

## **ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS DA LIGA AA5083: COMPARATIVO ENTRE PROCESSO TIG E SOLDAGEM POR FRICÇÃO**

Luciano Marcel Jatczak<sup>1</sup>, [luciano.jatczak@caxias.ifrs.edu.br](mailto:luciano.jatczak@caxias.ifrs.edu.br)  
Carolina Fink Silva<sup>2</sup>, [carolinafinks@gmail.com](mailto:carolinafinks@gmail.com)  
Mateus Ottonelli de Oliveira<sup>2</sup>, [mateusottonelli@gmail.com](mailto:mateusottonelli@gmail.com)  
Ricardo Callegari Jacques<sup>1</sup>, [ricardo.jacques@caxias.ifrs.edu.br](mailto:ricardo.jacques@caxias.ifrs.edu.br)  
Bruna Camacho<sup>2</sup>, [bicamacho@gmail.com](mailto:bicamacho@gmail.com)  
Mariana dos Reis Tagliari<sup>2</sup>, [mreis@ufrgs.br](mailto:mreis@ufrgs.br)  
Guilherme Vieira Braga Lemos<sup>3</sup>, [guilherme.lemos@ufsm.br](mailto:guilherme.lemos@ufsm.br)  
Diogo Buzzatti<sup>2</sup>, [dtbuzzatti@gmail.com](mailto:dtbuzzatti@gmail.com)  
Cleber Rodrigo de Lima Lessa<sup>1</sup>, [cleber.lessa@caxias.ifrs.edu.br](mailto:cleber.lessa@caxias.ifrs.edu.br)

<sup>1</sup>Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS), Campus Caxias do Sul, RS, Brasil

<sup>2</sup>Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Cachoeira do Sul, RS, Brasil

**Resumo.** Os métodos tradicionais de soldagem são baseados na fusão para produção da junta soldada e, portanto, podem ocasionar problemas relacionados às altas temperaturas atingidas e defeitos como porosidade, falta de penetração, entre outros. Por outro lado, o processo de soldagem por fricção (friction stir welding (FSW)) vem ganhando espaço entre as tecnologias modernas de união devido às suas inúmeras vantagens e aplicabilidade na indústria. O processo FSW é uma tecnologia em destaque para a união de diversos materiais, sendo considerada “verde” devido à sua eficiência energética, benefícios ambientais e versatilidade. Assim, o presente trabalho tem como foco a avaliação das tensões residuais em juntas soldadas da liga AA 5083 produzidas através dos processos de soldagem tungsten inert gas (TIG) e FSW. As medições de tensões residuais superficiais foram realizadas através da difração de raios-X (DRX). Defeitos foram observados na junta soldada produzida pelo processo TIG assim como tensões residuais de até 160 MPa.

**Palavras-chave:** Alumínio, AA5083, soldagem por fricção, soldagem TIG, tensões residuais.

**Abstract.** Traditional fusion-based welding methods for welded joint production can lead to issues related to the high temperatures achieved and defects such as porosity, lack of penetration, amongst others. On the other hand, friction stir welding (FSW) has been gaining attention among modern joining technologies due to its numerous advantages and applicability in the industry. FSW is technology highlighted for joining a large variety of materials, being considered "green" due to its energy efficiency, environmental benefits, and versatility. Thus, this work focuses on evaluating residual stresses in welded joints of AA 5083 produced by TIG and FSW processes. Surface residual stress measurements were performed through X-ray diffraction (XRD). Defects were observed in the TIG joint as well as tensile residual stresses up to 160 MPa.

**Keywords:** Aluminum, AA5083, friction stir welding, TIG welding, residual stresses.

### **1. INTRODUÇÃO**

Um dos principais focos da indústria é a redução de peso e, nesse cenário, o alumínio tem uma densidade aproximadamente três vezes menor que o aço, assim como excelentes propriedades mecânicas [1]. A soldagem de ligas de alumínio pode ser relativamente complexa devido a vários fatores que podem dificultar a produção de uma junta de alta qualidade [2]. Portanto, a formação de defeitos como trincas, falta de penetração, porosidades e deterioração das propriedades mecânicas decorrentes dos processos tradicionais de soldagem deve-se, em grande parte, ao maior aporte térmico, tornando o uso dessas técnicas às vezes pouco atrativo para a indústria [3, 4]. Como consequência, são utilizados diferentes métodos de soldagem como união com rebites e uniões parafusadas, entre outras [5].

