

## **Soldagem na industria aeroespacial**

Alessandro Sérgio Souza - ssandrosergio10@gmail.com  
Alexandre Borghi Cunha - alexandre.borghi@hotmail.com  
Fabio Henrique Delfino - fabiohsdelfino@gmail.com  
Guilherme Macella - guilherme.macella@gmail.com

Neste trabalho, iremos realizar um estudo sobre a industria aeronáutica, onde mencionaremos a instalação fabril com o objetivo de demonstrar como é o layout da planta de produção e os principais processos de fabricação empregados na construção de aeronaves.

Falaremos também sobre materiais especiais, frequentemente compostos por ligas metálicas, que têm sido desenvolvidos, para fins aeroespaciais, iremos tratar sobre os processos mais usuais na indústria aeronáuticas tal como os componentes a qual estes são empregados.

E finalizaremos destacando os desenvolvimentos que estão continuamente acontecendo nesta indústria que acaba sendo uma fonte de tecnologia para os demais ramos da indústria.

A fabricação de aeronaves sempre mexeu com o imaginário humano, desde os tempos primórdios, voar nos instigou a criar e posteriormente a aprimorar novas técnicas de fabricação, desenvolver novas ligas metálicas buscando cada vez mais um material resistente e ao mesmo tempo leve. Podemos ressaltar a soldagem como um processo de fabricação que vem crescendo em conjunto com a tecnologia aeronáutica. Porem a soldagem é pouco utilizado devido ao alto valor agregado em comparação com outros processos de fabricação, contudo novas pesquisas estão sendo realizadas para diminuir esta diferença.

Uma importante ferramenta de fabricação é a escolha correta do layout fabril, o layout por posição fixa, conhecido também por layout posicional, é utilizado sempre para produtos de grandes dimensões, localizados em apenas uma posição e de difícil movimentação do mesmo. Todo o processo é realizado ao seu redor, assim como a disposição de máquinas, pessoas e materiais, que estão exemplificados na figura 1. Este layout possui alto valor agregado e baixa produção em termo de quantidade.

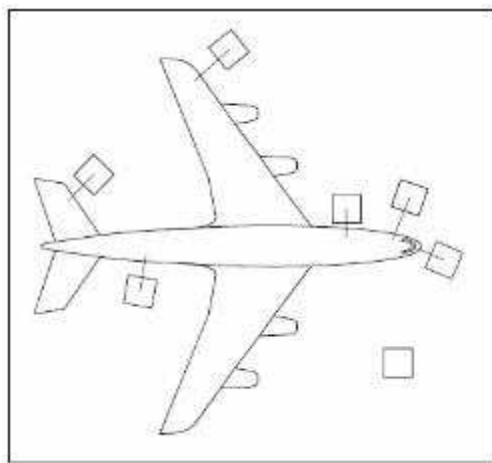


Figura 1 – Layout posicional FONTE: Adaptado de Groover (1987, pg. 29)

Apesar de ser o layout ideal para este tipo de produto o mesmo apresenta algumas vantagens e limitações características.

Uma vantagem é a paralisação do produto o qual se torna de fácil acesso para suas devidas alterações, a possibilidade de terceirização de grande parte do projeto e a implementação de softwares e técnicas de controle da produção.

Temos grandes desvantagens relacionadas à necessidade de supervisão Geral, alto custo de movimentação do produto, necessidade de galpões e áreas de tamanhos proporcionais a serem construídos, complexa supervisão geral relacionada à mão-de-obra, e consequentemente, devido a todos os empecilhos devido ao tamanho do produto, um baixo volume de produção e padronização.

A fabricação de aeronaves pode ser divididas em algumas etapas.

1. Recebimento matéria prima.
2. Conformação (estiramento) do revestimento da fuselagem

A chapa de liga de alumínio é conformada de acordo com a curvatura da fuselagem. Os painéis de revestimento (skin) da fuselagem serão mais adiante fixados a outros componentes estruturais primários, tais como cavernas (frames) e reforçadores (stringers)

3. Dimensionamento e ajustes

Os painéis são ajustados às suas dimensões e formas finais por uma máquina computadorizada de controle numérico (CNC) de cinco eixos.

