposta de aplicação linear e circunferencial;
- III - Para flanges e tubos;
- IV - Junta do tipo “T”;
- V - Canto ou borda;
- VI - Junta do tipo “T” com solda nas duas bordas.

Procedimento Experimental

Para a realização das soldas pelo processo FSW, foram utilizadas chapas de alumínio, com dimensões de 6,6 x 100 x 300 mm, da liga AA5083, que tem como principal elemento de liga o magnésio. As soldas foram realizadas em um centro de usinagem de três eixos (X, Y, Z), da marca Deb’Maq, série *Diplomat*, modelo *Skibull 600*, sendo soldado ao longo do comprimento de 300 mm.

O sistema de fixação das chapas deve ser rígido, capaz de suportar a força imprimida pela ferramenta, tanto no sentido axial como transversal. O dispositivo de fixação desenvolvido pode ser observado na Fig. 7.

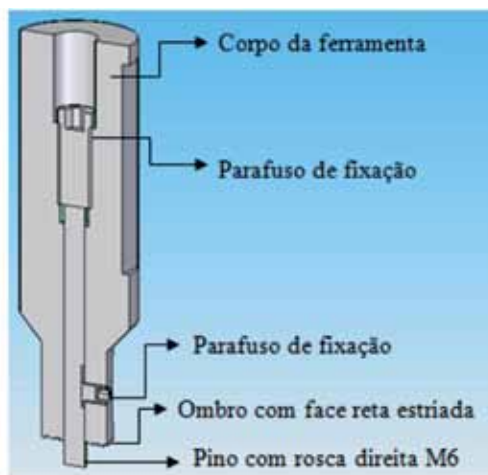
Figura 7 - Sistema de fixação das chapas a serem soldadas.



Com o objetivo de realizar uma soldagem livre de defeitos e mantendo as propriedades do material base o mais próximo possível das características originais, foi construída uma ferramenta com pino cilíndrico roscado de face reta, com diâmetro de 6 mm e rosca direita M6, já que as chapas a serem soldadas possuem 6,6 mm de espessura, sendo, segundo a literatura, o diâmetro mais indicado para tal. O pino com rosca tem o papel de diminuir a relação de volume de material deslocado pela ferramenta, diminuindo, portanto, a força imprimida para soldagem. A ferramenta possibilita o ajuste da altura do pino de acordo com cada solda realizada.

O ombro da ferramenta precisa necessariamente ser estriado, pois a máquina não dispõe de recurso para ser adotado um ângulo de ataque entre a chapa e a ferramenta. Com a face reta e estrias no sentido horário, o ombro da ferramenta promove o forjamento do material e desloca este no sentido do centro do pino. O ombro foi fabricado com 19 mm de diâmetro, aproximadamente três vezes a espessura da chapa, como recomendado.

Figura 8 - Desenho esquemático da ferramenta utilizada na soldagem FSW.



O material utilizado para a fabricação do pino e do ombro da ferramenta foi o aço AISI VC 131 normalizado. Com o objetivo de

promover a troca rápida em caso de quebra ou desgaste do pino, o conjunto foi fabricado em duas peças distintas que podem ser facilmente acopladas. Na Fig. 8, observa-se o desenho da ferramenta utilizada nos experimentos de soldagem por FSW.

A coleta dos dados para avaliação do campo de temperaturas e da ZAC (Zona Afetada pelo Calor) foi realizada durante o processo de soldagem das amostras. Foram utilizados termopares do tipo K, que são de uso genérico e cobrem faixas de temperatura de -270 a 1200 °C, que foram confeccionados no próprio laboratório de soldagem da universidade. Para a leitura dos dados levantados pelas sondas de termopares, utilizou-se um sistema de aquisição de dados da marca *Novus* modelo *Field Logger*. Os termopares foram dispostos na chapa a ser soldada conforme a Fig. 9.

Figura 9 - Disposição dos termopares na junta soldada.



Resultados e discussões

Os procedimentos iniciais de soldagem por FSW foram realizados com o objetivo de estabelecer os parâmetros ótimos de aplicação, tais como velocidade de rotação, avanço, altura do pino, altura de penetração do ombro, ajustados de acordo com cada experimento.

