

FRICION STIR WELDING – REVIEW: POTENCIAL DE APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL

Marcio Fernando Cruz ¹ e Carlos de Moura Neto ²

¹ EMBRAER - Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. - marcio.cruz@embraer.com.br

² ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - mneto@ita.br

Abstract — This work presents solid-state joining process called Friction Stir Welding (FSW). A brief introduction of FSW process and its characteristics has been described. Aerospace possibilities, including several proposed joint features, mechanical properties and costs in comparison to others metallic joining process are shown. Melting absence (solid-state) and their typical defects, ability to weld aluminum and titanium aerospace alloys with low distortion, remarkable joint efficiency and interesting welding speed, make FSW a strong candidate to aerospace structural parts applications. Several applications have been success at shipbuilding and automotive industry, and recently at aerospace industry, but FSW is fairly recent welding process and a lot of researches are on going to identify all its potential.

Keywords — Friction Stir Welding (FSW), Aluminum alloys, Titanium alloys, Joint design, Butt joint, Lap joint, Mechanical properties, Fuselage panel, Aerospace application.

I. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar as possibilidades de aplicação do processo FSW na indústria aeroespacial, juntamente com suas características, as ligas aeronáuticas soldáveis por esta técnica, propriedades mecânicas das juntas soldadas e custo da solução FSW, além da comparação com outros processos de junção metálica. O FSW foi patenteado em 1991 pelo *The Welding Institute (TWI)* da Inglaterra [1]. A técnica consiste na união realizada no estado sólido, não ocorrendo fusão dos materiais. Uma ferramenta especialmente projetada similar a um pino tem a função de aquecer e misturar as bordas de duas peças que se quer unir. A ferramenta tem ainda um ombro que não penetra no material a ser soldado, mas gira sobre ele, gerando atrito e consequentemente energia térmica para plastificar o material a ser unido. A Fig. 1 mostra um esquema do processo de soldagem por FSW.

O FSW envolve um complexo movimento de material e deformação plástica. Os parâmetros de soldagem, a geometria da ferramenta e o desenho da junta exercem efeito significativo no padrão de fluxo de material. Este fluxo de material durante o processo FSW é muito complicado dependendo da geometria da ferramenta, parâmetros de processo e material a ser soldado. É de importância prática entender as características do processo e da ferramenta para obter soldas com eficiência estrutural [2].

As vantagens do processo decorrem do fato que o FSW ocorre na fase sólida, abaixo da temperatura *solidus* das ligas a serem unidas. Dentre as vantagens, inclui-se a capacidade de unir ligas metálicas de difícil soldagem por fusão, por exemplo, as ligas de alumínio das séries 2xxx e 7xxx utilizadas em estruturas de aviões. A resistência da solda é de 30 a 50% maior que a soldagem por arco elétrico e a vida em fadiga é comparável àquela de peças rebitados [3].

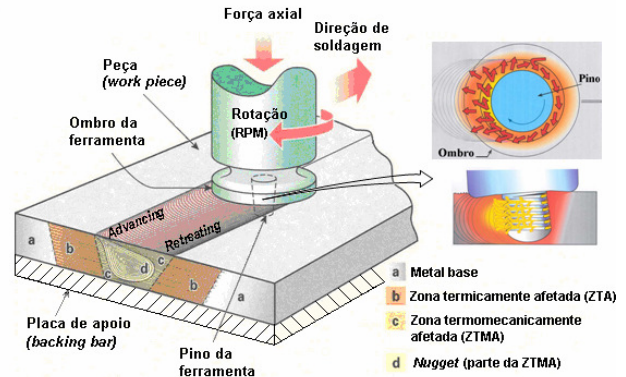


Fig. 1 - PROCESSO DE SOLDAGEM POR FSW - FRICTION STIR WELDING (MODIFICADO DE [1]).

II. MATERIAIS

A capacidade do FSW de juntar uma larga variedade de materiais tem sido avaliada em muitas organizações. Por exemplo, todas as ligas de alumínio trabalháveis mecanicamente (praticamente todas as classes/têmperas) têm provado ser soldável. Ligas de todas as classes de 1xxx a 8xxx têm sido investigadas, incluindo todas as ligas comuns, em uma variedade de espessuras e têmperas, como mostrado na Tabela I. As espessuras de material na faixa de < 1 mm a 50 mm têm sido soldadas em um único passe. Para os extrudados de alumínio (6xxx, 7xxx, todas as têmperas), como para ligas trabalháveis mecanicamente, nenhuma liga não soldável tem sido relatada [4].

