

Código Aceitação Resumo: 21038370

CARACTERIZAÇÃO DE JUNTA SOLDADA POR FSW DE ALUMÍNIO AA6063 T6

Freddy Poetscher¹, sebrandi@usp.br
Flávio Gil Alves Paiva¹, sebrandi@usp.br
Pedro Vilaça², sebrandi@usp.br
Sérgio Duarte Brandi¹, sebrandi@usp.br

(1) Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil.

(2) Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal.

Resumo: O processo de soldagem por atrito linear (FSW) é uma técnica recente para a soldagem no estado sólido de materiais, em particular para o alumínio e suas ligas. O processo foi inventado na Inglaterra em 1991. Neste processo, as partes a serem soldadas são fixadas e uma ferramenta especial realiza a soldagem de forma contínua. A ferramenta possui uma velocidade de rotação e, durante a sua translação, o material é misturado no estado sólido e, conseqüentemente, soldando as duas partes. O objetivo deste trabalho é caracterizar tanto a estrutura como as propriedades mecânicas da junta soldada por FSW de alumínio AA6063 T6, com espessura de 3,0 mm. A soldagem foi realizada com uma rotação da ferramenta de 720 rpm e com uma velocidade de translação de 5,4 mm/s. A ferramenta empregada é do tipo 'three flats', com diâmetro do ombro de 15 mm, diâmetro do pino de 3 mm e com ângulo de 90° com relação à horizontal. A junta soldada será caracterizada por macrografia e através de medidas de microdureza, ensaios de EBSD e medições de tamanho de grão. Os resultados mostraram que existem diferentes regiões na junta soldada. As propriedades mecânicas da junta soldada foram inferiores às do metal base.

Palavras-chave: soldagem por FSW; soldagem no estado sólido; soldagem por atrito linear.

1. INTRODUÇÃO

Em 1991 foi concebido um novo processo de soldagem de grande impacto mundial, denominado friction stir welding (FSW). Este processo tem recebido atenção mundial e já é aplicado em linhas industriais na Europa e na América do Norte na soldagem de alumínio. A aplicação na indústria aeronáutica é considerada como um diferencial técnico competitivo.

As vantagens resultam do fato que o FSW, como todos os outros processos de soldagem por atrito, é realizado na fase sólida, abaixo do ponto de fusão do material a ser unido. Conseqüentemente, os benefícios incluem baixa distorção, reduzido nível de defeitos no cordão e a possibilidade de junção de materiais dissimilares, que seriam difíceis de soldar, através da soldagem por fusão.

As ligas de alumínio, muito utilizadas na indústria aeronáutica, sofrem uma perda das propriedades mecânicas na região da solda devido ao ciclo térmico que a região é submetida. Nesta região ocorrem simultaneamente diversas transformações de fase, como a recristalização dinâmica, crescimento de grão e crescimento e solubilização de precipitados, quando endurecível por precipitação.

A compreensão e o detalhamento destes fenômenos são importantes para prever e otimizar a microestrutura e as propriedades mecânicas finais da junta soldada.

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar a soldagem por FSW de uma chapa de alumínio AA6063 T6.

2. PROCESSO DE SOLDAGEM POR FSW DE LIGAS DE ALUMÍNIO

A soldagem por atrito ocorre no estado sólido e a fonte de energia é de natureza mecânica. No processo desenvolvido nas décadas de 1950 e 1960, o aquecimento para a ligação entre as partes é obtido através da rotação de uma das partes, mantida sob pressão contra a outra. Como não ocorre a fusão do metal, defeitos associados à fusão e à solidificação não estão presentes. Esta soldagem por atrito, apesar de ser capaz de soldar diversos materiais e materiais dissimilares, está limitada aos tipos de junta de topo, planas ou angulares, que devem ser perpendiculares e concêntricas com o eixo de rotação^[1].

Na década de 1990 desenvolveu-se o processo FSW, onde uma ferramenta cilíndrica rotatória é introduzida na junta de topo entre duas peças a uma determinada profundidade. A ferramenta é então movida ao longo desta junta. O processo é caracterizado pelo calor gerado através do atrito entre a superfície da ferramenta em rotação e a superfície do material da junta e, pela deformação plástica oriunda da ferramenta em rotação. A soldagem também é realizada no estado sólido com baixa distorção e com propriedades mecânicas superiores à soldagem por arco^[2,3].

Atualmente, para a soldagem de ligas de alumínio, o processo por arco é o mais utilizado, devido a sua flexibilidade e baixo custo além da soldabilidade destas ligas. Nas indústrias aeronáutica e automobilística são freqüentes também as soldagens de alumínio por plasma, feixe de elétrons, laser, e por difusão^[3-6]. A escolha de processos menos convencionais está associada a soldabilidade das ligas empregadas, em particular das ligas das séries 2000 e 7000 empregadas em muitas das aplicações nestas indústrias.

Devido a soldabilidade das ligas de alumínio, procura-se desenvolver ligas com soldabilidade melhorada ou processos com fontes de calor de baixa potência, eficientes e concentradas, melhorando assim, o formato do cordão, minimizando a zona afetada pelo calor e reduzindo tanto as distorções como a presença de trinca de solidificação nestas ligas^[3]. O processo FSW tem todas estas características, ou seja, uma fonte calor baixa e concentrada sob a região de contato entre a ferramenta e a superfície do material a ser unido, além de soldar no estado sólido.