Como o sentido de giro da ferramenta é contrário à espiral do ombro e ao sentido

da rosca do pino, teoricamente, o material aquecido escoará das bordas do ombro em sentido ao centro da ferramenta, tendo o pino roscado à função de mover o material da superfície para a parte inferior da chapa, na raiz da solda, promovendo uma intensa mistura mecânica localizada.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no experimento E1

| Ângulo de inclinação (°) | Velocidade de rotação (rpm) | Velocidade de avanço (mm/min) | Velocidade de penetração (mm/min) | Penetração do ombro (mm) | Tempo de aquecimento (s) | Altura do pino (mm) | Altura de raiz (mm) | Sentido de rotação |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 0 | 1450 | 54 | 10 | 0,3 | 20 | 6,2 | 0,1 | Anti-horário |

Um parâmetro que mostrou ser importante foi a velocidade de penetração da ferramenta no início da solda, pois quando esta é elevada, a força necessária ultrapassa a capacidade da máquina, podendo também danificar a ferramenta. Nos experimentos, utilizou-se a velocidade de 10 mm/min.

Como a ferramenta atua no sentido anti-horário de rotação, a tendência de maior formação de rebarba foi no lado do retrocesso da junta, como mostra a Fig. 10a. Um fator que contribuiu para a formação de rebarba foi a penetração de 0,3 mm do ombro, que causou expulsão de material proporcional ao volume relativo do mesmo na chapa. Apesar da formação de rebarba, não ocorreu defeito visual aparente na superfície, tendo sido obtida baixa rugosidade na linha da junta.

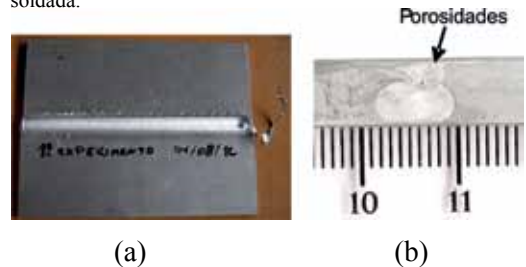
Com o objetivo de avaliar a macroestrutura deste primeiro experimento, um corpo de prova da região central da chapa foi submetido a ataque químico com o reagente

Experimento preliminar E1

Inicialmente foram implementados os parâmetros de soldagem propostos por Segatti (2011), de acordo com a Tab. 1.

denominado Água Régia. Na Fig. 10b pode-se observar uma pequena formação de vazio na região do *nugget* da solda, indicando que, possivelmente, a velocidade de rotação esteja elevada, tornando o fluxo do material descontínuo. A penetração da solda na raiz não foi suficiente para preencher toda a seção transversal da chapa.

Figura 10 - (a) Experimento E1, (b) Macrografia da junta soldada.



O perfil de dureza do metal base e da junta soldada foram comparados na seção transversal do material, e os resultados podem ser observados na Tab. 2.

Tabela 2 - Ensaio de dureza Rockwell no experimento E1

| Dureza (HRB) | Região retrocesso | Região retrocesso | Região central | Região avanço | Região avanço | Média (HRB) |
|---------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------|---------------|-------------|
| Material base | 30,8 | 30,8 | 30,8 | 30,8 | 30,8 | 30,8 |
| Lado superior | 31,0 | 30,0 | 23,0 | 29,0 | 32,5 | 29,1 |
| Lado inferior | 33,0 | 32,0 | 33,5 | 32,0 | 28,5 | 31,8 |

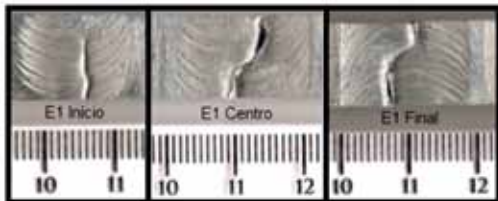
Avaliando os resultados obtidos, pode-se afirmar que a solda aproximou-se da dureza do material base, mas percebe-se que, devido ao superaquecimento da região superior central da solda, promovido pela proximidade com o ombro da ferramenta, houve uma queda na dureza devido à alteração da morfologia do grão.

