

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Maria Gabriela Moraes Duque de Castilho**

**ESTUDO ANALÍTICO SOBRE O PROCESSO DE *FRICTION*  
*STIR WELDING* (SOLDAGEM POR FRICÇÃO) E SUAS  
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

**Taubaté – SP**

**2017**

**Maria Gabriela Moraes Duque de Castilho**

**ESTUDO ANALÍTICO SOBRE O PROCESSO DE *FRICTION*  
*STIR WELDING* (SOLDAGEM POR FRICÇÃO) E SUAS  
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

Trabalho de Graduação apresentado para  
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia  
Mecânica do Departamento de Engenharia  
Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Paulo Cesar Corrêa Lindgren

Co-orientador: Profa. Maria Regina Hidalgo de  
Oliveira Lindgren

**Taubaté – SP**

**2017**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado  
de Bibliotecas / Unitau - Biblioteca das Engenharias**

C352e

Castilho, Maria Gabriela Moraes Duque de  
Estudo analítico sobre o processo de friction stir welding  
(soldagem por fricção) e suas aplicações industriais. / Maria  
Gabriela Moraes Duque de Castilho. - 2017.

35f. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) –  
Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia  
Mecânica e Elétrica, 2017

Orientador: Prof. Me. Paulo Cesar Corrêa Lindgren,  
Coorientador: Profa. Ma. Maria Regina Hidalgo de  
Oliveira Lindgren, Departamento de Engenharia Mecânica e  
Elétrica.

1. Friction stir welding. 2. FSW. 3. Aço. 4. Alumínio. I.  
Título.

# Maria Gabriela Moraes Duque de Castilho

## ESTUDO ANALÍTICO SOBRE O PROCESSO DE *FRICITION STIR WELDING* (SOLDAGEM POR FRICÇÃO) E SUAS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Data: 27/04/2017

Resultado: Aprovada com 9,4.

### BANCA EXAMINADORA

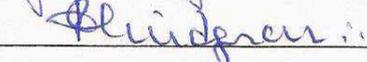
Prof. Paulo Cesar Correa Lindgren (orientador)

Universidade de Taubaté

Assinatura 

Prof. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren

Universidade de Taubaté

Assinatura 

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Jorge e Lúcia

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, meu sincero obrigado, por todos os ensinamentos, pela compreensão mesmo em momentos de nervosismo.

Ao professor Prof. MSc. Paulo Cesar Corrêa Lindgren pela orientação e apoio para a realização desse trabalho.

À Universidade de Taubaté, pela oportunidade de realizar o curso e proporcionar um ambiente criativo e amigável.

E aos colegas que me incentivaram e ajudaram ao longo de deste trabalho.

## RESUMO

A necessidade de materiais de baixo peso e alta resistência tem levado ao surgimento de novos processos de soldagem. Em 1991, foi desenvolvido no TWI - *The Welding Institute* o processo de soldagem *Friction Stir Welding* (FSW), que consiste na soldagem no estado sólido, na qual uma ferramenta giratória aquece os materiais a serem soldados tornando-os mais dúcteis, sem originar a fusão dos mesmos. A utilização dessa técnica elimina defeitos como trincas, porosidades e perdas nas propriedades mecânicas. Devido a problemas como consumo de combustíveis, geração de rejeitos durante a produção e emissão de gases poluentes, indústrias automobilística e aeronáutica vem utilizando o processo de FSW na soldagem de aço e alumínio a fim de reduzir o peso dos carros e aviões. Ao soldar por *Friction Stir Welding* um sub chassi, foi observado uma redução de 25% do peso da estrutura. FSW mostra-se mais vantajosos do que a rebiteagem na produção de aviões, pois elimina grande parte de prendedores mecânicos, além da alta produtividade do processo. Por isso soldagem por *Friction Stir Welding* apresenta-se como uma opção a métodos convencionais de união, permitindo ao engenheiro unir peças de materiais com diferentes propriedades em um mesmo componente.

**Palavras-chave:** *Friction Stir Welding*, FSW, aço, alumínio.

## ABSTRACT

The need for materials of low weight and high resistance to lead to the process of new welding processes. In 1991, it was developed in the TWI - The Welding Institute or Fusing Welding by Friction (FSW), which consists of solid state welding, in which a rotating tool, is a material that is a soldier making them more ductile, without causing them to merge. The use of the technique, such as cracking, porosity and losses in mechanical properties. Due to problems such as fuel consumption, generation of tailings during the production and emission of gaseous, automotive and aeronautical industries, using the process of selling steel and aluminum to reduce the weight of cars and airplanes. When welding by Friction Stir Welding a sub chassis, a reduction of 25% of the weight of the structure was observed. FSW is more advantageous than riveting in the production of airplanes, since most of the mechanical fasteners, besides the high production of the process. Therefore welding by Friction Stir Welding presents itself as an option of conventional joint methods, allowing the engineer to join pieces of materials with different properties in the same component.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Steel, Aluminum.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1	Objetivo .....	10
1.2	Delimitação do Estudo.....	10
1.3	Relevância do Estudo .....	11
2	REVISÃO DA LITERATURA .....	12
2.1	Aços Inoxidáveis .....	12
2.2	Propriedades Físicas, Químicas e Mecânicas dos Aços Inoxidáveis .....	13
2.3	Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis .....	14
2.4	Alumínio .....	15
2.5	Propriedades Físicas, Químicas e Mecânicas do Alumínio.....	16
2.6	Soldabilidade do Alumínio .....	17
2.7	Soldagem por Fricção .....	18
2.8	Soldagem por Fricção Linear (Friction Stir Welding) .....	19
2.9	Parâmetros no Processo FSW .....	21
2.10	Defeitos da Soldagem .....	23
2.11	Vantagens e Desvantagens .....	25
3	METODOLOGIA.....	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1	Resultado para Ligas de Alumínio.....	28
4.2	Resultado para Aço .....	28
4.3	Friction Stir Welding nas Indústrias .....	28
5	CONCLUSÃO.....	32
	REFERÊNCIAS .....	33

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas de tensão-deformação para aços inoxidáveis.....	13
Figura 2 – Classificação da Soldabilidade das ligas de alumínio .....	17
Figura 3 – Processo de Soldagem por Fricção .....	18
Figura 4 – Processo de Friction Stir Welding .....	20
Figura 5 – Geometria para ferramentas de FSW .....	21
Figura 6 – Vista lateral da ferramenta e do material no processo de FSW .....	22
Figura 7 – Defeito de vazio interno.....	23
Figura 8 – Vazios e rebarbas ao longo da superfície .....	23
Figura 9 – Defeitos de raiz .....	24
Figura 10 – Excesso de rebarba .....	25
Figura 11 – Modelo do Honda Accord 2008 e Modelo Honda Accord 2013.....	29
Figura 12 – Eclipse 500.....	30

## **1 INTRODUÇÃO**

Utilizar materiais mais leves em veículos e aviões significa reduzir o consumo de combustível, emitir menos poluentes na atmosfera e uma melhor relação custo benefício.

Visando estes e outros atrativos, indústrias automobilística e aeronáutica tem buscado utilizar materiais como o alumínio, que alia baixo peso com elevada resistência mecânica, em componentes de estrutura. No entanto o desafio de unir materiais dissimilares como o aço e alumínio, já que muitos componentes de carros e aviões ainda são feitos de aço, tornou-se um desafio.

