

CORRELAÇÃO ENTRE HISTÓRIA TÉRMICA E QUALIDADE DA JUNTA NO PROCESSO DE FSW DA LIGA DE ALUMÍNIO 5182-O

Diego Tolotti de Almeida¹
João Henrique Corrêa de Souza^{1,2}
Thomas Gabriel Rossauro Clarke³

Resumo

No presente estudo foram realizadas séries de soldas pelo processo de FSW em junta de topo, utilizando-se chapas planas de alumínio 5182-O, variando-se a velocidade de soldagem e utilizando uma ferramenta inteiriça de pino cônico com rosca e ombro plano, fabricada em aço VF800 AT. A qualidade das juntas soldadas em termos de aspecto superficial foi verificada por inspeção visual. As propriedades mecânicas foram obtidas através de ensaios de tração, dobramento, microdureza e imagens microestruturais. Uma janela ótima de trabalho foi determinada com base nos resultados dos ensaios mecânicos, e assim estabelecida uma correlação entre o aporte térmico na soldagem e o resultado do processo. **Palavras-chave:** Soldagem por fricção (FSW); Soldadura no estado sólido; Aporte térmico; AA 5182-O.

CORRELATION BETWEEN THERMAL-HISTORY AND WELD QUALITY IN FRICTION STIR WELDING OF ALUMINUM 5182-O

Abstract

In the present study, series of friction stir welded butt joints in aluminum 5182-O sheets were produced using a conical pin with plain shoulder made of VF800-at steel at various welding speeds. Welding quality was evaluated through visual inspection, tensile tests, bending tests, micro hardness and metallography. An optimal process window was identified based on the results of mechanical tests, thus establishing a correlation between thermal input and quality of welding.

Keywords: Friction Stir Welding (FSW); Solid state welding; Heat input; AA 5182-O.

1 INTRODUÇÃO

Friction Stir Welding (FSW) foi desenvolvido e patenteado no Instituto de Soldagem do Reino Unido (TWI) em 1991 como uma técnica de junta no estado sólido, e foi aplicada inicialmente às ligas de alumínio [1]. O material é plastificado na interface das peças e a união ocorre por difusão do material devido ao intenso trabalho mecânico e pelas condições de contato íntimo entre as peças [2]. É comumente mencionado na literatura que o processo FSW pode produzir soldas de alto desempenho com propriedades muitas vezes iguais ou superiores às do metal de base [3]. O processo de FSW é considerado uma técnica ambientalmente correta devido a sua eficiência energética [4].

O processo de FSW consiste basicamente de quatro fases: a fase de imersão da ferramenta em rotação, na qual a solda é iniciada, a fase do tempo de permanência

para aquecimento (*dwell time*) no local de imersão com a finalidade de que a ferramenta e as peças de trabalho atinjam temperaturas suficientes para concretizar a soldagem, a fase de soldagem, em que a solda é consolidada, e a fase final onde a ferramenta é afastada das peças de trabalho. Conforme a ferramenta é inserida dentro da junta, o calor gerado é conduzido pelo material e pela barra ou chapa de apoio (*backing bar ou backing plate*) [5].

O processo de soldagem por fricção é geralmente realizado através de máquinas com programação CNC, o que permite o controle dos parâmetros que influenciam diretamente no processo de soldagem [6]. Os principais parâmetros do processo de FSW incluem a velocidade de rotação da ferramenta, a velocidade de avanço, a força axial exercida pela ferramenta sobre a junta, o ângulo de inclinação da ferramenta e a geometria da ferramenta [7].

¹Bruning Tecnometal, Panambi, RS, Brasil. E-mail: diegot@bruning.com.br

²Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, Panambi, RS, Brasil.

³Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.



Depois da geometria da ferramenta, a velocidade de rotação é o segundo fator que mais influência na geração de calor do processo [8,9]. O aumento da velocidade de rotação gera mais atrito e, conseqüentemente, mais calor produzindo mistura e deformação mais intensa do material próximo ao ombro e ao pino [5].

A velocidade de avanço da ferramenta também influencia na geração do calor, isso porque aumenta ou diminui o tempo pelo qual o material fica exposto ao atrito com a ferramenta. Além disso, tem relação com o escoamento do material, intercalando porções de material que sofreram diferentes deformações e resultando em linhas de fluxo [4,10,11].

Um modelo simplificado proposto por Wei e Nelson [12] para o cálculo do aporte térmico leva em consideração o torque “T” (N.m), extraído indiretamente da potência do motor do equipamento de FSW, a velocidade de rotação “ ω ” (rpm) e a velocidade de avanço “v” (mm/min) da ferramenta, conforme é mostrado na Equação 1.

$$AT = \frac{2\pi T\omega}{v} \left(\frac{J}{mm} \right) \quad (1)$$

A velocidade de rotação da ferramenta combinada com a velocidade de soldagem são as variáveis do processo que possuem destaque por auxiliarem na definição das condições de soldagem por FSW. Desta forma, Sutton et al. [13], Cederqvist e Reynolds [14], relacionaram estas variáveis e consideraram as condições de soldagem da seguinte forma: condição de soldagem a quente, a frio ou uma condição intermediária. Da mesma forma, Vilaça et al. [15] apresentou resultados onde a razão numérica entre a velocidade de soldagem e a velocidade de rotação, definiram a soldagem em função da quantidade de calor gerada pelo trabalho de atrito e deformação.

Um dos defeitos que podem ocorrer durante a soldagem por FSW é a falta de preenchimento interno ou *wormhole*, resultando em regiões internas da junta soldada com ausência de material, decorrentes de menor atrito ou de menor tempo de permanência da ferramenta sobre o material, causados por aportes térmicos insuficientes [16,17]. Leonard e Lockyer [18] constataram que defeitos volumétricos aparecem no lado do avanço quando a velocidade de soldagem é elevada. De forma similar Kim et al. [19] constataram que aporte térmico insuficiente caracterizado como soldas “frias”, resultam em defeitos do lado do avanço. Outro tipo de descontinuidade ocasionado por aquecimento insuficiente é a cavidade superficial causada por falta de preenchimento interno, ou defeito do tipo *groove* [16].

