

SOLDAGEM POR FSW (FRICTION STIR WELDING) DA LIGA DE ALUMÍNIO 6063T6 UTILIZANDO FERRAMENTA CIRCULAR E CÔNICA

COBEF2017-1004

Weber de Melo Mesquita, weber.mmesquita@gmail.com¹

Kleber Ribeiro da Silva, kleber.ribeiros@yahoo.com.br¹

Carlos Alberto Carvalho Castro, carloscastro@varginha.cefetmg.br²

José Veríssimo de Toledo, verissimo@unifei.edu.br³

Paulo Henrique Paulista, paulohpaulista@gmail.com³

Daniel Assis Amancio, Daniel_assis_amancio@hotmail.com³

¹Centro Universitário de Itajubá – FEPI. Avenida Dr. Antonio Braga Filho, 687. Varginha. Itajubá, Minas Gerais.

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Av. dos Imigrantes, 1000. Vargem. Varginha, Minas Gerais.

³Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Avenida BPS, 1303. Bairro Pinheirinho. Itajubá, Minas Gerais.

Resumo: O processo de soldagem por fricção (FSW – Friction Stir Welding), soldagem em estado sólido, é uma nova técnica utilizada para fusão de materiais sem haver junção dos mesmos. As ligas de alumínio são submetidas a uma variedade de tratamentos térmicos, objetivando a obtenção de melhores propriedades mecânicas. Entretanto, estes tratamentos térmicos podem provocar susceptibilidade a diferentes tipos de ataques localizados (pite, corrosão intergranular e esfoliação). A qualidade da soldagem está ligada aos diversos parâmetros do processo (geometria da ferramenta e sua inclinação em processo, a velocidade de avanço da soldagem e a velocidade de rotação do ferramental). As propriedades mecânicas do material após o processo FSW são semelhantes ao seu estado inicial, que favorece a aplicação deste processo em diversos segmentos, principalmente aeronáutico. O trabalho visa realizar análises por macroscopia para avaliar a zona termicamente afetada (ZTA) e a microestrutura do material, verificando se houve variação sobre suas características iniciais ou falhas na área soldada, uma vez que a mesma sofrerá superaquecimento no ponto central da junção das peças e nas extremidades. O estudo consiste em unir duas placas compostas por uma liga de alumínio 6063T6 através de uma ferramenta rotativa que, ao entrar em atrito com as placas, se aqueceram e realizaram o processo de soldagem por fricção. O presente trabalho visa apresentar o resultado sobre a caracterização de uma solda FSW com uma ferramenta cônica e circular da liga de alumínio 6063T6 em diversas aplicações nas áreas de Engenharia de Fabricação.

Palavras-chave: friction Stir Welding, soldagem FSW, solda por fricção, alumínio 6063T6.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem por fricção, termo em inglês Friction Stir Welding (FSW) é uma nova técnica utilizada para fusão de materiais sem que haja junção dos mesmos. Na atualidade, a soldagem por FSW demonstra ser uma solução promissora para vencer os eventuais problemas associados a soldagem integrada em ligas de alumínio, pois sua aplicação obtém possibilidades diversas. As ligas de alumínio são submetidas a uma variedade de tratamentos térmicos com o objetivo de obter melhores propriedades mecânicas. No entanto, estes tratamentos térmicos podem provocar a susceptibilidade a diferentes tipos de ataques localizados (pite, corrosão intergranular e esfoliação).

A necessidade de novas técnicas em soldagens feitas nas indústrias aeronáutica e automobilística fazem com que sejam realizadas diversas pesquisas buscando novos métodos e materiais a serem utilizados para junção de peças, tendo como meta gerar o menor impacto possível nas propriedades mecânicas do material, reduzir o impacto ambiental durante o processo o que proporciona o desenvolvimento de equipamentos e estruturas de alto desempenho.

Este processo de soldagem por fricção destaca-se como uma técnica capaz de estabelecer melhorias nos parâmetros da soldagem de peças onde seja necessária uma padronização das características do material. A soldagem FSW possibilita que a peça soldada apresente propriedades mecânicas similares ao seu estado inicial. Segundo MISHRA e MA APUD VERASTEGUI (2012), essa técnica foi desenvolvida em 1991 na Inglaterra, mais precisamente no “The Welding Institute” (TWI).

