



## XIV SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Inteligência Artificial: A Nova Fronteira da Ciência Brasileira

07 a 12 de dezembro de 2020

ISSN 2594-8237

# A INFLUÊNCIA DO PERFIL DA FERRAMENTA NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA EM LIGA DE ALUMÍNIO

Francieli Gonçalves Franceschini<sup>1</sup>, Tancredo Westphal Junior<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Avenida Osvaldo Aranha, nº 99 - Porto Alegre – RS

<sup>2</sup>Departamento de Engenharias e Ciência da Computação – Universidade Regional e Integrada  
do Alto Uruguai e das Missões – URI  
Rodovia RS 331, nº 345, Erechim – RS.

*francielifranci@hotmail.com, tancredo@uri.edu.br*

**Resumo:** A soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) é um processo de soldagem relativamente novo, muito utilizado para ligas de alumínio. Este processo ocorre na fase sólida, onde uma ferramenta rotativa não consumível, possuindo pino e ombro é inserida nas bordas das chapas a serem soldadas, e deslocada linearmente. A obtenção de uma soldagem de excelência depende dos parâmetros do processo e do perfil da ferramenta. Este trabalho investiga a influência do perfil da ferramenta na obtenção de soldas pelo processo FSW. Foram soldadas chapas de alumínio da liga AA 5083, utilizando ferramenta com ombro contendo estrias em espiral e diâmetro de 15 mm, em duas configurações distintas. O efeito do perfil da ferramenta foi analisado por inspeção visual, macrografias e ensaios de tração.

**Palavras-Chave:** Soldagem FSW. Geometria da ferramenta. Soldagem de alumínio.

## 1. INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio apresentam baixa densidade e alta resistência à corrosão, por isso estão sendo cada vez mais utilizadas nas indústrias aeronáuticas. No entanto, as ligas de alumínio podem gerar defeitos como porosidade por hidrogênio (H<sub>2</sub>) e formação de trincas a altas temperaturas em processos de soldagem que envolvem fusão, limitando a sua aplicabilidade. Visando um processo alternativo, foi desenvolvido um processo de soldagem no estado sólido denominado *Friction Stir Welding* - FSW. A principal vantagem deste processo é que a soldagem ocorre a uma temperatura abaixo da temperatura de fusão do material, o que elimina defeitos provenientes da solidificação. Desde a sua invenção, o FSW obtém atenção mundial, já que ligas estruturais de difícil soldabilidade apresentaram excelentes resultados metalúrgicos e mecânicos após a soldagem (FIORAVANTI, 2009).

A soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) é um processo de união no estado sólido, que tem sido considerado o mais importante desenvolvimento na tecnologia



## XIV SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Inteligência Artificial: A Nova Fronteira da Ciência Brasileira

07 a 12 de dezembro de 2020

ISSN 2594-8237

de soldagem, na última década, especialmente na união de ligas leves como as ligas de alumínio (VILAÇA, 2003). O processo FSW é realizado por meio de uma ferramenta rotativa não-consumível, que é introduzida na linha da junta a ser soldada, sendo deslocada ao longo desta linha. O contato da ferramenta gera calor por atrito, promovendo a mistura mecânica dos materiais ainda no estado sólido, sem a ocorrência de fusão (MISHRA e MURRAY, 2007). Como principais vantagens dessa técnica, pode-se destacar o menor consumo de energia, a não utilização de metais de adição e a não utilização de gases de proteção e fluxo, que geram problemas inclusive ambientais. Enfatizando sempre que a soldagem é feita no estado sólido e conseqüentemente os principais defeitos de soldagem providos da solidificação deixam de existir (TWI, 2020).