Com ensaios de tração, foi possível comparar a resistência de corpos de prova da junta soldada com a resistência do material base. Dos três corpos de prova retirados do E1, todos fraturaram na região central da solda, não havendo distinção entre o lado de avanço e retrocesso da ferramenta, o que indica que a interface do material base com a zona atingida pelo calor na região da solda não teve suas propriedades de resistência alteradas. Na Tab. 3, podem ser observados os valores obtidos no ensaio para tensão de ruptura (σ_{rup}), tensão de escoamento (σ_{esc}), deformação (ϵ) e eficiência da tensão de escoamento da solda com relação à tensão de escoamento do metal base (η).

Tabela 3 - Ensaio de tração uniaxial no experimento E1

| Experimento | | σ_{rup} (MPa) | σ_{esc} (MPa) | ϵ (%) | η (%) |
|---------------|--------|-------------------------|-------------------------|----------------|---------------|
| E1 | Início | 183 | 146,1 | 1,1 | 0,99 |
| | Centro | 233 | 144,0 | 3,2 | 0,97 |
| | Final | 222 | 139,4 | 2,6 | 0,94 |
| Material base | | 222 | 148,0 | 11,0 | 1,00 |

Figura 11 - Corpos de prova submetidos a ensaio de tração no experimento E1.



No primeiro experimento, foi obtida uma solda de boa eficiência comparada à do metal

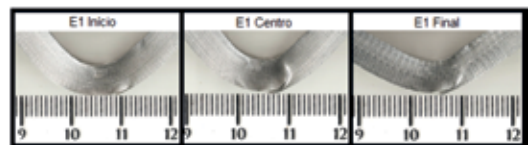
base em relação à tensão de escoamento. Na Fig. 11, estão apresentadas as fotografias dos corpos de provas submetidos ao ensaio.

Corpos de prova retirados do experimento E1 foram submetidos ao ensaio de dobramento na face contrária à raiz da solda, rompendo na raiz por falta de penetração. Com este ensaio, pode-se perceber que, no decorrer da solda, a chapa tende a perder sua ductilidade, pois na parte inicial, onde a soldagem acontece a menor temperatura, houve um ângulo de dobramento maior, que foi diminuindo até o final da chapa, rompendo com maior facilidade. Na Tab. 4, podem ser observados os ângulos de dobramento obtidos nos ensaios. Na Fig. 12, pode ser observada a falha nos corpos de prova ensaiados.

Tabela 4 - Dados obtidos do ensaio de dobramento de raiz no experimento E1

| Experimento | Força (kN) | Ângulo de dobra (°) |
|---------------|------------|---------------------|
| E1 | Início | 8,60 |
| | Centro | 8,55 |
| | Final | 7,80 |
| Material base | 7,50 | 180 |

Figura 12 - Corpos de prova submetidos a ensaio de dobramento no experimento E1.



Experimento preliminar E2

No segundo experimento, os parâmetros de soldagem foram alterados, visando à maior eficácia do processo. Devido ao corpo de prova do experimento E1 ter mostrado melhores propriedades mecânicas no início da junta soldada, optou-se por reduzir a velocidade de rotação da ferramenta para 1200 rpm, a fim de verificar possíveis alterações relacionadas ao

aquecimento da chapa e da ferramenta. A penetração do ombro da ferramenta foi reduzida para 0,2 mm, visando à redução da rebarba, e

a altura do pino foi aumentada para 6,37 mm, aumentando a penetração de raiz. Todos esses parâmetros são mostrados na Tab. 5.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados no experimento E2

| Ângulo de inclinação (°) | Velocidade de rotação (rpm) | Velocidade de avanço (mm/min) | Velocidade de penetração (mm/min) | Penetração do ombro (mm) | Tempo de aquecimento (s) | Altura do pino (mm) | Altura de raiz (mm) | Sentido de rotação |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 0 | 1200 | 54 | 10 | 0,2 | 20 | 6,37 | 0,03 | Anti-horário |

Na Fig. 13 pode-se observar que no segundo experimento também houve formação de rebarba, sempre maior na região de retrocesso de ferramenta e um pequeno vazio na parte inicial da solda, na superfície da chapa. Na parte da raiz da solda, não se observou nenhum defeito aparente.