Apesar da técnica receber destaque por sua aplicação, acreditando ser atualmente um importante progresso em operações que objetivam a união de metais, onde tal assunto vem sendo estudado em várias unidades e centros de pesquisas, assim como universidades no exterior, as instituições de ensino brasileiras gozam de pouco interesse no propósito de investigar mais profundamente esta técnica de soldagem. O que pode limitar este interesse é o alto custo para se investir em máquinas específicas nas operações. Certamente isso contribui para dar preferência em operações e processos mais baratos em junção de metais.

Para a construção industrial, aeronáutica e automobilística tais resultados são de extrema importância. As misturas de materiais nos componentes podem interferir na composição da área soldada, como eletrodos e gases. Uma das vantagens desse processo é 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.

ABAL (2012) cita que a elevação do uso de ligas de alumínio na indústria aeronáutica e automobilística permite que os processos de soldagem apareçam como um ponto crítico do processo industrial, devido as propriedades do material acabam-se por desgastar ao gerar a fusão do metal e, por isso é necessário a realização de estudos sobre esta técnica.

Abaixo, uma ilustração dos parâmetros da soldagem por fricção feita por Cruz e Neto, 2009, em seu estudo sobre FSW, apresentada na Fig. (1).

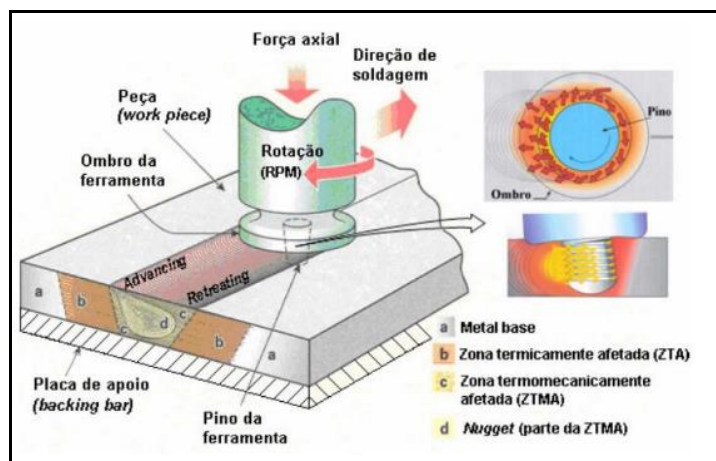


Figura 1. Parâmetros da soldagem por fricção (FSW). Fonte: CRUZ e NETO, 2009 p.6.

1.1. Histórico do processo de soldagem

Soldagem é o processo de junção de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”. (American Welding Society - AWS, 2011). Essa definição é mais adequada para descrever os processos de soldagem por fusão que utilizam o arco elétrico (Eletrodo Revestido, TIG, MIG/MAG), que são os mais utilizados atualmente. A Figura (2) apresenta a relação dos processos de soldagem ao longo do tempo.

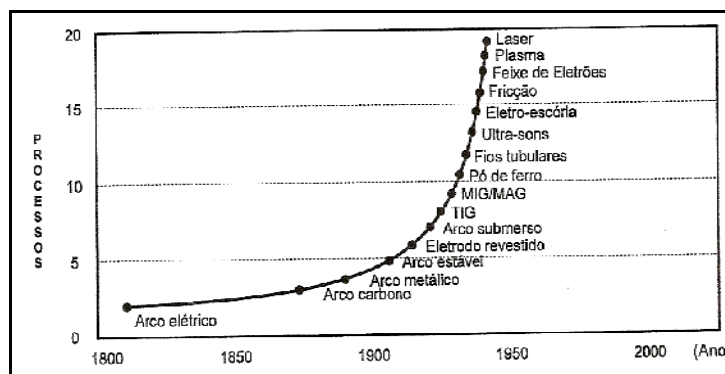


Figura 2. Evolução dos processos de soldagem. Fonte: SANTOS - ISQ, 1993.

O processo de soldagem é um dos processos de fabricação mais utilizados e importantes para as atividades industriais atualmente para junção de metais, tais como as ligas de alumínio. Os avanços tiveram seu pico nos últimos 60 anos, onde a indústria metalúrgica se viu carente de novas técnicas para uso em suas construções, assim como o aparecimento de novas ligas que necessitavam de um método para junção das mesmas.

1.2. Características do processo FSW na indústria

Os processos de soldagem apresentam variações micro estruturais, em sua maioria e, tais variações podem causar contaminação do metal base reduzindo suas propriedades iniciais do material da peça a ser soldada, sobretudo provocado devido as variações térmicas provenientes do processo.