4. Tratamento superficial e aplicação de filme Anticorrosão.

Depois da fabricação dos painéis de revestimento de fuselagem, é realizado um processo de tratamento superficial.

5. Montagem estrutural dos Segmentos da fuselagem.

Os painéis são unidos às cavernas e reforçadores, principalmente por meio de rebitagem ou soldados, dando origem a um segmento de fuselagem.

6. Selagem

O selante é então aplicado, de modo a garantir a pressurização da cabine e evitar vazamentos

7. Junção dos segmentos da fuselagem

Instalação dos cabos, tubos e dutos, fios, cabos, sistemas hidráulicos, válvulas e outros equipamentos são instalados. Depois de realizada a junção das fuselagens estes são unidos por rebites e cintas (butt-joint splices) ou soldados, completando a fuselagem, também conhecida por charuto, inicia-se a interligação entre si dos sistemas do avião (elétrico, hidráulico, pneumático, comandos e etc.) instalados parcialmente nos grandes segmentos na fase da pré-equipagem. Posteriormente ocorre a instalação e testes dos demais sistemas que dependem somente da fuselagem.

8. Pintura da fuselagem

A fuselagem é então pintada de acordo com as cores do cliente em uma cabine de pintura fechada, com temperatura e pressão controladas.

9. Montagem final

É caracterizada pela fase após a junção da asa e da fuselagem, seguida da instalação do trens de pouso principal e auxiliar. Basicamente, compreende a interligação entre a fuselagem e a asa, instalação dos aviônicos (equipamentos eletrônicos de navegação, comunicação e controle) instalação dos motores, montagem do interior e os testes funcionais. Nesta etapa ocorre o poweron, ou seja a energização do avião.

10. Finalização

Os sistemas aviônicos, hidráulico , de combustível e de comandos de vôo, bem como assentos, copa (gallery) e toalete, entre outros componentes são instados.

11. Ensaios em solo

Todos os sistemas e controles são inspecionados e testados, por meio de bancada integrada de testes

12. Vôos de produção

Os vôos de produção são realizados a fim de garantir que a aeronave cumpra todos os requisitos de projeto e de fabricação, bem como atenda aos padrões das autoridades de certificação para emissão do certificado de aero naveabilidade (para uma operação segura)

13. Documentação e entrega

Após conclusão dos ensaios em solo, dos vôos de produção e da respectiva documentação, a aeronave está pronta para ser entregue ao cliente.

## Soldagem na industria aeroespacial

A soldagem é um dos métodos mais práticos de união de metais. A junta soldada oferece rigidez, simplicidade, baixo peso e alta resistência. Por essa razão, a

soldagem foi adotada universalmente na fabricação e reparo de todos os tipos de aeronaves. Muitas partes estruturais, bem como partes não estruturais, são unidas por alguma forma de soldagem, e o reparo de muitas dessas peças é uma parte indispensável da manutenção de aeronaves.

É igualmente importante reconhecer quando não se deve usar este tipo de soldagem, como quando se deve usá-la. Muitas peças de ligas de aço ou aço carbono alto que receberam um tratamento térmico para endurecimento ou fortalecimento, não voltam a 100% de sua dureza ou resistência após este processo de soldagem.

## **Inspeção de Soldagem na Indústria Aeroespacial**

Os ensaios não destrutivos aplicáveis devem ser executados por pessoas qualificadas e certificadas pela norma NAS 410.

Esta norma aplica-se ao pessoal que utiliza o método de ensaios não destrutivos na aceitação de materiais, produtos, subsistemas, componentes e sistemas. Também aplica-se ao pessoal diretamente responsável pela adequação dos métodos de ensaios não destrutivos utilizados, tanto quanto aqueles que fornecem o treinamento técnico do pessoal de END. Esta norma não tem intenção de ser aplicada a indivíduos apenas com autoridade administrativa sobre o pessoal acima citado ou ao pessoal de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia que será usado por pessoal de END certificado e qualificado.