Como alternativa para a união por fusão e os problemas mencionados acima, a soldagem FSW (*friction stir welding*) vem chamando a atenção e ganhando espaço por ser um processo que pode causar um menor aporte térmico e permite a união de metais sem atingir a temperatura de fusão, que por sua vez poderia causar defeitos atrelados a solidificação. Este processo termomecânico utiliza uma ferramenta não consumível para promover a mistura do material no estado plastificado e, conseqüentemente, produzir a junta soldada idealmente livre de defeitos. Além disso, a junta é formada como uma resposta ao calor de fricção e força de forjamento entre a ferramenta e as chapas a serem soldadas, onde as temperaturas atingidas geralmente estão abaixo do ponto de fusão do material [2]. Portanto, este método é realizado no estado sólido [6], ou seja, o material atinge temperaturas suficientes para que ocorra a recristalização sem que haja a fusão. Além disso, as características atraentes da soldagem por fricção expandiram sua aplicação para empresas renomadas no mundo inteiro como NASA [7], BMW [8], Ford [8], Volvo [8], Audi [9], Airbus [10], Apple [11], entre outras. Recentemente, os autores [6] sugeriram que há um potencial emergente de aplicação desta técnica em tubos de petróleo e gás. Contudo, várias ligas podem ser soldadas, entre elas pode-se mencionar aço [12] e ligas não ferrosas como Alumínio [13,14,15,16,17], Titânio [18] e Níquel [6,19,20]. Por fim, esse processo pode ser uma solução para a união de materiais dissimilares como Ti e Al [21], Al e Mg [22], Al e Cu [23], o que prova o sucesso e a aplicabilidade desta tecnologia de soldagem no estado sólido.

O objetivo do presente trabalho é apresentar uma comparação entre a soldagem por fusão (processo TIG) e a soldagem no estado sólido (processo FSW) na liga alumínio AA5083. Assim, análises metalúrgicas e medições de tensões residuais superficiais foram realizadas em ambas juntas soldadas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Chapas da liga de alumínio AA5083 foram utilizadas no presente trabalho. Assim, as chapas foram soldadas com dois processos de união diferentes: TIG e FSW. A composição química das chapas foi medida através espectrometria de emissão óptica em equipamento da marca Bruker e é mostrada na Tab.1.

Tabela 1. Composição química da liga AA5083 utilizada neste trabalho.

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	V	Ti	Al
AA5083	0,18	0,328	0,0088	0,53	4,89	0,075	0,0007	0,087	0,011	0,014	Bal.

Para o processo de soldagem TIG (*tungsten inert gas*), as chapas foram cortadas e usinadas com dimensões de 125 x 80 x 6 mm e chanfro reto. Foram produzidos dois cordões de solda (um no lado superior e outro no inferior para preenchimento total). Uma máquina com inversor CC/CA Thermal Arc® 300 GTSW, cooler para refrigeração da tocha, eletrodo de tungstênio com 2% tório – ponta vermelha e diâmetro de 3/32” foi utilizada para soldagem TIG. Os parâmetros empregados foram: corrente (A): 200; tensão (V) 220; vazão de gás Argônio 100% (l/min): 10-12; Ø Bocal (mm): 11.

O processo FSW foi realizado com o auxílio de uma ferramenta de aço ferramenta AISI H13 (com ombro de 18 mm, cônico, e pino de 6 mm) em amostras de alumínio com dimensões de 400 x 80 x 6,35 mm. Os parâmetros utilizados para essa soldagem foram rotação de 1000 rpm, velocidade de avanço de 30 mm/min, 0,2 mm de penetração do ombro da ferramenta com carga axial de 70 kN. Os equipamentos de soldagem são apresentados na Fig.1.