A dificuldade de fazer soldas de alta resistência à fadiga e à fratura nas ligas de alumínio aeroespaciais e automobilística, tais como a série altamente ligada de alumínio 2XXX e de 7XXX, tem inibido por muito tempo o uso da soldagem para estruturas aeroespaciais e automobilísticas. (MISHRA, 2005)

A necessidade de novas técnicas em soldagens feitas nas indústrias aeronáutica e automobilística fazem com que sejam realizadas diversas pesquisas buscando novos métodos e materiais a serem utilizados para junção de peças, tendo como meta gerar o menor impacto possível nas propriedades mecânicas do material, reduzir o impacto ambiental durante o processo, o que proporciona o desenvolvimento de equipamentos e estruturas de alto desempenho. A partir deste cenário, foi descoberto em 1991, pelo The Welding Institute (TWI) um método de soldagem onde as junções das peças estão no estado sólido, sendo utilizado inicialmente em ligas de alumínio. A Fig. (3) descreverá as quatro etapas iniciais do processo de soldagem por fricção (FSW).

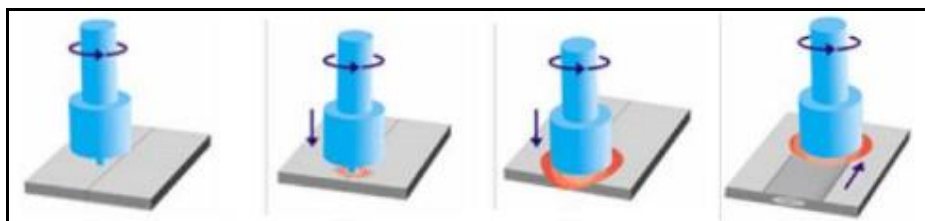


Figura 3. Etapas iniciais da soldagem FSW. Fonte: Rodriguez et al, 2013 p.4.

A soldagem por fricção utiliza fundamentos do contato entre superfícies abordadas pela tribologia, onde a superfície de um sólido representa uma forma de matéria mais complexa do que um simples plano. As irregularidades e características de uma superfície real influenciam as reações químicas que ocorrem quando do contato com meio fluidos lubrificantes ou não, enquanto o parâmetro rugosidade controla o mecanismo de contato entre sólidos e o desgaste (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2000).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Confeção do ferramental

Os ferramentais foram confeccionados por uma empresa automobilística situada na cidade Itajubá, Sul de Minas Gerais, onde os mesmos passaram por tratamento térmico de têmpera e nitretação, buscando o aumento da dureza do material para que não ocorra fragmentação nem desgaste dos mesmos durante o processo FSW. A máquina utilizada para confecção dos ferramentais foi um torno CNC ROMI CENTUR 30 D Siemens 802, ano 2008, apresentado na Fig. (4).



Figura 4. Torno utilizado para confecção dos ferramentais

Utilizou-se dois tipos de metais, o AISI H13 (Aço ferramenta) e o SAE 52100 (Aço para construção mecânica). A especificação do AISI H13, segundo a empresa Grupo Gonçalves Dias S/A (GGD Metals) muito utilizado para trabalho a quente com uma excelente combinação entre dureza e resistência à fratura, com a manutenção destas propriedades em temperaturas até 600°C, resistência a choques térmicos e às trincas por fadiga térmica, este aço possui ainda níveis de usinabilidade, polibilidade e resposta à texturização importante para o segmento de confecção de moldes para injeção de plásticos. Já o aço SAE 52100 é utilizado em componentes em geral nas indústrias de fabricação de rolamentos, pois é um aço que apresenta elevado teor de carbono, ligado ao cromo, utilizado para beneficiamento quando se pretende atingir elevada dureza e resistência em operações que geram impactos. As Figuras (5) e (6) ilustram os desenhos dos ferramentais que foram fabricados com os respectivos materiais. Na Figura (7) temos os quatro ferramentais confeccionados em torno CNC. Logo após, temos na Tabela (1) as especificações dos materiais utilizados para a fabricação dos ferramentais, onde podemos visualizar a diferença na composição dos mesmos.