Por outro lado, aportes térmicos muito elevados, caracterizados por velocidades de soldagem baixas, podem resultar em defeitos como rugosidade superficial e excesso de rebarba, sendo resultado de uma deformação plástica excessiva [20]. Nesta condição de deformação plástica, o material pode aderir na ferramenta, não sendo possível o controle de seu escoamento na região de contato com o

ombro da ferramenta, o que acarreta na expulsão do material, ocasionando vazios no interior da junta soldada [21]. Elangovan e Balasubramanian [22] também reportam defeitos ocorrendo com aportes térmicos elevados. Kim et al. [19] reportam defeitos volumétricos com velocidades de soldagem altas, o que resultam em soldas “quentes”, e a razão relatada por eles é que ocorre uma agitação anormal do material causada por um gradiente de temperatura entre o material próximo a superfície e o material próximo a raiz da solda. Desta forma, o aporte térmico é um fator determinante para garantir uma solda de qualidade, sendo desejada uma combinação de parâmetros que resultem em uma solda livre de defeitos.

O objetivo deste estudo caracterizou soldas produzidas através de uma gama de velocidades de avanço da ferramenta, com velocidade de rotação constante, na tentativa de melhor entender o que constitui uma solda boa (isenta de defeitos) e o efeito dos parâmetros do processo sobre a qualidade da solda. Soldas foram produzidas com velocidades de avanço que caracterizam uma janela de trabalho que vai desde condições de soldagem “quente”, com baixas velocidades de soldagem, até condições de soldagem “fria”, estas com maiores velocidades de soldagem. Esperava-se que os defeitos volumétricos ocorreriam com parâmetros que caracterizariam menor aporte térmico (soldas frias), e que excesso de rebarba ocorreria com maiores aportes térmicos (soldas quentes). Ensaio de resistência à tração, microdureza, dobramento e macrografias da seção transversal das soldas foram utilizados para caracterizar cada junta soldada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram utilizadas chapas de alumínio 5182-O com 3,25mm de espessura, nas dimensões de 150 mm × 500 mm. A composição química e propriedades mecânicas são estipuladas através das normas ABNT NBR 6834 e NBR 7823, podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química e propriedades mecânicas da liga Al 5182-O. Adaptada da Norma ABNT NBR 6834 e NBR 7823 [23,24]

Composição Química	
Manganês- Mn(%)	0,20-0,50
Silício-Si (%)	0,20 MÁX.
Cobre-Cu (%)	0,15 MÁX.
Titânio-Ti (%)	0,10 MÁX.
Cromo-Cr (%)	0,10 MÁX.
Magnésio-Mg(%)	4,0-5,0
Zinco-Zn(%)	0,25 MÁX.
Ferro-Fe(%)	0,35 MÁX.
Propriedades Mecânicas	
Limite Escoamento (N/mm ²)	110 MÍN.
Limite Resist. Tração (N/mm ²)	255-315
Along. (%)	13 MÍN.

A ferramenta de soldagem é inteiriça e usinada em aço VF800AT, a geometria do pino é cônica com rosca e possui 6,0mm de diâmetro, com comprimento de 3,1 mm e diâmetro do ombro de 18,0 mm, ver Figura 1.

A soldagem foi realizada através de uma adaptação de uma máquina fresadora CNC de cinco eixos, modelo Integrex e1060V do fabricante Mazak. Cook et al. [25] relatam que a adaptação da fresadora CNC ao processo de FSW se torna interessante, visto que apresentam grande rigidez, suportando assim as altas cargas verticais que são aplicadas às peças a serem soldadas. Sobre a mesa da máquina foi montada uma base para posicionamento e fixação dos corpos de prova de alumínio a serem soldados.

Com base na revisão bibliográfica, foram utilizados ângulo de inclinação e velocidade de rotação da ferramenta constantes, sendo o sentido de rotação horário. Com a finalidade de avaliar o efeito do aporte térmico durante a soldagem, foi priorizada a aplicação de diferentes velocidades de avanço, de modo a definir a maior velocidade que permite obter juntas soldadas de qualidade, isto se torna um parâmetro interessante, pois o aumento desta velocidade significa maior produtividade durante o processo. A Tabela 2 resume os parâmetros empregados no processo de soldagem.

Cada parâmetro produziu três soldas segundo os parâmetros de soldagens definidos na Tabela 2. As chapas foram soldadas em temperatura ambiente, sem pré ou

pós-aquecimento do material, depois de soldadas foram visualmente inspecionadas. A caracterização e avaliação mecânica de cada junta soldada foi realizada a partir de amostras cortadas, sendo os 50 mm iniciais e finais de cada amostra descartados. De cada amostra foram retirados três corpos de prova para ensaio de tração, dois para dobramento de face, dois para dobramento de raiz e dois para análise macro e microestrutural e ensaio de microdureza.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Imagens em vista de topo de trechos do centro das soldas nas chapas de alumínio podem ser vistas na Figura 2.

Uma característica marcante em termos de aparência da solda é a assimetria que é bastante acentuada, onde a rebarba (*flash*) está distribuída em maior parte no lado do recuo. Thomas et al. [26], sugere que a assimetria do processo se dá devido à relação entre os movimentos de rotação e translação da ferramenta durante o processamento. Kozminski [5] relata que um fator que possivelmente contribui para maior geração de *flash* é uma velocidade de avanço baixa, que ocasiona aportes térmicos elevados e propicia um fluxo de material excessivo, facilitando sua ejeção.