Métodos comuns, esta norma contém requisitos detalhados de experiência, treinamento e avaliação aplicável nos seguintes métodos:

### **Líquido penetrante**



Figura 2 – Líquido Penetrante no interior da turbina FONTE: [www.aqualified.com](http://www.aqualified.com)

O ensaio de líquido penetrante verifica a integridade de superfícies não porosas. As indicações encontradas pelo líquido penetrante incluem, trincas de fadiga, corrosão, riscamento em partes rotativas, danos superficiais em geral.

O ensaio é utilizado para ensaiar soldas, partes forjadas, hélices de turbina, partes do motor.

Partes comuns testadas: Componentes do motor, tais como pás da hélice. Pode ser utilizado para verificar diversos tipos de materiais como, incluindo metal, polímeros e cerâmicos, apenas não deve ser utilizado com materiais porosos.

### Partículas magnéticas



Figura 3 –Ensaio de Partículas Magnéticas em peças fundidas FONTE: [www.aqualified.com](http://www.aqualified.com)

Assim como o ensaio de líquido penetrante, o ensaio de partículas magnéticas verifica a integridade superficial do material a ser testado. Na indústria aeronáutica este ensaio é muito utilizado na inspeção de parafusos, tubos, em pequenos componentes do motor.

### Correntes parasitas



Figura 4 – Ensaio de Corrente Parasita na cauda de uma aeronave FONTE: [www.aqualified.com](http://www.aqualified.com)

O Ensaio por Correntes Parasitas baseia-se fundamentalmente na Lei de Indução de Faraday, onde o campo magnético, gerado por uma bobina quando alimentada por uma corrente elétrica alternada, induz, na peça a ser ensaiada, correntes elétricas, também denominadas correntes parasitas. Estas correntes elétricas, por sua vez, afetam a impedância da bobina que as gerou. Assim, quaisquer variações no fluxo das correntes parasitas geradas na peça ensaiada implicarão em variações da impedância da bobina. Este fato leva a uma das maiores aplicações deste método de ensaio que é o de detectar a presença de possíveis descontinuidades existentes nessa peça, que venham a interferir no fluxo das correntes parasitas.

O ensaio possui diversas aplicações como:

- Detectar falta de homogeneidade no material tais como trincas, deformações, inclusões, variações de espessura, corrosão, etc.;
- Medir espessura ou variação de espessura de camada não condutora aplicada em material condutor ou camada condutora aplicada em material de condutividade diferente;
- Detectar variações associadas à condutividade do material, falta de homogeneidade em ligas, superaquecimento local, erros de tratamento térmico, etc.;

Na industria aeronáutica este ensaio é muito aplicado em componentes do trem de pouso, verificação de pintura, verificação de tratamento térmico, e ensaios que determinam vida útil de muitos componentes da aeronave.

### **Ultrassom**



Figura 5 – Ultrassom em um componente na aeronave FONTE: [www.aqualified.com](http://www.aqualified.com)

O ensaio de ultrassom na aviação é predominantemente utilizado medição para a espessura do revestimento dos painéis (skin) e inspecções de descolamento do revestimento.

### **Radiografia**



Figura 6 – Radiografia no interior da turbina FONTE: [www.aqualified.com](http://www.aqualified.com)

A radiografia industrial é usada para detectar variação de uma região de um determinado material que apresenta uma diferença em espessura ou densidade comparada com uma região vizinha; em outras palavras, a radiografia é um método capaz de detectar com boa sensibilidade defeitos volumétricos. A capacidade do processo de detectar defeitos com pequenas espessuras em planos perpendiculares ao feixe, como trinca, dependerá da técnica de ensaio realizada. Descontinuidades como vazios e inclusões que apresentam uma espessura variável em todas as direções são facilmente detectadas desde que não sejam muito pequenas em relação à espessura da peça.

Utilizado principalmente em componentes forjados, chapas de vôo, trens de pouso, fuselagem e componentes do motor.