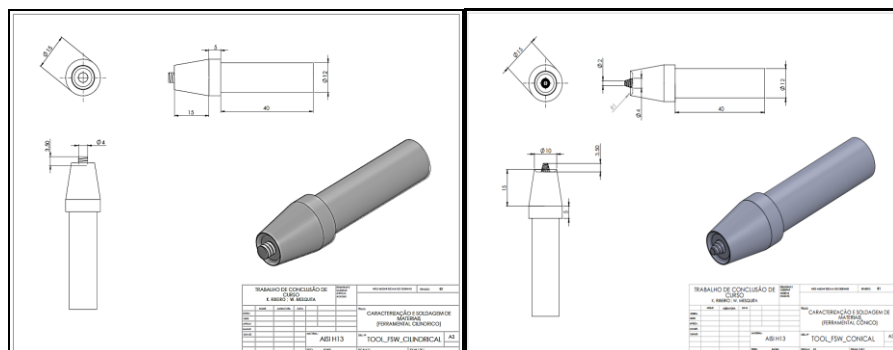


Figura 5. Desenho do ferramental com ponta cilíndrica (à esquerda) e cônica (à direita) fabricado em AISI H13

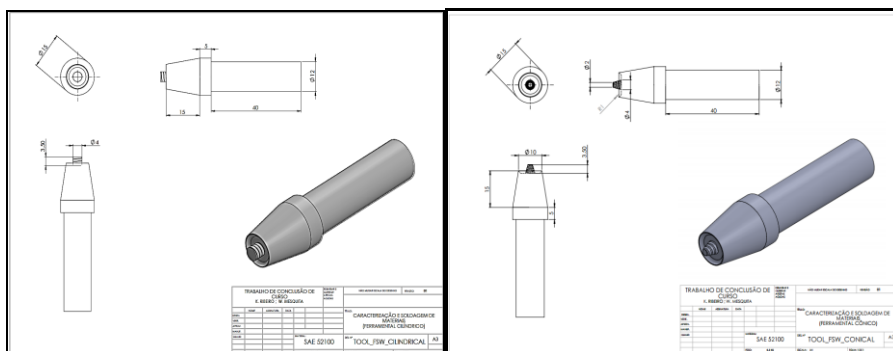


Figura 6. Desenho do ferramental com ponta cilíndrica (à esquerda) e cônica (à direita) fabricado em SAE 52100



Figura 7. Ferramentais em AISI H13 (à esquerda) e SAE 52100 (à direita) após usinados em CNC

Tabela 1. Apresentação da composição dos materiais utilizado para confecção do ferramental FSW.

Composição AISI H13		
Elemento	Simbologia	Percentual (%)
Carbono	C	0,40
Manganês	Mn	0,4
Silício	Si	1,0
Cromo	Cr	5,0
Molibdênio	Mo	1,30
Vanádio	V	1,0
Composição SAE 52100		
Elemento	Simbologia	Percentual (%)
Carbono	C	0,98 ~ 1,10
Silício	Si	0,15 ~ 0,35
Manganês	Mn	0,25 ~ 0,45
Cromo	Cr	1,30 ~ 1,60

2.2. Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares foram importantes para apresentar efeitos no processo. Foi utilizado uma fresadora Ferrari RDMM 7045 W com 500 mm de capacidade de mesa.

Esta etapa auxiliou na identificação de acertos importantes para um bom resultado final do experimento. A configuração do processo foi definida conforme a Tab. (2), visando um primeiro resultado da soldagem por fricção.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados no ensaio experimental preliminar

Geometria da ponta do ferramental	Material ferramental	Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Direção de rotação	Penetração do ombro do ferramental (mm)
Cônico	AISI H13	1000	20	Discordante	0,5
Cilíndrico	AISI H13	1000	20	Discordante	0,5

Para atingir o objetivo de soldas sem imperfeições ou quaisquer defeitos, foi realizado ensaios variando os parâmetros de velocidade de rotação do ferramental, de profundidade de penetração do ombro do ferramental e de velocidade de avanço do processo (mesa). De início, buscou-se compreender as características da soldagem para melhor entendimento do processo, uma vez que este tipo de operação atualmente está sendo pouco estudado. Os corpos-de-prova, com dimensões de 31,75 x 3,3 x 220mm feitos em alumínio 6063T6 foram preparados na fresadora para o início da operação. Fig. (8).



