

Solda por Fricção linear (FSW – FRICTION STIR WELDING) na indústria aeronáutica

Nomes:

Anael F. Junior 11105118 - junior.anael@hotmail.com

Alessandro A. Fracasso 12202742 - fracassofatec@yahoo.com.br

Newton C. Pedrosa 11105127 - ncesarito@hotmail.com

Paola S. Silva 11105190 - paoolasouza82@hotmail.com

Objetivo:

Mostrar a aplicação deste processo na aeronáutica em busca da substituição dos rebites.

Introdução

As novas tendências no setor da construção de estruturas mecânicas apontam para o desenvolvimento e utilização de estruturas metálicas como uma solução bastante favorável com vistas no desenvolvimento sustentável.

A vantagem competitiva desta solução estrutural reside na comprovação da sua excelência em termos de comportamento físico e ambiental, como ainda, nas vantagens econômicas decorrentes da redução dos custos iniciais de construção e manutenção da estrutura. Ao lado dos aços, as ligas de alumínio perfilam-se como materiais concorrentes em aplicações estruturais e estéticas, devido à sua leveza e excelente resistência à corrosão.

As Tecnologias de Soldagem, ratificadas como os procedimentos mais eficientes para a ligação de componentes metálicos, ganham deste modo um papel cada vez mais notável no setor da indústria aeronáutica. No estágio atual de desenvolvimento das tecnologias de união, o processo de Soldagem por Fricção Linear apresenta-se, talvez, como a solução mais promissora para superar alguns dos problemas usualmente associados à soldagem por fusão das ligas de alumínio. Este processo alia as vantagens decorrentes do processo tecnológico e qualidade das soldagens obtidas a benefícios ambientais, resultantes da possibilidade de eliminar emissões nocivas de gases e radiações, características da generalidade dos processos de soldagem por fusão.

1. Descrição da soldagem por fricção (FSW)

A Soldagem por Fricção Linear (SFL) é um processo de ligação no estado sólido desenvolvido pelo Welding Institute (TWI) em 1991. Tal como a própria designação indica, a fonte de energia utilizada para gerar o calor necessário no desenvolvimento do processo é a fricção entre as peças a unir e uma ferramenta rotativa, que se desloca linearmente ao longo da linha de soldagem.

A energia calorífica resultante da fricção conduz ao amaciamento dos materiais a serem ligados, que sofrem deformação plástica intensa sob a ação da ferramenta rotativa. O escoamento dos materiais em torno do eixo da soldagem promove a “mistura” no estado sólido dos materiais a ligar, originando sua soldagem após o esfriamento.

2. Caracterização micro estrutural da junta soldada

Neste capítulo colocaremos a importância que os ensaios possuem, para que a garantia da qualidade do material esteja de fato constatada. São feitos com a finalidade de se obterem resultados que satisfaçam as normas e especificações.

Como não há fusão propriamente dita do material a ser soldado, nem material de adição (autógeno), gás de proteção ou escória, as propriedades mecânicas e as micro estruturas da solda são as mesma do metal de base.

Em ligas de alumínio, no processo FSW pode produzir até quatro zonas diferentes:

A) “Nugget” no meio da solda, próximo ao local onde o pino passou, onde geralmente existem grãos finos recristalizados. Traduzindo para o português o termo “nugget” o que mais se aproxima é a palavra grão, porém, para evitar confusão com a mesma palavra utilizada em metalurgia e com outro significado, optou-se por manter o termo em inglês. Ver figura 2 - fica localizada onde está a rosca do pino, após sua passagem.

B) Área de contato do “ombro”, ombro é onde está localizada a parte plana da ferramenta, onde existe zona de deformação com grande área e pouca profundidade.

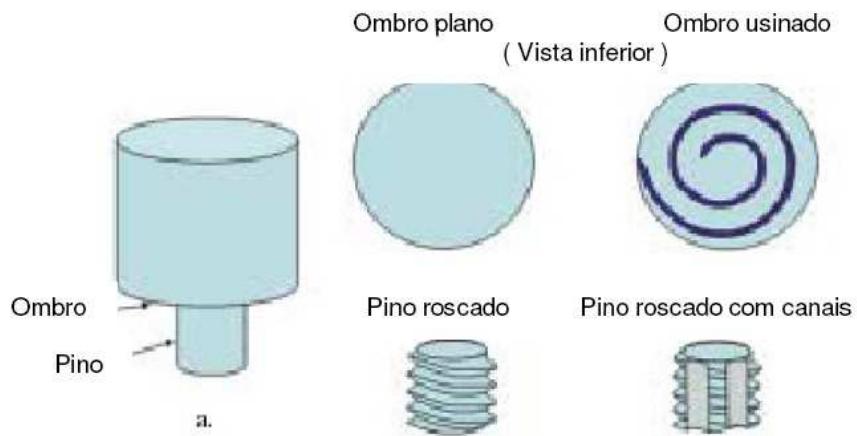


Fig 1. Ferramenta

É a região que foi afetada termo e mecanicamente, próxima à zona do “Nugget”, onde a área não foi afetada pela ferramenta, mas mesmo assim, se deformou pela sua passagem. Ver figura 2 - na figura é a parte mais rosa, como ele foi afetada apenas pela temperatura, já que a ferramenta não entrou em contato com aquela área.

Zona afetada termicamente, possui degradação termal, mas não foi plasticamente deformada. Ver figura 2 - é o local vermelho, pois se trata de um tipo de soldagem, somente por atrito de uma peça rotativa, com uma placa de metal fixa, essa área é bastante afetada termicamente.

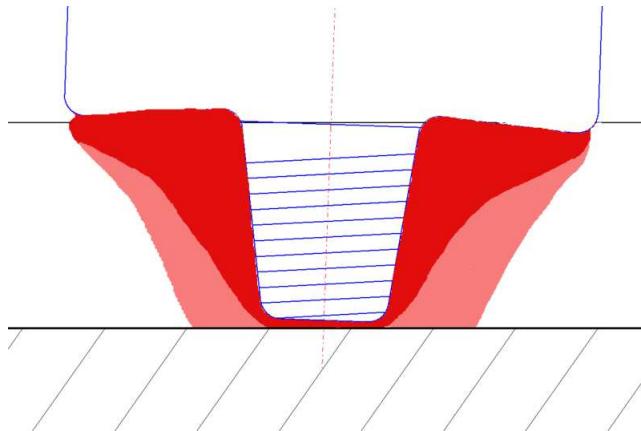


Fig. 2 ferramenta e as propriedades térmicas do cordão

3. Diferentes ferramentas e suas aplicações

O objetivo deste capítulo é mostrar as muitas variações que podemos encontrar para a escolha da ferramenta correta.

Verificar a relação entre a variável de processo-ferramenta, via alteração de geometria, combinado com o conjunto de parâmetros velocidade de rotação, velocidade de soldagem e inclinação da ferramenta na liga de alumínio 5052-F por exemplo.

Dos estudos e pesquisas já realizados sobre o tema, constatou-se que poucos pesquisadores estudaram o efeito da geometria da ferramenta como uma variável do processo pela complexidade do tema. Assim, grande parte das pesquisas em relação à geometria está de forma direta ou indireta relacionada com o instituto TWI onde foi desenvolvido inicialmente o processo.