Outra característica marcante que podemos ver na Figura 2, é que quanto maior a velocidade de soldagem,



Figura 1. Ferramenta utilizada no processo de soldagem por fricção.

Tabela 2. Parâmetros do processo de soldagem

Solda	Velocidade Avanço [mm/min.]	Sentido de rotação	Velocidade Rotação [RPM]	Profundidade Penetração [mm]	Ângulo Inclinação [°]	Tempo de Espera [s]
1	50	Horário				
2	100	Horário				
3	150	Horário	500	0,3	1	10
4	200	Horário				
5	250	Horário				

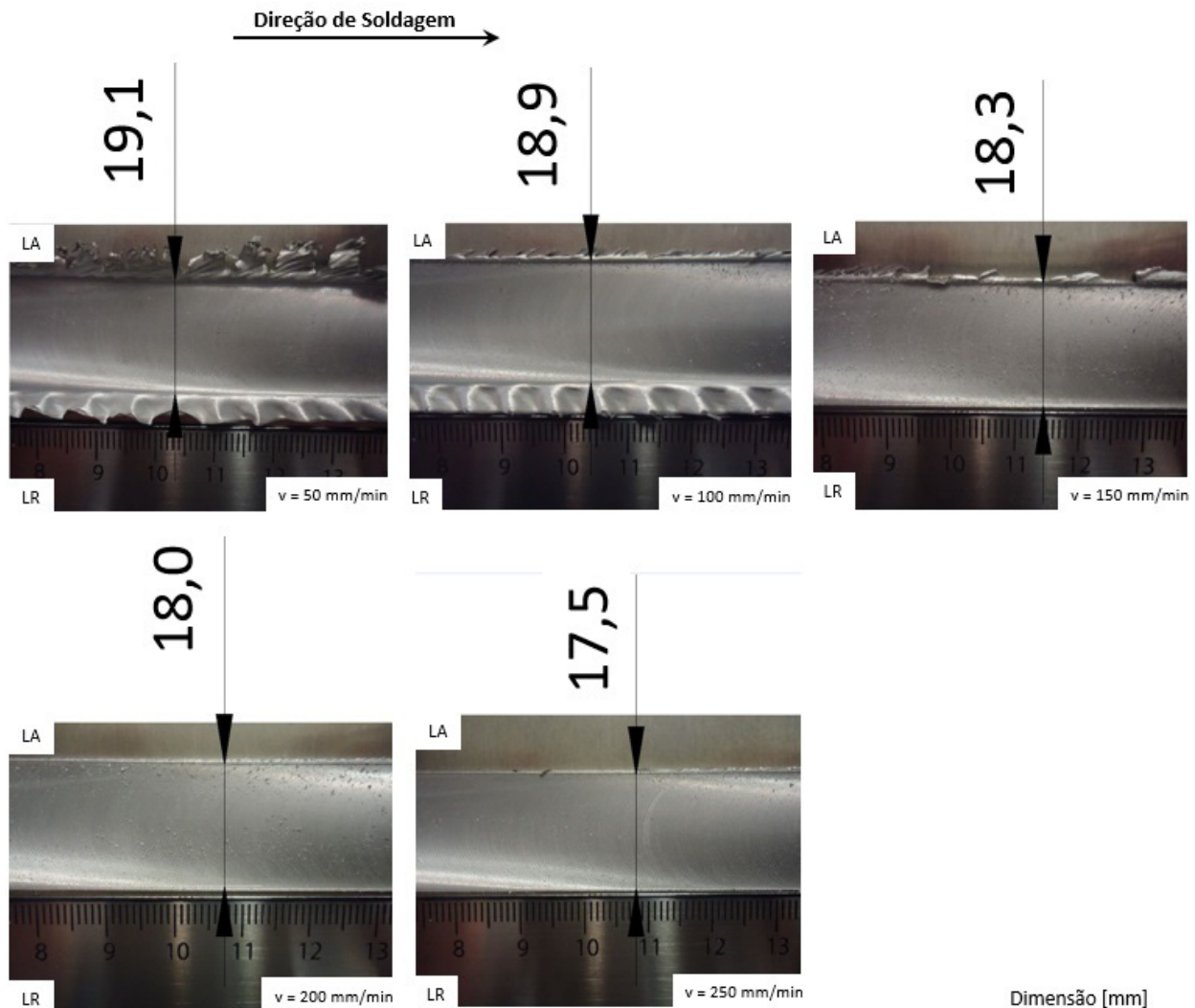


Figura 2. Vista de topo de trechos centrais das soldas.

menor a largura da junta soldada. Kozminski [5] estudou o comportamento da largura da junta soldada em chapas de aço inoxidável duplex UNS S31803 e constatou que essa diminuição da largura da junta soldada pode ser explicada pelo fato de maiores velocidades de soldagem acarretarem em um menor tempo de exposição a elevadas temperaturas.

Para caracterizar a existência ou não de defeitos na junta soldada amostras da seção transversal foram preparadas para análise macroscópica, ver Figura 3.

Um aspecto importante que podemos observar na Figura 3 é a presença de *onion rings* na região da mistura. Os *onion rings* são linha de fluxo de material em forma de anéis que geralmente são encontrados em soldas por fricção (FSW), cuja formação é descrita por Kumar et al. [16]. Também foi possível observar que não há presença de vazios e a formação da seção transversal de junta soldada tem aspecto regular em todas as variações de velocidade de soldagem.

Com referência as microestruturas das amostras soldadas, as mesmas podem ser observadas na Figura 4, em que exibe à grande diferença microestrutural da liga de alumínio 5182-O, evidenciando a zona termomecanicamente afetada (ZTMA) e a zona da mistura (ZM), também a região de transição entre elas.