O grande desafio do processo FSW está em aperfeiçoar os parâmetros do equipamento que realiza a soldagem, juntamente com um perfil satisfatório da ferramenta. Estes fatores são dependentes uns dos outros, além de influenciarem na geração de calor no processo e, por conseguinte, no aparecimento ou não de defeitos, ocasionados pelo escoamento do material aquecido. Por este motivo, o presente trabalho tem como objetivo o estudo da influência do perfil da ferramenta na obtenção de soldas pelo processo FSW. As juntas soldadas foram avaliadas por meio de análise visual, caracterização macrográfica e ensaios de tração. As propriedades mecânicas da junta soldada foram analisadas e comparadas com as propriedades do material base. O restante do artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta alguns conceitos básicos e discute trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta a metodologia utilizada enquanto a Seção 4 mostra os resultados e as discussões. A Seção 5 apresenta as considerações finais e os trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

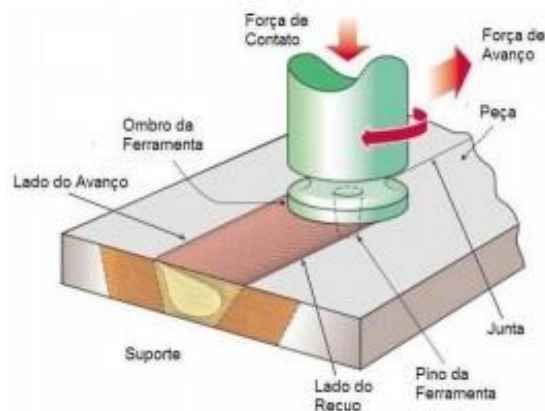
O processo de soldagem FSW é um processo de união no estado sólido que foi desenvolvido pelo TWI (*The Welding Institute*) em 1991, denominado de *Friction Stir Welding* (FSW) (THOMAS *et al.*, 1991). O processo de soldagem por fricção é considerado um processo de soldagem no estado sólido, uma vez que a temperatura de fusão dos materiais a serem soldados não é atingida (HILLER, 2007).

No processo FSW a união é obtida por meio de uma ferramenta rotativa que promove um complexo fluxo de material, valendo-se da sua capacidade de deformação plástica. A ferramenta é composta por duas regiões: pino e ombro. O pino é responsável pela mistura dos materiais das chapas, enquanto o ombro tem a função de oferecer energia térmica por meio de atrito, além de reter o material que tende a fluir da região da junta soldada (VILAÇA, 2003). Os parâmetros de soldagem (rotação, velocidade de avanço, ângulo de inclinação da ferramenta, etc.) e a geometria da ferramenta, exercem papel significativo no padrão de fluxo de material entre as chapas sendo soldadas. Para obter

soldas de qualidade (livres de defeitos e com resistência estrutural) é importante compreender as características do processo, dos parâmetros utilizados e sua relação com as características dos materiais soldados (MISHRA e MA, 2005).

O processo de soldagem FSW consiste na união por ação conjunta do calor e plastificação mecânica dos materiais, originados pela rotação de uma ferramenta atritando e deformando o material (HILLER, 2007). A Figura 1 apresenta uma representação esquemática do processo FSW.

**Figura 1 - Representação esquemática do processo FSW.**



Fonte: HILLER (2007).

O calor gerado pelo atrito e pela deformação plástica leva ao amolecimento dos materiais, aumentando a plasticidade e possibilitando a sua mistura. É intensa a deformação plástica dos materiais na vizinhança da ferramenta e a consequente alteração da microestrutura dos mesmos (SMITH, 1998).

O processo FSW aplicado a ligas de alumínio tem sido o foco principal, por isso possui muitos estudos e pesquisas na área, sendo esse material um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento do processo e, atualmente, o mais utilizado (KUMBHAR; DEY, 2011). Outro grande aspecto importante da soldagem FSW é que para sua realização não é necessário nenhum material de adição, consequentemente toda a liga de alumínio pode ser unida sem a preocupação com a compatibilidade de sua composição, que é uma grande preocupação com a solda por fusão (MISHRA e MA, 2005).

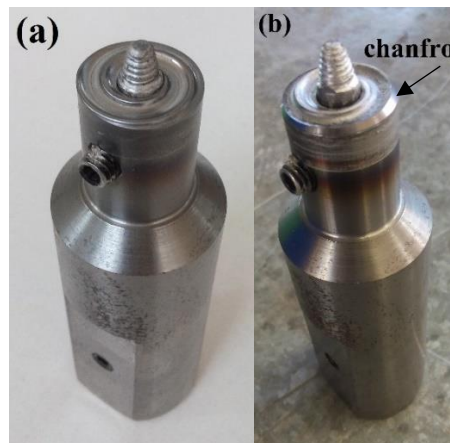
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados como metal base foram chapas de alumínio AA 5083-O, nas seguintes dimensões: 100 mm x 300 mm x 6,6 mm, sendo suas propriedades

mecânicas conforme o tratamento térmico de recozimento. O equipamento utilizado para a realização das soldagens foi o centro de usinagem de três eixos (X, Y, Z) da Deb'Maq, modelo Skybull 600.