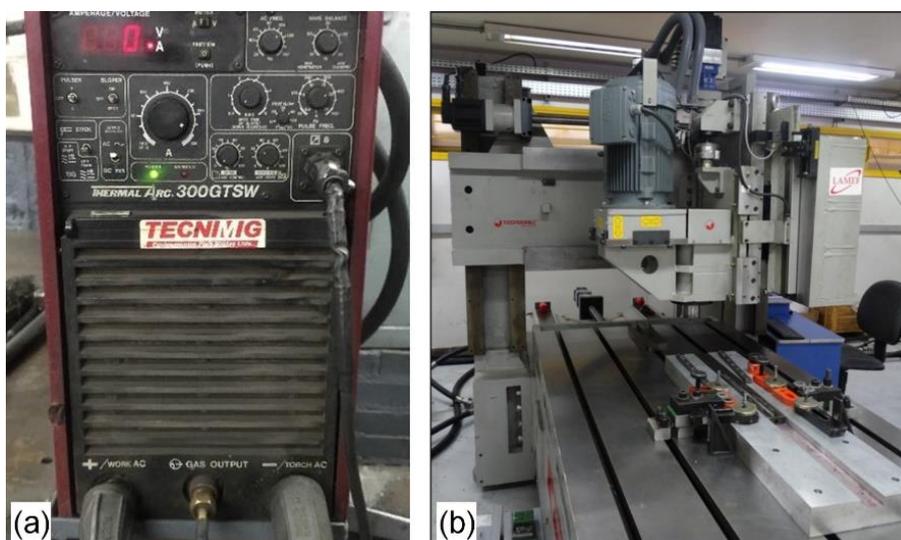


Figura 1. Equipamentos: (a) Fonte de soldagem TIG, (b) máquina de soldagem por fricção.

Amostras de cada uma das juntas soldadas foram usinadas para análise metalográfica. Assim, as amostras foram cortadas, lixadas, polidas e atacadas com reagente Keler. Além disso, dois perfis de microdureza foram realizados (um em cada solda), utilizando-se um equipamento microdurômetro INSTRON Tukon 2100-B com indentador Vickers acoplado e uma carga de 0.3 kgf.

A determinação de tensões residuais por difração de raios-X (DRX) com o método  $\sin^2\psi$  se baseia nos deslocamentos dos picos de difração, a partir dos quais são determinadas as distâncias entre os planos cristalográficos para determinar as deformações e, por conseguinte, as tensões residuais. Quando um feixe de raios-X incide sobre uma porção de material policristalino, onde os átomos estão periodicamente distribuídos e a distância entre os planos cristalográficos é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação emitida, linhas de difração são observadas e, assim, é possível medir as deformações do retículo cristalino utilizando a Lei de Bragg ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ) onde  $n$  é um número inteiro,  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação usada,  $\theta$  é a metade do ângulo de espalhamento, e “ $d$ ” é o espaçamento interplanar médio para dada reflexão de um material cristalino. Por fim, a caracterização das tensões residuais em juntas soldadas da liga AA5083, produzidas pelos processos TIG e FSW foi realizada em um difratômetro de raios-X, modelo GE Seifert Charon *research edition*, com geometria Bragg-Brentano e tubo de raios-X de radiação Cr-K $\alpha$ . Foi utilizado um feixe difratado a partir de um colimador com abertura primária de 2 mm e um detector linear de 20° GE-Meteor-1D. Os picos de difração na direção {220} em  $2\theta = 106,18^\circ$  foram avaliados e o método de inclinação lateral  $\sin^2\psi$  foi considerado para o estudo das tensões residuais. Neste contexto, a faixa de medição em  $2\theta$  foi de  $96^\circ$  a  $115^\circ$  em passos de  $0,02^\circ$  com tempos de medição de 50s por passo. A variação de  $\psi$  foi de  $-60^\circ$  a  $+60^\circ$  em 11 passos. Finalmente, para o cálculo das tensões residuais, utilizou-se valores das constantes elásticas  $\frac{1}{2}E$  e  $-s_1$  de  $19,02 \cdot 10^{-6}$  MPa-1 e  $-4,94 \cdot 10^{-6}$  MPa-1, respectivamente. Deste modo, os campos de tensões residuais foram analisados com 21 pontos de medição por amostra.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Aparência superficial das juntas soldadas

A aparência superficial das juntas soldadas é mostrada na Fig.2. Com respeito a solda produzida pelo processo TIG, Figs. 2a) e b), é possível notar uma superfície mais rugosa e a presença de poros em uma região próxima ao início do comprimento do cordão de solda conforme mostra a seta na Fig.2a). Para a solda produzida pelo processo FSW, Fig. 2 c) e d), verifica-se uma superfície mais lisa e sem defeitos, o que pode levar a um menor gasto com usinagem pós soldagem, diferente do processo TIG onde o acabamento é mais grosseiro e pode exigir etapa adicional de usinagem. Outro fato importante de salientar é que durante a solidificação do cordão ocorre uma contração do metal [24] que pode causar tensões residuais trativas localizadas. Além disso, a qualidade da junta produzida pela soldagem por fricção (processo FSW) foi maior, pois não foram observados os defeitos geralmente atrelados a solidificação.