Na macrografia apresentada na Figura 4 é possível visualizar que a zona da mistura é caracterizada pela formação de uma microestrutura de grãos refinados, com morfologia equiaxial, isso devido à recristalização dinâmica imposta pelo elevado grau de deformação plástica e pela temperatura, conferidos ao material pela rotação e penetração da ferramenta durante o processo [27]. A modificação microestrutural ocorrida na junta soldada tanto do lado do recuo quanto do lado do avanço da ferramenta, não é a mesma devido à ação assimétrica da ferramenta sobre o material. Conforme relatado por Kozminski [5], esta diferença se torna evidente na observação das regiões de fronteiras entre a ZM e a

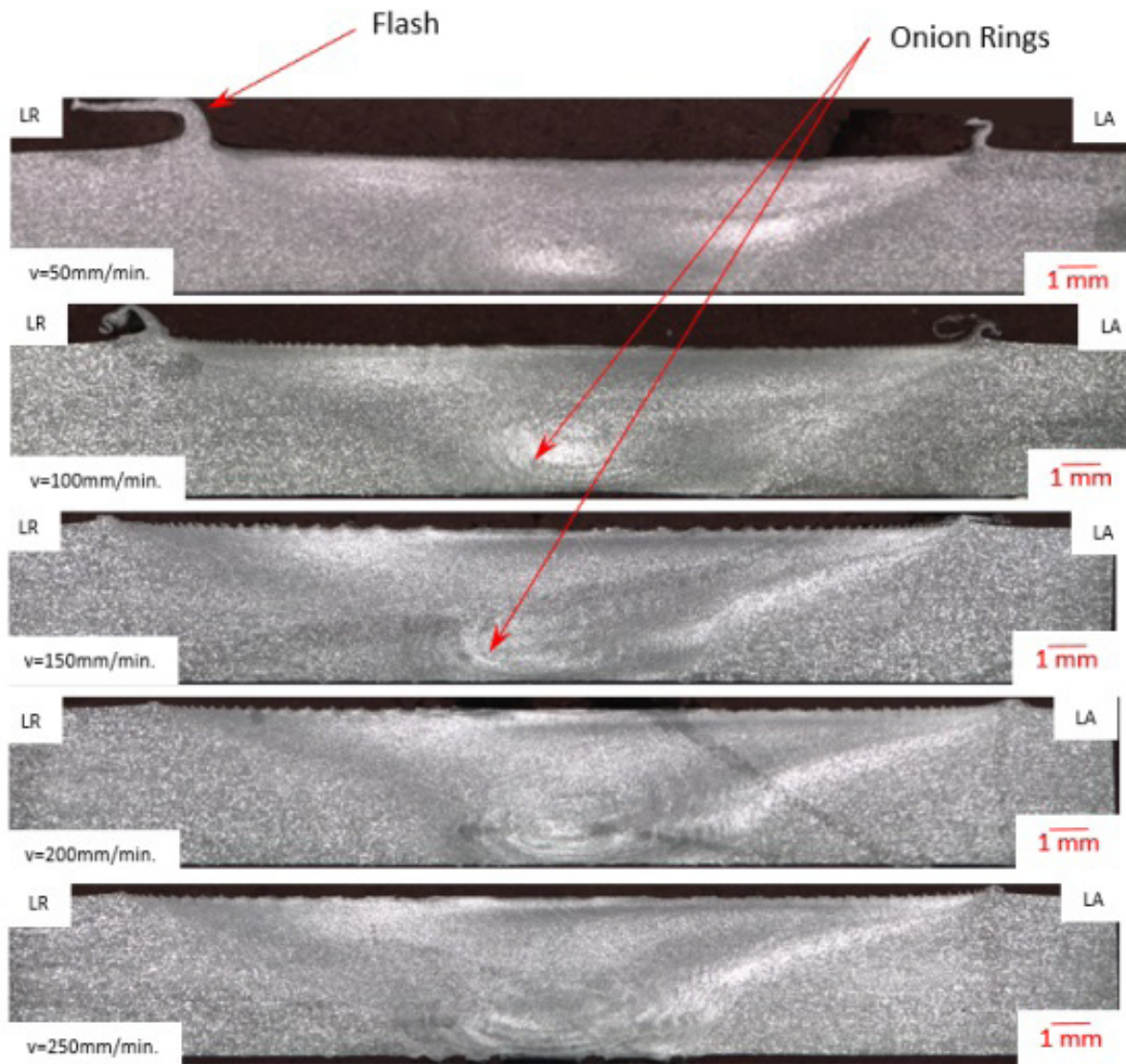


Figura 3. Macrografias da seção transversal das juntas soldadas.

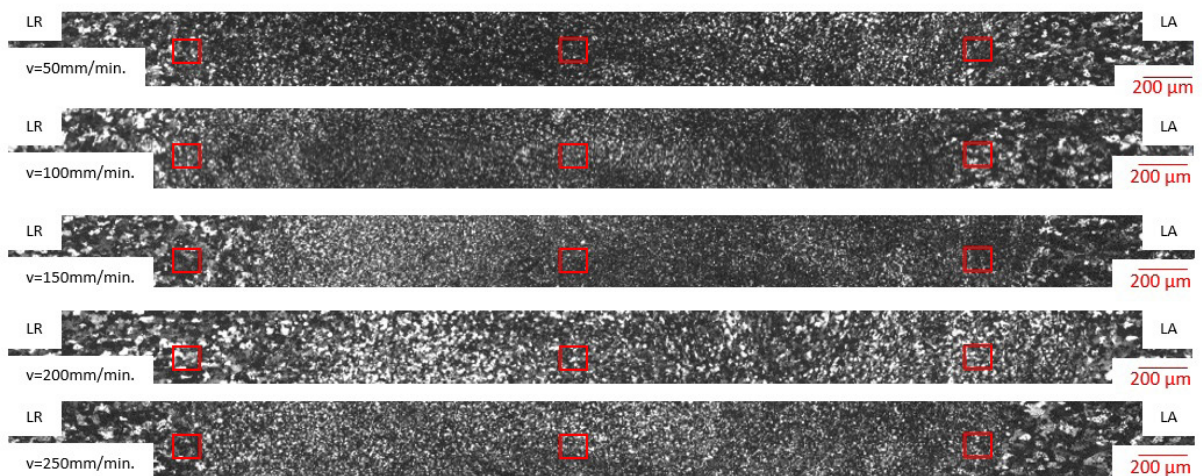


Figura 4. Micrografias da junta solda obtida com diferentes velocidades de avanço, sendo destacada a ZM e a transição entre a ZM-ZTMA no lado do avanço e recuo.