O alumínio tem algumas características físicas e químicas que devem ser consideradas em todos os processos de soldagem. Estas características tornam os processos de soldagem, por fusão de alumínio, complexos e com maior probabilidade de falhas. O alumínio forma uma camada de óxidos superficial, que tem um ponto de fusão próximo à 2050°C, muito acima do ponto de fusão da liga de alumínio de base. O processo de soldagem deve ser capaz de quebrar esta camada e removê-la continuamente, para evitar defeitos de falta de fusão. Esta camada de óxidos atua como um isolante, dificultando, na soldagem com fonte de calor de energia elétrica, a abertura do arco e a fusão do alumínio. Nos processos com fusão esta camada de característica porosa pode absorver substâncias que contém hidrogênio, introduzindo-o na poça de fusão. Este fato, somado à grande solubilidade do hidrogênio no estado líquido do alumínio, pode promover a porosidade do cordão de solda. Assim, são necessárias a preparação e limpeza da superfície das juntas, para a soldagem por fusão. Devido à alta condutividade térmica do alumínio, a soldagem é muito sensível a variações na fonte de calor durante o processo, podendo levar a variações no volume de material fundido e na penetração do cordão de solda. O alumínio tem uma taxa de contração de, aproximadamente, 6% durante a solidificação, necessitando de um balanceamento da seqüência de soldagem para reduzir a distorção. Além disto, a alta taxa de contração torna possível a formação de trincas na solidificação da poça de fusão^[4,6].

As características do FSW não o tornam suscetível à camada de óxidos e contaminantes. A baixa energia obtida a uma taxa constante torna o processo homogêneo e com baixas distorções.

O ciclo térmico da zona afetada pelo calor, para ligas de alumínio endurecíveis por precipitação, causa a degradação de suas propriedades mecânicas devido a modificações microestruturais^[6]. Obtém-se na soldagem uma região, adjacente ao cordão, solubilizada e com crescimento de grão e, após esta, uma região super-envelhecida, conforme a curva de resfriamento e a reação de formação dos precipitados. O calor utilizado para a soldagem é responsável pela degradação da microestrutura^[4]. A zona afetada pelo calor no *friction stir welding* é de dimensão próxima ao diâmetro da ferramenta, sendo assim relevante para a análise.

As vantagens do processo FSW estão relacionadas com a baixa energia utilizada para soldagem e com a ausência de fusão. A taxa de defeitos é nove vezes inferior à soldagem por arco, além de apresentar a facilidade de preparação das juntas, ausência da necessidade de gases de proteção e metais de adição^[7]. A inspeção da solda pode também ser reduzida. Todas estas vantagens reduzem, consideravelmente, o custo de soldagem^[7]. Este processo, pode soldar ligas de alumínio da série 2000 (Al-Cu) e 7000 (Al-Zn), que eram anteriormente consideradas não soldáveis em estruturas aeronáuticas. A vida, em fadiga, desta solda é comparável à junção de placas de alumínio com rebites.^[3] O *friction stir welding*, quando comparado com outros processos, é considerado robusto e aplicável em produções seriadas^[8]. Outras vantagens são: ausência de porosidade e respingos, soldagem em todas as posições, alta eficiência de energia e tolera imperfeições na preparação da soldagem.^[9]

Devido às vantagens do FSW, este está sendo desenvolvido nas indústrias aeronáutica, espacial e automobilística, sendo considerado, em alguns casos, um substituto para a soldagem por arco, plasma ou feixe de elétrons.^[3,5,7,8,10] Aplicações em aço e, em outros materiais também estão sendo desenvolvidas.^[11,12,13]

As principais desvantagens do processo são: a necessidade de fixação rígida, o furo remanescente após a soldagem, velocidade moderadamente inferior a alguns processos por fusão e a necessidade de placas isolantes.^[9,14]

O equipamento consiste de uma estrutura rígida, com um cabeçote para uma ferramenta rotativa que se desloca sobre a junta a ser soldada. As peças a serem soldadas são fixadas sob pressão.^[7] A figura 1 ilustra o equipamento e sua operação.

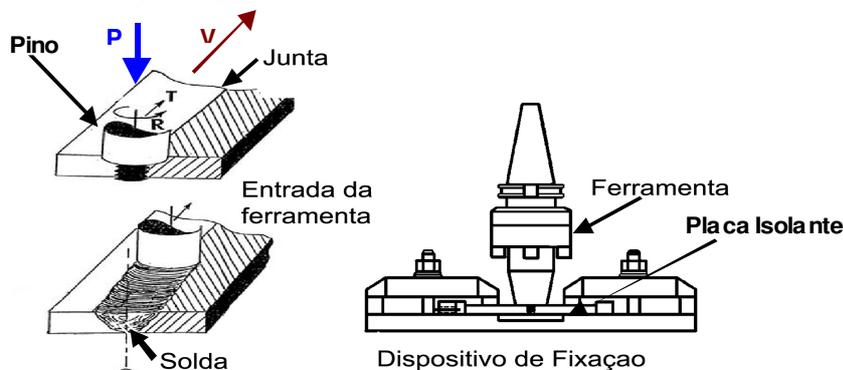


Figura 1. Esquema do processo FSW. (Adaptado das referências 15 e 16).