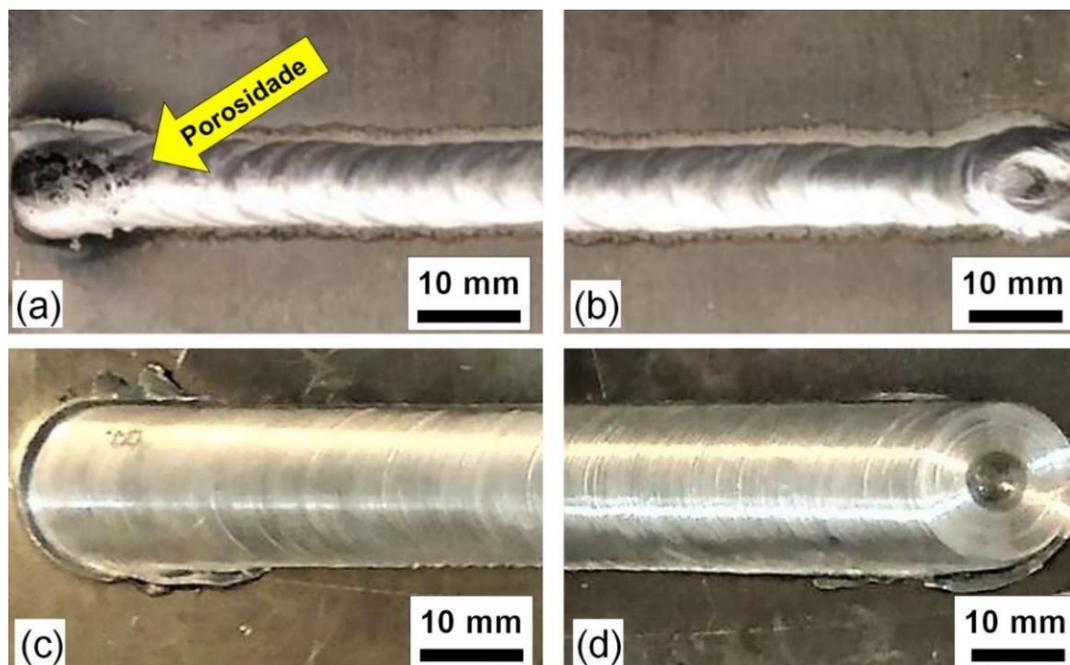


Figura 2. Aparência superficial das juntas soldadas da liga AA5083: (a) início do processo TIG com detalhe da porosidade, (b) fim do processo TIG, (c) início da soldagem por fricção e (d) fim da soldagem por fricção.

### 3.2. Macroestrutura e microdureza

A Figura 3 mostra as macroestruturas das juntas soldadas plotadas junto com e os perfis de microdureza. As linhas pontilhadas azuis indicam o local das medições de microdureza e os perfis foram diferenciados de acordo com a legenda mostrada na imagem. Podem ser vistas a zona fundida na soldagem TIG (parte inferior da imagem) e a zona de mistura no processo FSW (parte superior da imagem). Como pode ser percebido, no processo de soldagem com fusão (TIG), foram realizados dois passes. Além disso, defeitos como poros e falta de penetração foram verificados em um dos passes, características que podem prejudicar o desempenho da junta soldada. É importante mencionar que no processo TIG, a microdureza em alguns pontos de medição na região da solda foi menor que o metal de base, indicando que a soldagem TIG pode ter causado uma diminuição na resistência mecânica. Sobre o perfil de microdureza no processo FSW, é visível um aumento da dureza na região da solda, o que pode provocar um aumento na resistência mecânica. Contudo, os maiores valores de microdureza foram atingidos com o processo FSW e os menores com a soldagem TIG.