ZTMA em ambos os lados da seção transversal das soldas. Wey e Nelson [12] relata que mudanças microestruturais na solda são afetadas principalmente pela taxa de aquecimento, temperatura de pico e posterior resfriamento. Theodoro [28] observou que o aumento do refino microestrutural com a redução de temperaturas do processo pode ser explicada pelo fenômeno de recristalização.

Medições de microdureza foram realizadas à meia espessura das amostras soldadas, com objetivo de obter o perfil de dureza ao longo da seção transversal da junta soldada, ver Figura 5. Em todos os casos, obteve-se valores de dureza acima dos encontrados no material de base, confirmando essa informação através da linha de tendência. Segundo Kim et al. [19] na soldagem de ligas de alumínio recozidas, fundidas e forjadas a soldagem através do processo FSW geralmente não produz perdas nas propriedades do material em relação ao metal de base. Na verdade, na região da mistura da solda há algum aumento de dureza e resistência devido ao trabalho mecânico a quente e consequentemente refinamento na estrutura granular, dispersão de compostos intermetálicos, quebra da estrutura dendrítica original e a reduzida probabilidade de formação de defeitos volumétricos do tipo vazio.

Os ganhos de dureza na região da mistura (núcleo da solda) foram mais expressivo para todas as velocidades de soldagem, confirmando o mesmo comportamento

observado por Kozminski [5]. Este fato pode ser atribuído à redução do tempo de exposição do material às temperaturas elevadas do processo. Assim, acontecendo à interrupção de processos de recristalização secundária, comprometendo o crescimento dos grãos e mantendo os grãos refinados.

Os corpos de prova para ensaio de tração foram retirados em corte transversal em relação à direção de soldagem. O local de ruptura dos corpos de prova nos ensaios e os valores médios de limite de escoamento (N/mm^2), limite de resistência (N/mm^2) e alongamento (%) pode ser visualizado na Tabela 3.

Para todas as velocidades de soldagem, os valores de limite de escoamento foram mantidos próximos aos valores observados nas amostras do material de base. O alongamento foi reduzido para todas as velocidades de soldagem em comparação ao material de base, o que pode ser resultado de um refino microestrutural na região soldada [5]. Como pode ser visualizado na Figura 6, as amostras produzidas com velocidades de soldagem de 100, 150, 200 e 250 mm/min. apresentam rompimento no material de base, indicando que não houve redução na resistência mecânica das juntas soldadas quando comparadas aos corpos de prova do material de base. Já para velocidade de soldagem de 50mm/min., observou-se que a falha ocorre sobre a solda, situando-se a uma distância entre 3 e 5 mm afastada da linha de centro da solda no lado do avanço.

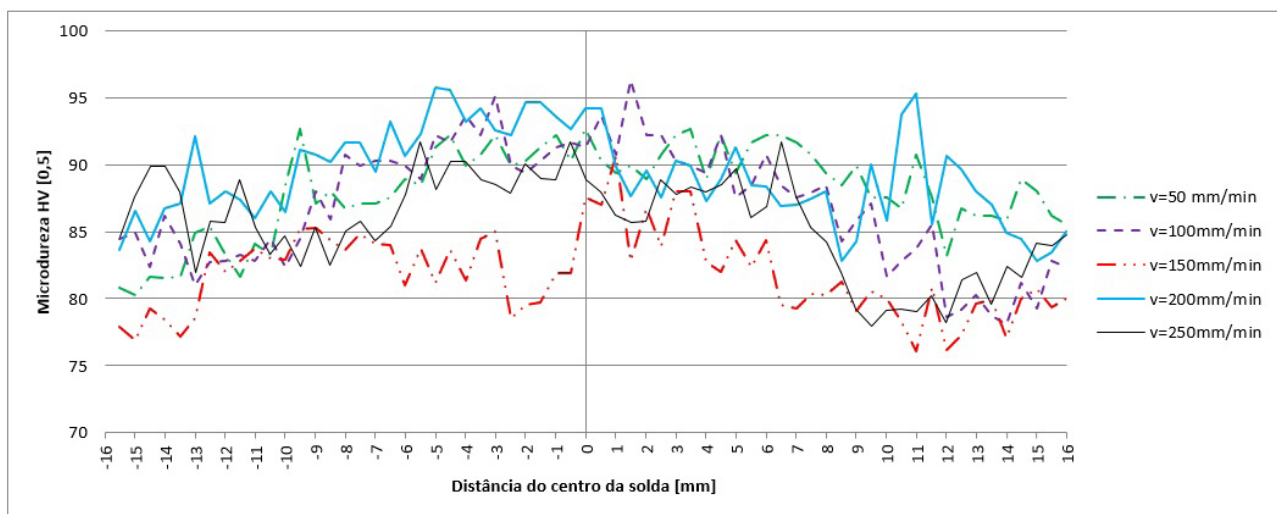


Figura 5. Perfil de microdureza Vickers.