Dessa forma, o processo de *Friction Stir Welding* mostra-se como resposta a essa necessidade por apresentar resultados satisfatórios ao unir materiais dissimilares, apresentando na junta soldada propriedades mecânicas iguais ou superiores às obtidas por processos convencionais e a ausência de defeitos como trincas e porosidades.

É um processo que consome menos energia, não utiliza metais de adição, nem gases de proteção, insumos ou fluxos. Além de ser um processo automatizado o que garante rapidez, repetibilidade e redução dos custos.

### **1.1 OBJETIVO**

O principal objetivo desse trabalho é compreender e analisar o processo de *Friction Stir Welding* ao soldar materiais dissimilares como aço e alumínio, avaliando as vantagens e desvantagens desse processo para indústrias automobilística e aeronáutica.

### **1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO**

Esta pesquisa delimitou-se no processo de *Friction Stir Welding* ao soldar aço e alumínio. Embora seja um processo novo e pouco utilizado, é um método inovador capaz de unir dois materiais diferentes mais utilizados na fabricação de carros e aviões.

### 1.3 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

A necessidade de unir materiais dissimilares nas indústrias de transporte faz com que novos processos de soldagem sejam desenvolvidos e aperfeiçoados. A utilização da soldagem em estado sólido como, o *Friction Stir Welding* tem sido utilizado para unir ligas de alumínio e aço, porém a união destes ainda é um desafio industrial.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Aços Inoxidáveis

Segundo Callister (2002), aços são ligas Ferro-Carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga. Em função disso, existem ligas com composições diferentes e que são submetidas a tratamentos térmicos diferentes.

Devido a corrosão, foram desenvolvidas ligas especiais de aço chamadas de aços inoxidáveis, no qual, formam um grande grupo em que o cromo é um elemento de liga que, ao ser adicionado a partir de 12%, melhora significativamente a resistência à corrosão em ligas a base de ferro. Isso se dá a capacidade do cromo em produzir uma fina camada de óxido altamente aderente à superfície dos aços inoxidáveis, protegendo – os em ambientes agressivos (KOZMINSKI, 2015).

Outros elementos quando adicionados, também concedem a liga diferentes características e propriedades mecânicas. O níquel, por exemplo, estabiliza a estrutura austenítica, melhora a ductilidade, resistência a corrosão, usinabilidade e a soldabilidade. Manganês em altas porcentagens pode afetar a resistência à corrosão dos aços. O carbono provoca diminuição na resistência a corrosão quando no estado dissolvido. O molibdênio e o cobre aumentam a resistência a corrosão em presença de ácido sulfúrico e sulfuroso quando sujeito a altas temperaturas e pressões. Silício e alumínio melhoram a resistência em altas temperaturas. Titânio e nióbio são estabilizadores quando adicionados aos aços austeníticos, evitando a corrosão intergranular devido a sua afeição pelo carbono (ALVES, 2010).

Conforme a AISI, os aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco categorias de acordo com a composição química, microestrutura, estrutura cristalina das fases presentes, ou tratamento térmico utilizado. As cinco categorias são:

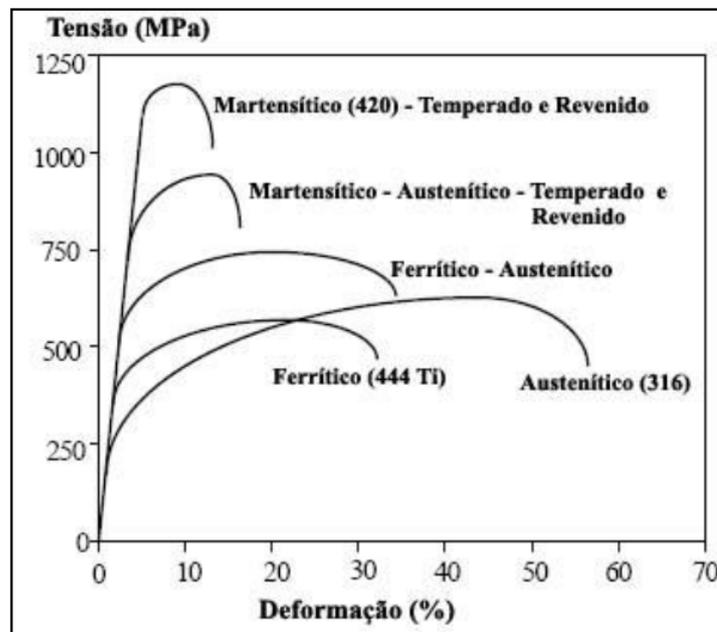
- Aços inoxidáveis da série 200, com cromo, níquel e manganês;
- Aços inoxidáveis da série 300, com cromo e níquel;
- Aços inoxidáveis da série 400, com cromo ou cromo carbono;
- Aços inoxidáveis da série 500, com cromo molibdênio;
- Aços inoxidáveis duplex, com cromo, níquel, titânio ou molibdênio.

## 2.2 Propriedades Físicas, Químicas e Mecânicas dos Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis apresentam propriedades físicas diferentes as dos aços carbono, possuindo baixo ponto de fusão, menor condutividade térmica, maior coeficiente de expansão térmica e menor condutividade elétrica, o que resulta em procedimentos diferentes de soldagem. Possuem também a capacidade de formar uma película fina, invisível e aderente ao material rica em cromo, protegendo toda superfície de agentes corrosivos. Quando submetido à usinagem o filme é reparado instantaneamente na presença de oxigênio. O acréscimo de molibdênio nos aços ferríticos e austeníticos melhora a resistência a corrosão por *pitting* e a sua resistência mecânica (ALVES, 2010).

Além da resistência a corrosão, as propriedades mecânicas como, resistência a tração, ductilidade, tenacidade, são fatores levados em consideração na escolha de um determinado aço inoxidável. Na Figura 1 são mostradas variações das propriedades de acordo com cada classificação por meio das curvas tensão-deformação (ALVES, 2010).

**Figura 1** - Curvas de tensão-deformação para aços inoxidáveis



**Fonte:** Alves (2010)

Os aços martensíticos demonstram boa resistência à tração e baixos limites de escoamento, o que caracteriza baixa ductilidade. Os austeníticos ocorre o

inverso, eles apresentam baixo limite de resistência a tração e alta ductilidade em relação às demais classes (ALVES, 2010).

### **2.3 Soldabilidade do Aços Inoxidáveis**

De acordo com Modenesi, (2011) os aços inoxidáveis são considerados mais difíceis de soldar do que aços de baixo carbono, mas as dificuldades variam de acordo com cada tipo de aço. Uma característica fundamental na soldagem é a necessidade de limpeza visando minimizar contaminações que deteriore a resistência a corrosão. Cuidados com a forma do cordão também são importantes, tendo em vista que irregularidades superficiais podem se tornar pontos de acúmulo de sujeira, dando início a corrosão.