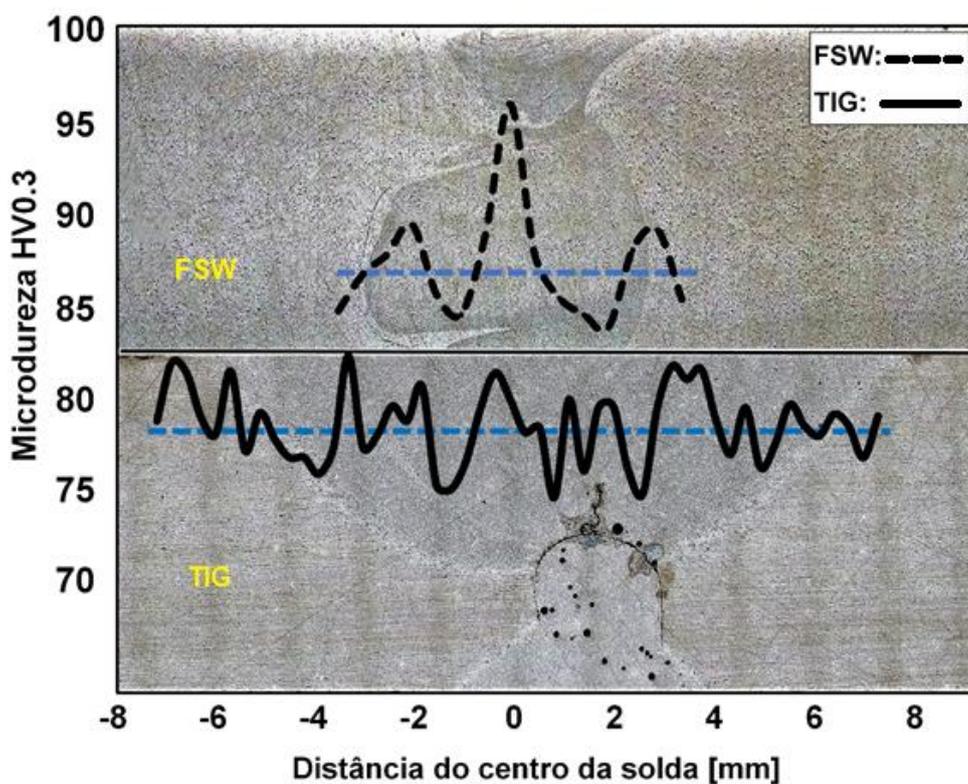


Figura 3. Macrografias das juntas soldadas plotadas com os perfis de microdureza.

### 3.3. Tensões residuais

A Fig. 4a) e Fig. 4b) apresentam os resultados das medições de tensões residuais superficiais nas juntas soldadas produzidas pelos processos de união TIG e FSW. Com respeito às tensões residuais longitudinais, mostradas na Fig. 4a), os maiores valores na região da solda foram atingidos com o processo TIG, com um valor máximo de 160 MPa verificado próximo à linha central da solda (distância de 0 mm). Por outro lado, considerando o processo de soldagem por fricção (FSW), tensões residuais compressivas (em torno de -30 MPa) foram observadas no intervalo de distância de -5 a 5 mm (próximo ao centro da junta), as quais tendem a ser benéficas para o desempenho em fadiga e o fechamento de trincas. Contudo, tensões compressivas de até -150 MPa foram verificadas nas distâncias de -15 e 15 mm (em relação ao centro da solda).

Em relação às tensões residuais transversais, mostradas na Fig. 4 b), os maiores valores também foram atingidos com processo de soldagem TIG. Assim, o valor de 80 MPa foi verificado. Além disso, em geral, os valores máximos de tensões residuais observados na direção transversal foram menores que os valores na direção longitudinal, fato também verificado em outros estudos [20]. Por outro lado, notou-se que o processo de soldagem FSW atingiu aproximadamente -100 MPa (o valor mais compressivo).