Tabela 3. Ensaio de Tração - Média, desvios padrões das juntas soldadas

Velocidade de Soldagem [mm/min.]	Média limite resistência [MPa]	Média limite de escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Local de Ruptura
Material Base	277,50	130,80	25,09	-
50	289,5 ± 3	133,1 ± 3,0	19,92 ± 1,70	Solda
100	294,4 ± 4	136,2 ± 3,3	20,08 ± 0,70	MB
150	284,0 ± 6	131,6 ± 2,6	20,97 ± 1,10	MB
200	288,8 ± 3	133,2 ± 2,8	20,45 ± 1,60	MB
250	283,0 ± 4	129,9 ± 2,5	22,53 ± 1,70	MB

Para velocidade de soldagem de 50mm/min que apresentou rompimento na junta soldada, os valores de eficiência da junta estão muito próximos ao do metal de base, o que leva a acreditar que o rompimento na junta soldada está associado ao defeito de expulsão de material (*flash*) devido ao maior aporte térmico obtido com essa velocidade de soldagem, o que ocasiona um fluxo de material excessivo, facilitando sua ejeção, acarretando em uma redução da espessura da chapa na junta soldada.

Com a finalidade de observar a ductilidade da região soldada e verificar se houve penetração total nas juntas, foram realizados ensaios de dobramento de face e raiz, ver Figuras 7 e 8.

Em todas as condições de soldagem, com velocidades variando de 50 a 250mm/min as amostras foram dobradas até um ângulo de 180°. Por mais que os valores de alongamento foram reduzidos em todas as velocidades de soldagem, conforme já visto no ensaio de tração, expresse uma redução de ductilidade, o ensaio de dobramento indicou que o nível de ductilidade das soldas é adequado. Segundo Gibson et al. [29], a falha no dobramento de raiz é acompanhada por uma redução mensurável e geralmente significativa da vida em fadiga. Desta forma, o ensaio de dobramento de raiz é um bom indicador de desempenho do ensaio de fadiga em relação a falhas de raiz.

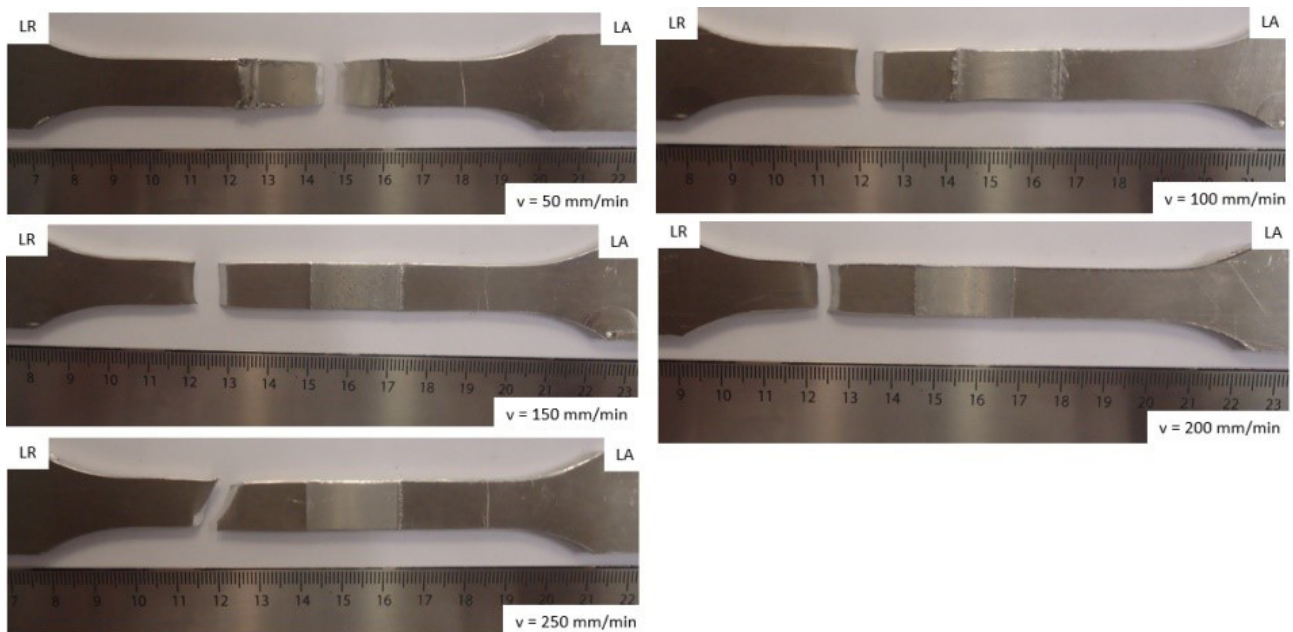


Figura 6. Imagens do ensaio de tração.