Já sendo conhecido que as partes de maior interesse da ferramenta são pino e suporte, resta à análise da influência da mudança de perfil do pino, como por exemplo, da adição de uma reentrância, da alteração de geometria de cilindro para tronco de cone ou cônico, da combinação com a presença de filete de rosca cujo passo pode variar ou não, além da variação de altura ou comprimento do mesmo.

A região da ferramenta FSW conhecida por suporte pode sofrer variações tais como: a presença de reentrâncias negativas, perfil saliente, helicoidal ou ranhurado em relação ao eixo de simetria da ferramenta, ou com a possibilidade de montagem da posição do pino

excêntrico em relação ao eixo de simetria da ferramenta, ou também com a montagem do pino inclinado em relação ao suporte e suporte com ângulo positivo ou negativo em vez de plano. O próprio diâmetro do suporte é uma variável, pois o mesmo interfere na quantidade de calor gerado, na deformação e na força necessária a consolidação da solda.

Perfil do suporte

Diferentes perfis de suporte podem ser utilizados, sendo projetados para atender aos mais distintos materiais a unir e as condições de união. O perfil do suporte tem a função mecânica de forjamento de material, por sua vez também possui responsabilidade sobre as rebarbas geradas durante o processo. Assim foram desenvolvidas as ferramentas com reentrâncias negativas, onde o material no estado de escoamento plástico assume este volume negativo do suporte, fazendo com que menos material seja expelido para fora da região de contato da face, o que melhora o fechamento do cordão de solda e reduz a formação de rebarbas. Alguns modelos de perfis com rebaixo podem ser observados na Figura 3 (A, B, C, D) enquanto na Figura 3 (E), tem-se um suporte convencional, de superfície plana.

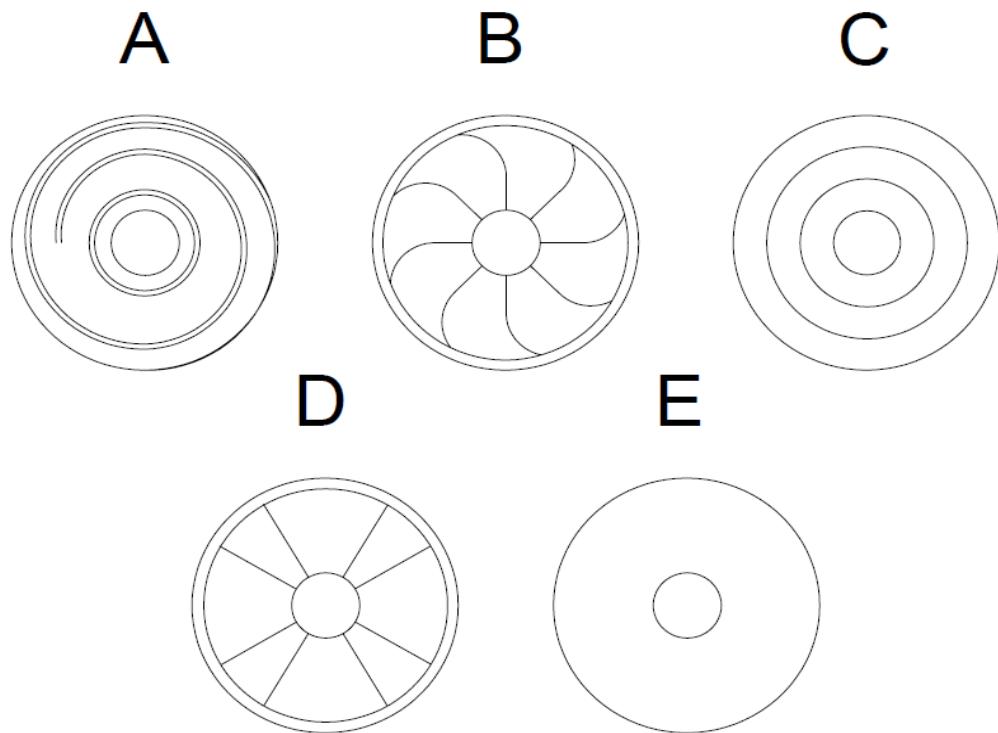


Fig. 3 – vários formatos das ferramentas

O suporte A observado na Figura acima possui sua superfície plana com a presença de reentrâncias negativas e na forma de espiral com relação ao eixo de simetria da ferramenta para absorver o volume de material que seria expelido para fora da região do suporte formando uma pequena rebarba.

O suporte B observado na Figura acima possui uma série de platôs na forma de hélice, os quais formam reentrâncias negativas, de forma a admitir um volume de material que tenderia a ser expelido para fora da região do suporte.

O suporte C na Figura acima possui uma série de superfícies escalonadas concêntricas, que no geral formam um volume negativo no suporte, o qual tem por finalidade reduzir o material que seria expulso da parte inferior do suporte.

O suporte D da Figura acima possui uma série de planos com a mesma geometria e que formam um volume negativo no suporte, também com objetivo de reduzir material que seria expulso do suporte.

O suporte E da Figura acima é o mais comum encontrado no estudo do processo FSW, sendo que o mesmo é composto de uma superfície plana ou côncava, para reduzir o volume de material expelido do suporte, melhorando a qualidade da solda.

Perfil do pino

A geometria do pino afeta a geração de calor e o escoamento de material necessário à união, onde indiretamente pode impactar também a forma e as propriedades mecânicas da solda. As avaliações de alteração de geometria do pino são realizadas pela avaliação do cordão de solda, via análise macroscópica das regiões da solda (ZTA, ZTMA e NUGGET) e microscópica, em função de refino de grão, densidade de discordâncias e recristalização.

Nos estudos desenvolvidos feitas em liga de alumínio 7075 de espessura 3 mm, foi avaliada a alteração de geometria de pinos cilíndricos e cônicos para uma altura de pino fixa de 2,8mm, combinados com três intervalos de velocidade de avanço (50, 100 e 200 mm/min) e rotação de 1000rpm, onde os perfis de temperatura modelados podem ser vistos na Figura abaixo.

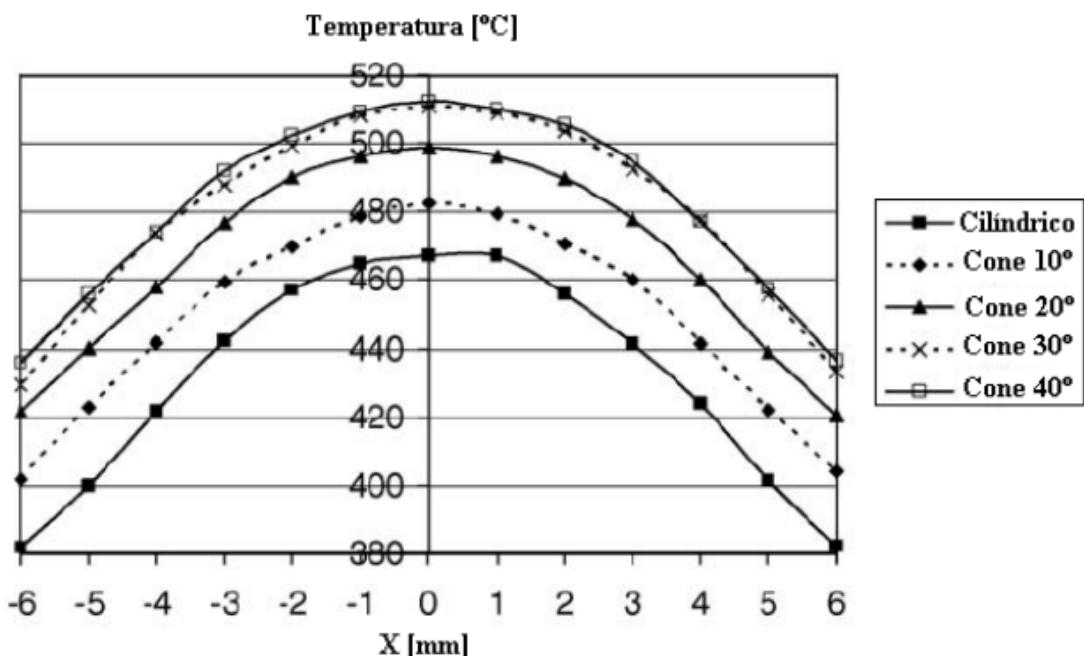


Fig. 4 – Gráfico do comprimento da solda pela temperatura com a variação do angulo