As ligas de titânio (CP-Ti, Ti-6Al-4V, ligas β) têm alcançado sucesso na soldagem de 5 a 6 mm de espessura em um passe, embora devam ser necessários desenvolvimentos adicionais antes do uso comercial [4, *apud* 5, 6].

Tabela I – CONDIÇÃO DO FSW PARA LIGAS DE ALUMÍNIO (ADAPTADO DE [4]).

Material	Em Produção	Pré-Produção Desenvolvimento	Em Pesquisa	Demonstrado
1xxx				✓
2xxx 25-50mm			✓	
2xxx <25mm	✓			
3xxx <5mm				✓
4xxx <5mm				✓
5xxx <25mm	✓			
6xxx 25->50mm		✓		
6xxx <25mm	✓			
7xxx 25-50mm			✓	
7xxx <25mm	✓			
8xxx				✓
Al-Si fundidos			✓	
Al-Mg fundidos			✓	
Al MMCs				✓
Al-Be ligas				✓

III. DESENHO DE JUNTAS

As configurações mais comuns para FSW são juntas de topo e sobrepostas. Uma junta de topo simples é mostrada na Fig. 2a. Duas chapas com mesma espessura são posicionadas na placa de apoio (*backing bar*) e fixadas firmemente para prevenir afastamento das faces da junta, porque durante o mergulho inicial da ferramenta as forças são razoavelmente grandes. Uma ferramenta rotativa é mergulhada na linha da junta e traslada ao longo desta linha quando o ombro da ferramenta está em contato com as superfícies das placas, produzindo uma solda de topo ao longo da linha de junta.

Para uma junta sobreposta simples, duas chapas sobrepostas são fixadas em uma placa de apoio (*backing bar*). Uma ferramenta rotativa é verticalmente mergulhada através da placa superior na placa inferior e traslada ao longo da direção desejada, unindo as duas placas, Fig. 2d. Outros tipos de desenhos de juntas, tal qual juntas tipo T, Fig. 2f, são também possíveis quando necessárias para algumas aplicações de engenharia.

É importante notar que nenhuma preparação especial é necessária para o FSW de juntas de topo e sobreposta. Duas placas limpas de metal podem ser unidas sem qualquer preocupação maior a respeito das condições das superfícies das peças [2].

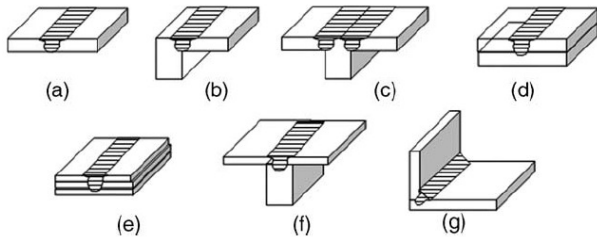


Fig. 2 - CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS PARA FRICTION STIR WELDING: (A) TOPO SIMPLES, (B) TOPO DE ARESTA, (C) TOPO T, (D) JUNTA SOBREPOSTA, (E) JUNTA SOBREPOSTA MÚLTIPLA, (F) JUNTA SOBREPOSTA T, E (G) JUNTA DE FILETE [2].

IV. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Comparada à soldagem por fusão tradicional, FSW exibe uma considerável melhora em resistência, ductilidade, fadiga e tenacidade à fratura. Além do mais, 80% da tensão de escoamento do material base tem sido alcançada em ligas de alumínio soldadas por FSW com falha usualmente ocorrendo dentro da região afetada pelo calor (ZTA). A vida em fadiga das soldas por FSW é mais baixa que do material base, mas substancialmente mais alta que das soldas a laser e soldas MIG. Depois removendo todas as irregularidades do perfil das superfícies da solda, a resistência à fadiga dos cupons de FSW foi melhorada em níveis comparáveis àqueles do material base. A tenacidade à fratura das soldas por FSW é observada ser mais alta que ou equivalente àquela do material base. Sobre propriedades de corrosão das soldas por FSW, têm sido relatadas observações contraditórias. Enquanto alguns estudos relatam que a resistência a *pitting* e trinca por corrosão em ambiente salino (SCC) das soldas FSW são superiores ou comparáveis àqueles do material base, outros relatos indicam que soldas FSW de algumas ligas de alumínio de alta resistência são mais susceptíveis ao ataque intergranular do que as ligas base, preferencialmente na ZTA adjacente à ZTMA [2]. Isto se deve muito

provavelmente ao aumento do tamanho de grão na ZTA, mas uma proteção superficial adequada mitigaria o risco de perda de resistência por corrosão.