Figura 8. Preparação dos corpos-de-prova para os ensaios

Após operação de soldagem FSW, verificou-se que a solda fora realizada satisfatoriamente. Um ponto levantado foi o superaquecimento dos componentes na operação (calço, porta-pinça e mesa). No momento do processo de soldagem ocorreu vibração do conjunto porta-pinça/ferramental, o que ocasionou em uma soldagem não uniforme.

Para eliminar este problema, os corpos-de-prova receberam uma placa de alumínio entre os mesmos e a mesa de fixação, que se mostrou eficaz após sua implementação, fazendo com que o processo de soldagem ocorresse de forma uniforme. Reduziu-se também a penetração do ombro do ferramental, minimizando os esforços em excesso da operação. Como isso, a vibração dos componentes fora reduzida e o material se comportou melhor ao gerar calor com atrito dos ferramentais com a superfície dos corpos-de-prova.

Entretanto, nos ensaios pode-se verificar o efeito da soldagem na formação de rebarbas, falhas no cordão da soldagem e possível quebra do ferramental nesta etapa do experimental. Devido à baixa velocidade de avanço da mesa, o aparecimento de rebarba, também chamado de *flash*, foi evidenciado no sentido do recuo, conforme mostra a Fig. (9) abaixo:

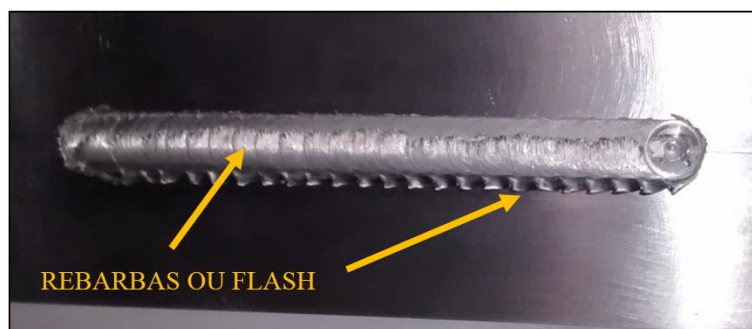


Figura 9. Cordão apresentando acúmulo de flash na superfície soldada.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. Ensaio experimental

Diferentes resultados foram obtidos, um para cada tipo de geometria do pino do ferramental e seus respectivos materiais de composição. Os resultados foram apresentados na Tab. (3), comparando-os.

Tabela 3. Resultados dos ensaios realizados com ferramental cônico e cilíndrico

Geometria da ponta do ferramental	Material ferramental	Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Direção de rotação	Penetração do ombro do ferramental (mm)
Cônico	AISI H13	2250	50	Discordante	0,3
Cilíndrico	AISI H13	2250	50	Discordante	0,2
Cônico	SAE 52100	2250	50	Discordante	0,3
Cilíndrico	SAE 52100	2250	50	Discordante	0,2

A velocidade de rotação do ferramental, a velocidade de avanço e o sentido da rotação foram fixados conforme Tab. (4) acima, pois se mostraram adequados de acordo com o desenvolvimento da soldagem. Verificou-se que a taxa de penetração da ferramenta é classificada como um parâmetro relevante para se iniciar a soldagem FSW. Quando a taxa de penetração é maior do que o esperado, a força excede a capacidade da fresadora e pode danificar o ferramental. Nos testes, operamos com uma velocidade de 10 mm/min. À medida que o ferramental gira no sentido horário de rotação, a tendência é que se forme menos rebarba no sentido de recuo da junção.

Os resultados dos ensaios serão apresentados na Fig. (10), Fig. (11), Fig. (12) e Fig. (13).

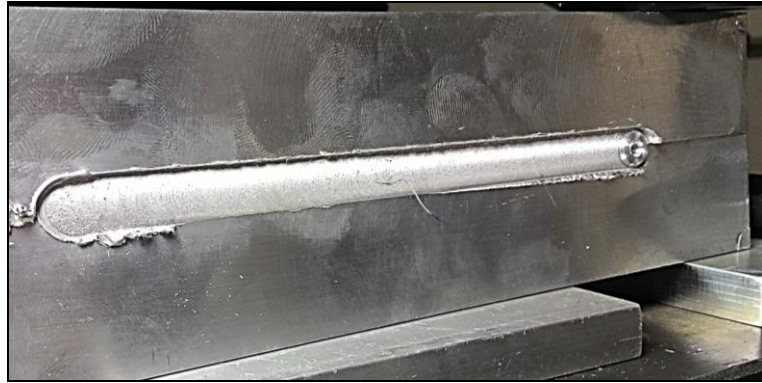


Figura 10. Junção dos corpos-de-prova completos (Ferramental cônico AISI H13)