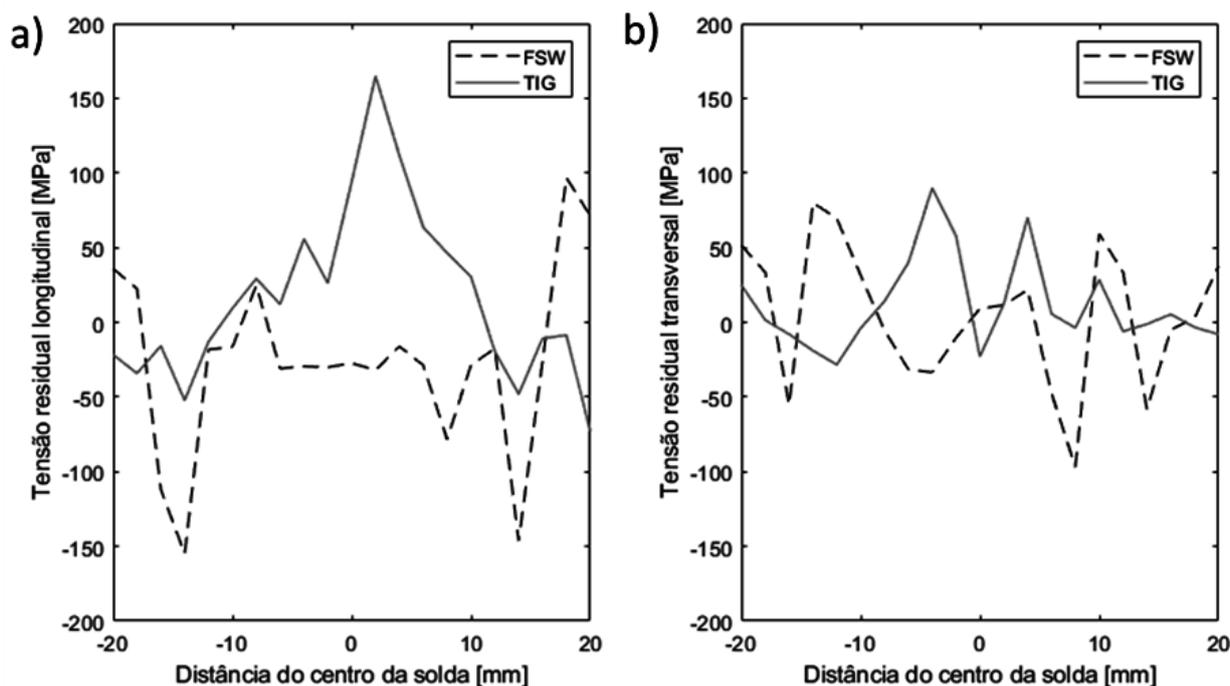


Figura 4. Análise de tensões residuais nas juntas soldadas FSW e TIG: a) longitudinais, b) transversais

Como as tensões trativas podem ser críticas para a integridade estrutural e o início de trincas de fadiga é frequentemente associado ao acabamento superficial e às tensões residuais, a tensão longitudinal de 160 MPa pode ocasionar uma alta tensão efetiva (dependendo da soma das tensões residuais a todas às tensões de serviço aplicadas) e, conseqüentemente, superar a resistência mecânica do material e afetar consideravelmente as suas propriedades de fadiga.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente estudo mostrou diferenças importantes relacionadas à macroestrutura, microdureza e tensões residuais com a comparação dos processos de soldagem TIG e FSW na liga de alumínio AA5083. Assim, os resultados alcançados neste trabalho podem ser resumidos como:

- i) O processo TIG promoveu defeitos, porosidades e os menores valores de dureza na região da solda.
- ii) A melhor junta soldada foi produzida com o processo FSW. Assim, não foram observados defeitos, ocorreu um aumento de dureza e as tensões residuais mais compressivas foram atingidas com a soldagem no estado sólido.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

#### 6. REFERÊNCIAS

1. Associação Brasileira de Alumínio (ABAL). Anuário estatístico ABAL 2016. São Paulo: ABAL; 2017. Available from: <<http://abal.org.br/publicacao/anuario-estatistico-abal-2016>>.
2. Khan NZ, Siddiquee AN, Khan ZA. Friction Stir Welding Dissimilar Aluminum Alloys. Boca Raton: CRC Press; 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315116815>
3. Oliviecki NJ, Beskow AB. Análise dos parâmetros do processo de solda por fricção em uma liga de alumínio. Revista Perspectiva. 2013;37(138):15-29.
4. Thakur R, Bajwa PS. Friction stir welding of 5xxx series aluminium alloys. A literature survey. International Journal of Scientific Research in Science. 2016;2(2):1129-1131.
5. Valenciani VC. Ligações em estruturas de aço. [dissertation]. São Carlos: Faculdade de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; 1997. 301 f.
6. Lemos GVB, Hanke S, dos Santos JF, Bergmann L, Reguly A, Strohaecker TR. Progress in friction stir welding of Ni alloys. Science and Technology of Welding and Joining. 2017;22(8):643-657. <https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1288953>
7. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Space Shuttle Technology Summary. Friction Stir Welding. Washington: NASA; 2001. [http://www.nasa.gov/centers/marshall/pdf/104835main\\_friction.pdf](http://www.nasa.gov/centers/marshall/pdf/104835main_friction.pdf)