4. O uso da FSW em alumínio na indústria aeronáutica

Trata-se aqui do comparativo entre a eficiência do processo de união da FSW e por rebites, pois a indústria aeronáutica necessita de novos métodos de fabricação, já que o uso de rebites vem caindo em desuso.

No setor aeronáutico a busca por redução de peso das aeronaves e, um consequente aumento na autonomia de voo, redução no gasto de combustíveis, além da diminuição na emissão de gases poluentes é fator desejado. Uma possível solução para redução do peso seria a diminuição da utilização de rebites, já que o peso dos mesmos, dependendo do tamanho do avião, pode representar até 10% do peso total. Tipicamente esses rebites são aplicados na fixação da fuselagem na estrutura do avião.

A utilização de processos de soldagem em substituição aos rebites tem sido objeto de pesquisa principalmente com o processo de soldagem por fricção linear – FSW Friction Stir Welding. Este processo é realizado sem a fusão dos materiais envolvidos, minimizando os possíveis problemas metalúrgicos, tais como porosidade e defeitos volumétricos. Como exemplo, um protótipo de aeronave comercial fabricado conseguiu reduzir 60 % dos rebites através da utilização do processo de soldagem FSW. Em especial, este processo FSW tem uma aplicação potencial para a fabricação de asas de aviões, visto que os materiais utilizados nestas partes, as ligas de alumínio 2024

(fuselagem) e 7075 (estrutura da asa), geralmente apresentam defeitos quando soldados por processos convencionais por fusão. Na produção das asas dos aviões, por possuírem “design” não convencional, dois tipos de soldas são inevitáveis: sobreposição (realização de um cordão de solda se sobrepondo exatamente sobre outro realizado anteriormente), e cruzamento de soldas (intersecção entre dois cordões de solda) cujas propriedades são muito pouco conhecidas. Isto também é importante quando se pensa em realizar reparos em cordões de solda de FSW. Este trabalho foi desenvolvido em parceria com uma indústria aeronáutica, já que a intenção desta empresa é fabricar asas de aviões com os processos FSW. Os principais materiais utilizados para a fabricação de asas de aviões são as ligas de alumínio 2024 (fuselagem) e 7075 (estrutura da asa), sendo que a Figura 5 ilustra a utilização do FSW para unir a fuselagem à estrutura da asa de uma aeronave.

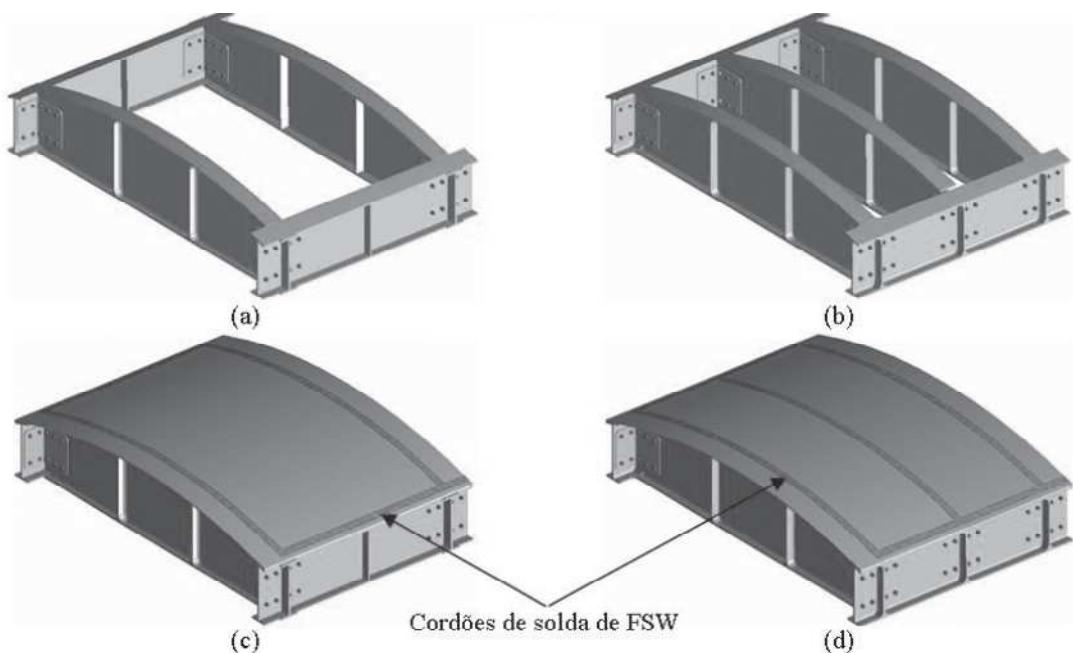


Fig.5 – Ilustração da utilização do FSW para solda em asa de aeronaves;(a) e (b) são diferentes estruturas da asa e (c) e (d) mostram as estruturas cobertas com fuselagem e os cordões de solda de FSW (cortesia GKSS).

As uniões por solda FSW produzem pequenas alterações de características mecânicas em relação aos materiais originais quando comparadas a uniões com outros tipos de soldas.

A elevação da resistência mecânica apresentada, e os bons índices de alongamento dos materiais soldados em relação aos materiais base são consistentes com a observação da existência de grão refinado na região da solda, os principais materiais utilizados para a fabricação das aeronaves são as ligas de alumínio 2024 (fuselagem) e 7075 (estrutura da asa).

Para a avaliação que se propõe o presente estudo, vamos considerar a produção de um painel padrão, utilizando-se o processo de solda por FSW em lugar da união de rebites entre as longarinas e as chapas, verificando sua averiguação técnica, comparando os custos de produção, características mecânicas como tensão de escoamento, ruptura, alongamento, dureza, cisalhamento e limite a fadiga.

Em um comparativo entre as soldas FSW e aplicação de rebites, a eficiência da solda por fricção linear na união de materiais AA 2024 e AA 7075 situa-se entre 70 % e 97 % do material base, dependendo de parâmetros e processos, as uniões rebitadas, em sua utilização típica para união de longarinas e chapas de fuselagem aeronáutica possuem eficiência da ordem de 85 %, desta forma, as uniões através do processo FSW, sendo produzidas com parâmetros adequados de processo, podem apresentar eficiência estrutural comparável às uniões rebitadas.

Conforme estudo as características mecânicas resultantes para painéis aeronáuticos soldados por FSW são superiores às características encontradas em painéis rebitados. O estudo levou em consideração painéis compostos com chapas de material AA 2024 e longarinas de material AA7075.