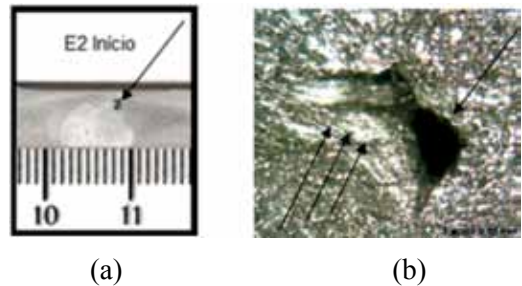
pode-se observar a formação de um vazio na região do *nugget* da solda, mais precisamente no lado de avanço do pino e as demais amostras ao longo da chapa não apresentaram defeito aparente. Ainda assim, o defeito de falta de penetração na raiz da solda pode ser percebido.

Figura 13 - Experimento E2.



No experimento E2, para uma análise mais precisa, todos os corpos de prova retirados da chapa soldada foram submetidos à análise metalográfica. Na imagem retirada da parte inicial do corpo de prova, Fig. 14,

Figura 14 - (a) Macrografia do experimento E2 e (b) ampliação da região do vazio.



No ensaio de dureza novamente foram comparados os perfil de dureza do metal base e da junta soldada, sobre a seção transversal do material e os resultados podem ser observados na Tab. 6.

Tabela 6 - Ensaio de dureza Rockwell no experimento E2

| Dureza (HRB) | Região retrocesso | Região retrocesso | Região central | Região avanço | Região avanço | Média (HRB) |
|----------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------|---------------|-------------|
| Material base | 30,8 | 30,8 | 30,8 | 30,8 | 30,8 | 30,8 |
| Lado superior início | 30,0 | 31,5 | 31,0 | 32,0 | 31,0 | 31,1 |
| Lado inferior início | 30,0 | 31,0 | 34,0 | 33,0 | 31,0 | 31,8 |
| Lado superior final | 27,0 | 31,5 | 33,0 | 31,0 | 29,0 | 30,3 |
| Lado inferior final | 33,0 | 33,0 | 33,0 | 32,0 | 32,0 | 32,6 |

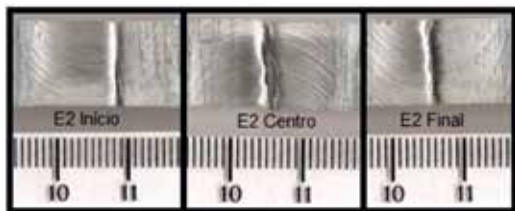
Avaliando os resultados obtidos, nota-se que o material apresentou uma pequena diferença entre os lados superior e inferior da seção transversal. Novamente o lado superior apresentou menores durezas que o lado inferior, mas, no comportamento geral, em relação ao metal base, apresentou durezas mais elevadas.

Analisando os três corpos de prova retirados do experimento E2, todos também fraturaram na região central da solda. No ensaio de tração realizado, observou-se que a chapa soldada com menor velocidade de rotação apresentou resultados não tão satisfatórios quanto os testes realizados com o experimento E1, a tensão de escoamento teve valores inferiores. Na Tab. 7, podem ser observados os valores obtidos no ensaio para tensão de ruptura (σ_{rup}), tensão de escoamento (σ_{esc}), deformação (ϵ) e eficiência (η). Na Fig. 15, pode-se observar os corpos de provas submetidos ao ensaio.

Tabela 7 - Ensaio de tração uniaxial no experimento E2

| Experimento | | σ_{rup} (MPa) | σ_{esc} (MPa) | ϵ (%) | η (%) |
|---------------|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------|---------------|
| E2 | Início | 228 | 113,9 | 3,8 | 0,76 |
| | Centro | 228 | 136,7 | 3,5 | 0,92 |
| | Final | 178 | 99,7 | 2,1 | 0,67 |
| Material base | | 222 | 148,0 | 11,0 | 1,00 |

Figura 15 - Corpos de prova submetidos a ensaio de tração no experimento E2.



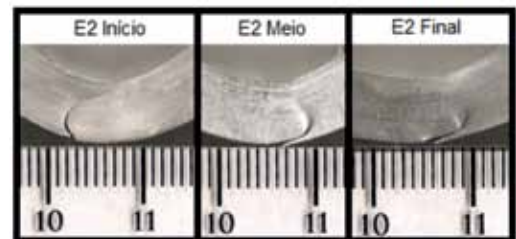
Com comportamento ligeiramente inferior ao experimento E1, os corpos de prova do experimento E2 também romperam na raiz da solda por falta de penetração, antes que fosse atingido 180°. Porém, a força exigida

para o dobramento foi superior até mesmo à do metal base. Os corpos de prova apresentaram também baixa ductilidade, pois nenhum dos corpos chegou a 90°, rompendo na raiz da solda. Pode ser observado, também, que a fratura do dobramento aconteceu na interface entre o metal base e o metal misturado, revelando uma região de fragilidade. Na Tab. 8, podem ser observados os valores obtidos nos ensaios. Na Fig. 16, pode ser observada a falha nos corpos de prova ensaiados.