Com exceção dos aços com adição de enxofre para facilitar a usinagem, os aços austeníticos são considerados simples de soldar. Possuem coeficiente de expansão térmica (cerca de 45%) e resistência mecânica elevadas, e baixa condutividade térmica do que os aços doces. Conforme sua composição química (maior quantidade de elementos gamagênicos), o metal de solda pode solidificar-se com uma estrutura completamente austenítica. Nestas condições, a solda é muito sensível ao aparecimento de trincas durante a solidificação. Este problema é minimizado pela seleção de metal de adição que possibilite uma estrutura austeno-ferrítica na solidificação e resulte em cerca de 4 a 10% de ferrita na solda à temperatura ambiente. Nos casos em que a seleção de um consumível deste tipo não seja possível, isto é, havendo a necessidade de uma estrutura completamente austenítica na solda (em ambientes altamente corrosivos ou em aplicações criogênicas, por exemplo), eletrodos com baixos teores de enxofre e fósforo e uma elevada relação Mn/S devem ser usados junto com um procedimento de soldagem que minimize o nível de tensões na solda (MODENESI, 2011).

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam coeficiente de expansão térmica semelhante aos dos aços doces, tendo conseqüentemente menor tendência à distorção. No entanto, apresentam sérios problemas de perda de ductilidade e tenacidade e de resistência à corrosão da região da solda devido a formação de uma estrutura de granulação grosseira, à precipitação de carbonetos e nitretos e à formação de uma rede de martensita ao longo dos contornos dos grãos de ferrita. Estes problemas limitam a soldagem em aplicações de pequena responsabilidade

para maioria dos aços ferríticos. Nestes casos, para algumas aplicações, é recomendável utilizar metal de adição para restringir problemas na zona termicamente afetada (ZTA) da solda (MODENESI, 2011).

Os aços martensíticos de baixo teor de carbono podem ser soldados sem grandes problemas. No entanto, os com teor acima de 0,15% tendem a ser temperáveis ao ar e, assim é necessário o uso do pré-aquecimento e frequentemente, de pós-aquecimento para o processo de soldagem. Temperatura de pré-aquecimento varia entre 230 e 290°C, e a de pós-aquecimento, que deve ser feito imediatamente após a soldagem, varia de 650 a 760°C, seguido de um lento resfriamento até a temperatura ambiente (MODENESI, 2011).

Aços inoxidáveis duplex tendem a ser facilmente soldáveis desde que sejam tomados cuidados necessários. Fazer um resfriamento muito rápido pode potencializa um teor muito elevado de ferrita e a precipitação de nitretos de cromo na ZTA, prejudicando a tenacidade e a resistência à corrosão da solda. Por outro lado, um resfriamento muito lento e a manutenção por tempos longos a temperaturas entre 600 a 1000°C pode levar a precipitação de compostos intermetálicos que também prejudicam as propriedades mecânicas e químicas da solda. Portanto, controlar a energia de soldagem e a temperatura pré-aquecimento é muito importante para estes materiais (MODENESI, 2011).

## **2.4 Alumínio**

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante no planeta Terra, no entanto apenas recentemente vem sendo usado em escala industrial. Devido a propriedades como, baixa densidade e excelente resistência à corrosão, facilidade de processamento através de diversos métodos de fabricação e elevada condutividade térmica e elétrica, fazem com que o alumínio ocupe um lugar de destaque principalmente na indústria automotiva e aeroespacial (ALMEIDA, 2015).

Por causa da sua baixa resistência mecânica, alguns elementos são adicionados como o cobre, silício, manganês, lítio, magnésio e zinco para aumentar a resistência sem prejudicar as outras propriedades. E Isso facilitou o desenvolvimento de novas ligas estruturais combinando as propriedades adequadas as suas aplicações específicas (BRZOSTEK, 2012; ALVES, 2010).

Portanto essas ligas são classificadas em ligas fundidas, cujas características e propriedades mecânicas são obtidas por meio de fundição, e ligas de alumínio trabalhadas que são aquelas que têm as suas propriedades mecânicas obtidas por meio de trabalho mecânico de laminação, extrusão, forjamento (BRZOSTEK, 2012; ALVES, 2010).

## **2.5 Propriedades Físicas, Químicas e Mecânicas do Alumínio**

O alumínio e suas ligas possuem baixa massa específica ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) o equivalente a um 1/3 da massa específica do aço ( $7,8 \text{ g/cm}^3$ ) e 30% da do cobre ( $8,9 \text{ g/cm}^3$ ) (ALVES, 2010).

A condutividade térmica, uma das mais altas entre os materiais, é outro diferencial do alumínio e suas ligas. Essa propriedade influencia sua soldabilidade, pois requer um fornecimento cinco vezes maior do que o calor necessário para a soldagem do aço, isso significa a necessidade de uma fonte de calor com maior intensidade para realizar uma boa soldagem. A difusibilidade térmica também é elevada. Quando é feita soldagem no estado sólido entre materiais dissimilares do tipo alumínio/aço inoxidável, a alta difusibilidade do alumínio em relação ao aço inoxidável pode ser favorável a formação de uma junção com boas propriedades mecânicas (ALVES, 2010).

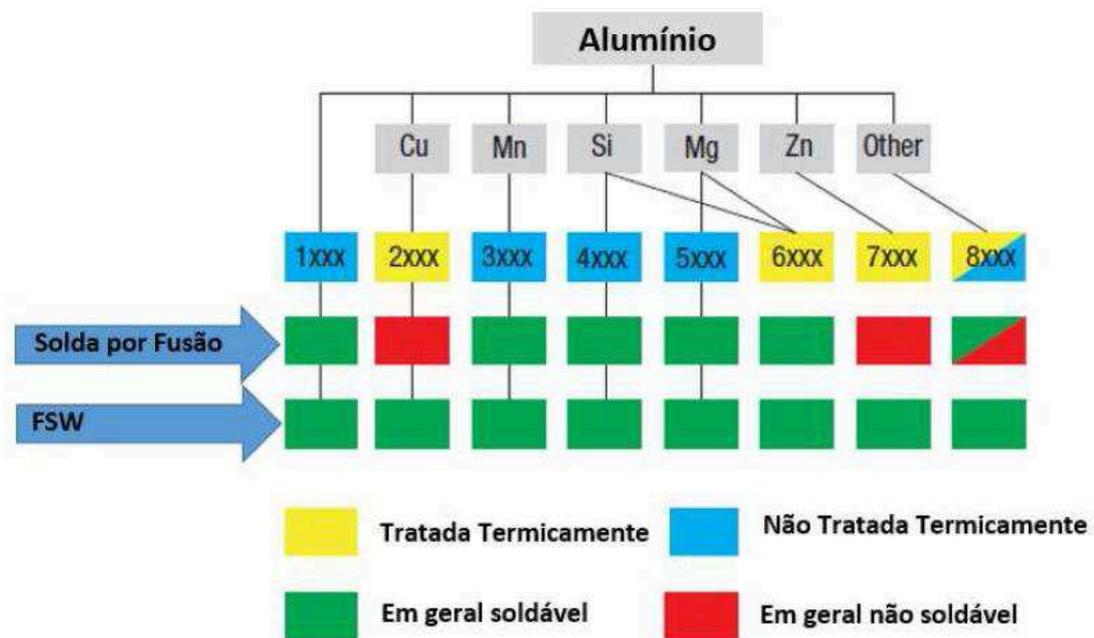
A principal característica do alumínio e suas ligas é a formação da camada natural de óxido na sua superfície. Essa camada é formada a partir do contato do alumínio com o oxigênio presente na atmosfera e tem a função de proteger o metal contra o ataque dos mais variados meios, resultando assim a excelente resistência a corrosão. Essa resistência pode ser melhorada através dos tratamentos superficiais de alodinação e anodização, objetivando aumentar essa camada de óxidos (ALVES, 2010).