#### **Outros métodos.**

Esta norma poderá ser aplicada a outros métodos de ensaio não destrutíveis tais ccmo: emissão acústica, radiografia por nêutrons, estanqueidade ou vazamento, termografia, holografia, tomografia computadorizada ou qualquer outro método que venha a ser usado na determinação da aceitabilidade ou adequabilidade para o serviço proposto a certo material, peça, componente, sistema ou subsistema, sem prejuízo para estas funções.

#### **Inspeção de soldagem na industrial aeronáutica**

##### **Classe A – Aplicação crítica**

A falha da junta soldada pode causar perigosos significantes ás pessoas, perda do avião, perda de controle, perda do sistema e perda de um componente principal.

##### **Classe B – Aplicação semicrítica**

A falha da junta soldada pode reduzir a resistência geral do equipamento ou do sistema, ou pode gerar um mal funcionamento do equipamento.

##### **Casse C – Aplicação não crítica**

A falha da junta soldada não afeta a eficiência do sistema e não põe vidas em risco.

### Níveis de ensaio não destrutíveis

Líquido penetrante: Soldas classificadas como Classe A e Classe B devem ser testadas de acordo com a ASTM E417. Soldas classe C devem ser testadas com líquido penetrante quando especificada no desenho de fabricação.

Teste radiográfico: Soldas Classe A de topo devem ser radiograficamente testa de acordo com a ASTM E1742. Quando o teste radiográfico de soldas de filete ou soldas de topo de penetração parcial é requerido, o critério de aceitação da raiz deve ser explícito no desenho de fabricação. Soldas Classe B e Classe C devem ser radiografadas quando especificadas no desenho de fabricação.

Ultrassom: O teste de ultrassom deve ser usado ao invés do teste de radiografia quando especificado no desenho de fabricação. A inspeção ultrassônica deve ser executada de acordo com a ASTM E164.

### Critérios de aceitação

A dimensão de qualquer descontinuidade deve ser definida pela maior dimensão, duas ou mais descontinuidades devem ser tratadas como uma quando o espaço entre elas é menor do que a dimensão maior da maior descontinuidade. Descontinuidades devem ser removidas por usinagem subsequente.

As soldas devem atender os requisitos da Tabela 1.

Descontinuidades	Classe A	Classe B	Classe C
Trincas	Não permitido	Não permitido	Não permitido
Falta de penetração	Não permitido	Não permitido	Não permitido
Inclusões	0,33 T ou 0,06 in • Individual [1,5mm]	0,50 T ou 0,09 in [2,3mm]	Não permitido
• Espaçamento	4 vezes o tamanho da descontinuidade maior	2 vezes o tamanho da descontinuidade maior	Não permitido
• Comprimento acumulado	1,33T ou 0,24 in [6,1]	1,33T ou 0,24 in [6,1]	Não permitido
Poros internos e externos	Não permitido	Não permitido	Não permite poros superficiais
Descontinuidade Linear através da junta	1,05 T	1,075	Não Aplicável

Tabela 1 - Critérios de aceitação conforme AWS D17-3 FONTE:

### Materiais

Nesta capítulo estaremos mostrando os principais materiais utilizados em estruturas e carcaças em gerais de aviões e planadores.

Matérias-primas especiais são utilizadas no processo de fabricação das aeronaves. Propriedades mecânicas de cada um dos materiais devem possuir um desempenho

adequado quando submetidas às próximas etapas de fabricação como conformação e corte por exemplo.

As escolhas destes materiais são também devido a algumas características específicas como: baixa densidade combinado com ótima resistência mecânica, corrosão e flexibilidade.

Essas características são devido à extrema necessidade de resistência devido a sua aplicação.