As ferramentas desenvolvidas, fabricadas em aço AISI VC 131, possuem pino cônico roscado com diâmetro de 6 mm, o pino com rosca tem a função de diminuir a relação de volume de material deslocado pela ferramenta e a conicidade diminui a força e conseqüentemente a potência necessária da máquina. O ombro das ferramentas possui face reta com estrias em espiral, que facilitam o forjamento e conduzem o material extrudado para o centro do pino, providenciando um correto nível de forjamento. O ombro possui diâmetro de 15 mm, em duas configurações: sem chanfro e com chanfro de 1 mm x 45°. A utilização de chanfro na borda do ombro da ferramenta tem por objetivo a eliminação ou redução da formação de rebarbas. As ferramentas desenvolvidas são apresentadas na Figura 2.

**Figura 2 – Ferramentas de soldagem desenvolvidas: (a) sem chanfro e (b) com chanfro**



Fonte: Os autores (2020).

Os parâmetros de processo utilizados para soldagem estão apresentados na Tabela

1.

**Tabela 1 – Parâmetros de processo utilizados**

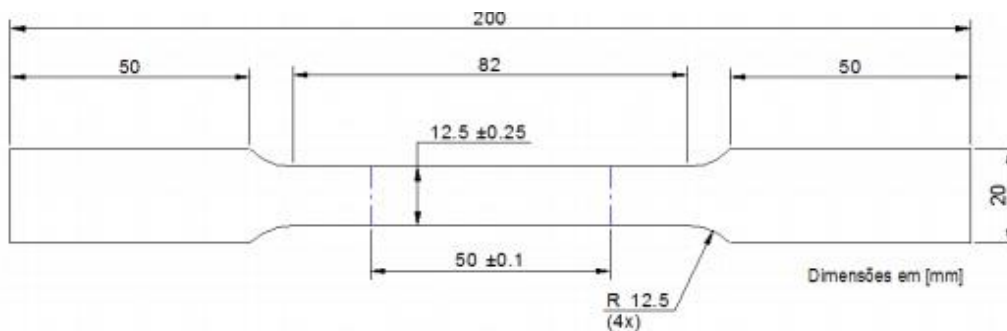
Velocidade de Rotação [rpm]	1450
Velocidade de Avanço [mm/min]	20
Penetração do Ombro [mm]	-0,40
Tempo de Aquecimento [s]	60
Altura do Pino [mm]	6,2
Sentido de Rotação	Anti-horário

Fonte: Os autores (2020).

As análises macrográficas e metalográficas foram realizadas em todas as juntas soldadas. Com as chapas soldadas foram preparados corpos de prova, por meio de corte na seção transversal das chapas, e preparadas segundo os procedimentos metalográficos padrões de embutimento, lixamento e polimento. Após a preparação metalográfica foi realizado o ataque químico com o reagente Água Régia (um terço de água destilada, um terço de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e um terço de ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ )), através da imersão por aproximadamente 20 s. A análise macrográfica foi utilizada a fim de analisar a interface da junta, defeitos de soldagem, identificação e avaliação das zonas de solda. As imagens das macrografias foram registradas com a utilização de um scanner.

Para cada chapa soldada foram extraídos quatro corpos de prova (CP's) para realização de ensaios de tração, confeccionados conforme recomendações da norma DIN EN ISO 4136:2013 “*Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test*”, na direção transversal à solda, para determinação do limite de resistência à ruptura, escoamento e o alongamento percentual do material após a soldagem, com o objetivo de possibilitar uma avaliação das perdas de resistência do material soldado em relação ao material base. Na Figura 3 podem ser observadas as dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios, do fabricante Shimadzu.

**Figura 3 – Dimensões dos corpos de prova para ensaios de tração**



Fonte: Adaptado DIN EN ISO 4136 (2013).