Tabela 8 - Dados obtidos do ensaio de dobramento de raiz no experimento E2

| Experimento | Força (kN) | Ângulo de dobra (°) | |
|---------------|---------------|------------------------|----|
| E2 | Início | 9,50 | 67 |
| | Centro | 8,55 | 53 |
| | Final | 9,55 | 37 |
| Material base | 7,50 | 180 | |

Figura 16 - Corpos de prova submetidos a ensaio de dobramento no experimento E2.



Perfil de temperaturas – Experimento E3

Para obtenção dos perfis de temperaturas no processo de solda por FSW, montou-se um aparato com termopares tipo K, inseridos na superfície da chapa de alumínio em orifícios de 1 mm de diâmetro. No experimento E3, foram utilizados parâmetros semelhantes ao experimento E1, que apresentaram os melhores resultados no geral, a fim de monitorar a temperatura no processo. Na Fig. 17, pode ser observada a montagem do experimento antes da soldagem das chapas.

Figura 17 - Montagem do experimento E3 para aquisição das temperaturas de soldagem.

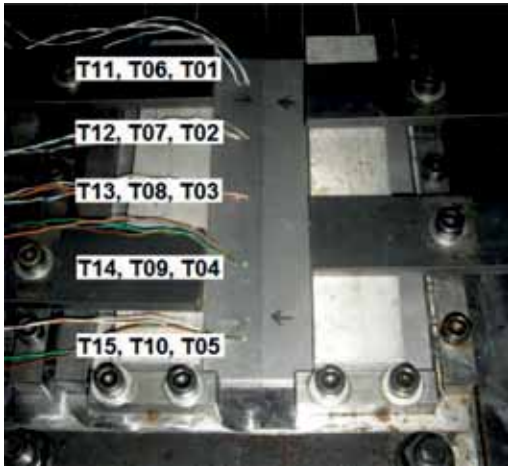
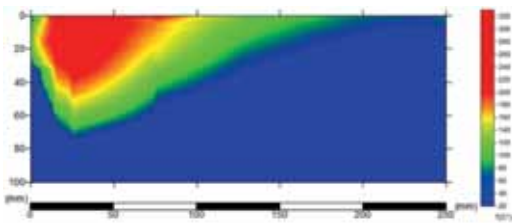


Figura 18 - Campo de temperaturas no ponto 1.

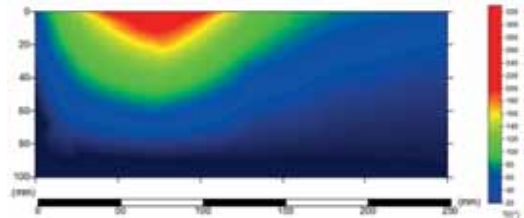


Com os dados de temperaturas coletados no ponto 1 com os termopares T01, T06 e T11, no instante em que a ferramenta passa por tal ponto, levantou-se o campo de temperaturas partindo do centro da linha da junta no sentido das extremidades da chapa, tendo como fonte de calor o aquecimento gerado pelo atrito da ferramenta, de acordo com a Fig. 18. Este campo de temperaturas foi gerado pelo software Surfer 8 (em uma versão de demonstração gratuita). A imagem é relativa a uma das metades da chapa soldada seccionada na linha da junta. No termopar T01 instalado na parte inferior da chapa, na região próxima ao pino, a temperatura chegou a 291,7 °C. Já próximo ao ombro na superfície da chapa, a temperatura ficou próxima a 294,5 °C, indicado por T06, onde a tem-

peratura tende a ser mais elevada devido ao ombro da ferramenta ser o principal gerador de calor do processo. O termopar T11 atingiu a temperatura de 217 °C, mostrando que, à medida que se afasta do centro da ferramenta, a chapa não aquece tanto.