A sua resistência mecânica varia de 70 MPa a 600 MPa. Quanto mais puro o alumínio, mais baixa é a sua resistência mecânica e sua dureza, e maior é a sua ductilidade. Conforme são adicionados elementos de liga essa resistência aumenta (ALVES, 2010).

## 2.6 Soldabilidade do Alumínio

Propriedades como, formação da camada de óxidos, alta condutividade, elevado coeficiente de expansão térmica e baixo ponto de fusão, tornam o processo de soldagem do alumínio diferente dos demais materiais, como por exemplo o aço. A Figura 2 apresenta uma classificação geral quanto a soldabilidade das ligas de alumínio, em que a solda por fusão neste caso é caracterizada pelos processos de TIG e MIG (ALMEIDA, 2015).

**Figura 2** – Classificação da Soldabilidade das ligas de alumínio



**Fonte:** Almeida (2015)

Segundo Olson (1977) as ligas das séries 1xxx, 3xxx, 5xxx e 6xxx são as que apresentam melhor soldabilidade por processo de soldagem por fusão. As séries 4xxx e 2xxx podem ser soldadas, mas requerem técnicas especiais sofrendo assim perda de ductilidade. Por fim, as ligas de alta resistência mecânica da serie 7xxx não são recomendadas para soldagem por fusão, mas vale destacar que as ligas 7055 e 7039 foram desenvolvidas com o intuito de melhorar a soldabilidade.

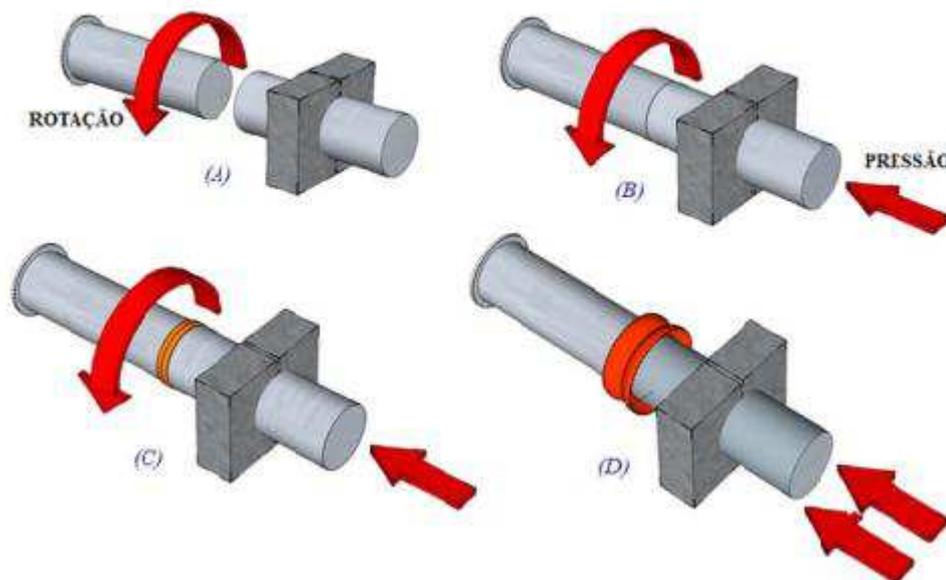
No entanto, é possível observar que diferentemente dos processos convencionais, a soldagem por fricção (*Friction Stir Welding* – FSW) é considerada em geral soldável para todas as ligas de alumínio. Isto ocorre, pelo fato da soldagem por fricção ser um processo no estado sólido, o que faz com que os problemas encontrados na soldagem por fusão, como por exemplo, distorções significativas dos

componentes a serem soldados que podem dar origem a fissurações devido às tensões envolvidas durante a solidificação da solda devido ao excessivo aporte térmico envolvido nos processos de soldagem por fusão, atuam de forma menos intensa no processo de soldagem por fricção (ALMEIDA, 2015).

## 2.7 Soldagem por Fricção

Segundo Wainer *et al.* (1992) soldagem por fricção ou soldagem por atrito, é um processo no estado sólido em que a união dos materiais ocorre por causa da conversão de energia mecânica em energia térmica. O calor gerado deve-se à pressão exercida de uma peça que está em alta rotação contra outra que está fixa, conforme mostra a Figura 3.

**Figura 3** – Processo de Soldagem por Fricção



**Fonte:** Mattei (2011)

No início do processo o atrito é obtido através do contato entre as peças, ao elevar a pressão, eleva-se também a temperatura facilitando a deformação plástica nas superfícies de contato, fazendo com que a união se dê por caldeamento (WAINER *et al.*, 1992). A soldagem ocorre em poucos segundos, não sendo necessário utilizar materiais de preenchimento, atmosferas protetoras e nem adição de fundentes (MATTEI, 2011).

A rápida variação de temperatura do metal sob elevada pressão em um volume limitado, faz com que o processo produza uniões com estrutura metalúrgica composta por grãos finos e equiaxiais (ALVES, 2010). Tornando nas junções as propriedades mecânicas de impacto, dobramento e tração igual ou superior ao dos materiais soldados (WAINER *et al.*, 1992).

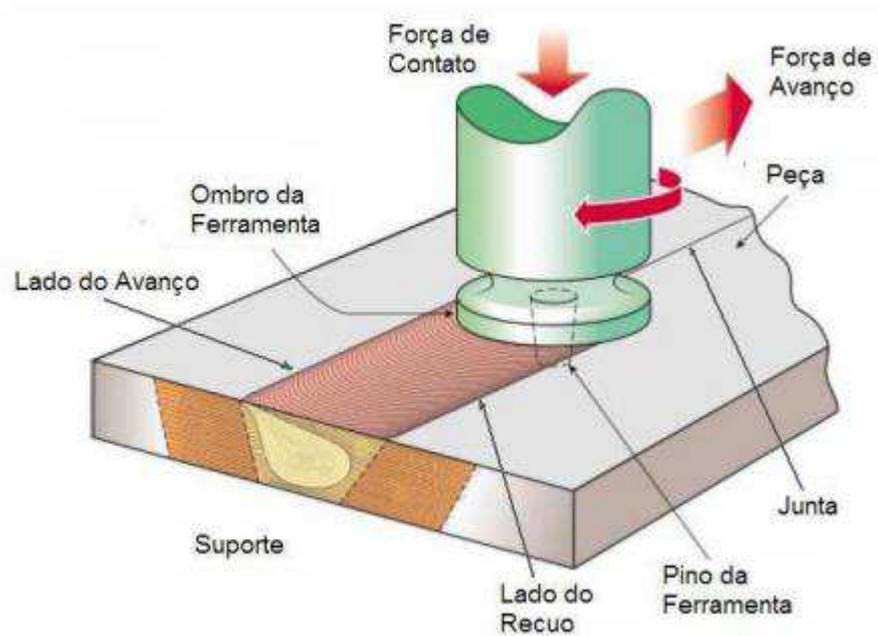
A soldagem por fricção por ser dividida em dois métodos, por atrito direto e por atrito inercial, cujas diferenças consistem na geração de energia. No método por atrito direto, também conhecido como método russo, o equipamento parecido com um torno possui o controle da força axial, onde o ciclo de soldagem possui uma fase de atrito e geração de calor, outra de parada do movimento rotativo e por fim uma última etapa de forjamento. No outro método, denominado de método americano, a peça é presa a um volante rotativo que controla a energia de soldagem, onde a força axial aplicada resulta na redução da rotação do volante, sendo o processo constituído por duas fases, atrito e forjamento (WAINER *et al.*, 1992; ASM, 1993).