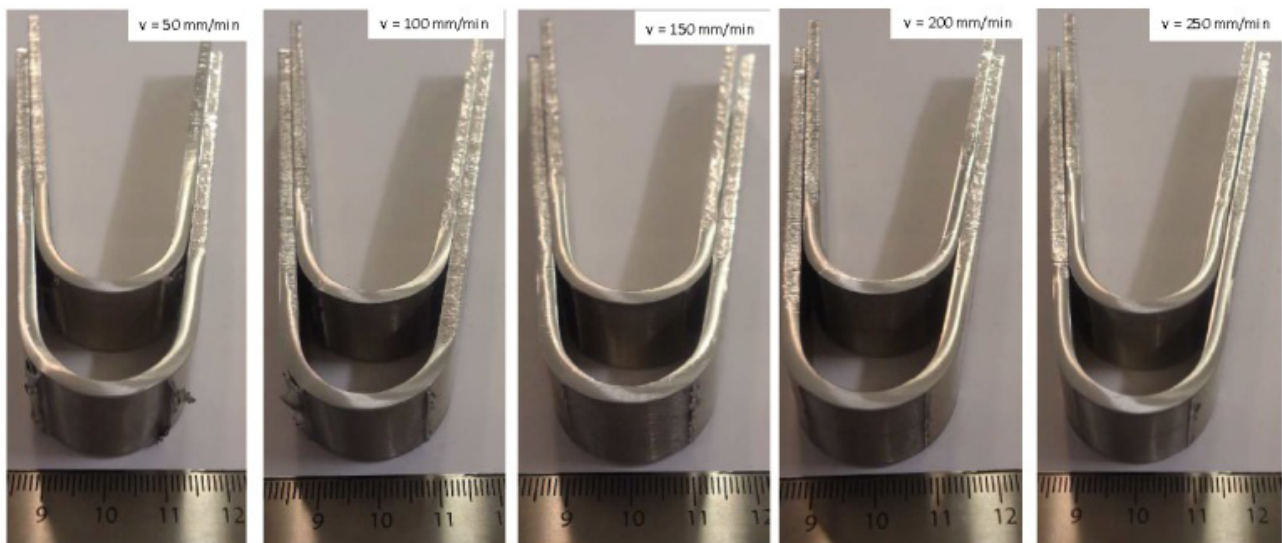


Figura 7. Dobramento de face.

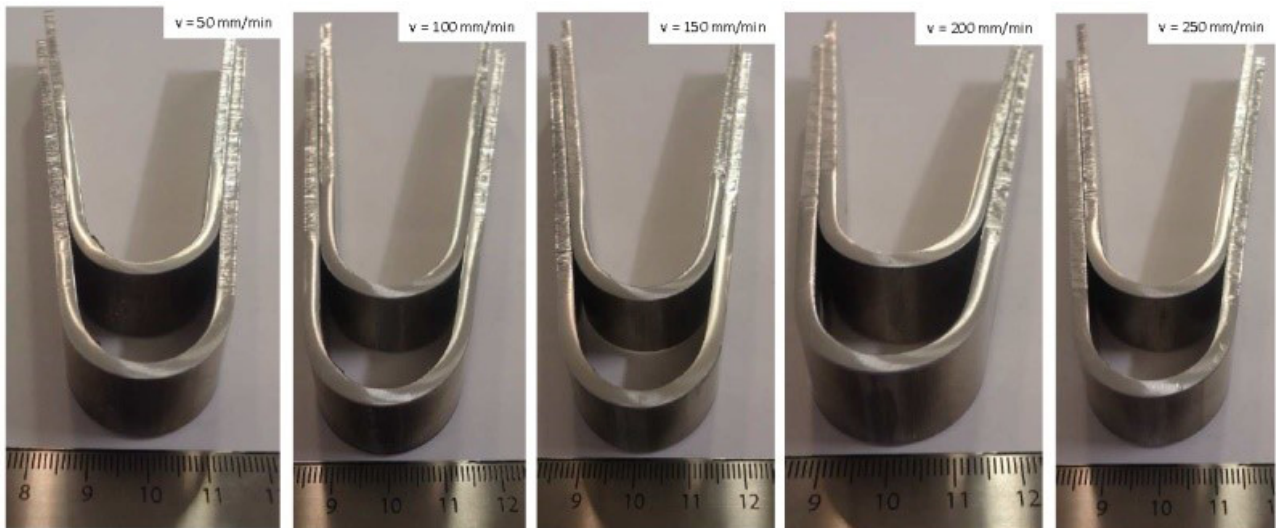


Figura 8. Dobramento de raiz.

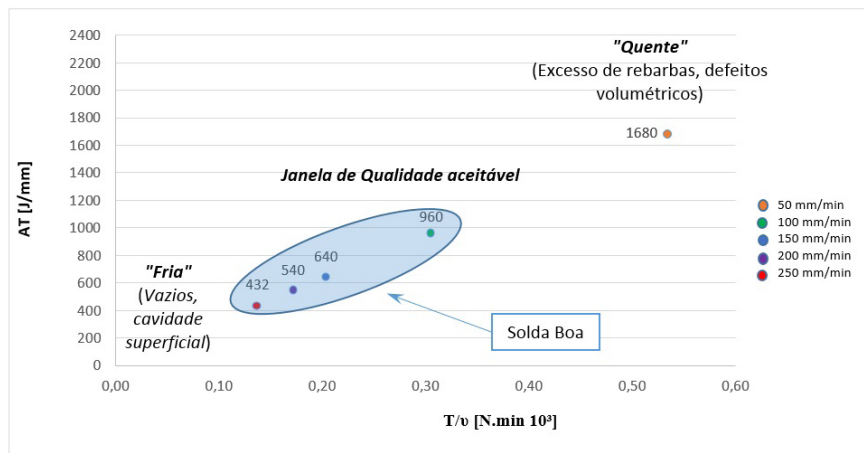


Figura 9. Influência da relação T/v no valor resultante do aporte térmico.

Para a compreensão do efeito dos parâmetros de torque e velocidade de avanço, pode-se observar o gráfico da Figura 9, o qual mostra a influência da relação T/v no valor do aporte térmico.

Neste caso, o aporte térmico calculado varia apenas pela influência da velocidade de avanço e do torque resultante do processo de soldagem por FSW. Observa-se que o aumento da velocidade de soldagem resulta no aumento do torque, isso é explicado pelo fato de que o aumento da velocidade durante o processo de soldagem acarreta na redução do tempo pelo qual o material sofre fricção pela ação da ferramenta. Como resultado, as temperaturas atingidas pelo material são menores, o que torna mais difícil o seu arraste pela ferramenta em rotação e, como consequência, há um aumento do torque resultante. Da mesma forma que o relatado por Kozminski [5], ocorreu uma redução do aporte térmico com o aumento da velocidade de soldagem e do torque, isso se explica pelo aumento de ambas as variáveis simultaneamente, sendo o aumento da velocidade mais acentuado.