Na tensão mecânica houve 10 % de aumento no limite de ruptura e 40% no alongamento total, os esforços suportados pelo painel foram equivalentes ao rebitado. Os painéis soldados por FSW continuam a torcer após falha, enquanto os rebitados praticamente se rasgam, os painéis unidos por FSW se mostraram capazes de dissipar energia de deformação de forma menos abrupta que os painéis unidos por rebites, mantendo suporte à carga enquanto sujeito a danos nas longarinas.

Conforme apresentado aqui, pode-se perceber que a resistência mecânica obtida com a junção de componentes das ligas AA 2024 e AA 7075, desde que produzidas com processos adequados será superior à resistência mecânica obtida por painéis rebitados, sob o ponto de vista mecânico, é previsto que a união das longarinas e chapas por FSW mantenha, no mínimo características existentes nas estruturas rebitadas, sendo esperada que algumas sejam melhoradas.

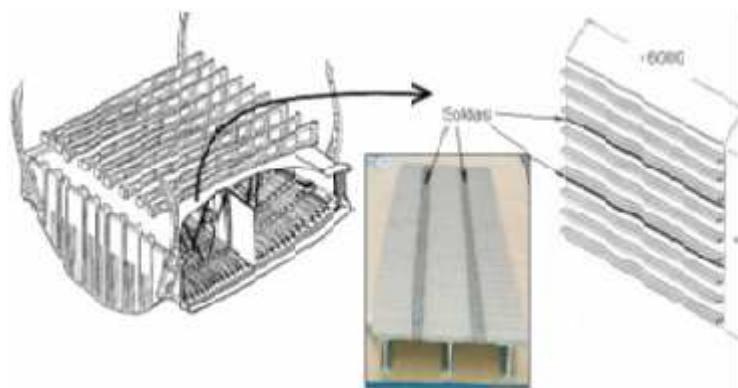


Fig. 6 – Novo conceito de integração para o caixão central da asa: Painel superior feito de extrudados soldados de topo por FSW.

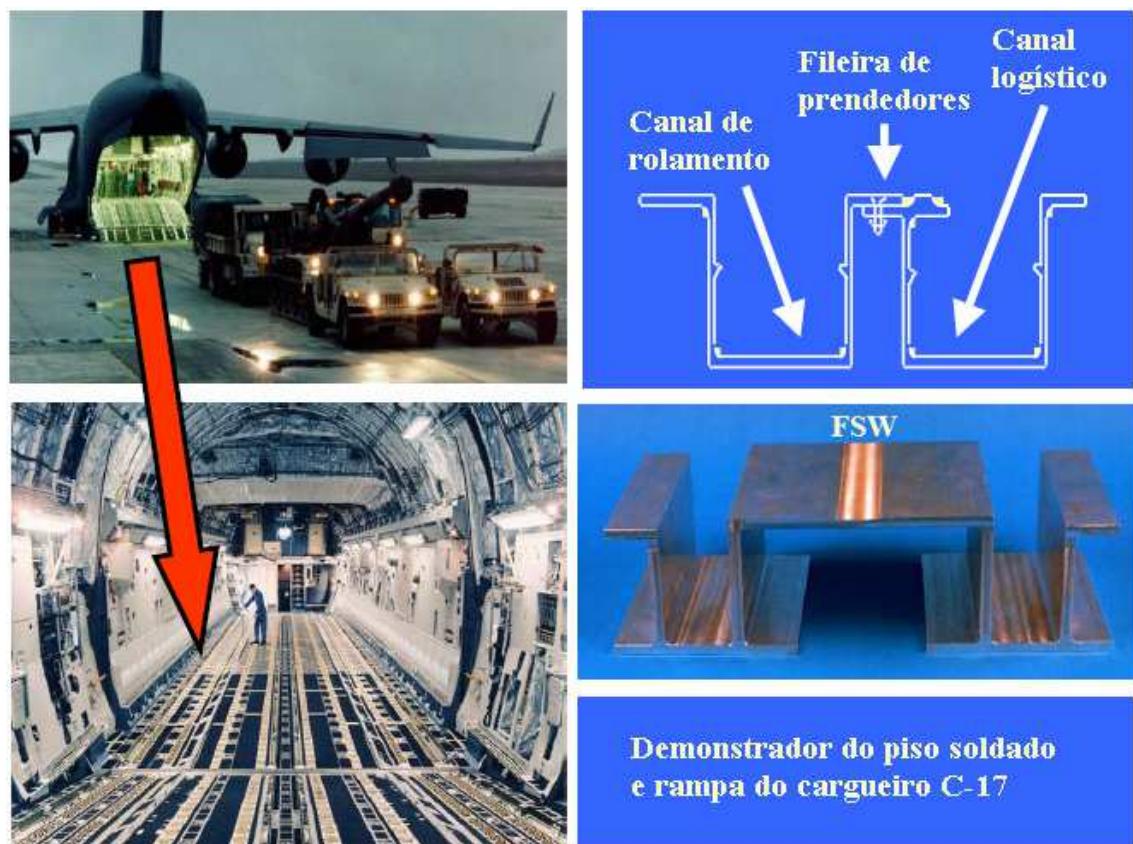


Fig.7 - Proposta de fabricação por FSW do piso e rampa de carga.



Fig. 8 – Montagem dos revestimentos de cabines feitos por FSW.

4.1 Resistência Mecânica

As uniões por solda (FSW) produzem pequenas alterações de características mecânicas em relação aos materiais originais quando comparadas a uniões por outros tipos de solda.

A elevada resistência mecânica apresentada, e os bons índices de alongamento dos materiais soldados em relação ao material base são consistentes com a observação da existência de grão refinados na região central da solda, referida neste texto como nugget.

Na construção típica de aeronaves utilizam-se, para região da fuselagem, os elementos “Stringers”, “Frames” e “Skin”, que neste trabalho traduziremos como “Longarinas”, “Cavernas” e “Chapas”.

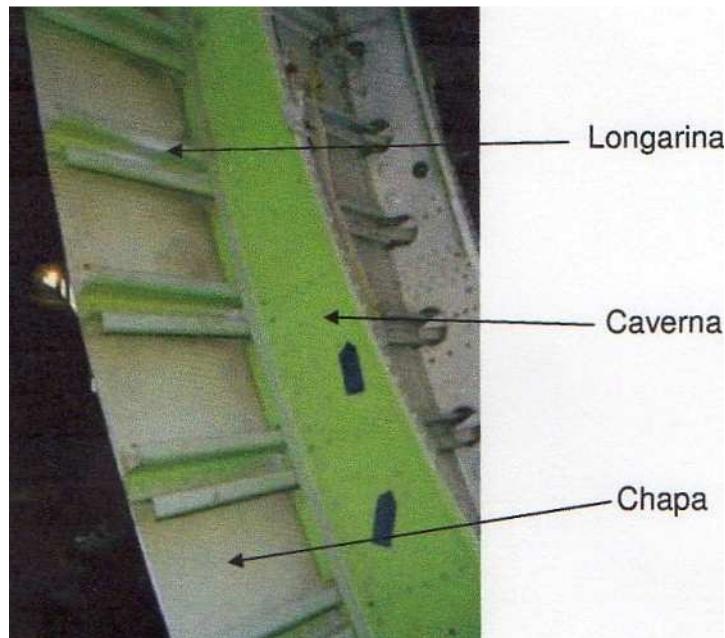


Fig. 9 – Fuselagem da aeronave Boeing 747.

