



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013



INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA E PARAMETROS NA SOLDAGEM DE CHAPAS SOBREPOSTAS DE ALUMÍNIO PELO PROCESSO FRICTION STIR WELDING

Giliard Osinski (FAHOR) go000243@fahor.com.br

Jonathan Felipe Camargo (FAHOR) jc000506@fahor.com.br

Richard Thomas Lermen (FAHOR) richard@fahor.com.br

Resumo

O objetivo foi realizar soldagem FSW (Friction Stir Welding) de chapas sobrepostas de alumínio com diferentes geometrias de ferramentas que foram projetadas, fabricadas e testadas. Foi realizada a soldagem de chapas sobrepostas de alumínio com o processo FSW (Friction Stir Welding), no qual dois tipos de ferramentas foram utilizadas. Definidos os parâmetros, juntas foram obtidas e avaliadas por ensaio mecânico de dobra e análise macrográfica da seção transversal sendo que nos ensaios de dobra as juntas soldadas não apresentaram falhas e na análise macrográfica ficou evidenciada a mistura mecânica dos materiais.

Palavras-chave: Friction Stir Welding; Alumínio; Juntas sobrepostas.

1 Introdução

A busca por inovações nos processos de fabricação visando diminuir peso de conjuntos, reduzir custos, reduzir ou eliminar impactos ambientais e melhorar as propriedades mecânicas dos materiais faz nascer novas técnicas de manufatura.

Uma técnica no campo da soldagem que vem se destacando é o processo denominado FSW (Friction Stir Welding), que consiste em soldagem por fricção e mistura mecânica. Segundo Mishra e Ma apud Verástegui (2012) esta técnica foi desenvolvida em 1991 na Inglaterra, mais precisamente no The Welding Institute (TWI). A técnica une as peças no estado sólido, não ocorrendo a fusão dos materiais. Uma ferramenta não consumível de elevada resistência mecânica é utilizada para fazer a fricção das peças e promover calor, gerando assim a mistura mecânica dos materiais e realizando a soldagem. A Figura 1 representa a união de duas chapas pelo processo FSW.

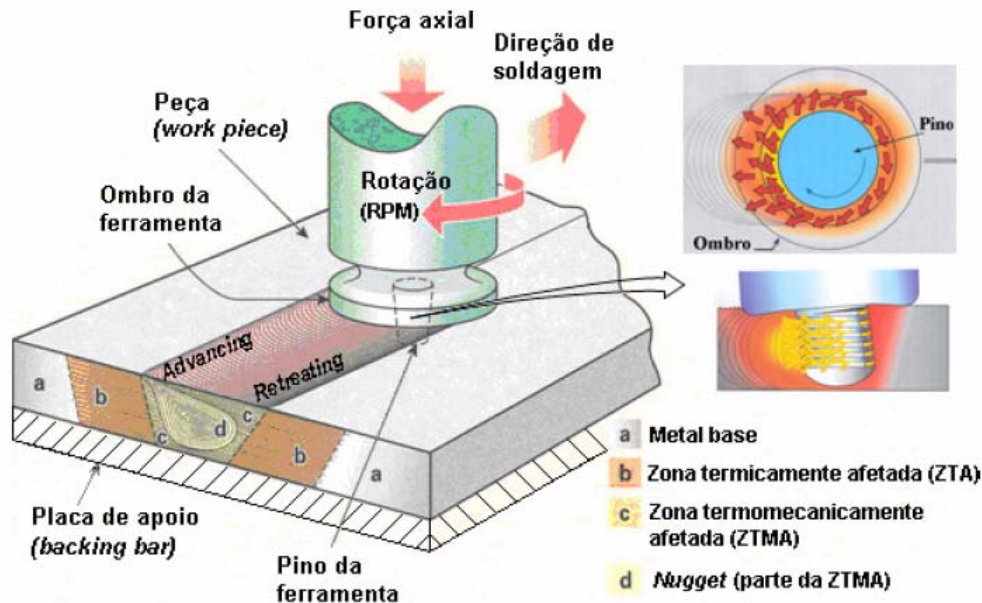


Figura 1: processo de soldagem por FSW – Friction Stir Welding. Fonte: CRUZ e NETO, 2009 P.6.