A operação do equipamento é automatizada, não necessitando de um soldador certificado e sim de um operador qualificado.^[13] As variáveis de operação citadas na literatura são: velocidade de avanço da ferramenta (V), rotação da ferramenta (R), geometria da ferramenta (Rosca, Pino ou Pino com Anéis), pressão da ferramenta (P), temperatura inicial do metal de base.

3. CARACTERÍSTICAS DA SOLDA POR FRICTION STIR WELDING

A seção do cordão resultante no *friction stir welding* pode ser caracterizada pelo formato denominado de "*onion rings*", normalmente, em ligas de Al de alta resistência e baixa capacidade de extrusão, e pelo formato de taça. O formato da seção também está relacionado com os parâmetros de processo.^[18]

O *friction stir welding*, produz uma região de dureza inferior a do metal de base. Conforme a curva de resfriamento e a taxa de deformação obtêm-se propriedades mecânicas diferentes do metal de base. O perfil de dureza da solda destas ligas apresenta uma queda no centro do cordão.^[17,18]

A zona termo-mecanicamente afetada pelo calor está ilustrada na Fig. (2).

Os grãos do material após a soldagem, conforme a Fig. (2), são distribuídos em: região D da solda, que é constituída de uma estrutura fina de 2 a 20 μ m, com baixa densidade de discordâncias, recristalizada dinamicamente, devido ao

calor gerado na fricção e devido a alta deformação plástica do fluxo de material; regiões C e B, que são caracterizadas pela recuperação dos grãos, e também como uma região afetada termicamente. A classificação dos grãos nem sempre é consistente com o perfil de dureza, pois esta característica mecânica depende das propriedades de precipitados formados, conforme a liga soldada.^[17,18]

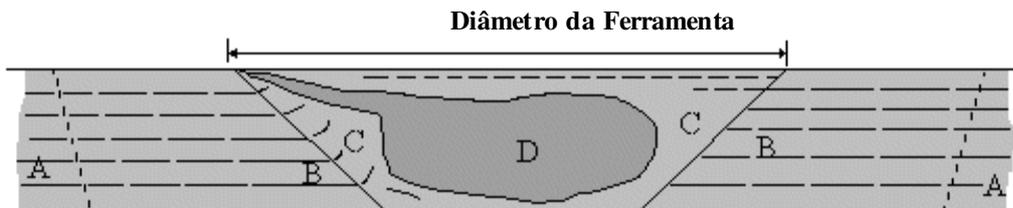


Figura 2. Zona termo-mecanicamente afetada pelo calor: A- Material não afetado; B- Termicamente afetado; C- Termo-mecanicamente afetado - plasticamente deformado, com áreas recristalizadas; D- Dinamicamente recristalizado.[9]

A recristalização dinâmica ocorre devido às tensões existentes durante a soldagem. O modo de deformação na região da ferramenta é similar à extrusão.^[19]

Os estudos sobre o transporte de material em volta do pino da ferramenta evoluiu bastante nos últimos anos apresentando atualmente métodos de cálculo válidos.^[18,19,20]

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Duas chapas de alumínio AA6063 de 3,0mm de espessura foram soldadas pelo processo FSW utilizando os seguintes parâmetros: força de recalque próxima de 5000 N; rotação da ferramenta de 720 rpm; velocidade de translação de 5,4 mm/s; ferramenta do tipo ‘three flats’ de diâmetro de ombro de 15 mm; diâmetro do pino de 5 mm e com ângulo de 90° com relação à horizontal da chapa.

Desta chapa foram retirados corpos de prova para análise, seguindo a orientação abaixo. A figura 3 ilustra a disposição da chapa soldada a orientação de extrusão da chapa e parte do cordão soldado.

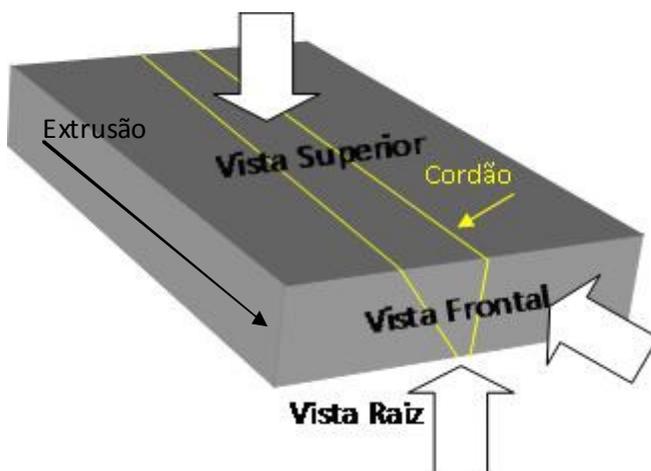


Figura 3. Orientações utilizadas na análise do cordão soldado.

5. RESULTADOS

Os resultados do perfil de microdureza estão indicados na Tab. (1). Foram realizadas medições de dureza na região frontal, superior e na raiz do cordão. O levantamento do perfil foi realizado com duas medidas a cada 1 mm na direção transversal do cordão.

Tabela 1. Perfil de Microdurezas (Hv 0,050).