As longarinas geralmente são formadas por perfis extrudados de alumínio da série AA 7XXX, e se conectam as chapas. As longarinas suportam cargas axiais induzidas pelos momentos fletores atuantes na fuselagem.

As cavernas são formadas por chapas conformadas em perfil “U”, de material alumínio também da série AA7XXX, e se conectam as chapas. As cavernas recebem e transmitem cargas concentradas e reduzem vão livre entre as longarinas, colaborando para a estabilidade estrutural da fuselagem.

As chapas são feitas de alumínio da série AA2XXX e estão sujeitas cargas de cisalhamento causado por forças externas transversais e torcionais, suportando também tensões devidas à pressurização da cabine.

Para avaliação a que se propõe o presente estudo, vamos considerar a produção de um painel padrão com as características descritas no desenho abaixo se utilizando o processo de solda FSW em lugar da união por rebites entre as longarinas e as chapas, verificando sua adequação técnica, comparando os custos de produção.

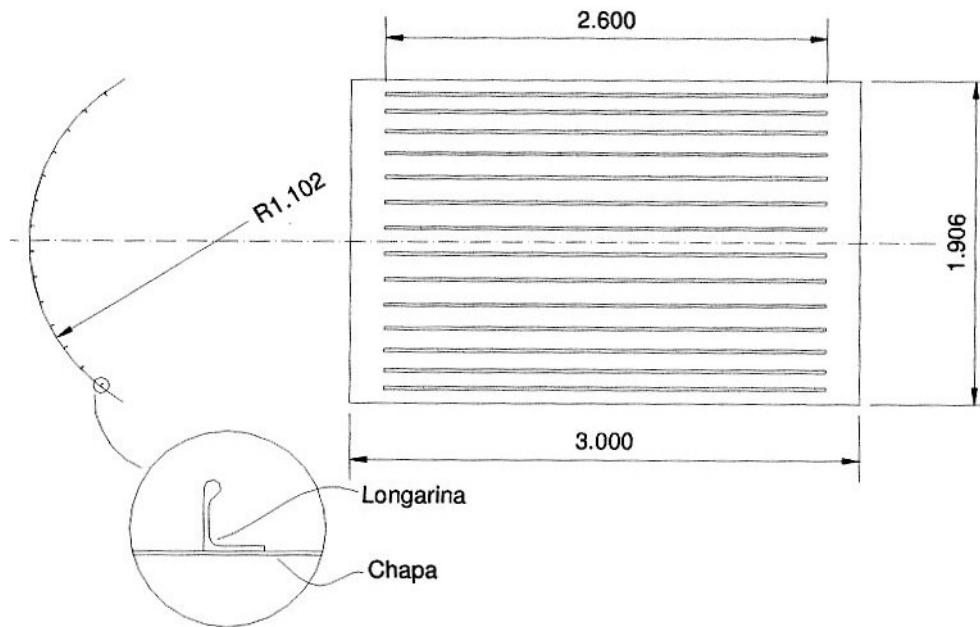


Fig. 10 – Desenho da estrutura.

Características relevantes do painel padrão acima:

- Quatorze linhas de longarina
- Centro e trinta rebites por linhas de longarinas
- Inexistência de janelas
- Material das longarinas: AA 2024 – 1,2 mm de espessura
- Materiais da chapa: AA 7075 – 1,6 mm de espessura

As características mecânicas dos materiais base considerados nas construções do painel padrão encontram-se apresentadas na tabela:

	AA 2024	AA 7075
Tensão de escoamento	76 Mpa	95 Mpa
Tensão de ruptura	185 Mpa	220 Mpa
Alongamento	20%	17%
Dureza	47 HB500	60 HB500
Tensão de cisalhamento	125 Mpa	150 Mpa
Tensão limite de fadiga	90 Mpa	160 Mpa

Tabela 1 – Características mecânicas dos materiais, conforme classificação AA- The Aluminum Association – EUA.

Conforme pesquisa feita por Khaled, vários autores levantam as propriedades mecânicas dos materiais AA 2024 e AA 7075 sujeitos ao processo de solda FSW.

Os resultados encontrados são mostrados na tabela 2 e 3:

AA 2024	Hashimoto et al	Von strombeck et al	Biallas et al	Talwar et al	Zettler et al	Kumagai et al
Eficiência da união	78%	83%	90%	88%	70% a 97	83%
Resistência a tração	-	77%	-	91%	-	79%
Alongamento	-	27%	30 % a 50%	41%	-	19%
Tensão de ruptura	-	-	-	-	-	-
Resistência a fadiga	-	-	80%	-	-	-

Tabela 2 – Material AA 2024 – Consolidação dos dados apresentados por Khaled.

AA 7075	Magnusson e kallman	Mahoney et al	Talwar et al
Eficiência da união	90%	-	84%
Resistência a tração	-	80%	71%
Alongamento	-	24%	33%
Tensão de ruptura	-	84%	-
Resistência a fadiga	aprox. 100%	-	-

Tabela 3 – Material AA- 7075 – Consolidação dos dados apresentados por Khaled.

Os valores apresentados nas tabelas 2 e 3 são dados pela razão entre os valores de resistência mecânica de materiais unidos por FSW em relação ao material base.

As propriedades de resistência mecânica relativas ao material AA 2024 seguem o padrão da curva de dureza, apresentando o mínimo na região afetada pelo calor, confirme gráfico abaixo:

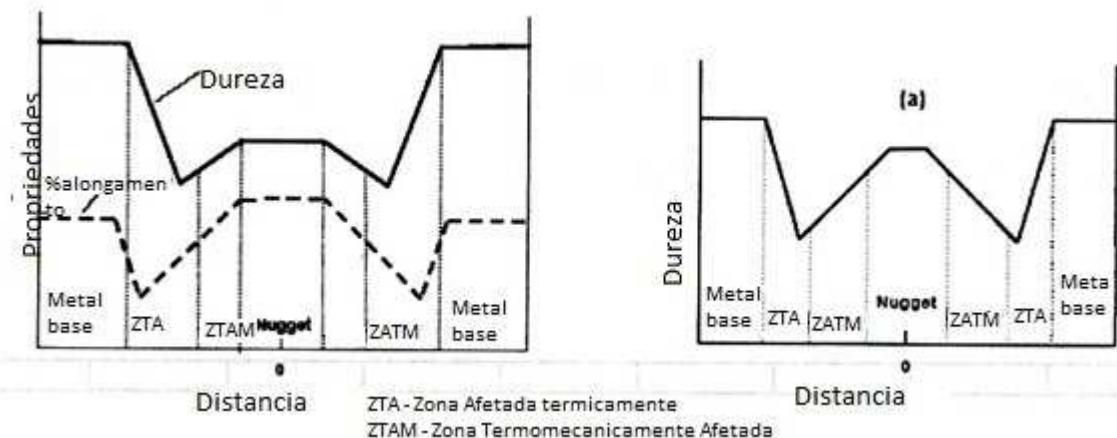


Fig. 11- Curvas características das propriedades mecânicas do material AA2024 –Khaled.

As propriedades de alongamento seguem curva diferente da dureza , pois apesar de terem mínimo na zona afetada pelo calor , tem seu máximo com calor superior ao do material base , na região do “nugget”.