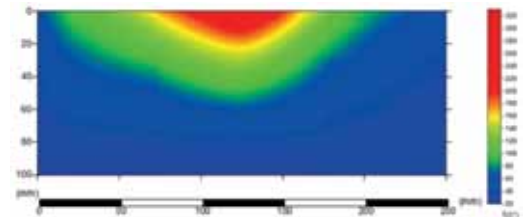
Na Fig. 19, é apresentado o campo de temperaturas construído com os dados coletados no ponto 2, com os termopares T02, T07 e T12 a uma distância de 75 mm do início da chapa, no instante em que a ferramenta passou por tal ponto. O termopar T02 na parte inferior da chapa próximo ao pino atingiu a temperatura de 321,7 °C, já o termopar T07 próximo ao ombro da ferramenta atingiu 281 °C, uma temperatura menor que a registrada próximo ao pino e o termopar T12 atingiu 209 °C.

Figura 19 - Campo de temperaturas no ponto 2.



No ponto 3, a 125 mm do início da chapa, as temperaturas de pico atingidas pelos termopares T03, T08 e T13 foram, respectivamente, 316,2 °C, 283,5 °C e 214,3 °C e o campo de temperaturas no instante em que a ferramenta passou pelo ponto 3 pode ser verificado na Fig. 20.

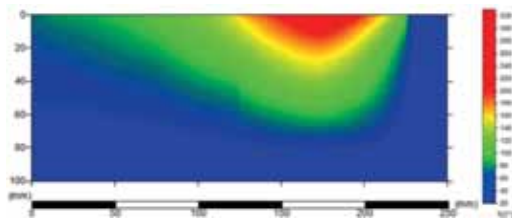
Figura 20 - Campo de temperaturas no ponto 3.



No ponto 4, situado a 175 mm do início da chapa, as temperaturas máximas atingidas

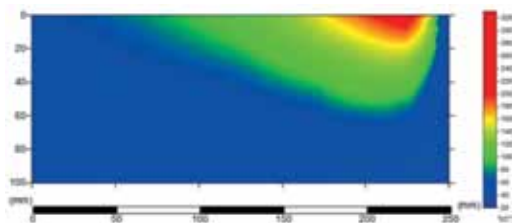
pelos termopares T04, T09 e T14 foram, respectivamente, 305 °C, 290,4 °C e 205 °C. Para os termopares localizados no ponto 4, o campo de temperaturas no instante em que a ferramenta passou por este ponto está ilustrado na Fig. 21. Percebe-se que a parte inicial da chapa já está em fase de resfriamento natural ao ar.

Figura 21 - Campo de temperaturas no ponto 4.



No ponto 5, a 225 mm do início da chapa, as temperaturas máximas atingidas pelos termopares T05, T10 e T15 foram, respectivamente, 274,6 °C, 264,7 °C e 238,1 °C. No quinto e último ponto, os termopares registraram o campo de temperaturas ilustrado na Fig. 22.

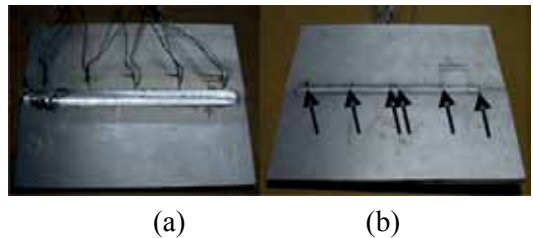
Figura 22 - Campo de temperaturas no ponto 5.



Neste experimento, surgiram vazios na linha da junta da solda, como pode ser observado na Fig. 23a e as falhas podem ser justificadas devido à existência de furos na chapa do suporte, feitos para instalação dos termopares na parte inferior da mesma. A Fig. 23b mostra o verso da chapa com o metal que escoou pelos furos do suporte. Por este motivo, não foram realizados os ensaios com a chapa, sendo o ponto positivo do

experimento a mínima formação de rebarba durante a solda.

Figura 23 - (a) Frente e (b) verso da chapa soldada com a montagem dos termopares.



Conclusões

O processo de soldagem por fricção FSW é um processo inovador, que proporciona inúmeras vantagens tanto para a indústria quanto para o operador, que não é mais exposto aos riscos laborais, aos quais estão expostos nos processos tradicionais de soldagem do alumínio por fusão.