O processo de soldagem FSW vem se destacando devido a sua aplicabilidade no alumínio e suas ligas, que se destacam dos outros materiais devido a seu baixo peso específico e alta resistência mecânica de suas ligas. De acordo com ABAL (2012) a redução de peso nos veículos e demais meios de transporte proporciona inúmeras vantagens, como o menor consumo de combustível, sendo que 90% do alumínio presente nos veículos é recuperado e reciclado o que favorece o meio ambiente.

Entretanto, este trabalho visa realizar o processo FSW em uma fresadora universal adaptada para soldagem de chapas de alumínio sobrepostas a partir de ferramentas projetadas com diferentes geometrias. Este trabalho também contempla a realização de macrografia das juntas soldadas e ensaios de dobramento das mesmas.

2 Revisão da Literatura

TWI Ltd. (2013) destaca que o processo Friction Stir Welding (FSW) foi inventado por Wayne Thomas na TWI Ltd, em 1991 e supera muitos dos problemas associados a técnicas tradicionais de união de peças. FSW é um processo de estado sólido que produz soldas de alta qualidade em materiais de que apresentam dificuldade para realizar o processo de soldagem convencional como, por exemplo, o alumínio.

De acordo com Mishra e Ma apud Verástegui (2012) o processo FSW ameniza as distorções de chapas finas em relação a processos de soldagem convencionais pois a união ocorre sem atingir o ponto de fusão do material.



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013

SEEMI 2013
7º Seminário Estadual de Engenharia Mecânica e Industrial



Dixon (1994) define os processos de estados sólidos como aqueles nos quais é produzida a união das superfícies de atrito a temperatura menor que a de fusão do material sem inclusão de material ou metal de adição. As pressões podem ou não ser aplicadas. Estes processos envolvem difusão e deformação para produzir união de alta qualidade entre os dois materiais tanto materiais iguais ou diferentes.

Conforme Dunkerton (1994), a união de materiais no estado sólido pode ser alternativa para os processos de solda por fusão. Metais que são difíceis de soldar e combinações de diferentes materiais podem ser soldados utilizando o processo no estado sólido.

De acordo com o trabalho desenvolvido por Ramos (2009), a área soldada é considerada uma camada de ligação, ou seja, a área efetiva de solda que suporta os esforços mecânicos da junta na seção transversal da solda. Quanto maior for a camada de ligação de ligação, maior será a resistência mecânica da junta da soldada.

O processo FSW possui vantagens se comparado com processos de soldagem tradicionais. TWI Ltd, (2013) apresenta as seguintes vantagens: baixo empenamento, mesmo em longos cordões de solda e tensões residuais pouco significativas; excelentes propriedades mecânicas em testes de fadiga, tração e flexão e composição química similar ao material base; sem respingos e ausência de porosidade; elimina geração de gases nocivos ao meio ambiente; opera em várias posições; pode soldar alumínio e cobre com espessura até 75 mm em um passe; permite soldar materiais com ponto de fusão diferente; não necessita de cuidados especiais como limpeza e desoxidação das peças.

Existem algumas desvantagens no processo. Capelari (2006) cita a necessidade de um rígido sistema de fixação para realizar o processo, presença de um furo no final da solda e dificuldade na soldagem de materiais de elevado ponto de fusão.