## **2.8 Soldagem por Fricção Linear (*Friction Stir Welding*)**

Criada e patenteada na Inglaterra pelo TWI (*The Welding Institute*) em 1991, soldagem por fricção linear ou *Friction Stir Welding* é um processo no estado sólido, no qual uma ferramenta cilíndrica de alta resistência é rotacionada e lentamente introduzida na área a unir as duas peças, como mostra a Figura 4 (MATTEI, 2011; SANTOS *et al.*, 2004).

Ao ser inserida nas juntas de topos, uma ferramenta de giro não consumível gera calor, provocando a plastificação dos materiais resultando assim a mistura de ambos os lados da junta. Desse modo o processo de FSW baseia – se em quatro fases: a fase de imersão da ferramenta em rotação, na qual a solda é iniciada, a fase do tempo de permanência para aquecimento no local de imersão com a finalidade de que a ferramenta e as peças 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 (ALMEIDA, 2015).

**Figura 4 – Processo de *Friction Stir Welding***



**Fonte:** Hiller (2007)

A ferramenta de soldagem por não ser consumível, requer uma geometria que gere uma boa solda, tenha uma vida útil considerável e não cause toques excessivos no equipamento. Seus pinos devem possuir comprimento pouco menor que a espessura do material base e diâmetro próximo da espessura do material base. Elas podem ser com ponteiros lisos, com roscas, cônicas ou com sulcos. O suporte ou ombro tem que ser três vezes maior que o diâmetro do pino, podendo ser liso, espiral, côncavo ou ter uma combinação dessas geometrias, como é possível observar na Figura 5 (MATTEI, 2011; GIPIELA, 2007).

Como a temperatura alcançada no processo de FSW é inferior a temperatura de fusão do material a ser soldado, a utilização de gases de proteção é desnecessária, visto que não há formação de poça de fusão, como acontece no processo a arco elétrico. Não havendo poça de fusão, não há geração de respingos nas juntas soldadas (GIPIELA, 2007).

**Figura 5 – Geometria para ferramentas de FSW**



**Fonte:** Mattei (2011)

As máquinas utilizadas para fresamento têm sido adaptadas com sucesso para o processo de FSW. Algumas são utilizadas para este fim já que possibilitam o controle dos principais parâmetros e movimentos inerentes ao processo. O controle da especificação do material e da geometria das peças, além da correta utilização dos parâmetros de soldagem, garante a qualidade do processo (HILLER, 2007)

## **2.9 Parâmetros no processo FSW**

Os principais parâmetros do processo de FSW consistem em velocidade de rotação e penetração da ferramenta, velocidade de avanço, geometria e material da ferramenta e força axial exercida sobre a junta. (THEODORO, 2013).

A geometria da ferramenta interfere em dois aspectos da soldagem, o calor gerado no processo e o escoamento do material. Conforme a conicidade da ferramenta, a existência ou não existência de roscas, do passo e do sentido das roscas, do comprimento do pino e do diâmetro do ombro, pode existir mais calor, mais atrito e mais deformação, tornando o escoamento do material mais complexo e

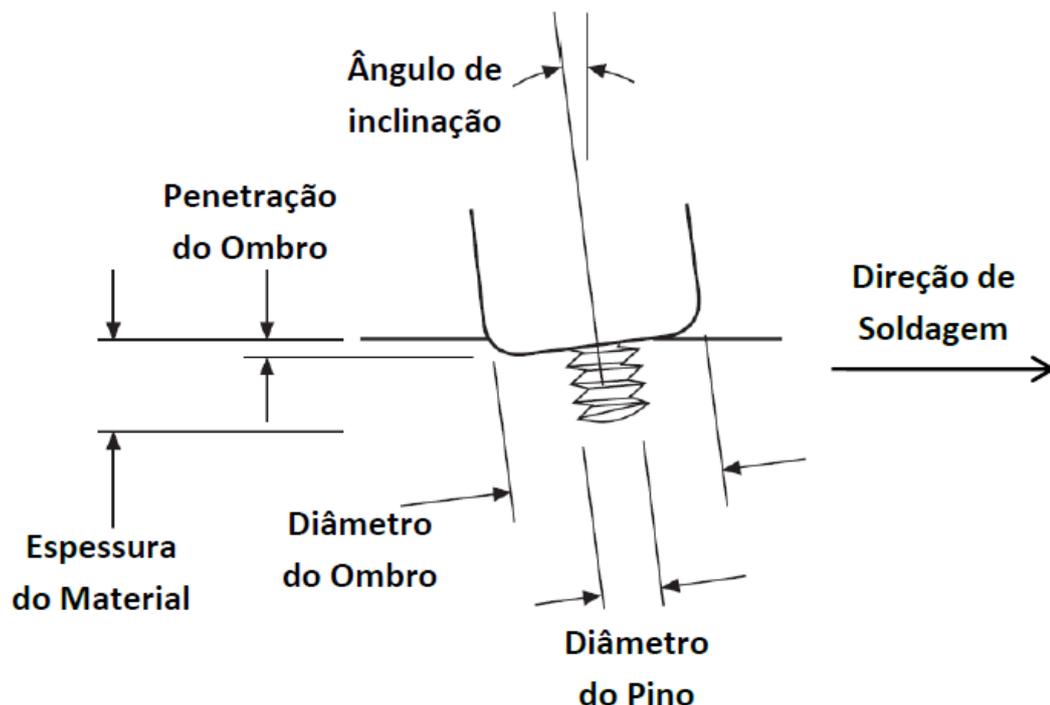
mais intenso. O calor é provocado pelo atrito e deformação, sendo o atrito maior no ombro e a deformação maior no pino. (THEODORO, 2013).

De acordo com Kozminki (2015), a velocidade de rotação é o segundo aspecto que mais influencia na geração de calor, está relacionado diretamente a quantidade de deformação plástica e mistura do material. Quanto maior a velocidade de rotação maior o atrito e conseqüentemente há mais deformação do material próximo ao ombro e ao pino.

A velocidade de avanço ou de soldagem também influencia na geração de calor, pois determina o tempo em que o material fica exposto ao atrito da ferramenta. Além disso, influencia no escoamento do material, intercalando porções de material que sofreram diferentes deformações ocasionado as linhas de fluxo (MISHRA *et al.*, 2005).

O ângulo correto de inclinação da ferramenta (Figura 6) facilita o avanço, auxilia o ombro da ferramenta a conter o material deformado e garante o atrito do ombro com a peça (MISHRA *et al.*, 2005).