Segue exemplo de suas aplicações:



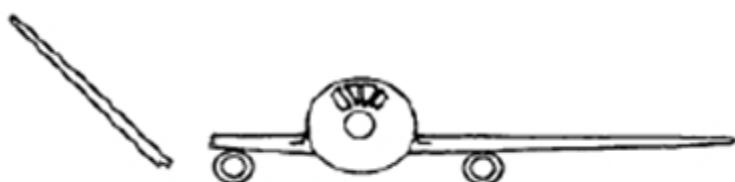
Baixa densidade, para facilitar no voo.



alta flexibilidade.



Ótima resistência a tensões



Ótima tenacidade

Figura 7 – Flexão das asas de uma aeronave.

FONTE:<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010160030507>

Dentre os principais materiais estão o alumínio e o titânio, cerca de 70%Alumino seguido do titânio.

Aqui estaremos exemplificando as principais características dos dois materiais e suas ligas.

## **Alumínio**

O alumínio apresenta densidade de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, aproximadamente 1/3 da densidade do aço.

Excelentes condutividades elétrica e térmica (de 50 a 60% da condutividade do cobre)

Resistente à corrosão atmosférica, à corrosão em meio aquoso (inclusive água salgada), à óleos e diversos produtos solventes.

Ductilidade elevada (estrutura CFC) permitindo conformação de componentes com elevados valores de deformação.

Não é ferromagnético (característica importante para aplicações eletroeletrônicas);

A resistência mecânica do alumínio puro é baixa (~90MPa), entretanto, nele, podem ser empregados mecanismos de endurecimento:

Endurecimento por solução sólida (ligas não tratáveis); o Endurecimento por dispersão de partículas (ligas não tratáveis); o Encruamento (ligas não tratáveis); o Endurecimento por dispersão de partículas coerentes ou submicroscópicas (ligas tratáveis termicamente).

A principal limitação do alumínio é a sua baixa temperatura de fusão (660 °C), o que limita a temperatura de trabalho de suas ligas.

Os principais elementos de liga das ligas de alumínio incluem combinações dos seguintes elementos:

## **Cobre-Magnésio- Lítio- Manganês.**

As ligas de alumínio são divididas em 9 classes, mas nesse trabalho só citaremos as que são mais aplicas a aeronaves.

2xxx: O cobre é o principal elemento de liga. Se receberem tratamentos tais como solubilização e envelhecimento, ter-se-ão grandes aplicações na indústria aeronáutica, devido à alta resistência mecânica. Os dois últimos dígitos não possuem significado numérico, apenas identificam diferentes ligas do mesmo grupo (número sequencial) O segundo dígito indica modificações no limite de impurezas ou a adição de elementos de liga.

Ligas experimentais também utilizam este sistema de classificação, porém, são indicadas pelo prefixo X.

8xxx: O principal elemento de liga é o lítio. São tratáveis termicamente e apresentam alta resistência mecânica específica. Os dois últimos dígitos não possuem significado

numérico, apenas identificam diferentes ligas do mesmo grupo (número sequencial). O segundo dígito indica modificações no limite de impurezas ou a adição de elementos de liga.

Ligas experimentais também utilizam este sistema de classificação, porém, são indicadas pelo prefixo X.

Resumo de séries considerado:

### SÉRIE 2XXX

O COBRE é o elemento de liga principal e, na maioria das ligas, o Mg é o elemento de liga secundário. São ligas tratáveis termicamente, podendo, após os tratamentos, atingir-se a resistência de aço baixo carbono (450 MPa). A resistência à corrosão das ligas da série 2xxx é inferior a de outras ligas de alumínio. Sob certas condições estas podem apresentar corrosão intergranular. As ligas desta série apresentam boa usinabilidade e características de soldagem limitadas (exceto a liga 2219).

O primeiro trabalho desenvolvido em liga binária Alumínio-Cobre foi nos Estados Unidos sobre a liga 2025, a qual contém aproximadamente 5,5% de Cu. Entretanto a liga 2025, introduzida em 1926, está limitada ao uso para materiais forjados. A liga 2219, que contém 6,3% Cu e foi desenvolvida em 1954, tem substituído em muitos casos a liga 2025. A liga 2219 apresenta maior e mais alto campo de resistência, assim com uma boa soldabilidade, superior resistência a tensão de corrosão e melhores propriedades a elevadas temperaturas.