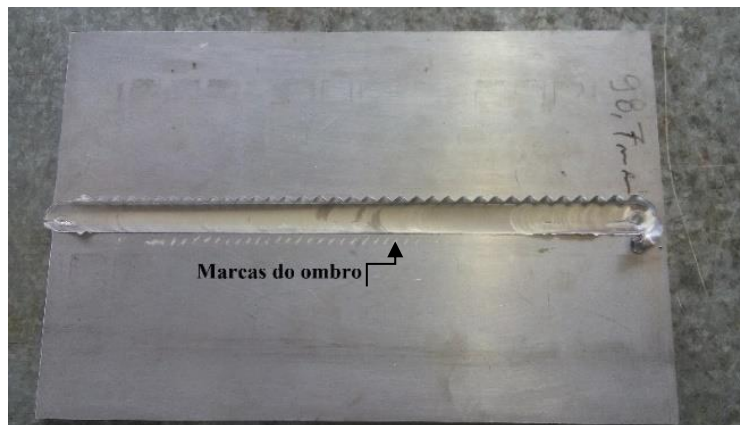
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Experimento I

Para realização do experimento I, foi utilizada a ferramenta com ombro de 15 mm sem chanfro na borda. O aspecto superficial da solda obtida é apresentado na Figura 4. O consumo de potência da máquina manteve-se constante do início ao fim da solda em 19%, evidenciando que em função do diâmetro do ombro ser pequeno a potência necessária para realização da solda é relativamente baixa. A solda obtida apresentou má qualidade,

com grande quantidade de rebarbas, descontinuidades na junta soldada, marcas do ombro da ferramenta e formação de vazios.

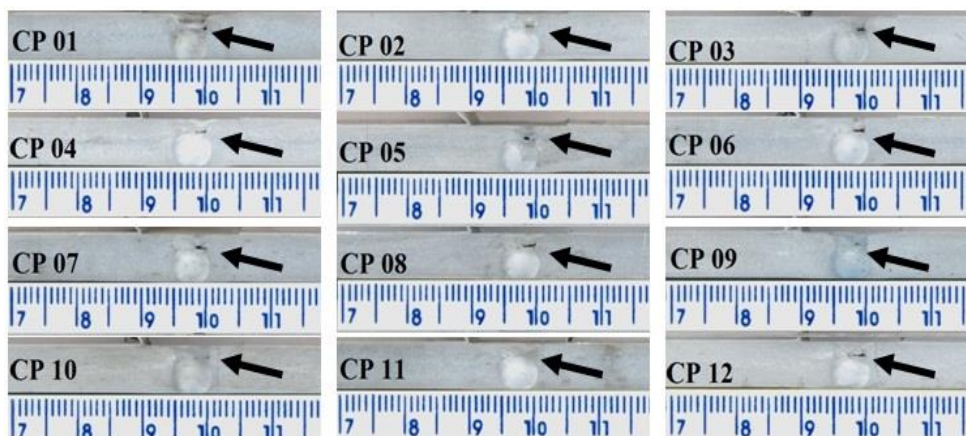
**Figura 4 – Aspecto superficial do experimento I**



Fonte: Os autores (2020).

Na análise macrográfica, apresentada na Figura 5, todos os CP's apresentaram vazios internos e descontinuidades do fluxo de material em toda a região da junta, cuja formação está relacionada a uma pressão inadequada da ferramenta na superfície da chapa, devido ao tamanho do diâmetro do ombro da ferramenta, gerando energia insuficiente para a solda. Conforme descrito por Kim *et al.*, (2006), os vazios de preenchimento podem ser causados por fornecimento insuficiente de energia, devido à ação do processo, ou por mistura anormal na junta soldada.

**Figura 5 – Macrografias do experimento I**



Fonte: Os autores (2020).

Com base nos resultados da análise macrográfica, este experimento foi reprovado e os ensaios de tração não foram realizados.

## 4.2 Experimento II

Para realização deste experimento, foi utilizada a ferramenta com diâmetro de ombro de 15 mm com chanfro de 1 mm x 45° na borda da ferramenta. O consumo de potência da máquina manteve-se constante do início ao fim da solda em 20%, ou seja, o esforço de soldagem e de pressão do ombro contra a chapa era pequeno. A Figura 6 apresenta o aspecto superficial da solda obtida.