Figura 11. Junção dos corpos-de-prova completos (Ferramental Cilíndrico AISI H13)

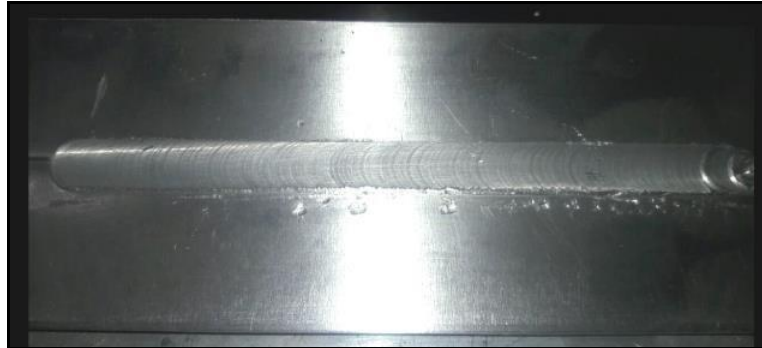


Figura 12. Junção dos corpos-de-prova completos (Ferramental Cônico SAE 52100)



Figura 13. Junção dos corpos-de-prova completos (Ferramental Cilíndrico SAE 52100)

A raiz proveniente do processo apresenta bons resultados estéticos ao ser comparado com outros processos de soldagem convencionais. Na Figura (14) pode-se evidenciar a qualidade da raiz após os corpos-de-prova passarem pelo processo FSW, utilizando ferramental cônico em SAE 52100



Figura 14. Raiz obtida após soldagem dos corpos-de-prova utilizando ferramental cônico em aço SAE 52100

De acordo com ATALLAH e SALEM (2005), o excesso de material de expulsão em direção ao suporte causa escassez de material e, conseqüentemente, leva à rejeição da articulação. Este defeito ocorre devido a variação recorrente da velocidade de rotação da ferramenta. Neste ponto, o atrito realizado entre ferramenta e chapas gera mais esforço para realizar a soldagem, o que acarreta a ausência de material.

O processo de soldagem realizado com ferramental cônico em AISI H13 apresentou um efeito negativo. A composição do material a ser soldado é uma variante, pois a contaminação ou impureza de sua estrutura causa má formação dos grãos na fase de solidificação, acarretando o aparecimento de vazios na área soldada. A área destacada com seta azul nas figuras (15), (16) e (17) ocorrem quando a cavidade no lado de avanço está relacionada com o fluxo de material na forma de vórtice na região soldada.