**Figura 6** – Vista lateral da ferramenta e do material no processo de FSW



**Fonte:** Kozminki (2015)

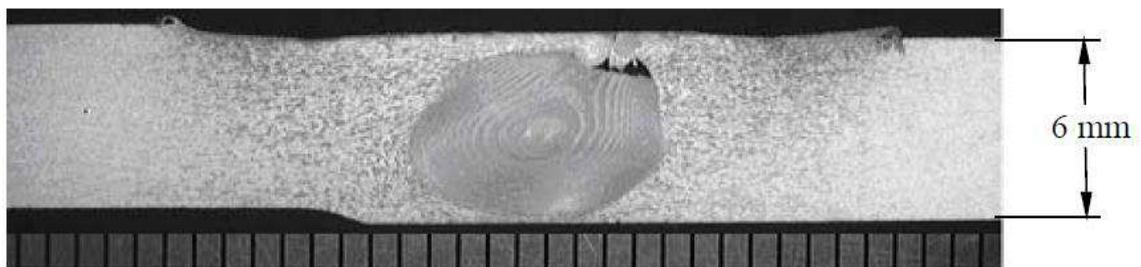
## 2.10 Defeitos da Soldagem

A escolha correta dos parâmetros de soldagem pode evitar ou minimizar os defeitos causados no processo de união. Para Almeida (2015), os defeitos característicos do processo de FSW são menores do que os encontrados na soldagem por fusão. No entanto, eles podem ser classificados em três grupos: defeitos do tipo vazio, na raiz da solda e defeitos na superfície.

O mais comum é a formação de vazios na linha de centro da solda (ou perto dela), que pode ocorrer internamente como mostra a Figura 7, ou na superfície como mostra a Figura 8. Esses vazios são causados por parâmetros e procedimentos incorretos, como pressão inadequada, alta velocidade de deslocamento e baixas rotações (HILLER, 2007; CRUZ 2009).

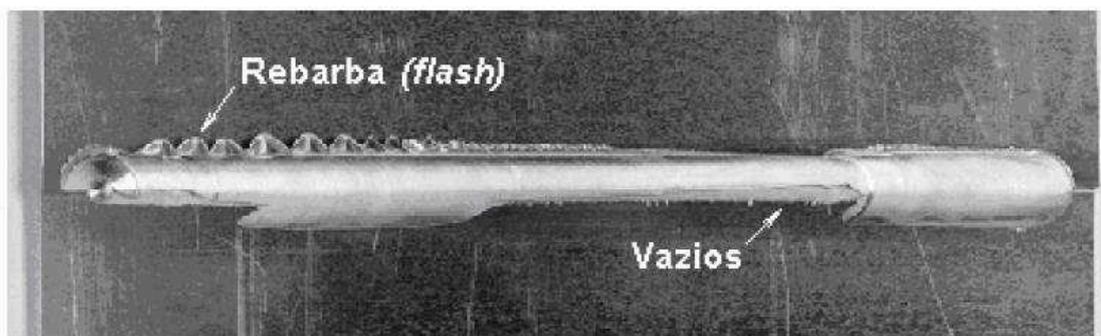
Essas falhas podem ser detectadas através de técnicas de ultrassom e raio X e evitadas selecionando valores corretos para penetração do ombro e parâmetros apropriados (CRUZ, 2009).

**Figura 7** – Defeito de vazio interno



**Fonte:** Cruz (2009)

**Figura 8** – Vazios e rebarbas ao longo da superfície

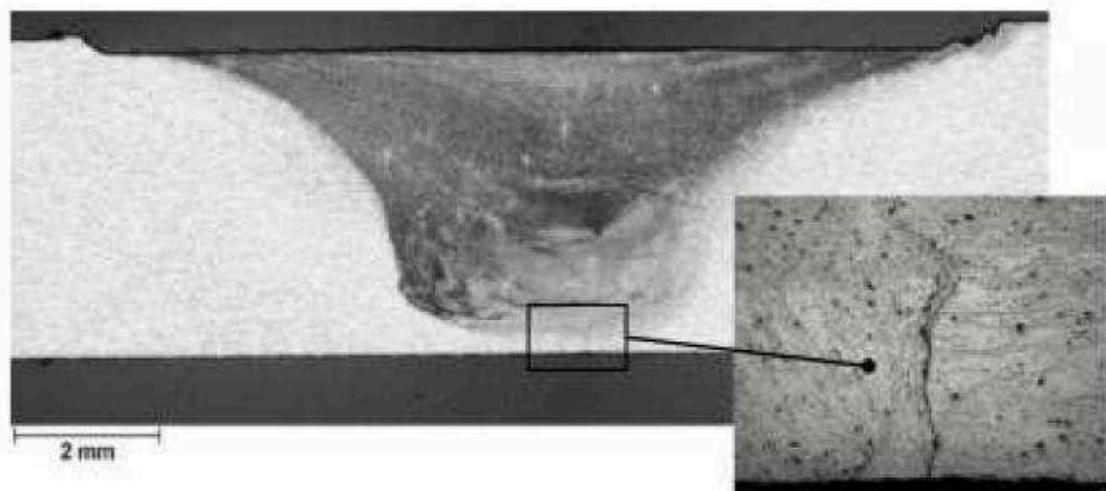


**Fonte:** Cruz (2009)

Na Figura 9 é possível observar o defeito de falha de raiz, que geralmente ocorre quando há uma penetração inadequada do pino da ferramenta, seja pelo desalinhamento da ferramenta em relação à linha da junta, ou pela existência de uma densa camada de óxido que não é dispersa na linha da junta. É classificado como defeito mais fácil de identificar, já que, é visto por exame visual e o mais destrutível em matéria de propriedades mecânicas (ALMEIDA, 2015).

Para que não ocorram tais defeitos, é recomendável a utilização de uma ferramenta com pino de tamanho correto, tal como alinhar a ferramenta em relação alinhada da junta e retirar a camada de óxido das peças a serem soldadas. Outra possível causa é o exagerado afastamento das peças (HILLER, 2007). Para Sylva *apud* Leonard (1996) afastamentos de até 36% à espessura podem ser tolerados sem alteração na resistência das soldas. No entanto, a partir deste limite defeitos podem surgir.

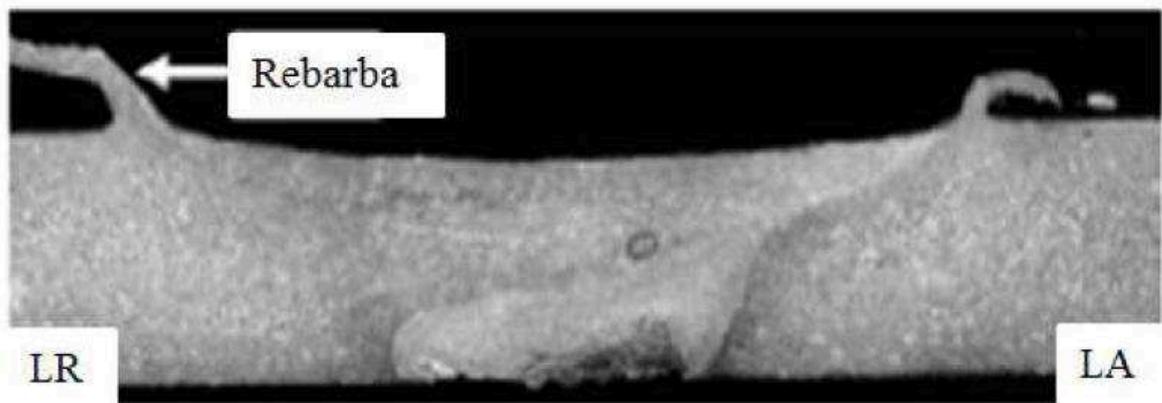
**Figura 9** – Defeitos de raiz



**Fonte:** Almeida (2015)

Alguns defeitos podem surgir na superfície da solda, porém seu baixo poder destrutivo em relação às propriedades mecânicas, não costumam ser muito estudados. A rebarba excessiva (defeito de superfície mais importante) pode ocasionar um afinamento local da peça ou formar um vazão por causa da ejeção excessiva de material como é possível verificar na Figura 10. Geralmente a rebarba está associada a um sobreaquecimento da solda (HILLER, 2007).