**Figura 6 – Aspecto superficial do experimento II**



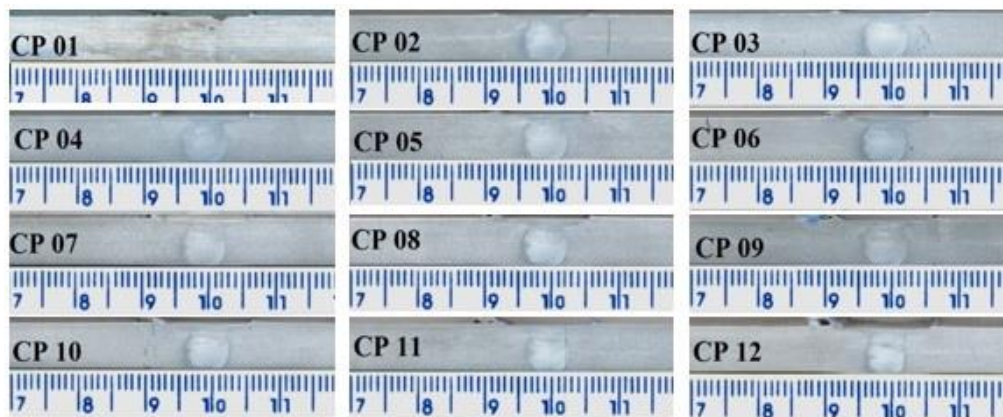
Fonte: Os autores (2020).

Na análise visual, a solda apresenta bom aspecto, houve pouca formação de rebarba no cordão de solda, devido à utilização de chanfro na borda da ferramenta. A raiz da solda foi completamente preenchida sem defeitos aparentes, evidenciando que a altura do pino e a folga entre o pino e o suporte foram bem dimensionadas.

Foram retirados CP's em corte transversal na chapa soldada e estes submetidos à análise metalográfica para avaliação da solda obtida. Na análise macrográfica, apresentada na Figura 7, pode-se perceber que a formação do *nugget* (núcleo da solda) apresenta um perfil arredondado. Houve pouca formação de rebarba devido à menor movimentação de material provocada pelo ombro da ferramenta, em função de seu diâmetro de 15 mm. Não houve formação de vazios internos e a raiz da solda foi completamente preenchida.

Os CP's foram submetidos aos ensaios de tração uniaxial para avaliação da resistência da solda obtida. Os resultados dos ensaios foram comparados com as propriedades do material base (MB) e são apresentados na Tabela 2.

**Figura 7 – Macrografias do experimento II**



Fonte: Os autores (2020).

**Tabela 2 - Resultados dos ensaios de tração do experimento F8.**

<b>Corpo de prova</b>	<b>Tensão de escoamento [MPa]</b>	<b>Tensão máxima atingida [MPa]</b>	<b>Alongamento [%]</b>
F8 - 03	117,57	267,02	14,8
F8 - 06	118,72	232,98	8,2
F8 - 09	118,59	205,40	4,8
F8 - 12	117,43	247,05	10
Média	118,08	238,11	9,45
Alumínio AA 5083	129,7	297,18	26,1

Fonte: Os autores (2020).

Analisando a tensão de escoamento medida para cada CP, todos mostraram valores abaixo do MB, sendo obtida uma média de 118,08 MPa. Em relação à tensão máxima atingida, obteve-se média de 238,11 MPa, cerca de 19,8% abaixo da tensão máxima do MB. O percentual de alongamento médio foi de 9,45%, bem abaixo do alongamento do MB que é 26,1%. Nesta análise destaca-se o CP 03 que obteve maiores valores de tensão máxima (267,02 MPa) e alongamento de 14,8%, sendo que este CP foi o que mais apresentou porosidades na região da solda. A formação das porosidades se deve ao tamanho do diâmetro de ombro utilizado (15 mm), o qual é muito pequeno e diminui a força de contato do ombro com a chapa, gerando menos calor no processo. A Figura 8 apresenta os CP's ensaiados, onde a solda realizada foi menos resistente que o MB, pois todos romperam na região soldada. Foi observada a formação de porosidades na junta soldada.



**Figura 8 – Corpos de prova submetidos aos ensaios de tração**



Fonte: Os autores (2020).