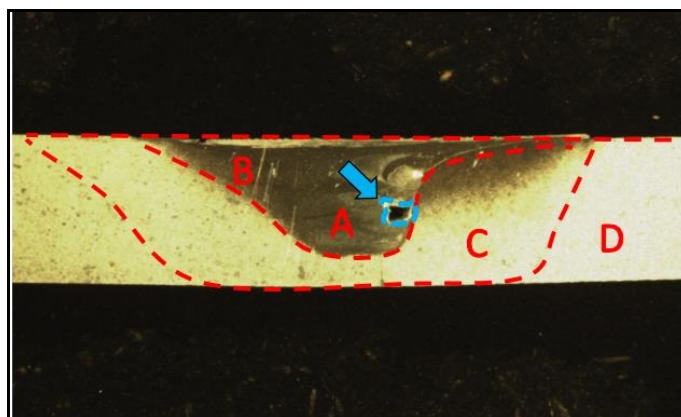


Figura 15. Macrografia da solda realizada com ferramental cônico em AISI H13

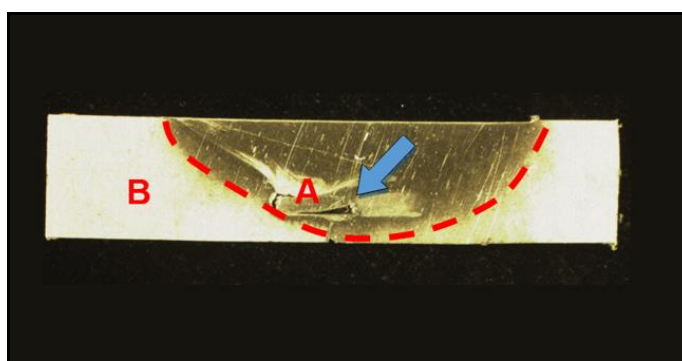


Figura 16. Zona afetada utilizando ferramental cilíndrico em AISI H13

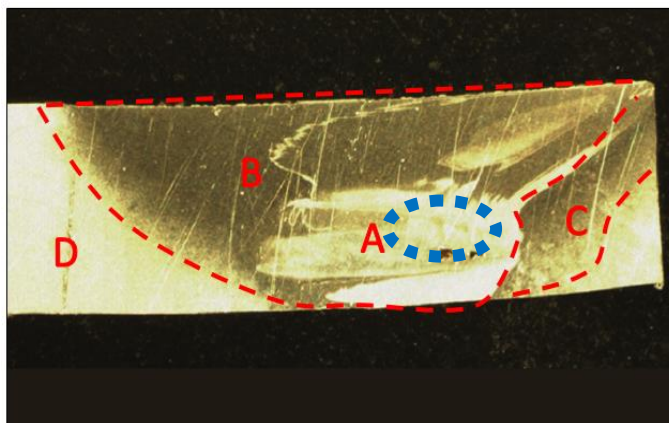


Figura 17. Área afetada pelo processo sem preenchimento completo no *nugget* utilizando ferramental fabricado em SAE 52100

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, o processo de soldagem por fricção apresenta grande potencial em seu uso nas indústrias automobilística e aeronáutica.

A soma da metodologia e a confecção adequada do ferramental proporcionou o sucesso na soldagem de ligas de alumínio 6063T6 que, por serem materiais com alta ductilidade estão susceptíveis ao aparecimento de trincas quando soldadas em processos envolvendo a fusão. A avaliação dos parâmetros de soldagem foi obtida através da junção de duas chapas de alumínio 6063T6, sendo selecionado como tais a geometria da ponta do ferramental, o tipo de material do ferramental utilizado para cada tipo de ponta, a velocidade de rotação, a velocidade do avanço e do corte, direção de rotação e profundidade da penetração do ombro do ferramental. Deste estudo pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Foi apresentado que este tipo de soldagem realizada em chapas com espessuras menores possibilita um melhor controle do processo resultando em junções mais efetivas e livres de problemas na raiz;
- A aparência superficial da junção das placas varia de acordo com a irradiação do material base do corpo-de-prova no ferramental, devido ao aquecimento da operação gerado pelo ombro da mesma e a superfície do corpo-de-prova;
- A composição do material a ser soldado é uma variante, pois a contaminação ou impureza de sua estrutura causa má formação dos grãos na fase de solidificação acarretando no aparecimento de vazios na área soldada;
- A correta definição dos parâmetros do processo de soldagem FSW são de extrema importância para se obter uma boa e uniforme junção das chapas a serem soldadas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem primeiramente à FAPEMIG pelos recursos financiados para a execução do projeto e sem a qual seria improvável a realização do mesmo. Agradecem ao Centro Universitário de Itajubá – FEPI, à Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, à empresa Mahle Metal Leve S/A e ao Grupo Gonçalves Dias (GGD Metals) pelo fornecimento dos materiais, maquinário, espaço e tempo para que toda esta pesquisa fosse realizada e concluída com sucesso.

Um agradecimento especial ao senhor Francisco Lázaro, responsável pelo laboratório de usinagem no Centro Universitário de Itajubá – FEPI que nos deu total suporte para a realização dos ensaios e compartilhou conosco toda sua experiência em processos de fabricação, assim como ao senhor Luiz Fernando Rodrigues Alves, responsável pelo laboratório de soldagem que contribuiu com sua experiência sobre diversos parâmetros de operações em soldagem e nos proporcionou norteamento sobre a validação e obtenção de resultados assertivos sobre o processo FSW.

6. REFERÊNCIAS

- ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio. 2012.
- ABNT NBR 7823. Alumínio e suas ligas - Chapas - Propriedades Mecânicas. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.
- AMÂNCIO FILHO, S. T. Soldagem por fricção de junta dissimilar em ligas de alumínio de AA 2024 e AA 6056: microestrutura e propriedades. Dissertação de mestrado. São Carlos: UFSCAR, 185 p. 2002.