2.1 Descrição do processo FSW

Com as peças a serem soldadas, firmemente fixas, uma ferramenta cilíndrica não consumível em rotação é inserido na junta até o contato do ombro da ferramenta com a superfície superior da junta gerando calor por meio de atrito. O pino da ferramenta é ligeiramente inferior a penetração desejada, penetrando na junta. O aquecimento eleva a temperatura local até que o material entre no estado plástico e a ferramenta misture os materiais, unindo-os. Estabelecidas as condições termomecânicas adequadas, inicia-se o movimento linear ao longo do eixo de soldagem. O escoamento dos materiais em torno do eixo de soldagem promove a mistura no estado sólido dos materiais, originando a solda após o esfriamento do local (VERASTEGUI, 2012; MISHRA e MA, 2005; RODRIGUES et al, 2013]. A Figura 2 representa o

princípio geral do processo FSW dividido em 4 partes: (1) posicionamento da ferramenta em rotação; (2) com a ferramenta em movimento a ferramenta é pressionada sobre a peça até o pino penetrar na chapa e o ombro da ferramenta encostar na peça; (3) o calor gerado pelo atrito faz o material atingir sua deformação plástica; (4) a ferramenta é deslocada pelo eixo de soldagem e atrás da ferramenta após o arrefecimento surge uma ligação contínua, a solda. Após a ferramenta é retirada do contato da peça e é finalizado a operação.

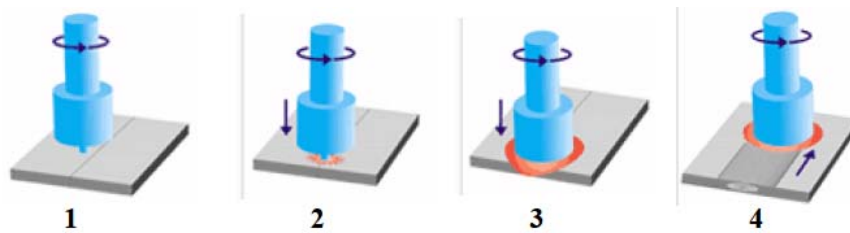


Figura 2: representação esquemática do processo FSW – Friction Stir Welding. Fonte: Rodriguez et al, 2013 P.4.

Leal e Loureiro (2004) definem que para a correta execução do processo é necessário uma fixação rígida das peças numa base de apoio, de modo a contrariar as elevadas forças de forjamento fornecidas pela ferramenta. As elevadas forças são aplicadas para o forjamento do material e deslocamento da base da ferramenta ao longo do material amaciado pelo calor, levando-o a um intenso desgaste da mesma.

2.2 Geometria da ferramenta

A relação entre a base/pino e sua relação de dimensões são os elementos chaves da geometria da ferramenta (KHALED, 2005; MISHRA e MAI, 2005). De acordo com Mishra e Ma (2005) a geometria da base assume um papel extremamente importante no aquecimento e confinamento do volume de material aquecido. Esta pode ser plana, côncava ou convexa, lisa ou estriada. As bases cônicas, cuja concavidade é relativa a um pequeno ângulo entre periferia da base e o pino, permitem, comparativamente às planas, um maior confinamento do material aquecido, atuando como volume de escape/reservatório do material ejetado pelo pino. As bases estriadas usualmente consistem numa superfície plana caracterizada por conter estrias concêntricas, ou em espiral, direcionadas desde a extremidade até ao centro. As referidas estrias encaminham o material desde a periferia da base até ao pino, eliminando assim a necessidade de um ângulo de ataque da ferramenta. Rebarba e reduções de espessura mais ténues ou inexistentes são outras características de soldagens obtidas com ferramentas de base estriada. As bases convexas lisas foram inicialmente encaradas pelo TWI como inadequadas para a produção de boas soldagens, pois, a sua forma encaminhava o material para longe do pino. Todavia, a presença de estrias nestas bases permite o direcionamento do material até ao pino. Assim, a vantagem da utilização de bases convexas estriadas resulta da extremidade da



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013

SEEMI 2013
7º Seminário Estadual de Engenharia Mecânica e Industrial



ferramenta não necessitar de se encontrar em contato com o material, podendo a interface ser definida em qualquer local da superfície convexa. Esta geometria aumenta então a flexibilidade na área de contato entre a base e o material a soldar (SCHMIDT et al., 2004; FULLER, 2007; KHALED, 2005).