Devido ao rompimento dos corpos de prova terem ocorrido na região da junta soldada, este experimento também não foi aprovado.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos estudos realizados conclui-se que o processo FSW é uma solução promissora para a fabricação de estruturas de alumínio em vários setores da indústria. Apresenta grande potencialidade de utilização, além de benefícios, como por exemplo, economia de energia, soldas de elevada resistência mecânica e é uma técnica versátil que permite a união de materiais dissimilares. A qualidade da solda obtida pelo processo FSW depende diretamente dos parâmetros atribuídos ao processo e da geometria da ferramenta utilizada. Este trabalho teve como objetivo o estudo da influência do perfil da ferramenta na obtenção de soldas pelo processo FSW. Com as duas geometrias de ferramentas desenvolvidas, e com os parâmetros de processo utilizados, as seguintes conclusões podem ser feitas:

A ferramenta com diâmetro de ombro de 15 mm sem chanfro não foi eficiente para obtenção de soldas pelo processo FSW, visto que na análise visual foram verificadas discontinuidades na junta soldada e formação de vazios. Com a análise macrográfica, comprovou-se a ineficiência da ferramenta, todos os CP's apresentaram vazios internos e discontinuidades do fluxo de material em toda a região da junta.

No segundo experimento, o chanfro utilizado na borda do ombro da ferramenta contribuiu efetivamente para a redução da formação de rebarbas. Na avaliação visual da junta soldada verificou-se o bom aspecto da solda, sem defeitos aparentes. Com a análise macrográfica observou-se que não houve formação de vazios internos e a raiz da solda foi completamente preenchida. Entretanto, após a realização dos ensaios de tração, conclui-se que a solda realizada foi menos resistente que o material base, pois todos



## XIV SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Inteligência Artificial: A Nova Fronteira da Ciência Brasileira

07 a 12 de dezembro de 2020

ISSN 2594-8237

romperam na região soldada. Sendo assim, com as geometrias de ferramentas desenvolvidas, não foram obtidas soldas de qualidade pelo processo FSW. Como sugestões para continuidade do trabalho, sugere-se o aumento do diâmetro do ombro da ferramenta, possibilitando um aumento da força de contato do ombro com a chapa, gerando mais calor no processo, e conseqüentemente, melhor consolidação da solda. As principais limitações do trabalho estão relacionadas ao aprimoramento dos parâmetros de soldagem, visto que para cada geometria de ferramenta desenvolvida, novos parâmetros precisam ser testados e aperfeiçoados.

### REFERÊNCIAS

FIORAVANTI, A. S. **Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD AA2024-t3 e AA7075-t6**. 2008. 93 p. Dissertação (Mestrado em Processos de Fabricação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

HILLER, D.J. **Estudo de Parâmetros e Percursos no Processo de Soldagem de Mistura por Atrito (FSW) da Liga de Alumínio 5052**. 2007. 128f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ISO 4136:2012. **Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test**. Berlin, 2012.

KIM, Y. G; FUJI H.; TSUMURA, T.; KOMOZAKI, T.; NAKATA, K.; Three Defect Types in Friction Stir Welding of Aluminum die Casting Alloy. **Materials Science and Engineering**, USA, vol. 415, p 250-254, 2006.

KUMBHAR, N. T.; DEY, G. K. Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. **Research article**. BARC Newsletter. n. 321, p. 11–17, 2011.

MISHRA, R. S. e MA, Z. Y. Friction Stir Welding and Processing. **Materials Science and Engineering**, USA, vol. 50, p. 1-78, 2005.

MISHRA, R. S. e MURRAY, W. M. **Friction Stir Welding and Processing**. ASM International, 2007.

SMITH, W. F., **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, 3ª Edição, McGraw-Hill, Portugal, 1998.

THE WELDING INSTITUTE (TWI). **Materials joining technology home page**. Disponível em: <[www.twi.co.uk](http://www.twi.co.uk)>. Acesso em: 22 out. 2020.

THOMAS, W. M.; NICHOLAS, E. D.; NEEDHAM, J. C.; MURCH, M. G.; TEMPLESMITH, P.; DAWES, C.J. **Friction Stir Butt Welding. International Patent Application PCT/GB92/02203 and G.B. Patent Application 9125978.8**, Dec. 1991.

VILAÇA, P.; **Fundamentos dos Processos de Soldadura por Fricção Linear: Análise Experimental e Modelação Analítica**. PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2003.