Uma informação importante está relacionada ao desempenho da junta soldada. Este pode ser avaliado por diferentes parâmetros. Um deles é a eficiência de junta, calculada pela razão entre a tensão máxima em tração σ_{max} da junta soldada e a do material base. Valores próximos a 1 significam que a junta soldada e o metal base têm praticamente o mesmo comportamento mecânico [7]. Propriedades de tração típica das ligas da série 5xxx, 6xxx e 7xxx soldadas por FSW são dadas na Tabela II, com a respectiva eficiência de junta.

Tabela II - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AMOSTRAS DE ALUMÍNIO SOLDADAS POR FSW (ADAPTADO DE [8]).

Material	Tensão de escoamento (0,2% proof strength), MPa	Resistência à tração, MPa	Deformação, %	Eficiência da junta ($\sigma_{max} FSW / \sigma_{max} Metal base$)
5083-O metal base	148	298	23,5	1,00
5083-O FSW	141	298	23,0	
5083-H metal base	249	336	16,5	0,91
5083-H FSW	153	305	22,5	
6082-T6 metal base	286	301	10,4	0,83
6082-T6 FSW	160	254	4,85	
6082-T4 metal base	149	260	22,9	0,93
6082-T4 FSW	138	244	18,8	
7108-T79 metal base	295	370	14,0	0,86
7108-T79 FSW	210	320	12,0	

V. COMPARAÇÃO COM OUTROS PROCESSOS

O processo FSW tem demonstrado um número de vantagens sobre a competição e processos convencionais de soldagem por arco elétrico. Algumas das vantagens para as ligas de alumínio são: processo na fase sólida, portanto sem problemas com trinca à quente, porosidades etc.; baixa distorção; não é necessário metal de adição (*filler wire*) ou gás de proteção; sem fumaça, respingos, radiação ultravioleta, portanto não é nocivo ao meio-ambiente; utiliza tecnologia de máquina ferramenta, portanto fácil de automatizar, e reduz a necessidade de soldadores especializados; pode trabalhar em qualquer posição; boas propriedades mecânicas, que para as ligas de alumínio são iguais ou superiores àquelas obtidas por processos concorrentes; eficiente em energia. Mas há limitações, tais como: deixa um furo de saída da ferramenta no final da solda; são necessárias significativas forças axial e transversal; baixa flexibilidade se comparado com processos manuais [9].

Em termos de energia requerida, o FSW apresenta vantagens claras sobre vários outros processos de soldagem. Na Tabela III, é feita uma comparação para soldagem de passe simples de 6 mm de espessura da liga AA6082-T6 [4].

Tabela III – ENERGIA REQUERIDA PARA A SOLDAGEM DE 6 MM DA LIGA AA6082-T6 (ADAPTADO DE [9]).

Processo	Velocidade de soldagem (mm/min)	Potência de trabalho (kW)	Potência bruta requerida (kW)	Aporte térmico (kJ/mm)
FSW	500	2	2,5	0,24
MIG	300	7,5	8,6	1,5
CO ₂ Laser	5000	10	112	0,12
	1600	5	55	0,18

Uma das razões porque o *FSW* tem alcançado proeminência em tão curto tempo é a capacidade de o processo soldar as então chamadas ligas de alumínio não soldáveis: ligas Al-Cu (ligas 2xxx), Al-Zn (ligas 7xxx) e Al-Li (e.g., 8090, 2090 e 2191). Este tem coincido com a mudança na perspectiva da indústria aeroespacial, o principal usuário de tais ligas, que estão mais receptivos ao conceito de soldagem de componentes estruturais e alcançando altos padrões de qualidade [9]. A resistência da solda é de 30 a 50% maior que a soldagem por arco elétrico. A vida em fadiga é comparável àquela de painéis rebitados. A melhoria derivada da ausência de furos é compensada pela presença de uma pequena ZTA, tensões residuais, e modificação microestrutural na zona de soldagem [3]. Uma outra razão é a adequação do processo para unir longas seções retas, permitindo extrudados simples serem soldados por *FSW* para formar peças mais complexas com custo mais baixo do que extrusão direta da peça final [9], como mostrado na Fig. 3. Na indústria aeronáutica, as juntas de topo de chapas de alumínio requerem uma cinta de emenda e selagem, mas, com o *FSW*, são eliminadas esta cinta e a selagem, e conseqüentemente há redução de peso e de ciclo de fabricação desta estrutura.