4 CONCLUSÕES

- O aporte térmico é um fator determinante para garantir uma solda de qualidade, sendo desejada uma combinação de parâmetros que resultem em uma solda livre de defeitos, uma vez que aportes térmicos muito elevados podem resultar em defeitos como rugosidade superficial e excesso de rebarbas, que comprometeu o comportamento mecânico no ensaio de tração para junta soldada com velocidade de 50mm/min.
- Em todos os casos ocorreu um refinamento na microestrutura na região da mistura, com grãos recristalizados devido ao ciclo térmico e deformação plástica induzida pelo processo de soldagem, a distribuição microestrutural é assimétrica entre o lado do avanço e o lado do recuo, com refino de grão mais acentuado no lado do avanço da zona

da mistura, o que ficou evidente a demarcação da fronteira com a ZTMA neste lado da junta soldada.

- Em relação aos parâmetros de soldagem, pode-se afirmar que o desempenho obtido pela combinação

de velocidade de avanço de 250mm/min, mostra-se o mais adequado para obtenção de solda com qualidades apreciável, uma vez que maiores velocidades de soldagem podem acarretar em aumento da produção.

REFERÊNCIAS

- 1 Thomas WMED, Nicholas JC, Needham MG, Murch P, Templesmith CJ, Dawes GB. Improvements to Friction Welding. GB Patent Application No. 9125978.8. 1991 Dec.
- 2 Hiller DJ. Estudo de parâmetros e percursos no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5052 [dissertação de mestrado]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2007.
- 3 Dawes CJ, Spurgin EJR, Staines DG. Friction Stir Welding aluminum alloy 5083: increased welding speed. Cambridge: The Welding Institute; 1999. (TWI Report, 684).
- 4 Mishra RS, Ma ZY. Friction Stir Welding and processing. *Materials Science and Engineering*. 2005;50:1-78.
- 5 Kozminski ELO. Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) do aço inoxidável dúplex UNS S31803 [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2015.
- 6 Almeida DT. Estudo dos parâmetros no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5083-O. Monografia, UNIJUÍ, Panambi, 2013.
- 7 Nandan R, Debroy T, Bhadeshia HKDH. Recent advances in Friction Stir Welding – process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2008;53:980-1023.
- 8 Threadgill PL, Nunn ME. A review of Friction Stir Welding: part I, process review. Cambridge: The Welding Institute; 2003. (TWI Report, 760).
- 9 Mottaleb-Nejad P, Saeid T, Heidarzadeh A, Darzi K, Ashjari M. Effect of tool pin profile on microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy. *Materials & Design*. 2014;59:221-226.
- 10 Guerra M, Schmidt C, McClure JC. Flow patterns during friction stir welding. *Materials Characterization*. 2003;49:95-101.
- 11 Schmidt HNB, Dickerson TL, Hattel JH. Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3 H.N.B. *Acta Materialia*. 2006;54:1199-1209.
- 12 Wei LY, Nelson TW. Correlation of microstructures and process variables in FSW HSLA-65 steel. *Welding Journal*. 2011;90:95-101.
- 13 Sutton MA, Reynolds AP, Yang B, Taylor R. Mixed mode I/II fracture of 2024-T3 friction stir welds. *Engineering Fracture Mechanics*. 2003;70:2215-2234.
- 14 Cederqvist L, Reynolds AP. Factors affecting the properties of Friction Stir Welding aluminum lap joints. *Welding Journal*, 2002;80(Supplement):1-7.
- 15 Vilaça P, Quintino L, Santos JF. iSTIR: analytical thermal model for friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;169:452-465.
- 16 Kumar K, Satish V, Kailas V. The role of Friction Stir Welding tool on material flow and weld formation. *Materials Science and Engineering A*. 2008;485:367-374.
- 17 Mishra RS, Mahoney MW. Friction Stir Welding and processing. Ohio: ASM International; 2007.
- 18 Leonard AJ, Lockyer SA. Flaws in friction stir welds. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Friction Stir Welding*; 2003; Park City, USA. Cambridge: The Welding Institute; 2003.
- 19 Kim YG, Fujii H, Tsumura T, Komozaki T, Nakata K. Three defect types in Friction Stir Welding of aluminum die casting alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2006;415:250-254.
- 20 Doude H, Schneider B, Patton B, Stafford S, Waters C, Varner C. Optimizing weld quality of a friction stir welded aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;222:188-196.
- 21 Arbogast WJ. A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. *Scripta Materialia*. 2008;58:372-376.

- 22 Elangovan K, Balasubramanian V. Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219aluminium alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2007;459:7-18.
- 23 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6834: alumínio e suas ligas: classificação da composição química. São Paulo: ABNT; 2006.
- 24 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 7823: alumínio e suas ligas: chapas – propriedades mecânicas. São Paulo: ABNT; 2007.
- 25 Cook GE, Cox CD, Hendricks CE. Controlling robotic friction stir welding. *Welding Journal*. 2003;82(6):28-34.
- 26 Thomas WM, Minus I, Smith PT. Friction Stir Welding of an aluminum alloy: effects of tool geometry. Cambridge: The Welding Institute; 1999. (Report, 668).
- 27 Carletti CB. Propriedades mecânicas de juntas sobrepostas da liga Al 6061 soldadas por FSW [dissertação de mestrado]. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos; 2002.
- 28 Theodoro MC. Soldagem por atrito com pino não-consumível em juntas dissimilares de aços inoxidáveis austeníticos UNS S31603 e superduplex UNS S32750 [dissertação de mestrado]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2013.
- 29 Gibson BT, Lammlein DH, Prater TJ, Longhurst WR. Friction stir welding: process, automation and control. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014;16(1):56-73.

Recebido em: 4 Fev. 2016

Aceito em: 29 Abr. 2016