4.2 Resistencia das uniões rebitadas

Conforme método de calculo, o coeficiente de resistência da união rebitada se calcula como:

$\phi = t-d/ K t$, onde: t = distancia.

d = diâmetro do rebite

k = coeficiente de concentração de tensões (para uma fileira de rebites $K = 1$)

Para linha de rebites onde $t = 3d$, $\phi = 0,67$ significando redução de 33% na resistência dos elementos a unir.

Na construção de aeronaves, os valores típicos encontrados para união rebitada das longarinas nas chapas de fuselagem são $d = 3mm$ e $t = 20mm$, de onde se pode calcular o coeficiente $\phi = 0,85$.

4.3 Comparativos entre eficiência dos processos de união por FSW e por rebites.

Conforme os diversos estudos citados na tabela 2 e 3, a eficiência da união de materiais AA 2024 e AA 7075 situam-se entre 70% e 97% do material base dependendo do parâmetro de processos.

As uniões rebitadas, em sua utilização típica para união de longarinas e chapas de fuselagem aeronáutica possuem eficiência da ordem de 85%.

Desta forma, as uniões através do processo FSW sendo produzidas com parâmetros adequados de processo, podem apresentar eficiência estrutural comparável as uniões rebitadas.

4.4 Comportamento mecânico de uniões entre materiais AA 2024 e AA 7075 soldadas por FSW

Conforme estudos as uniões entre os materiais AA 2024 e AA 7075, soldadas pelos métodos FSW, possuem características mecânicas similares ao material base menos resistentes, como se pode ver na tabela abaixo:

Material	Tensão de Escoamento (Mpa)	Tensão de ruptura (Mpa)	Alongamento (%)
AA 2024	380	490	17
AA 7075	503	572	11
2024- 7075 FSW	325	424	6

O aspecto das curvas de tensão x deformação segue o aspecto característico dos materiais base, como demonstrado pelas curvas abaixo:

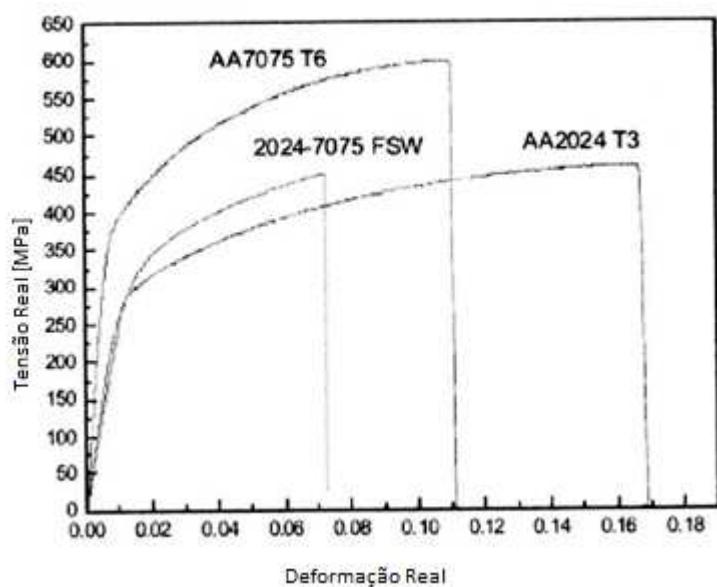


Fig. 12 – Curvas de Tensão x Deformação dos materiais AA7075, AA2024 e da união entre AA2024 com AA7075 por FSW – P. Cavaliere .

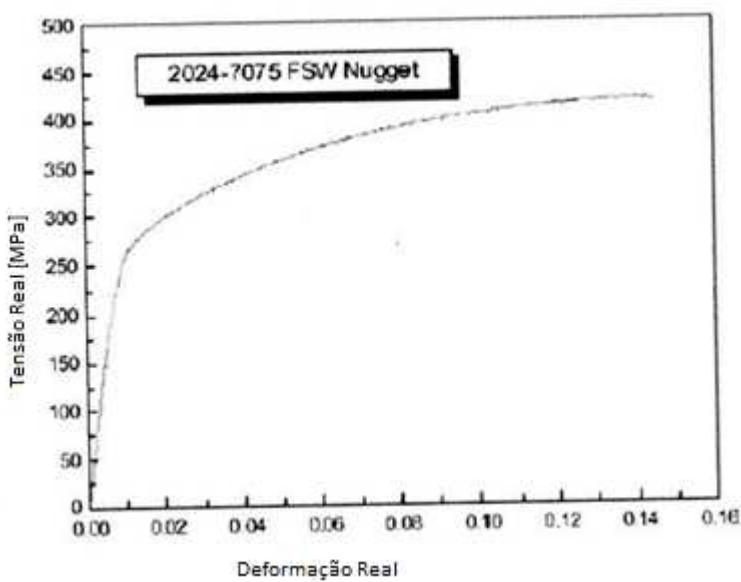


Fig. 13 – Curva de Tensão x Deformação da união entre AA2024 com AA7075 por FSW , na região do núcleo – P. cavaliere.

4.5 – Comparativo entre comportamento mecânico de painéis soldados por FSW e painéis rebitados.

Conforme estudo apresentado as características mecânicas resultantes para painéis aeronáuticos soldados por FSW são superiores às características encontradas em painéis rebitados. O estudo levou em consideração painéis compostos por chapas de material AA2024 e longarinas de material AA 7075.

Os resultados encontram-se listados abaixo, e referem aos painéis unidos por FSW em relação aos painéis unidos por rebites.

- Tensão :

* Dez por cento de aumento em tensão limite de ruptura.

* Quarenta e um por cento de aumento no alongamento total.

- Compressão

* Equivalente aos esforços suportados pelo painel rebitado.

* Painéis formados por FSW continuam a torcer após falha, enquanto painéis rebitados falham catastroficamente.

- Cisalhamento

* Oito por cento de aumento na tensão limite de ruptura comparado a painéis rebitados.

* Os painéis unidos por FSW se mostraram capazes de dissipar energia de deformação de forma menos abrupta que os painéis unidos por rebites, mantendo suporte à carga enquanto sujeito a dano nas longarinas, conforme documento abaixo:



Fig. 14 – Falha em painéis unidos por FSW e por rebites , sujeitos aos mesmos esforços – Khaled.

A resistência à fadiga apresentada pelos painéis unidos por FSW tem características superiores aos painéis por rebitagem.

Sob o ponto de vista de comportamento mecânico, é previsto que a união das longarinas e chapas por FSW mantenha, no mínimo as características existentes nas estruturas rebitadas, sendo esperado que algumas sejam melhoradas.

4.6 – Comparação entre painéis manufaturados com longarinas rebitadas e com longarinas soldadas por FSW.

A indústria de construção aeronáutica historicamente utiliza na construção de fuselagens, painéis de alumínio reforçados por longarinas e cavernas, também de alumínio, unidos mecanicamente por rebites. Algumas das razões para a escolha desta forma de união, no

passado, foram o uso de ferramentas simples, baixo investimento inicial, disponibilidade no mercado, compatibilidade dos materiais com a estrutura da aeronave. Também são fatores determinantes sua resistência à corrosão e a dificuldade de soldar os componentes da estrutura da aeronave pelos processos tradicionais.