De acordo com a bibliografia, esta técnica possibilita a união de materiais dissimilares, o que permite aos engenheiros e projetistas se beneficiarem de diferentes propriedades e materiais, em busca de novas concepções construtivas e na redução de custos e tempos de fabricação.

Com os experimentos realizados, concluiu-se que:

- utilizando 1450 rpm de velocidade de rotação da ferramenta, 54 mm/min de avanço e penetração do ombro de 0,3 mm para o perfil de ferramenta desenvolvido, obtém-se soldas com qualidades razoáveis, chegando a atingir uma eficiência de 94 a 99 % para a tensão de escoamento, comparado ao material base;
- no teste de dobramento as chapas soldadas aceitaram dobramentos que variaram de 66° a 100°, sendo submetidos a dobramento na face contrária à raiz de solda;

- no que diz respeito à dureza, a chapa soldada permaneceu com suas características praticamente inalteradas em relação ao metal base;
- o ombro da ferramenta necessita de uma maior profundidade em suas estrias, a fim de impedir que o material aquecido escoe do seu interior para fora da ferramenta, formando rebarba excessiva;
- o pino da ferramenta teve um bom comportamento em relação à mistura mecânica promovida no processo.

Conforme Aires (2007), a existência de vazios internos encontrados no experimento

E1 pode estar relacionada à força de forjamento do ombro (penetração do ombro), além da geometria do mesmo e da velocidade de rotação.

Sendo assim, os parâmetros utilizados nestes experimentos podem servir de ponto de partida para um aperfeiçoamento do processo e uso em maior escala pela indústria, inclusive as presentes na região de Erechim, e também, pode ser usado para aplicações simples de componentes que não exijam esforços estruturais e vitais de conjuntos, mas sim, para acabamentos e substituição de sistemas de fixações tradicionais como rebites.

AUTORES

Neilor José Oliviecki - Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI - Campus de Erechim, atualmente é Engenheiro Mecânico na Dheytecnica Indústria de Máquinas Ltda. em Erechim, RS.

Arthur Bortolin Beskow - Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, atualmente é professor do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI – Campus de Erechim. E-mail: arthur@uricer.edu.br.

REFERÊNCIAS

AIRES, L. **Análise experimental do comportamento à fadiga em juntas soldadas por fricção linear de ligas de alumínio para a indústria aeronáutica.** Dissertação de Mestrado em Materiais, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

ANDRADE, E. A. C. **Desenvolvimento de ferramenta Bobbin-Tool para o processo de soldadura por fricção linear. Caracterização e análise da liga de alumínio AA6061-T4.** Dissertação de Mestrado em Engenharia, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.

CAPELARI, T. V. **Friction Stir Welding de placas de alumínio 5652.** Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre, 2006.

CERVEIRA, R. L. L. P. **Caracterização experimental do comportamento mecânico sob sollicitação multiaxial em junções de chapas AA 2024-T3 soldadas por fricção-mistura.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CRUZ, M. F. **Desenvolvimento dos parâmetros de Friction Stir Welding – FSW, aplicado na junção de topo de chapas finas de alumínio de alta resistência.** Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.

GIPIELA, M. L. **Influência dos parâmetros de processo na geração de defeitos na soldagem FSW da liga de alumínio 5052**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, UTFPR, Curitiba, 2007.

HILLER, D. J. **Estudo de parâmetros e percursos no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5052**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. Friction Stir Welding and Processing. **Materials Science and Engineering**, vol. 50, p. 1-78, 2005.

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

NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADESHIA, H. K. D. H. Recent advances in Friction Stir Welding – process, weldment structure and properties. **Progress in Materials Science**, Estados Unidos, Vol. 53, p. 980-1023, 2008.

POTOMATI, F. **Avaliação da qualidade final de juntas dissimilares de ligas de alumínio 2024-6056 e 7075-6056 Soldadas por FSW – Friction Stir Welding**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

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**. Trabalho de Final de Curso, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação, URI, Erechim, 2011.

SOUZA, G. S. **Influência da geometria da ferramenta na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo Friction Stir Welding**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

WORLD HONDA. **Honda develops new technology to weld together steel and aluminum and achieves world's first application to the frame of a mass-production vehicle**. Disponível em : <<http://world.honda.com>>. Acesso em: 25 set. 2012.