(mm)	Frontal		Superior		Raiz	
	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2
1	50,9	51,9				
2	59,8	60,3	58,3	54,6		
3	47,1	49,5	48,3	45,9	51,4	47,7
4	52,4	53,3	49,3	49,6	45	48,5
5	44,9	50,9	50,7	50,7	54,2	53,3
6	48,2	53,9	49,9	60,8	50,6	50
7	48,6	53,4	52,3	51,8	51	49,5
8	51,8	45	50	49,6	49,3	48,7
9	51,4	50,9	45,3	44,2	49,9	48,4
10	45,7	51,2	49,6	47,3	49,4	48,2
11	46,9	46,8	46	49,4	51,9	48,8
12	49,6	51	49,3	49,3	48	45,8
13	50,9	47,4	49,2	50,8	47	42,9
14	43,7	48	37,6	44	51	50,8
15	48	47,5	50,2	47,7	57,3	56,5
16	51,5	59,2	50,9	48,5	62,3	61,4
17	64,2	66,4	59,8	59,1		
18	64	65				

Os perfis de microdureza estão ilustrados na Fig. (4) à (6). Foram feitas medições ao longo da sua seção transversal, nas orientações indicadas.

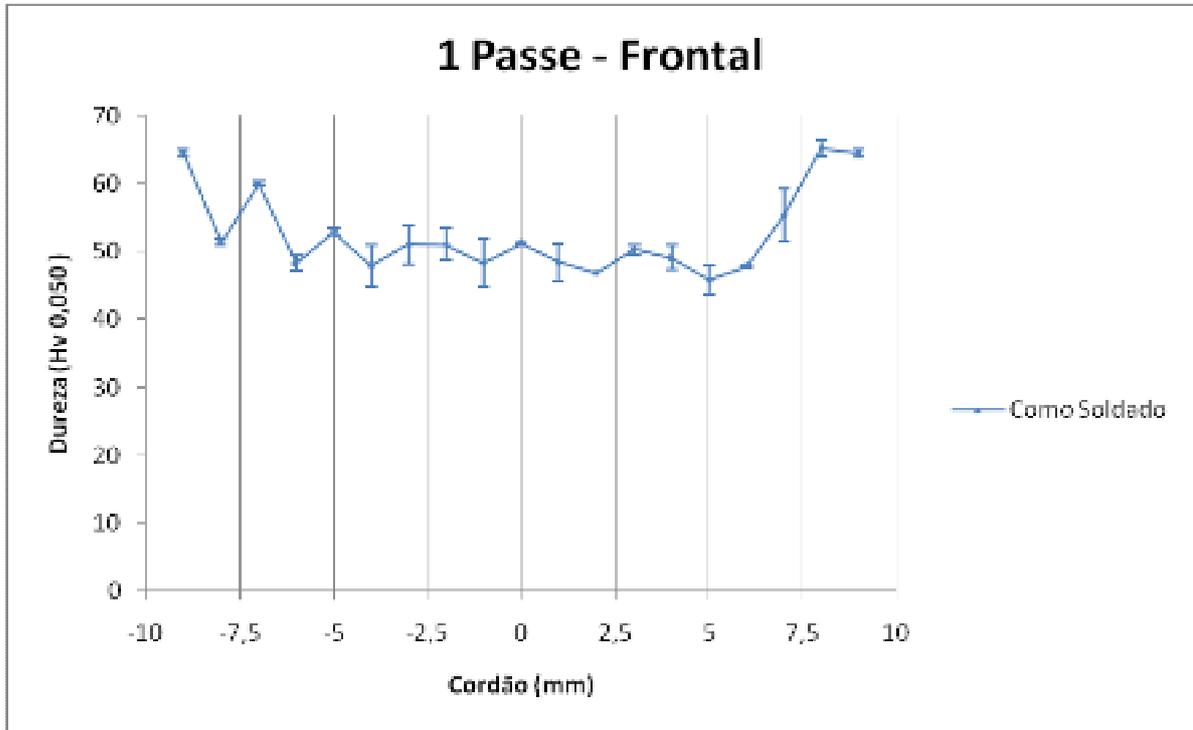


Figura 4. Perfil de microdureza Vickers. Região frontal.