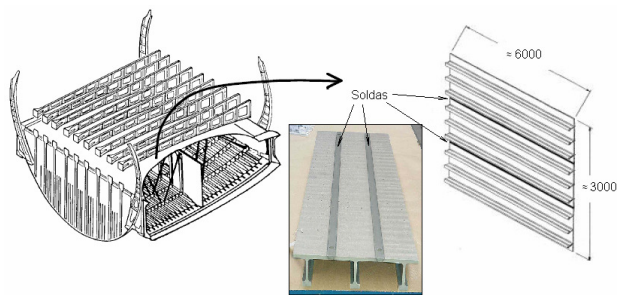


Fig. 3 – NOVO CONCEITO DE INTEGRAÇÃO PARA O CAIXÃO CENTRAL DA ASA: PAINEL SUPERIOR FEITO DE EXTRUDADOS SOLDADOS DE TOPO POR FSW (MODIFICADO DE [10]).

VI. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL

As ligas de alumínio são os materiais mais comuns utilizados para aeronaves por causa de sua alta razão resistência-peso. A rebiteagem é método principal para fabricação de estruturas de aeronaves e superfícies de vôo, mas talvez mais devido à necessidade do que por escolha. Colagem estrutural é uma alternativa, mas restringe oportunidades de projeto e facilidade de produção. Soldagem por fusão (fase líquida) tem aplicações limitadas porque muito pouco das ligas aeronáuticas podem ser soldadas por fusão e produzir propriedades de solda aceitáveis. Além do mais, ligas dissimilares são difíceis de soldar por fusão uma na outra e distorção é um problema. Entretanto, a invenção da soldagem sem derretimento (fase sólida) pelo processo de *FSW* tem revertido completamente esta situação. De fato, todas as ligas de alumínio aeronáuticas em geral podem ser soldadas por *FSW* e também uma a outra. Em muitos casos são alcançadas propriedades mecânicas da solda próximas àquelas do metal base [11].

Há demonstrações do processo *FSW* como um meio para fabricação de grandes tanques criogênicos para foguetes espaciais. Inicialmente, foram construídos e testados com sucesso tanques em escala reduzida. Não somente as propriedades encontradas da solda são superiores àquelas das

técnicas de soldagem anteriores, mas também tempo de produção e custo de mão-de-obra foram substancialmente reduzidos e os retrabalhos foram quase eliminados. Em 1999 e 2002 foram lançados os foguetes Delta II e IV respectivamente, com um tanque de combustível fabricado por este processo de soldagem.

FSW oferece novas e simplificadas oportunidades de projeto para fabricação de ambas as aeronaves: militar e comercial. Este pode ser capaz de redução significativa de peso, horas de fabricação e custos, devido à substituição da rebiteagem. Por exemplo, os grandes discos que formam as cavernas de pressão em fuselagem de aeronaves podem ser feitos por soldagem de topo de chapas ao invés da adição de cintas sobrepostas e rebites, conforme apresentado na Fig. 4 [11].

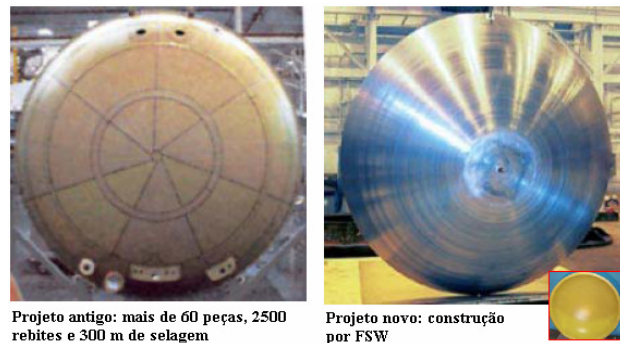


Fig. 4 – CAVERNA DE PRESSÃO REBITADA À ESQUERDA E FABRICADA POR FSW À DIREITA (ADAPTADO DE [11]).