O pino pode ser cilíndrico ou cônico, liso ou roscado de extremidade plana ou convexa. Pode ainda possuir, ou não, facetamentos. Os pinos cônicos estão sujeitos, comparativamente com os cilíndricos, a menores esforços transversais e o maior momento de carga a que estão expostos está presente na base do cone, onde este apresenta maior resistência. Permitem então a soldagem de maiores espessuras a velocidades superiores. A presença de rosca na superfície dos pinos é responsável por aumentar o fenômeno de transporte vertical do material. Quanto às extremidades do pino, as planas possuem em relação às convexas maiores velocidades superficiais. As velocidades superficiais juntamente com o atrito existente entre o pino e o material realizam a deformação. Assim, os pinos de base plana têm maior capacidade em afetar o material que sobre ele se encontra. Todavia, bases convexas estão associadas a menor desgaste da ferramenta e à obtenção de soldagem com melhor qualidade da raiz. O objetivo do facetamento dos pinos consiste em aumentar localmente a deformação do material, produzindo fluxo metálico turbulento, preferível em juntas sobrepostas (FULLER, 2007; KHALED, 2005). Colligan et al. em 2003, citados por Fuller (2007), concluíram que a redução das forças transversais e do momento a que a ferramenta se encontra sujeita é diretamente proporcional ao número de faces.

De acordo com Fioravanti (2008) a ferramenta possui duas funções primárias que são aquecimento localizado e escoamento do material. Miyazaki (2009) comenta que caso o projeto ou o material da ferramenta não seja correto a solda tende a ser pobre.

Para escolher o material da ferramenta deve-se levar em conta as suas propriedades, segundo Miyazaki (2009) o material deve possuir: resistência a temperatura de trabalho; resistência ao desgaste; ductibilidade à fratura na temperatura ambiente e na temperatura de soldagem; boa performance a fluência; usinabilidade; possuir microestrutura estável; resistência a oxidação; preço razoável; curto tempo de fabricação.

De acordo com a literatura as dimensões básicas para uma ferramenta FSW são: diâmetro de pino similar à espessura da chapa a ser soldada; comprimento do pino deve ser um pouco inferior a espessura da chapa a ser soldada; diâmetro do ombro da ferramenta deve corresponder a 3 vezes o diâmetro maior do pino. CAPELARI, (2006).

Miyazaki (2009) cita alguns materiais utilizados na fabricação das ferramentas, tais como: os aços ferramentas, WC-Co, PCBN, metais refratários, ligas de cobalto, ligas de níquel, ligas de tungstênio, aços inoxidáveis e cerâmicos. A ferramenta pode ser revestida para melhorar sua performance destacando o revestimento de nitreto de titânio que apresenta ganhos consideráveis.

2.3 Parâmetros do processo

Conforme Mishra e Ma (2005) além da geometria da ferramenta os parâmetros de soldagem são os fatores mais determinantes para o processo de FSW. Capelari (2006) cita alguns fatores que influenciam no escoamento do material no processo FSW e, conseqüentemente, na qualidade da solda, os quais: tipo de junta; velocidade de rotação da ferramenta; velocidade de soldagem (ou avanço da ferramenta); inclinação da ferramenta; profundidade de penetração do pino (força).

3 Métodos e Técnicas

Para soldagem foi utilizado uma fresadora universal marca Sanches Blanes modelo FHIIA ano 1998, conforme Figura 3 (a).