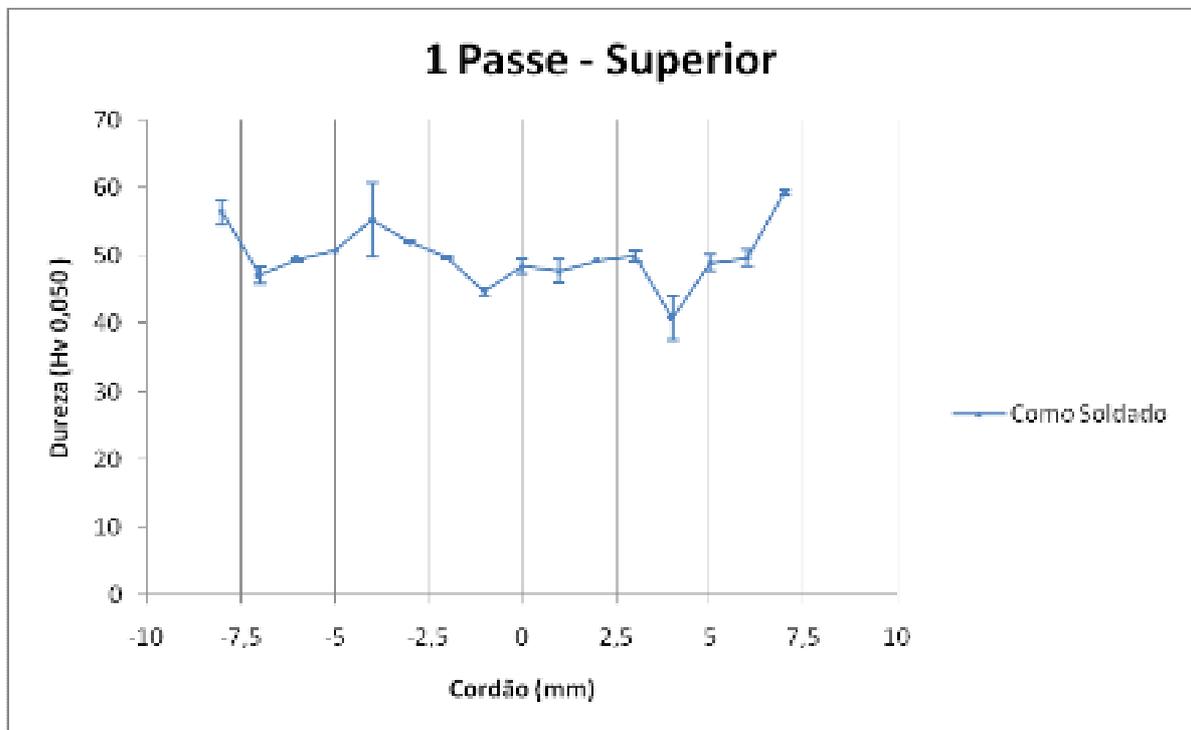


Figura 5. Perfil de microdureza Vickers. Região Superior.

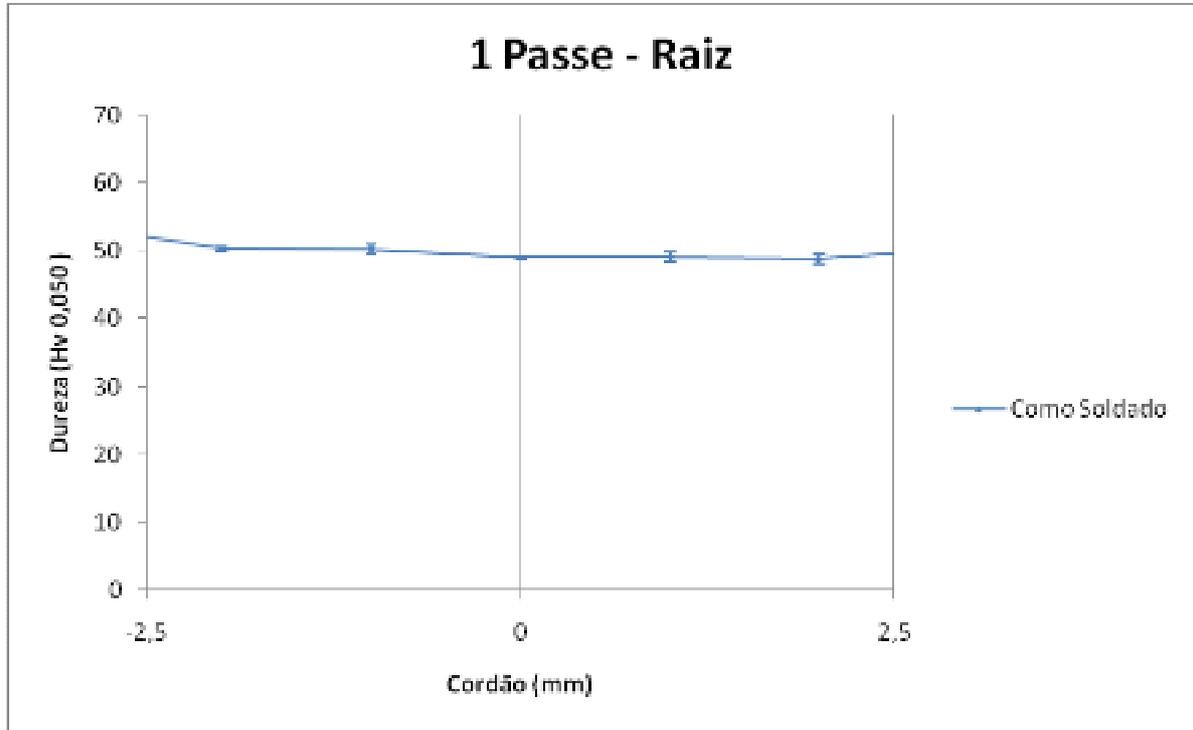


Figura 6. Perfil de microdureza Vickers. Região Superior.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos na medição dos tamanhos de grão. Com a microscopia óptica, utilizando-se do ataque de Barker, foram realizadas as medidas de tamanho de grão de diferentes regiões do cordão através do método dos interceptos. Foi utilizado um círculo teste e um aumento que permitisse uma contagem mínima de 10 e máxima de 35 interceptos. O procedimento encontra-se descrito na ASTM E 112. Foram medidos 5 campos para obter um tamanho de grão médio TG . A equação (1) apresenta o cálculo para o tamanho de grão médio.

$$\overline{TG} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(N_L)_i}}{n} \quad (1)$$

Tabela 2: Medidas de Tamanho de Grão.