Veja abaixo o diagrama de fases Al-Cu com fases e composições:

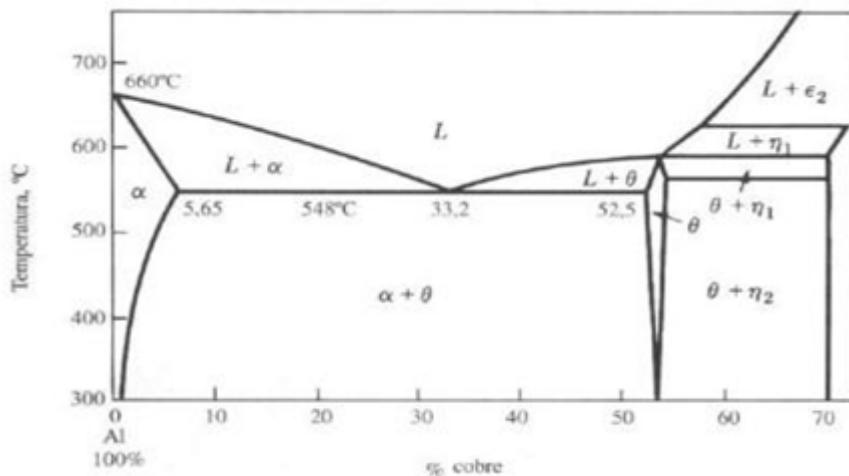


Figura 8 – Diagrama de fases Al-Cu. FONTE: Callister , J.;WILLIAM, D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução., LTC, 2008.

### Aplicações:

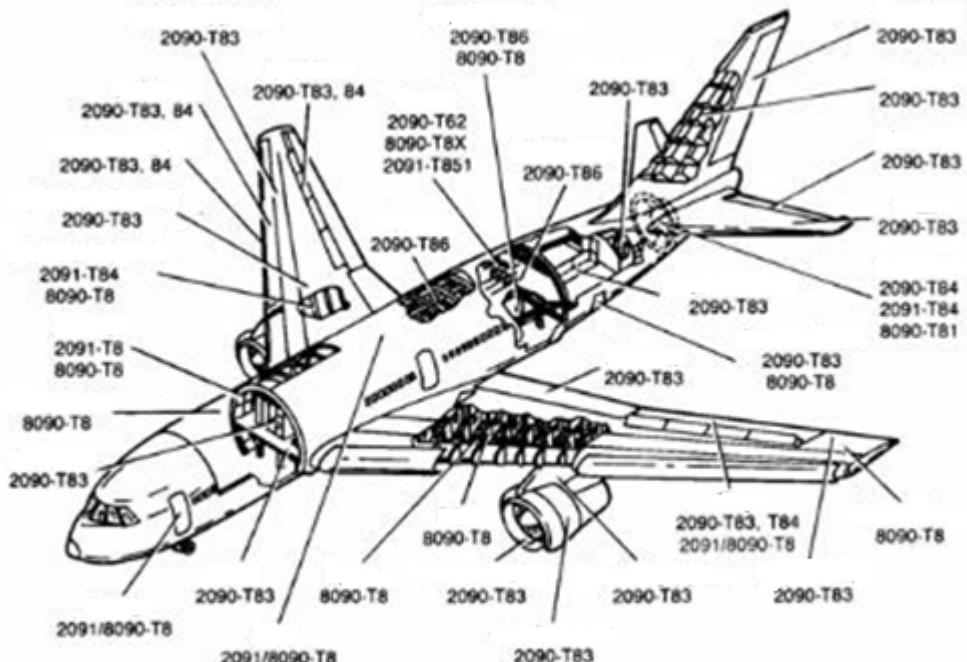
Componentes com elevada relação resistência/peso, sujeitos a temperaturas inferiores à 130°C;

Rodas forjadas para a indústria aeronáutica e de caminhões;

Fuselagem e componentes estruturais de aeronaves (vide figura);