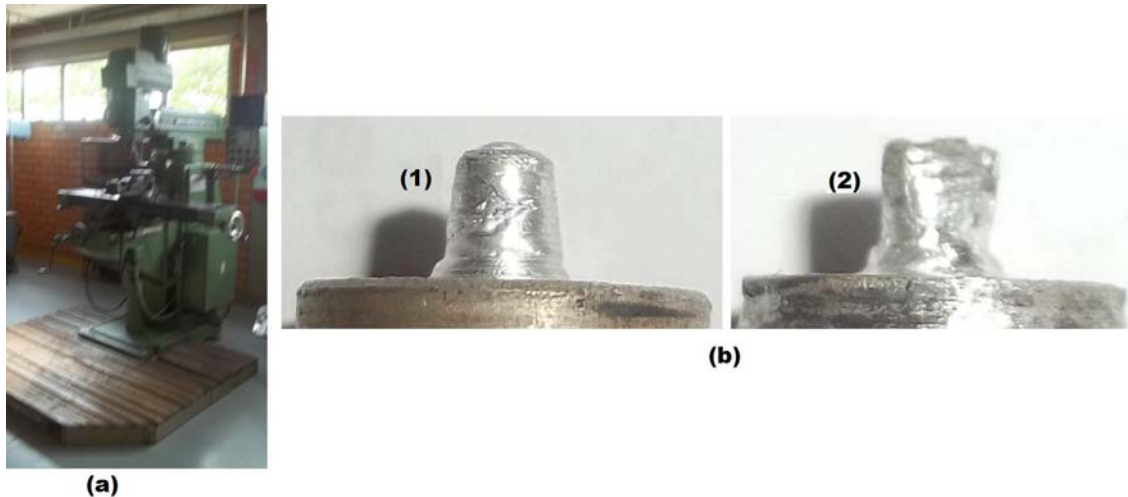


Figura 3:(a) Fresadora universal utilizada para o processo FSW; (b) ferramentas projetadas e fabricadas para a soldagem FSW.

Para a soldagem duas ferramentas com pinos distintos foram projetadas e fabricadas. As geometrias escolhidas foram conica (1) e facetada (2) conforme figura 5.

As ferramentas foram fabricadas com aço 1045, as quais foram tratadas termicamente através de têmpera.

As ferramentas têm características dimensionais baseadas na revisão de literatura, a qual cita que o diametro maior do pino deve ser igual a espessura da chapa soldada, o comprimento do pino deve ser ligeiramente inferior a espessura da chapa soldada e o diametro do ombro deve corresponder a tres vezes o diametro maior do pino. A Tabela 1 apresenta detalhes dimensionais das ferramentas de soldagem.

Tabela 1. Detalhes dimensionais das ferramentas.

Ferramenta	Comprimento do pino (mm)	Ø do pino (mm)	Geometria do ombro	Ø do ombro (mm)	Observações
A – cônica	3,75	4	Liso - reto	12	Inclinação 10°
B - facetada	3,75	4	Liso - reto	12	120° entre faces

As soldas foram realizadas em corpos de prova com dimensões de 50mm x 150mm x 2 mm conforme Tabela 2.

Tabela 2. Parametros utilizados na soldagem FSW.

Corpo de prova	Ferramenta	Velocidade de soldagem (mm/min)	Velocidade de rotação (RPM)	Penetração da ferramenta (mm)
01	Facetada	100	1000	3,6
02	Facetada	100	1600	3,9
03	Facetada	100	1600	3,8
04	Facetada	100	1600	3,7
05	Facetada	75	1000	3,7
06	Conica	100	1600	3,7
07	Conica	75	1000	3,7
08	Facetada	50	1000	3,75
09	Facetada	70	1600	3,75
10	Facetada	30	1600	3,75
11	Conica	30	1600	3,75
12	Conica	50	1600	3,75
13	Conica	70	1600	3,75

A soldas que apresentaram melhor acabamento foram as soldas realizadas com velocidade de 1600 RPM e penetração da ferramenta de 3,75mm sendo os ultimos cinco corpos de prova levados aos ensaios de dobramento e analise macrografica.

Foram preparados corpos de prova para o ensaio de dobramento de acordo com a NBR 6153/88. As chapas foram submetidas ao dobramento em 90°.

As macrografias dos corpos de prova foram realizados através de embutimento e ataque químico com Marble por 20 segundos.

4 Resultados e Discussões

Apos soldar as chapas sobrepostas, os corpos de prova analisados

apresentaram o seguinte acabamento conforme Figura 4.