Metal de base	34,0±5,7	
Condição de soldagem		
Região	1 Passe	
Avanço	Grãos Alongados	16,9±3,9
	Grãos Equiaxiais	7,3±0,5
Centro	7,6±0,4	
Retrocesso	Grãos Alongados	23,9±5,3
	Grãos Equiaxiais	7,3±1,5

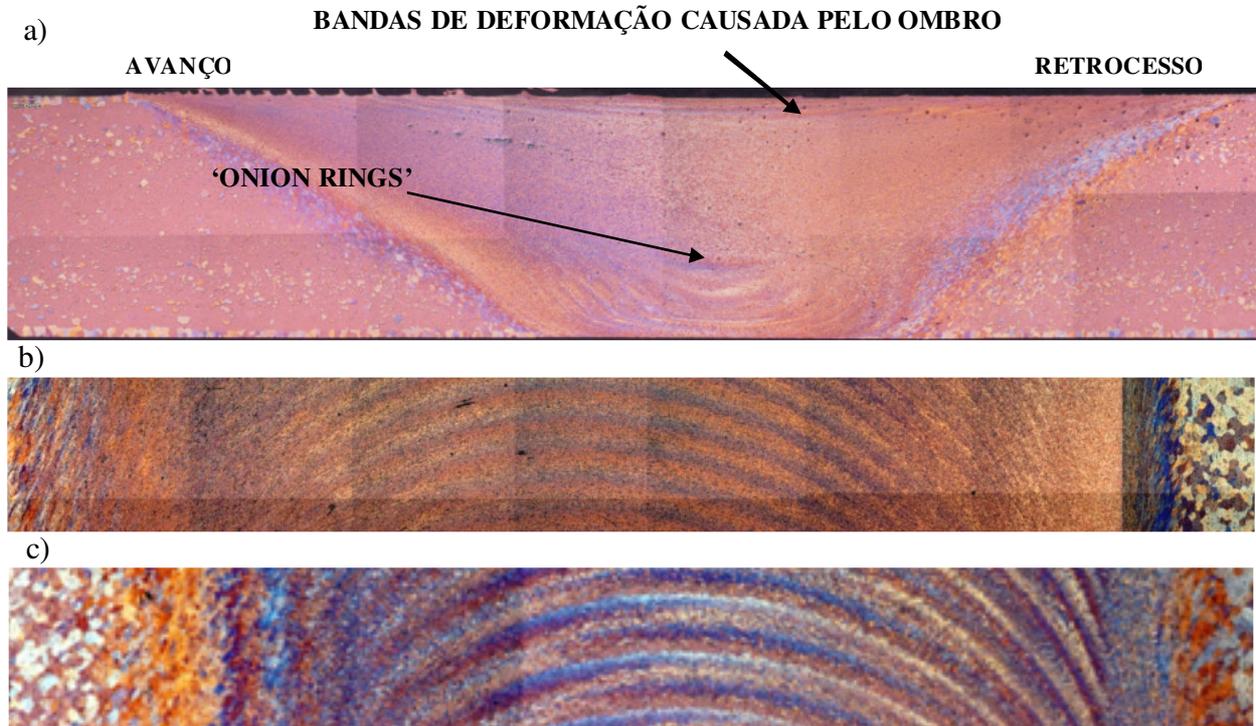


Figura 7. Micrografias do cordão soldado. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. (c) Vista da Raiz. Aumento 32x Ataque Barquer 1,8%.

Com a técnica de EBSD e a posterior análise por software específico foram analisadas as diferenças de orientação dos grãos no lado de avanço e retrocesso do cordão. As figuras 8 e 9 ilustram os resultados obtidos.

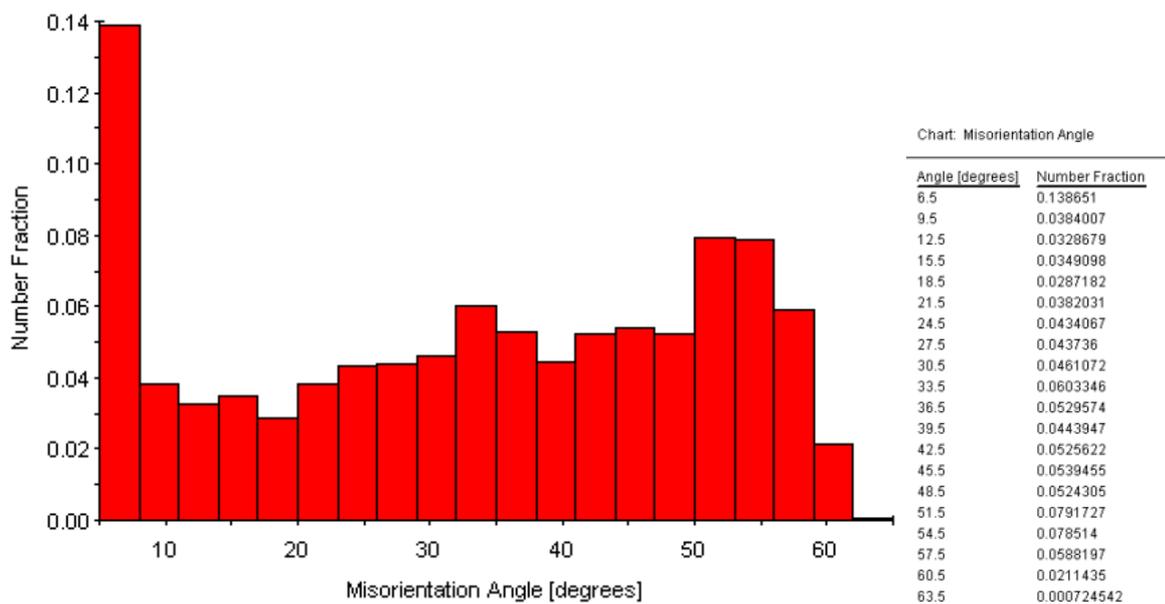


Figura 8. Diferença de orientação dos grãos para a condição de um passe. Região de avanço da ferramenta.