8. Thomas WM, Kallee SW, Staines DG, Oakley PJ. Friction stir welding - process variants and developments in the automotive industry. In: 2006 SAE World Congress; 2006 Apr 3-6; Detroit, MI, USA. SAE Technical Paper 2006-01-0555. <https://doi.org/10.4271/2006-01-0555>
9. Lohwasser D, Chen Z, eds. Friction stir welding from basics to applications. Oxford: Woodhead Publishing; 2010.
10. Pacchione M, Telgkamp J. Challenges of the Metallic Fuselage. In: 25th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences; 2006 Sep 3-8; Hamburg, Germany.
11. Dilger DE. Apple slims down iMac 40% with 'friction-stir welding' & ditching the disc drive. Appleinsider; 2012. Available from: <http://appleinsider.com/articles/12/10/24/apple-slims-down-imac-40-with-friction-stir-welding-ditching-the-disc-drive>
12. Cui L, Fujii H, Tsuji N, Nogi K. Friction stir welding of a high carbon steel. Scripta Materialia. 2007;56(7):637-640. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.12.004>
13. Lee WB, Yeon YM, Jung SB. The joint properties of dissimilar formed Al alloys by friction stir welding according to the fixed location of materials. Scripta Materialia. 2003;49(5):423-428. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(03\)00301-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00301-4)
14. Çevik B, Özçatalbas Y, Gülenç B. Friction Stir Welding of 7075-T651 Aluminium Alloy. Practical Metallography. 2016;53(1):6-23. <https://doi.org/10.3139/147.110363>
15. Çevik B, Özçatalbas Y, Gülenç B. Effect of tool material on microstructure and mechanical properties in friction stir welding. Materials Testing. 2016;58(1):36-42. <https://doi.org/10.3139/120.110816>
16. Çevik B, Ozcatalbas Y, Gülenç B. Effect of welding speed on the mechanical properties and weld defects of 7075 Al alloy joined by FSW. Kovove Materialy. 2016;54(4):241-247. [https://doi.org/10.4149/km\\_2016\\_4\\_241](https://doi.org/10.4149/km_2016_4_241)
17. Azimzadegan T, Serajzadeh S. An Investigation into Microstructures and Mechanical Properties of AA7075-T6 during Friction Stir Welding at Relatively High Rotational Speeds. Journal of Materials Engineering and Performance. 2010;19(9):1256-1263. <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9625-1>
18. Lee WB, Lee CY, Chang WS, Yeon YM, Jung SB. Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium. Materials Letters. 2005;59(26):3315-3318. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.05.064>
19. Hanke S, Lemos GVB, Bergmann L, Martinazzi D, dos Santos JF, Strohaecker TR. Degradation mechanisms of pcBN tool material during Friction Stir Welding of Ni-base alloy 625. Wear. 2017;376-377(Pt A):366-371. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.070>
20. Lemos GVB, Farina AB, Nunes RM, da Cunha PHCP, Bergmann L, dos Santos JF, et al. Residual stress characterization in friction stir welds of alloy 625. Journal of Materials Research and Technology. 2019;8(3):2528-2537. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.02.011>
21. Aonuma M, Nakata K. Dissimilar Metal Joining of 2024 and 7075 Aluminium Alloys to Titanium Alloys by Friction Stir Welding. Materials Transactions. 2011;52(5):948-952. <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-MZ201102>
22. Sato YS, Park SHC, Michiuchi M, Kokawa H. Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys. Scripta Materialia. 2004;50(9):1233-1236. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.02.002>
23. Li XW, Zhang DT, Qiu C, Zhang W. Microstructure and mechanical properties of dissimilar pure copper/1350 aluminum alloy butt joints by friction stir welding. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012;22(6):1298-1306. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61318-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61318-6)
24. Marques, P. V.; Modenesi, P. J.; Bracarense, A. Q.; Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3. ed. atual. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

## 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.