Outras áreas incluem a fabricação de pisos de aviões de carga, conforme se pode observar na Fig. 5. Itens menores tais como portas do trem de pouso e carenagens podem economizar um número considerável de rebites. Há projetos de fuselagens e de asas de aviões que têm sido revisados para uso do *FSW*, para redução de peso, operações de usinagem e custo de milhares de rebites, conforme evidencia a Fig. 6 [11]. Estuda-se introduzir a primeira aplicação significativa de *FSW* na substituição de emenda sobreposta longitudinal de fuselagem, por junta de topo soldada, assim produzindo um forte efeito positivo nos direcionadores de custo. Atualmente, a largura de painéis de fuselagem é limitada pela largura da chapa do revestimento de alumínio entregue pelo fornecedor de material. Para criar painéis grandes é então necessário emendar painéis mais estreitos com juntas de topo longitudinais. A combinação de *FSW* para juntas longitudinais e *Laser Beam Welding (LBW)* para conexão reforçador-revestimento (*stringer-skin*), leva à produção de painéis integrais muito grandes com significativas vantagens de manufatura [12].

A junta sobreposta longitudinal rebitada em fuselagem pressurizada é de grande importância prática. Esta é dimensionada por fadiga e tolerância a dano (*Fatigue and Damage Tolerance – F&DT*); onerosa para fabricar; introduz uma penalidade no peso causada pelo material sobreposto, utilização de reforços (*doublers*), rebites, selante e interruptores de trinca (*crack stoppers*). Em contraste à emenda rebitada, a junta soldada é realizada na configuração de junta de topo, como mostrado na Fig. 7.

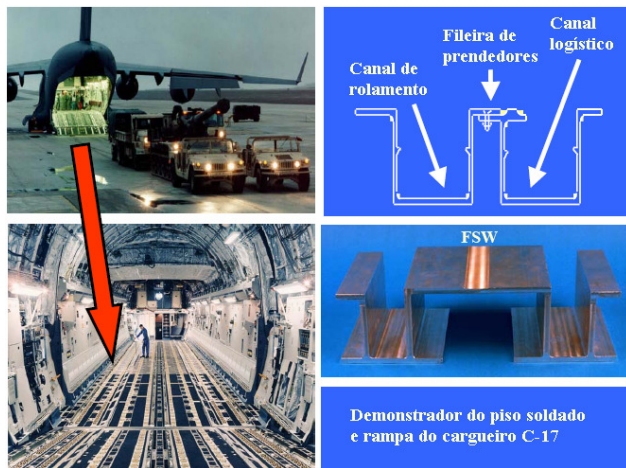


Fig. 5 – PROPOSTA DE FABRICAÇÃO POR FSW DO PISO E RAMPA DE CARGA (ADAPTADO DE [11]).

Os passos de manufatura são: usinagem das arestas dos painéis para ser soldado; FSW de topo longitudinal na forma da curvatura final; usinagem de superfície local do lado de dentro para eliminar as rebarbas (*flashes*) deixadas pelo ombro da ferramenta de soldagem, a fim de melhorar o acabamento da superfície; tratamento/proteção de superfície local da superfície da solda. O resultado final é uma junta de alta qualidade e muito difícil de reconhecer após a pintura dos painéis [12].

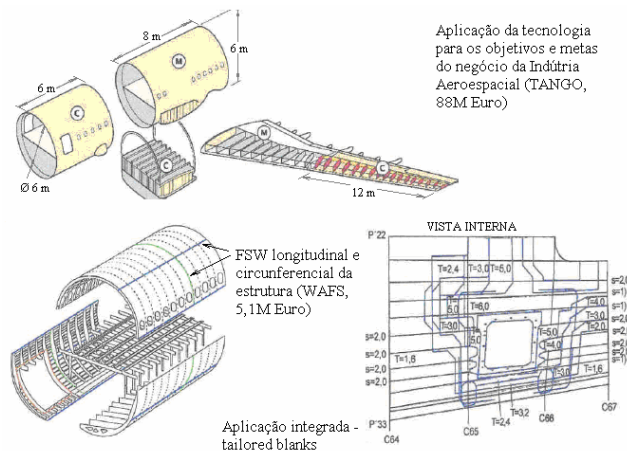


Fig. 6 – MONTAGEM DE ASA E FUSELAGEM SOB INVESTIGAÇÃO PARA FABRICAÇÃO POR FSW (ADAPTADO DE [11]).