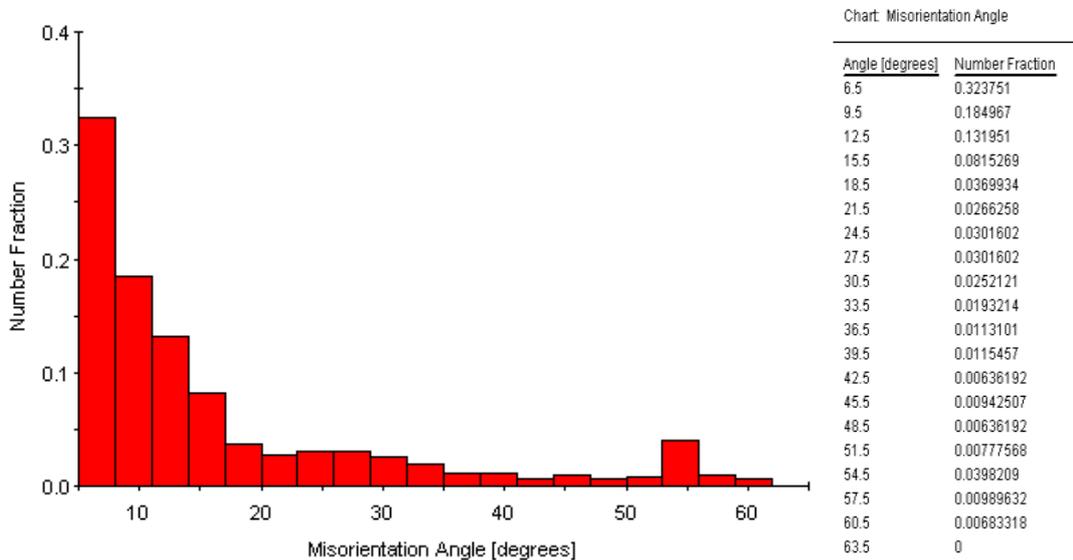


Figura 9. Diferença de orientação dos grãos para a condição de um passe. Região de retrocesso da ferramenta.

6. DISCUSSÃO

O perfil de dureza apresentou valores abaixo do metal de base. O provável motivo é esta região estar solubilizada, devido ao aquecimento produzido pelo ombro da ferramenta. A região central com menor dureza sofreu recristalização dinâmica devido às altas taxas de deformação associada às altas temperaturas do processo, apesar da baixa energia de falha de empilhamento (EFE) da liga de alumínio AA6063. A região central do cordão apresenta grãos equiaxiais devido à presença do fenômeno de recristalização dinâmica, de tamanho menor do que os grãos do material de base. A região equiaxial tem pouca diferença de tamanho entre o lado de avanço e retrocesso. Uma diferença maior é observada com os grãos alongados, sendo os maiores no lado de retrocesso da ferramenta. Estas diferenças são devidas ao fluxo de material durante a soldagem.

A distribuição das diferenças de orientação entre os grãos são diferentes entre o lado de avanço e o lado de retrocesso do cordão soldado. O lado de retrocesso apresenta uma grande quantidade de grãos com diferença orientação abaixo de 15° e o lado de avanço apresenta uma quantidade de grãos com diferença de orientação abaixo de 15° e outra quantidade significativa acima de 15° . Esta diferença está relacionada com os mecanismos de recristalização existentes em cada lado do cordão.

7. CONCLUSÃO

A soldagem por SALM (FSW) já é um processo com grande domínio sobre suas variáveis, e os resultados mecânicos permitem o seu uso nas mais diferentes indústrias. As variáveis dos materiais e suas microestruturas combinadas com as variáveis do processo são um campo extenso ainda para estudo. A região central do cordão apresentou grãos finos e equiaxiais. Não foram observadas diferenças entre os tamanhos de grão equiaxiais do lado do avanço e do retrocesso. Já os grãos alongados da ZTMA são maiores no lado do retrocesso que no lado do avanço. Em particular, o entendimento dos fenômenos de recristalização no processo de SALM (FSW) podem trazer melhorias nas propriedades da junta soldada.

8. AGRADECIMENTOS

Ao IST (Instituto Superior Técnico) da Universidade Técnica Nova Lisboa, através dos professores Luisa Quintino e Pedro Vilaça, pela execução dos corpos-de-prova.