- ANDRADE T. C., SILVA C. C., MIRANDA H. C., MOTTA M. F., FARIAS J. P., BERGMAN L. A., DOS SANTOS, J. F. Microestrutura de uma Solda Dissimilar entre o Aço Inoxidável Ferrítico AISI 410S e o Aço Inoxidável Austenítico AISI 304L Soldado pelo Processo FSW. UFC, Ceará, dez. 2015.
- ASM Metals Handbook. Metallography and microstructures. United States of America: ASM International. v. 9. 2873 p. 1995.
- ASM Metals Handbook. Welding, Brazing and Soldering. United States of America: ASM International. v. 6. 2873 p. 1995.
- ASTM E8M-95a; Standard Test Methods For Tension Of Metallic Materials. Annual Book of ASTM Standards; v.03.01, 2001.
- AWS. American Welding Society. Welding Handbook Volume 1 - Welding Science & Technology (AWS WHB-1.9). 9th Edition. Nov. 2011.
- AWS. American Welding Society. Welding Through the Ages. Disponível em: https://app.aws.org/rwma/docs/2013spr_Greitmann-2013-02-22-Summary.pdf. Acesso em: out. 2016.
- BERTOLDI, E. “Análise de ensaios de tração em corpo de prova de aço SAE 1020”. Trabalho apresentado na IV Semana Internacional de Engenharia e Economia FAHOR. Nov. 2014.
- CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento, 2ª edição. McGraw-Hill, São Paulo, 1986.
- CIMM, Centro de Informações Metal Mecânica. Teste de Microdureza. São Paulo, SP. Disponível em: < http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6560-teste-da-microdureza#.WA4pHuUrIdU >. Acesso em out. 2016.
- 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.
- DUNKERTON, S. B. Procedure Development And Practice Considerations For Diffusion Welding. In: ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering. United States: ASW Internacional, 1994.
- GETSOLDA – Processos de Soldagem; Universidade Federal do Para – UFPA; Disponível em: < http://www.ufpa.br/getsolda/docs_graduacao/Seguranca_outros.pdf >; Acesso em: Nov. 2015.
- GGD METALS. GRUPO GONÇALVES DIAS. Folheto de caracterização do aço AISI H13. 2016. Disponível em: < <http://www.ggdmetals.com.br/cat/H13.pdf> >. Acesso em: maio 2016.
- GORNI, A. A. Introdução à Soldagem por Fricção e seus Processos”. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/publ.html#manufac>>. Acesso em: setembro 2016.
- LAMOGLIA, M. S. Estudo da ocorrência de camada escura na superfície de anéis de pistão do terceiro canaleta tratados termoquimicamente pelo processo de nitretação a gás. UNIFEI. Dissertação de Pós-Graduação. Itajubá, MG, dez. 2015.
- MISHRA, C. R., Ma, Z. Y. “Friction Stir Welding and Processing”, Materials Science and Engineering, vol 50, pag 1-78. 2005
- OLIVEIRA R. O. M.; ROCHA, O. F. L. Tratamento Térmico De Precipitação. T6 - PRECIPITATION HEAT TREATMENT APPLIED IN LIGHT ALLOY WHEEL OF MOTORCYCLE. HOLOS, Ano 30, Vol. 5, set. 2014
- SANTOS, J. F. O. Processos de Soldadura – Edições Técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade - ISQ. Lisboa, 1993.
- SENAI, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, CST, Companhia Siderúrgica de Tubarão. “Tratamentos Térmicos – Mecânica”. p. 5. 1997
- STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. Engineering Tribology. Austrália: Butterwoth Heinemann, 769 p. 2000. Sidney, AUS;
- TEODORO, T. M. Microscopia óptica. Fev. 2012 Disponível em: < <http://www.biomedicinaemacao.com.br/2012/02/microscopia-optica.html> >. Acesso em out. 2016.
- VATAVUK, J.; ALVAREZ, S.D.M.; GARCIA, M.B. Efeito da nitretação na resistência à corrosão dos aços AISI H13, 201 e 440B; EBRATS, São Paulo, out. 1997.
- W.M. THOMAS, E.D. NICHOLAS, J.C. NEEDHAM, M.G. MURCH, P. TEMPLESMITH, C.J. DAWES, G.B. Patent Application No.9125978.8. Dez. 1991.
- YILBA, B. S.; SAHIN, A. Z.; COBAN, A.; ALEEM, B.J. A. Investigation into the properties of friction-welded aluminum bars. Journal of Materials Processing Technology 54, p. 76-81, 1995.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo apresentado neste trabalho.