O processo de aplicação de rebites sólidos, utilizados na junção dos componentes longarina e chapa de fuselagem, existe a necessidade de dois técnicos posicionados um em cada lado da estrutura a ser unida, e a velocidade media do processo é de cerca de 30 rebites por hora.

Conforme citado por Abel Rosato Junior, em sua tese de mestrado, o processo de solda FSW é capaz de efetuar junções até sessenta vezes mais rápidas que as produzidas pelo processo manual de rebitagem. A origem destas informações é o documento "Fatigue of Metals" de S. Surish, editado pela universidade de Cambridge em 1998, citado pelo autor da tese.

Ainda conforme este autor, a empresa Eclipse Aviation, fabricante norte americana de jatos executivos de pequeno porte e baixo custo, informa incremento na produtividade da operação de junção de painéis, onde a velocidade aumentou de 50,8 mm/min para 1016 mm/min ao passar do processo de rebitagem para o de união através de FSW. As informações teriam sido retiradas da publicação "New jet Will Stir Up Aircraft Assembly", de J.Ogando, Design New Magasine, EUA,2001.

Para confecção do painel padrão de dimensões conforme figura 10 são necessários:

Processo de rebitagem:

- 130 rebites por longarina (passo de 20 mm).
- 1820 rebites por painel para fixar todas as longarinas.

Processo FSW

- Comprimento de solda por longarina : 2,6 m.
- Comprimento de solda para fixar todas as longarinas no painel : 36,4 m.

- Rebitagem manual : $T=(1820/30) \times 2 = 121,32\text{hs}$ (2 técnicos)
- FSW (velocidade de 1016 mm/min): $T= 36400/1016 = 35,82 \text{ min} = 0,60 \text{ hs.}$

No presente estudo são adotadas as premissas:

- Custo de mão de obra para rebitagem: R\$ 25,00 / h.
- Custo de mão de obra para FSW : R\$ 40,00 / h.
- Custo de aquisição – equipamento para rebitagem : R\$ 3000,00
- Custo de aquisição de equipamento FSW : R\$ 700.000,00
- Os custos de importação e instalação do equipamento FSW são considerados equivalentes a 40% do custo do equipamento, resultando em R\$ 280.000,00.
- O custo do desgaste da ferramenta de usinagem FSW é considerado equivalente ao custo de aquisição dos rebites necessários para montar o painel.
- O processo de rebitagem necessita de gabarito para fixação das partes à serem unidas, e o processo de união por FSW necessita fixação em sistema próprio, similar a um gabarito. No presente estudo consideramos que os custos de aquisição e os tempos improdutivos para fixação são equivalentes, e se anulam em um estudo comparativo.
- A infra-estrutura necessária para ambos métodos de produção apesar de ser de natureza distinta, é considerada neste estudo como tendo custo de aquisição equivalente.

Os custos de aquisição do equipamento para rebitagem e do equipamento de FSW foram obtidos por cotação de fornecedores.

O custos de mão de obra para produção de um painel por rebitagem é:

$$121,32 \text{ hs} \times \text{R\$ } 25,00 / \text{h} = \text{R\$ } 3033,00$$

O custos de mão de obra para produção de um painel por FSW é :

$$0,6 \text{ hs} \times \text{R\$ } 40,00 / \text{h} = \text{R\$ } 24,00$$

O consumo de energia para produção do painel por rebitagem é :

- Consumo de ar na ferramenta : $7,0 \text{ l/s} = 420 \text{ l/min.}$
- $1 \text{ Kw} = 135 \text{ l/min.}$
- Consumo de energia na ferramenta : $3,1 \text{ KW}$
- Tempo de produção de um painel : $1820 \text{ s} (1\text{s} / \text{rebite}) = 30,33 \text{ min} = 0,505 \text{ h.}$
- Consumo de energia para um painel : $3,1 \text{ Kw} \times 0,505 \text{ h} = 1,57 \text{ Kw.h}$

O consumo de energia para produção do painel por FSW é :

- Consumo de energia do equipamento : $7,5 \text{ Kw}$
- Tempo de produção de um painel : $0,6 \text{ h}$
- Consumo de energia para um painel : $7,5 \text{ Kw} \times 0,6 \text{ h} = 4,5 \text{ Kw.h}$

Considerando-se o custo da energia elétrica como $\text{R\$ } 0,28 / \text{Kw.h}$, obtemos os custos de energia :

- Painel rebitado : R\$ 0,28 x 1,57 Kw.h = R\$ 0,44
- Painel soldado por FSW : R\$ 0,28 x 4,5 Kw.h = R\$ 1,26

A diferença de custo para produção de um painel por rebitagem e por FSW é :

$$(R\$ 3033,00 + R\$ 0,44) - (R\$ 24,00 + R\$ 1,26) = R\$ 3008,18 / painel$$

O número de painéis estimados para retorno do investimento no equipamento FSW é :

$$(R\$ 700.000,00 + R\$ 280.000,00) - R\$ 3000,00) / R\$ 3008,18 = 324,78 \text{ painéis}$$

Nas condições apresentadas para a produção de um painel padrão conforme descrito na figura 10 ,o investimento para produção pelo processo FSW seria recuperado após a produção de trezentos e vinte e cinco painéis ,quando comparado com a produção pelo processo de rebitagem. Esta avaliação mostra a possibilidade de um significativo ganho em redução de mão de obra e um expressivo aumento na velocidade de produção, indicando que o processo FSW tem grande potencial para substituir o processo de união por rebitagem, sob o ponto de vista econômico.

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 relação a 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. 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.

5. Ensaio de qualidade

Neste capítulo abordaremos a importância que os ensaios possuem para que a garantia da qualidade do material esteja de fato constatada. Ensaios não destrutivos como raio-x, ultrassom, etc. são feitos a fim de se obterem resultados que satisfaçam as normas e especificações.

Por ser um tipo de soldagem no estado sólido, descontinuidades como poros, inclusões de escória e fases frágeis não são encontradas. As descontinuidades mais comuns são: cisalhamento devido à baixa velocidade inicial ou volante inercial superdimensionado e defeitos centrais devido a imperfeições no metal de base.

5.1 Inspeção visual

O ensaio visual da solda é o principal teste de qualidade da solda por atrito, pois este define quais serão os parâmetros a serem utilizados. A inspeção visual exige definição clara e precisa de critérios de aceitação e rejeição de acordo com a norma utilizada, o próprio operador da máquina de fricção, já realiza um pré-ensaio visual.

Alguns fatores que podem influenciar na verificação das descontinuidades no ensaio visual:

- Limpeza da superfície.
- Acabamento da superfície.
- Nível de iluminação e seu posicionamento.
- Contraste entre a descontinuidade e o resto da superfície.

5.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é realizado para determinação da resistência da solda, como todo processo de soldagem o procedimento de soldagem se torna qualificado quando a solda tem a resistência superior ou no mínimo igual ao metal de base. Ele não tem nada de especial, o corpo de prova é submetido a um esforço que tende esticá-lo até à ruptura. Todas as especificações são seguidas a fim de os resultados obtidos possam ser comparados. O corpo de prova é preso numa máquina de ensaios que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes. Os esforços ou cargas são medidos e visto na máquina.

5.3 Ensaio de flexão e dobramento

O ensaio de dobramento se caracteriza através de um esforço de flexão no corpo de prova, medindo qualitativamente a ductilidade da solda, este ensaio evidencia ainda a presença de defeitos de soldagens. É apoiado entre dois apoios afastados a uma distância especificada em norma, e por intermédio de um cutelo, aplica-se uma força de flexão no centro do corpo de prova até que seja atingido certo ângulo de dobramento.