9. LISTA DE REFERÊNCIAS

- [1] BRANDI, S.D. Soldagem por atrito. In: WAINER, E. *et al.* **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. p.317-334.
- [2] CAMPBELL, G.; STOTLER, T. Friction stir welding of armor grade aluminum plate. *Welding Journal*, n.12, p.45-47, Dec. 1999.
- [3] MENDEZ, P.F.; EAGAR, T.W. Welding Processes for Aeronautics. *Advanced Materials & Processes*, v.159, n.5, p.39-43, May 2001.
- [4] Menzemer, C.C.; LAM, P.C.; Wittell, C.F.; Srivatsan, T.S. A Study of Fusion Zone Microstructures of Arc-Welded Joints Made from Dissimilar Aluminum Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v.10, n.2, p. 173-177, Apr. 2001.
- [5] WITTMANN, R.J.; Pires, P.C.; BRANDI, S.D. – Friction Stir welding: overview and perspectives. In: 17th International Congress of Mechanical Engineer 'COBEM 2003', São Paulo, SP, vol. MI-7, pg 1-7.
- [6] DAVIS, J.R. Welding. In: **Aluminum and Aluminum Alloys**. Materials Park, USA: ASM International, Handbook Committee. p.376-419, 1994.
- [7] JOHNSON, M.R. Friction stir welding takes off at Boeing. *Welding Journal*, n.2, p.35-39, Feb. 1999.
- [8] SMITH, C.B. *et al.* Friction stir welding in the automotive industry. In: ANUAL MEETING ALUMINUM AUTOMOTIVE AND JOINING SYMPOSIA. New Orleans USA, 12-14 Feb. 2001. **ALUMINUM 2001**. Warrendale, USA: Minerals, Metals and Materials Society/AIME, 2001. p.175-185, 2001.
- [9] Kallee, S.; Nicholas, D. Friction Stir Welding at TWI. Inglaterra. Descrição das atividades referentes a *friction stir welding* do instituto. Disponível em: <<http://www.twi.co.uk>>. Acesso em: 10 de out. 2002.
- [10] KALLEE, S. TWI works on friction stir welding for light weight automotive structures. *Metalurgia*, v.64, n.4, p.119 Apr. 1997.
- [11] BAYHA, T. *et al.* Metals affordability initiative consortium. *Advanced Materials & Processes*, v.160, n.5, p.30-31, May 2002.
- [12] THOMAS, W.M. *et al.* Feasibility of friction stir welding. *Science and technology of welding and joining*, v.4, n.6, p.365-372, Sept. 1998.
- [13] Friction stir welding - a star among the weld processes. *Schweiss- & Prüftechnik*, v.54, n.11, p.178-179, 2000.
- [14] DAWES, C.J.; THOMAS, W.M. Friction stir process welds alluminum alloys. *Welding Journal*, v.75, n.3, p.41-45, Mar. 1996.
- [15] OUYANG, J.H.; KOVACEVIC, R. Material flow and microstructure in the friction stir butt welds of the same and dissimilar aluminum alloys. *Journal of material engineering and performance*, v.11, n.1, p.51-63, Feb. 2002.
- [16] PRADO, R.A., *et al.* Tool wear in the friction-stir welding of aluminum alloy 6061 +20% Al₂O₃: a preliminary study. *Scripta Materialia*, v.45, p.75-80, 2001.
- [17] SATO, Y.S. *et al.* Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction stir welding. *Metallurgical and materials transactions A*, v.30A, p.2429-2437, Sept. 1999.
- [18] SATO, Y.; KOKAWA, H. Microstructural characteristics in friction stir welded aluminium alloys. *Welding International*, v.15, n.9, p.693-698, 2001.
- [19] REYNOLDS, A.P. Visualization of material flow in autogenous friction stir. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.5, n.2, p.120-124, 2000.
- [20] COLEGROVE, P.A.; SHERCLIFF, H.R. 3-Dimensional CFD modelling of flow round threaded friction stir welding tool profile. *Journal of Materials Processing Technology*, v.169 p. 320-327, 2005.
- [21] BOX, G E P **Statistics for experiments: an introduction to design, data analysis and model building**. New York: John Wiley, 1978.

10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

FSW But Welded Aluminum AA1050 Characterization.

Freddy Poetscher¹, sebrandi@usp.br
Flávio Gil Alves Paiva¹, sebrandi@usp.br
Pedro Vilaça², sebrandi@usp.br
Sérgio Duarte Brandi¹, sebrandi@usp.br

(1) Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil.

(2) Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal.

Abstract: *The process of friction stir welding (FSW) is a recent technique for welding materials in the solid state, particularly aluminum and its alloys. The process was invented in England in 1991. In this case, the parts to be welded are fixed and a special tool performs the welding continuously. The tool has a rotational speed and, during its translation, the material is mixed in solid form and, consequently, the two welded parts. The objective of this work is to characterize both the structure and mechanical properties of the weld by FSW of aluminum AA6063 T6, with a thickness of 3.0 mm. The welding was performed with a rotation of the tool of 720 rpm and a speed of translation of 5.4 mm / s. The tool used is a 'three flats', the shoulder diameter of 15 mm, the pin diameter of 3 mm and angle of the 90° with the horizontal. The welded joint was characterized by micrography and by means of microhardness profiles in different regions of the weld beads, EBSD analysis and measurements of size of grain. The results showed that different regions in the weld presented different grain sizes and different grain orientation. The mechanical properties of the weld metal were lower than the base metal.*

Key-words: *friction stir welding; solid state welding; friction stir welding.*