**Figura 10** – Excesso de rebarba



**Fonte:** Almeida (2015)

### 2.11 Vantagens e Desvantagens

Para Cruz (2009), Júnior (2003) e Gipiela (2007) o processo de FSW apresenta inúmeras vantagens se comparado aos métodos de soldagem por fusão, como TIG (*Tungsten Inert Gas*) e MIG (*Metal Inert Gas*):

- Não a necessidade de utilização de material de adição ao unir as juntas
- A zona afetada pelo calor é limitada, proporcionando a junta uma pequena variação de dureza ao longo da região
- Deformações e tensões no material soldado são mínimas
- O processo de alta produtividade, capaz de efetuar junções até sessenta vezes mais rápidas que a rebiteagem manual e seis vezes mais veloz que o processo automático
- é capaz de unir juntas de topo com espessuras acima de 12 mm com um único passe
- Não apresenta a formação de fumos, resíduos e radiação ultravioleta
- Produz juntas de elevada eficiência mecânica (superiores a 100%), permitindo projeto estrutural de juntas mais leves e resistentes
- Une ligas de alumínio, em juntas similares e dissimilares em tipo de liga e/ou espessura

Porém, Júnior (2003) e Gipiela (2007) destacam algumas desvantagens que o processo possui:

- Necessidade que as juntas sejam fixadas rigidamente;
- Dispositivo de fixação de juntas impossibilita a utilização de equipamento portátil;
- A Ferramenta de soldagem deve ser adequada para cada espessura de material que se deseja soldar; e
- No final da soldagem a ferramenta deixa um orifício no cordão de solda.

### 3 METODOLOGIA

Para se ter maior familiaridade com o assunto abordado foi realizada uma pesquisa geral, de caráter exploratório, em sites de buscas, gerais e acadêmicas, bem como em livros.

Após se adquirir a familiarização com o tema, a título de conhecimento prévio, foi realizada uma pesquisa exploratória mais aprofundada e dirigida, de caráter bibliográfico, na qual foram utilizadas obras de autores em evidência na área de materiais e soldagem, como ASM (1993), CALLISTER (2002), FREENEY, T; SHARMA, S; MISHRA, R. (2006), e WAINER et al (1992), para citar alguns, atendo-se, especificamente, àqueles relacionados à área de soldagem por fricção.

Foram utilizados também artigos e dissertações para se aprofundar o conhecimento acadêmico sobre o assunto, como em ALVES (2012), BRZOSTEK (2012), GIPIELA (2007) e THEODORO (2013), partindo-se, então, para a análise do processo de soldagem em materiais dissimilares, como aço e alumínio, nas industriais automotiva e aeronáutica.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Resultado para ligas de alumínio**

Como mostra o estudo de Barros (2015), ligas de alumínio soldadas por FSW apresentaram valores de microdureza com poucas alterações do que os apresentados no processo de GTAW. E ao estudar mais detalhadamente o corpo de prova, foi observado que esse desvio padrão menor significa uma resistência homogênea, o que é muito positivo, visto que, regiões que tem valores de resistência muito discrepantes tendem a ter concentrações de defeito, podendo causar falhas em suas aplicações.

Para Barros (2015) e Genicolo (2007) também foi verificado a não ocorrência de descontinuidades, comuns em processos de GTAW e formação de porosidade ou trincas de solidificação. E como mostraram Cruz e Moura Neto (2009), se comparada a processos convencionais de fusão, a FSW apresenta uma melhora na ductilidade, fadiga e tenacidade à fratura. Além de 80% da tensão de escoamento do material base ter sido alcançada com falha ocorrendo dentro da ZTA (zona termicamente afetada).

### **4.2 Resultado para aço**

Ao soldar aço, Kozminki (2015), observou que os valores dos limites de resistência a tração e escoamento foram próximos aos apresentados pelo material de base, um aumento da dureza na junta soldada e apenas uma redução dos valores de alongamento.

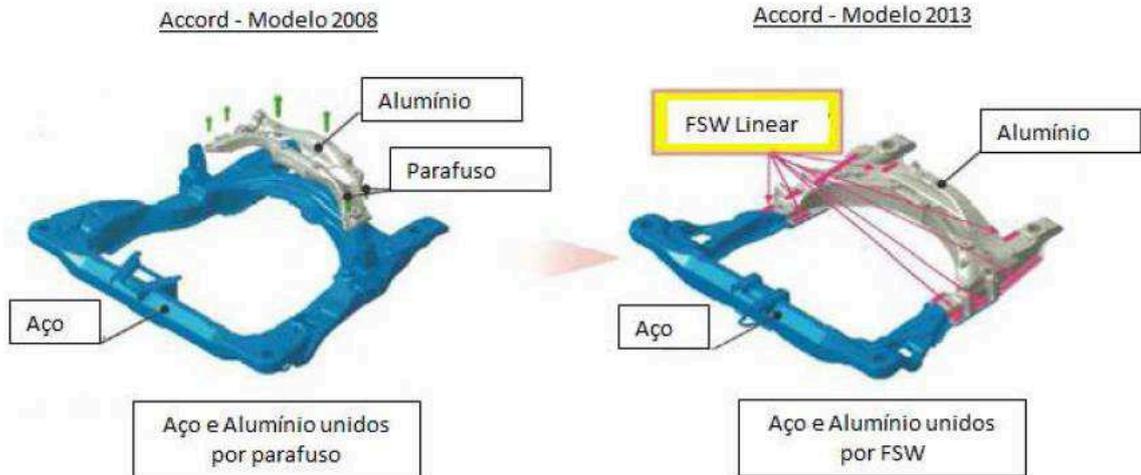
Os estudos de Theodoro (2013) mostraram soldas sem defeitos superficiais, boa largura do cordão, podendo observar também que as juntas não apresentaram defeitos causados por falta de preenchimento. As juntas soldadas também apresentaram uma boa resistência à corrosão para os meios de 3,5% NaCl e de 1% NaCl.

### **4.3 *Friction Stir Welding* nas indústrias**

De acordo com Almeida (2015), a empresa Honda Motor Co., utilizou o processo de *Friction Stir Welding* para unir aço e alumínio no sub conjunto do chassi

do carro Honda Accord modelo 2013. Segundo a empresa, houve uma redução de 25% (6kg) no peso da peça, comparada com o modelo anterior, em que a união se dava através de parafusos. Na Figura 11 é possível observar o modelo unido com parafuso e o unido por FSW.

**Figura 11** – Modelo do Honda Accord 2008 e Modelo Honda Accord 2013



**Fonte:** Almeida (2015)

A Boeing utilizou *Friction Stir Welding* na construção de foguetes da série Delta, cujo lançamento ocorreu em 1999. O A substituição do processo convencional de GTAW revelou vantagens do *Friction Stir Welding* tais como ganhos de produtividade de até 60%, incremento de 30 a 50% das propriedades mecânicas das juntas, redução do ciclo de manufatura de 23 para seis dias e um decréscimo dos custos de manufatura em até 60% (JUNIOR, 2003).