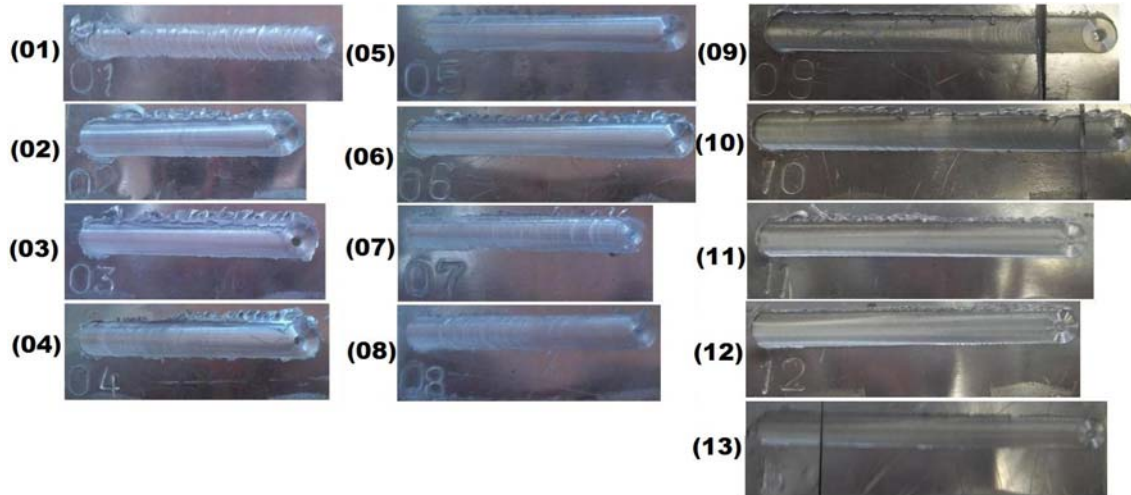


Figura 4: vista superior dos corpos de prova soldados.

Os corpos de prova com uma rotação menor e penetração insuficiente apresentaram qualidade inferior na solda pela menor energia térmica presente no processo. Os corpos de prova com penetração do pino excessiva apresentaram maior quantidade de rebarba.

4.1 Ensaio de dobramento

O quadro 1 apresenta a imagem dos corpos de prova após os ensaios de dobramento.

Corpo de prova	Dobramento da raiz	Dobramento da face	Corpo de prova	Dobramento da raiz	Dobramento da face
09			12		
10			13		
11					

Quadro 1: resultados dos ensaios de dobramento.

Pode-se observar que não houve falhas ou defeitos na região soldada.

4.2 Análise macrográfica

O Figura 5 apresenta a seção transversal da solda obtidas no meio do cordão.

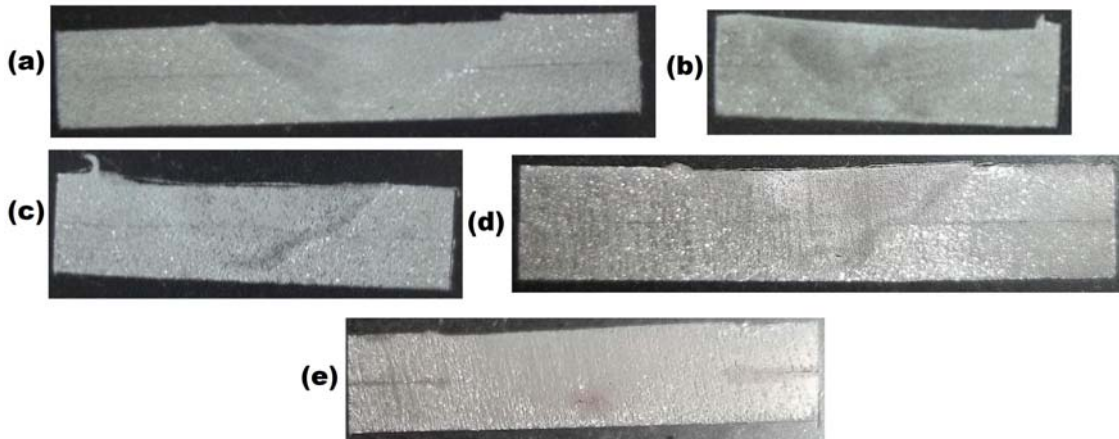


Figura 5: análise macrografica dos corpos de prova, (a) corpo e prova 09; (b) corpo de prova 10; (c) corpo de prova 11; (d) corpo de prova 12; (e) corpo de prova 13.