Entretanto, o direcionador para uso do FSW e eliminar o uso de rebites foi levado no projeto de um jato executivo de seis assentos, o *Eclipse 500* [11]. Nos estágios iniciais, considerou-se construir o avião de compósitos de fibra de vidro e de carbono, mas o processo não parecia ter qualquer potencial de ganho de escala de produção (*scalability*). O Homem-hora (Hh), unidade que mede a quantidade de trabalho realizada por uma pessoa durante uma hora, para construir o produto de número 1, seria praticamente idêntico ao Hh para o número 1000. Não havia qualquer real redução no tempo de fabricação utilizando compósitos. Também, por causa do que a *Federal Aviation Administration (FAA)* permitiria na época, a razão resistência-peso não estava sendo vantajosa. Os aviões de compósito, que foram

projetados há uma década ou mais, são realmente mais pesados que os de alumínio. Embora o material compósito em si tenha menor massa específica, a *FAA* impõe muitos fatores de segurança, que não se poderia realmente aproveitar a melhor resistência do material. Além disso, é um material muito difícil para inspecionar [13].

Além do que, a indústria aeronáutica tem utilizado alumínio por mais de 70 anos e como resultado é o entendimento do comportamento deste material e se conhece como este falha. Todos os materiais têm deficiências. Não quer dizer que o alumínio é melhor ou mais seguro que os compósitos, mas afirma-se que a indústria aeronáutica ainda está em estágio inicial de trabalho com os compósitos. Uma vez tomada a decisão de ficar com o alumínio, a questão era como diminuir o Hh do processo de montagem, aumentar a confiabilidade e definitivamente reduzir peso, de modo a atingir um dos objetivos do projeto, custar menos que US\$ 1 milhão. Foram avaliadas muitas diferentes idéias e alternativas. Investigou-se soldagem por fusão, colagem e outras técnicas de produção para a fuselagem, como também diferentes técnicas de fabricação para o alumínio. E durante horas de concepção, considerou-se uma técnica de manufatura chamada FSW utilizada pelos foguetes *Delta* e desenvolveu uma nova tecnologia que reduziu significativamente os custos de fabricação do avião [13].

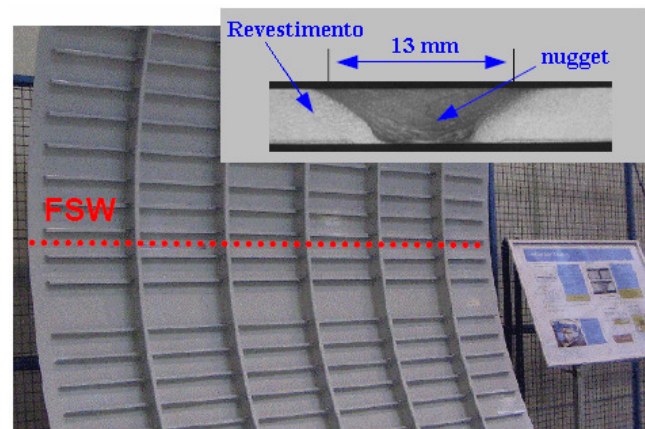


Fig. 7 – APLICAÇÃO DE LBW E FSW PARA A MANUFATURA DE GRANDES PAINÉIS DE FUSELAGEM (ADAPTADO DE [12]).

Depois de conduzirem muitos testes de FSW em fadiga, propagação de trinca, resistência à corrosão, etc., foi construído e testado o *Eclipse 500*. Para alcançar redução substancial de custo de produção, o FSW substituiu mais de 7000 prendedores (*fasteners*) convencionais e é utilizado para unir os reforçadores (*stringers*), liga de alumínio da série 7xxx, aos revestimentos (*skins*) de liga 2xxx utilizados na cabine, (reportar-se à Fig. 8), depois fuselagem e asas. O tempo de fixação por FSW tem provado ser um terço daquele por rebiteagem automática e quase um sexto da rebiteagem manual. Dos componentes descritos, todos exigem juntas sobrepostas, que são muito mais difíceis para fazer do que juntas de topo por FSW. Nada menos, foi desenvolvida a operação de soldagem sobreposta FSW, que tem provado exigir um alto nível de controle de processo e espessura do material dos extrudados e da chapa [11].



Fig. 8 – MONTAGEM DOS REVESTIMENTOS DE CABINE FEITOS POR FSW [11].