A Airbus tem como meta utilizar FSW em painéis dissimilares em composição química e espessura, após estudos com materiais de potencial aplicação nos revestimentos de fuselagem, cujos resultados demonstraram uma eficiência de junta de até 100%. No entanto, ela já está visando a substituição de aproximadamente um milhão de prendedores mecânicos usados na aeronave Airbus A340. Tendo em vista selecionar o material com melhor relação resistência mecânica e processo de junção, proporcionado a máxima redução de peso, boa resistência a corrosão e aumento de produtividade na fabricação das estruturas primárias (JUNIOR, 2003).

Junior (2003) atenta-se também à Eclipse Aviation, que construiu o Eclipse 500 com componentes primários unidos pelo processo de *Friction Stir Welding*. Esta

aeronave (Figura 12) é um jato executivo bi-turbina capaz de transportar 6 passageiros mais tripulantes, custando cerca de  $\frac{1}{4}$  de uma aeronave da mesma categoria. Segundo o fabricante, o baixo custo de fabricação é em grande parte creditado as substanciais reduções nos custos de manufatura, economia de materiais e de peso alcançados pela eliminação de aproximadamente 60% dos prendedores mecânicos. O aumento na produtividade na junção dos painéis, que manualmente representava um valor de 50,5 milímetros/minuto, se deu pelo FSW que é capaz de produzir uniões de até 1016 milímetros/minuto. Transformando está maior produtividade em termos monetários.

**Figura 12** – Eclipse 500



**Fonte:** Junior (2003)

Segundo Junior (2003), os ensaios realizados para obtenção de certificado da aeronavegabilidade e livre comercialização do Eclipse 500 mostrou que:

As propriedades mecânicas estáticas e em fadiga de corpos de provas representativos do processo de FSW são aproximadamente duas vezes superiores às similares das juntas rebitadas;

Não foram evidenciados falhas ou danos ao realizar simulações dinâmicas da cabine dos passageiros, numa situação de voo a uma altitude de aproximadamente 12500 metros.

Ensaio de tolerância ao dano dos painéis soldados por *Friction Stir Welding* demonstram que trincas de fadiga, surgem após 371.000 ciclos de pressurização, o que corresponde a 18,5 vezes a vida útil da aeronave.

## 5 CONCLUSÃO

*Friction Stir Welding* tem sido alvo de pesquisas tanto no meio acadêmico quanto no ramo industrial por possibilitar a união de materiais dissimilares e materiais até então considerados insoldáveis. É um processo que permite engenheiros e projetistas se beneficiarem de diferentes propriedades e materiais, em busca de novas concepções construtivas e na redução de custos e tempos de fabricação.

Apresenta-se como alternativa à utilização de métodos convencionais de soldagem por fusão e de rebitagem, visto que, há um aumento na produtividade, as propriedades sofrem poucas alterações e principalmente ocorre grande redução dos pesos de carros e aviões, podendo assim obter uma melhor eficiência de consumo.

Desta forma, a soldagem *Friction Stir Welding* é um processo novo, porém atrativo para indústrias do ramo de transporte, visto que a sua utilização gerou resultados satisfatórios ao unir aços e ligas de alumínio.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. T. de. **Análise Microestrutural e Avaliação Mecânica de Juntas Soldadas por Fricção e Mistura Mecânica (FSW) da Liga de Alumínio 5182-0**. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ALVES, E. P. **Junções de Materiais Dissimilares Utilizando o Processo de Soldagem por Fricção Rotativa**. 2012. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Inpe, São José dos Campos, 2010.

ASM. **Specialty handbook: aluminum and aluminum alloys. Fabrication and finishing of aluminum alloys – welding**. Ohio, USA: ASM International, Metals Park, 1993. p. 376.

BARROS, Wesley do Nascimento Santana de *et al.* **Análise Microestrutural e Comparativa entre os Processos de Soldagem por Fricção (Friction Stir Welding - FSW) e TIG ( Gas Tungsten Arc Welding - GTAW) em Ligas de Alumínio Aeronáutico de Série 2xxx**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 8., 2015, Salvador.

BRZOSTEK, R. C. **Estudo da Fratura em Solda Ponto por Fricção em Alumínio ALCLAD 2024-T351 e Alumínio 2024-T351: Uma abordagem Numérica e Experimental**. 2012. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CALLISTER, W. D. J. **Materials science and engineering: an introduction**. London: John Wiley & Sons Inc., 2002.

CRUZ, Marcio Fernando. **Desenvolvimento dos Parâmetros de Friction Stir Welding - FSW, Aplicado na Junção de Topo de Chapas Finas de Alumínio de Alta Resistência**. 2009. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.

CRUZ, Marcio Fernando; MOURA NETO, Carlos de. **Friction Stir Welding – Review: Potencial de Aplicação na Indústria Aeroespacial**. In: XI SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, São José dos Campos, 2009.

GENICOLO, Marco Aurélio Cestari. **Estudo de Viabilidade para Implementação de Uniões Soldadas pelo Método Friction Stir Welding em Estruturas Aeronáuticas**. 2007. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GIPIELA, M. L. **Influência dos Parâmetros de Processo na Geração de Defeitos na Soldagem FSW da Liga de Alumínio 5052**. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

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

KOZMINSKI, E. L. de O. **Análise Microestrutural e Avaliação Mecânica de Juntas Soldadas por Fricção e Mistura Mecânica (FSW) do Aço Inoxidável Dúplex UNS S31803**. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MATTEI, Fabiano. **Desenvolvimento de Equipamento para Estudo de Soldagem por Fricção**. 2011. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MISHRA, R; SHARMA, S; FREENEY, T. **Effect of Welding Parameters on Properties of 5052 Al Friction Stir Spot Welds**. SAE Technical Paper 2006-01-0969, 2006.

OLSON, D.L. ASM International (Ed.). **ASM Handbook V.6: Welding, Brazing and Soldering**. 8<sup>th</sup> ed., Metals Park, Ohio, 1977.

MODENESI, Prof. Paulo J. **Soldagem de Algumas Ligas Metálicas**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

ROSATO JÚNIOR, Abel. **Estrutura Integral por Soldagem por Atrito "Friction Stir Welding - FSW" - Requisitos Básicos Para o Projeto Estrutural**. 2003. 262 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

SANTOS, M. R. dos et al. **Sobreposição e Cruzamento de Soldas por Fricção Linear – FSW**. In: CONGRESSO ANUAL INTERNACIONAL DA ABM, 59., 2004, São Paulo. Anais... . São Paulo: Soldagem Insp., 2005. v. 10, p. 155 - 163.

SYLVA, G., CHRISTNER, B. **Friction Stir Weld Developments For Aerospace Applications**, International Conference on Advances in Welding Technology, Columbus, Ohio, 1996.

THEODORO, Maria Claudia. **Soldagem por Atrito com Pino Não-Consumível em Juntas Dissimilares de Aços Inoxidáveis Austenítico UNS S31603 e Superduplex UNS S32750**. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

WAINER, Emílio et al. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1992. 494 p.