5.4 Ensaio Impacto

O ensaio de impacto é um dos ensaios mais empregados para estudo de fatura frágil na solda. Este ensaio é realizado por diversas razões: um deles é como teste de aceitação de materiais aplicados em equipamentos que operarão em baixas temperaturas ainda sujeitos ao impacto.

Além disso, o ensaio de impacto age como ferramenta auxiliar para estudo da temperatura de transição dúctil-frágil dos materiais.

5.5 Ensaio de Fadiga

O ensaio de fadiga tem como objetivo submeter o conjunto soldado a uma tensão dinâmica e cíclica. É simulado o uso, para que possa fazer uma simulação da vida útil do equipamento, podendo desta forma conhecer possíveis descontinuidades e corrigi-las antes que os produtos cheguem a eles. Ele também é usado, para comprovar o correto dimensionamento do produto em relação à durabilidade esperada para eles.

Os materiais submetidos ao ensaio de fadiga começam a ter falhas na sua estrutura, gerando trincas na superfície que vão se propagando ao longo do material devido à aplicação da tensão cíclica, provocando assim a ruptura. Estas trincas geralmente começam em regiões de concentração de tensão ou de imperfeição estrutural.

5.6 Metalografia

Utilizado para determinação da ZTA e verificação da microestrutura. Existem dois tipos de metalografia:

5.7 Microscopia

Analise feita em um microscópio com aumentos que normalmente vai 50 vezes, até 2500 vezes.

5.8 Macroscopia

É uma análise feita basicamente a olho nu, lupa ou com utilização de microscópios (que favorecem a profundidade de foco e dão, portanto, visão tridimensional da área observada) com aumentos que podem variar de 5x a 64X.

5.9 Defeitos Comuns:

Deformação dos componentes.

Falta de fusão dos materiais.

Trincas de resfriamento da junta.

Movimento horizontal dos componentes que estão sendo soldados.

Existem outros tipos de ensaios que já são aplicados na soldagem e na indústria metal-mecânica e metalúrgica e que podem ser requisitados por normas. Não existe o melhor

ensaio, caso existisse, os outros seriam obsoletos. Cada aplicação é uma aplicação, e existem normas que orientam todo o processo de fabricação e ela deve ser estritamente seguida.

CONCLUSÃO

O processo de soldagem por fricção linear (FSW) é a solução promissora para a fabricação das estruturas de alumínio na indústria aeronáutica devido as suas múltiplas vantagens referentes a características de resistência mecânica, resistência a corrosão dentre outras, além de oferecer um aporte menor de peso nas aeronaves.

O diferencial do processo com relação ao rebitamento, é que o FWS além não aumentar o peso na estrutura soldada, também é um processo sustentável visto que o mesmo usa energia friccional não emitindo nenhum tipo de gás nas camadas atmosféricas.

Sendo bem delimitados os parâmetros de soldagem, o FSW funciona como o que há de mais sofisticado no tocante a fabricação das estruturas de aviões, já que a fusão das placas possibilita moldagem estrutural e leveza nas estruturas quando a resistência nessas mesmas são requisitos básicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros e artigos

P. F. Mendez, "New Trends in Welding in the Aeronautic Industry", Massachusetts Institute of Technology, USA, Cambridge-MA, May. 2000.

XI simpósio de aplicações operacionais em áreas de defesa.

ITA – São Jose dos Campos –São Paulo 29/09/09 a 02/10/09.

Abel Rosato Junior ;Estrutura Integral Por Soldagem Por Atrito "Friction Stir Welding " FSW – Requisitos Basicos Para o Projeto Estrutural – Tese de Mestrado – ITA 2003.

P.Cavaliere, E. cerri, A. Squillace; Mechanical Responce of 2024-7075 AluminiumAlloys Joined by Friction Stir Welding – journal of material science 40 (2005) 3669-3676.

Khaled T.; An Outsider Looks at Friction Stir Welding – Federal Aviation Administration – Report ANM – 112N 05-06-FAA-USA-julho-2005.

http://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/csta/publications/media/friction_stir_welding.pdf

www.infosolda.com.br

Marco Aurélio Cestari Genicolo ; ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UNIÕES SOLDADAS PELO MÉTODO FRICTION STIR WELDING EM ESTRUTURAS AERONAUTICAS – Tese de Mestrado – 2007-SP

Figuras

Fig. 1 - Trabalho de Graduação da Universidade de São Paulo escola politécnica
Aluno: Marco Aurelio Cestari Genicolo

Fig. 2 - Jtmonone - Poikkileikkauskuva FSW hitsauksesta. Hitsaussuunta kuvassa vasemmalle ja työkalun pyörimissuunta vastapäivään.

Fig. 3 - Variações de perfil do suporte adaptado de DAWES e THOMAS (1999)

Fig. 4 - Perfil de temperatura em função dos ângulos de pino para avanço constante de 100 mm/min. (BUFFA et al., 2006).

Fig. 5 - Ilustração da utilização do FSW para solda em asas de aeronaves; (a) e (b) são diferentes estruturas da asa e (c) e (d) mostram as estruturas cobertas com fuselagem e os cordões de solda de FSW (cortesia GKSS – Forchungszentrum, Joining, Thecnology Group, Geesthacht, Alemanha).

Fig. 6 - Integração para o caixão central da asa , painel superior extrudado soldado por FSW (XI Simpósio de Aplicação Operacional em Ações de Defesa – ITA – São José dos Campos – SP 29/09/09 a 02/10/09).

Fig. 7- Proposta de fabricação por FSW do piso e rampa de carga .(cortesia GKSS) (XI Simpósio de Aplicação Operacional em Ações de Defesa – ITA – São José dos Campos – SP 29/09/09 a 02/10/09).

Fig. 8- Substituição dos prendedores tradicionais pelo processo FSW. (cortesia GKSS) (XI Simpósio de Aplicação Operacional em Ações de Defesa – ITA – São José dos Campos – SP 29/09/09 a 02/10/09).

Fig. 9 -Fuselagem da aeronave boeing 747.

<http://www.answers.com/fuselage?cat=thecnology>

Fig.10-desenho da estrutura.(Marco Aurélio Cestari Genicolo ; ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UNIÕES SOLDADAS PELO MÉTODO FRICTION STIR WELDING EM ESTRUTURAS AERONAUTICAS – Tese de Mestrado – 2007-SP)

Fig.11-Curvas características das propriedades do material AA2024 – Khaled T.

Fig.12- Curvas de tensões x Deformação dos materiais AA7075, AA2024 e da união entre AA2024 com AA7075 por FSW- P.Cavaliere.

Fig.13- Curva de Tensão x Deformação da união entre AA2024 co AA7075 por FSW,na regiao do núcleo- P. Cavalier.

Fig. 14 – Falha em painéis unidos por FSW e por rebites , sujeitos aos mesmos esforços – Khaled.

Tabelas

Tabela 1 – Características mecânicas dos materiais, conforme classificação AA- The Aluminum Association – EUA – Khaled.

Tabela 2 – Material AA 2024 – Consolidação dos dados apresentados por Khaled.

Tabela 3 – Material AA- 7075 – Consolidação dos dados apresentados por Khaled.