Pode se observar que todos os corpos de prova apresentaram resultados satisfatórios, pois não apresentaram falhas e aparentemente ocorreu uma mistura mecânica completa. O corpo de prova 13 (e) apresentou uma pequena fissura na extremidade inferior da solda .

5 Conclusões

De acordo com os experimentos, ensaio de dobra e análise metalgrafica pode-se concluir que:

- Foi realizada a soldagem de chapas sobrepostas de alumínio com ferramenta fabricada com aço 1045 temperada.
- Fatores como penetração da ferramenta e sistema de fixação são fatores fundamentais para obtenção de sucesso na soldagem FSW.
- Foi possível realizar soldagem com a ferramenta com pino cônico, assim como, a ferramenta com pino facetado.

Referências

ABAL, Associação Brasileira do alumínio. **A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio**. 2012.

CAPELARI, Tiago V.. **Avaliação da geometria da ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052**. 2006. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013

SEEMI 2013
7º Seminário Estadual de Engenharia Mecânica e Industrial



CRUZ, M. F.; NETO, C. de M. **Friction Stir Welding – Review: Potencial de Aplicação na Indústria**. Trabalho apresentado no XI Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, São Jose dos Campos - SP, 2009.

DIXON, R. **Brazing and soldering**. In: **ASM Handbook. Brazing and Soldering**. United States: ASM Internacional, 1994. V, cap. Procedure Development and Practice Considerations for Solid-State Welding

DUNKERTON, S. B. **Procedure development and practice considerations for diffusion welding**. In: **ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering**. United States: ASW Internacional, 1994. V, cap. Procedure Development and Practice Considerations for Solid-State Welding.

FIORAVANTI, Artur S. **Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD AA 2024-T3 e AA7075**. 2008. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FULLER, C. B. **Friction Stir Tool Materials and Designs**. In: Mishra R. S.. **Friction Stir Welding and Processing**. 1º edição. ASM Internacional, 2007, 7 – 36

KHALED, T. (2005), “**An Outsider looks at friction stir welding**”. Federal Aviation Administration.

LEAL, R. LOUREIRO, A. (2004), “ **Defects Formation in friction stir welding of aluminium alloys**”, *Materials Science Forum*, 455 – 456, 239 – 302.

MISHRA, R. S; MA, Z. Y. **Friction Stir Welding and Processing**. A review jornal. *Materials Science e Engineering*, Volume 50, issues 1 – 2, p. 1 – 78 , 31 August 2005.

MIYAZAKI, Marcos H. **Desenvolvimento de novo conceito de junção de reforçadores aeronáuticos por FSW**. 2009. Tese (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica e Mecânica, São Jose dos Campos, 2009.

NBR 6153/88, **Produtos metálicos – Ensaio de dobramento semi-guiado**. Rio de Janeiro, 1988.

RAMOS, F. D. **The influence of the tool profile in friction stir spot welding of the aluminium alloy AA6181-T4 e MG-AZ31**. 2008

RODRIGUES D.; LOUREIRO A.; LEAL R.. **Soldadura por fricção linear**. Disponível em: http://www2.dem.uc.pt/dulce.rodrigues/ref_web/rn_1.pdf. Acesso em 19 ago. 2013.

SCHMIDT, H. et al. (2004) “ **An analytical modelo for the heat generation in friction stir welding**”. *Modelling Simul. Mate Sci. Eng.*, 12, 143 – 157.

VERÁSTEGUI, Roger N. **Estudo de uniões dissimilares alumínio – solda por “ Solda Ponto por Fricção e mistura mecânica com preenchimento do furo” (Friction Spot Welding – FSpW)**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

TWI ltd – The Welding Institute. **Friction Stir Welding at TWI**. Disponível em: < <http://www.twi.co.uk/technologies/welding-coating-and-material-processing/friction-stir-welding/>>. Acesso em : 19 ago. 2013.