Mais recentemente, por outra empresa foi desenvolvida e fabricada uma parede de proteção de tripulação para um cargueiro a partir de extrudados de alumínio unidos por *FSW*. Utilizou-se uma máquina que possui dois cabeçotes de soldagem para soldar extrudados de ambos os lados simultaneamente, formando a parede de proteção pela soldagem sequencial dos extrudados.

Várias outras empresas do setor aeroespacial estão investindo tempo e dinheiro em pesquisa e desenvolvimento para conhecer mais o processo *FSW* e suas potencialidades técnicas e econômicas principalmente no que se refere à redução de Hh e peso das aeronaves.

VII. CONCLUSÕES

O *FSW* tem feito grandes avanços nos últimos anos, possibilitando junções dos principais componentes de jatos comerciais e peças de foguetes, com boas propriedades mecânicas, pouca distorção e vantagens em custo e peso. Atualmente, o processo *FSW* pode unir superfícies com curvaturas complexas, seções de várias espessuras e ligas não soldáveis por fusão, e provavelmente irá continuar a expandir sua aplicação na indústria aeroespacial por meio da junção de componentes de ligas de alumínio de alta resistência [3]. Mas a soldagem de ligas de titânio para produção em escala comercial provavelmente não será em curto prazo.

Direcionados pela redução de custo e peso - *Traveling light, traveling easy* -, o processo tecnológico tem a tendência de se mover na direção da substituição de rebites e prendedores por soldas nas estruturas metálicas de aviões comerciais e é provável que o *FSW* seja aplicado para a junção de componentes estruturais de ligas aeronáuticas das séries 2xxx e 7xxx.

A capacidade de soldar grandes (compridas) juntas, sem fusão e com distorção reduzida, são as principais vantagens técnicas do *FSW* para aplicação aeroespacial.

VIII. REFERÊNCIAS

- 1 W. M. Thomas, et al, “Friction Stir Butt Welding, International Patent Appl. n.º. PCT/GB92/02203 and GB Patent Appl. n.º. 9125978.8”, Dec. 1991, U.S. Patent n.º. 5,460,317.
- 2 R. S. Mishra, and Z. Y. Ma, “Friction Stir Welding and Processing”, Materials Science and Engineering, 2005 (R50) 1-78.

- 3 P. F. Mendez, “New Trends in Welding in the Aeronautic Industry”, Massachusetts Institute of Technology, USA, Cambridge-MA, May. 2000.
- 4 P. L. Threadgill, and M. Nunn, “A review of Friction Stir Welding: part 1, process review”, The Welding Institute, Cambridge, UK, Feb. 2003.
- 5 M. C. Juhas, G. B. Viswanathan, and H. L. Faser, “Microstructural evolution in Ti alloy friction stir welds”, Proc. 2nd Int. Symp. on Friction Stir Welding, Sweden, Gothenburg, Jun. 2000.
- 6 T. J. Lienert, “Microstructures and mechanical properties of friction stir welds on Ti-15-3-3-3”, Proc. 5th Int. Conf on Trends in Welding Research, USA, Pine Mountain-Georgia, Apr. 2002.
- 7 R. J. Wittman, P. C. Pires, e S. D. Brandi, “Friction Stir Welding – Overview and Perspectives”, 17^o Congresso Internacional de Engenharia Mecânica - COBEM, Brasil, São Paulo, Nov. 2003.
- 8 E. D. Nicholas, and S. W. Kallee, “Friction Stir Welding – a Decade on”, IIV Asian Pacific International Congress, Australia, Sydney, Oct. 2000.
- 9 P. L. Threadgill, “Friction Stir Welding – The State of the Art”, TWI 7417.01/99/1012.03, UK, Jan. 1999.
- 10 M. François, “Development of *Friction Stir Welding* of 7000 Series Extrusions for Central Wing Box Application”, EADS Corporate Research Center France, Austria, Vienna, Mar. 2003.
- 11 C. J. Dawes, “Developing a Metal Joining Process for Fabricating Airframes”, AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition, USA, Dayton-Ohio, Jul. 2003.
- 12 M. Pacchione, and J. Telgkamp, “Challenges of the Metallic Fuselage”, 25th ICAS International Congress of the Aeronautical Sciences, 2006.
- 13 R. Olexa, “Stirring up a new airplane”, FF Journal Magazine, Trend Publishing 625N, email: info@ffjournal.net