## Componentes de suspensão de automóveis.

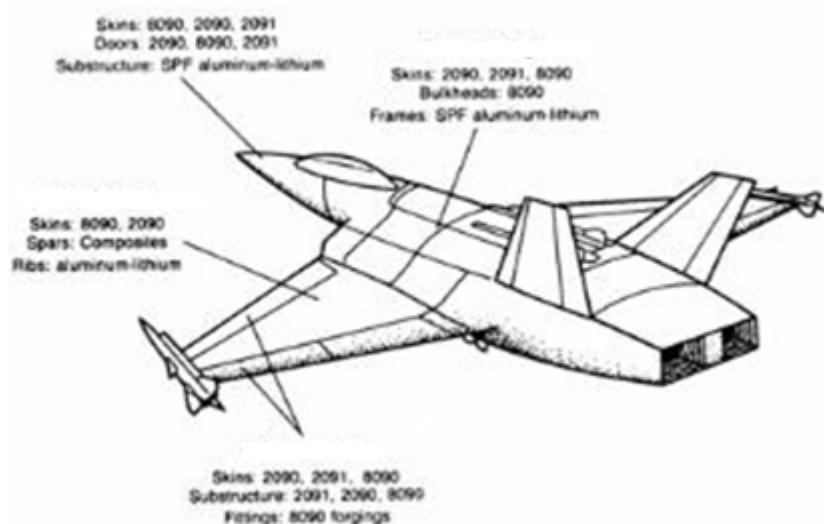
Abaixo estão apresentadas algumas aplicações da série 2XXX e da série 8XXX em aeronave comercial e em aeronave militar.



#### **Aplicações de ligas alumínio-cobre e alumínio-lítio em aeronave comercial.**

Figura 9 – Tipos de materiais de uma aeronave. FONTE:

<http://www.artigonal.com/negocios-admin-artigos/sobre-o-titanio-659477.html>



Aplicações de ligas alumínio-cobre e alumínio-lítio em um aeronave militar.

Figura 10 – Tipos de materiais de uma aeronave. FONTE: Figura 9 – Tipos de materiais de uma aeronave. FONTE: <http://www.artigonal.com/negocios-admin-artigos/sobre-o-titanio-659477.html>

Para alcançar o máximo efeito de endurecimento por precipitação (sem deformação a frio), a liga alumínio-cobre precisa ser:

1. Solubilizada no campo da fase da solução sólida- $\alpha$  (aprox. 5150C);
2. Resfriada rapidamente até temperatura ambiente ou abaixo desta;
3. Envelhecida artificialmente entre as temperaturas de 130 à 1900C (em estufa).

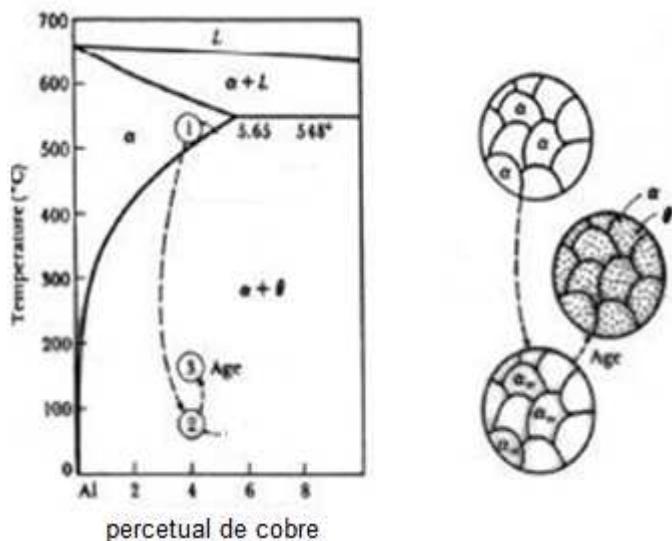


Figura 11 – Microestrutura. FONTE: Callister , J.; WILLIAM, D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7<sup>a</sup> edição., LTC, 2008.

#### EVOLUÇÃO DA MICROESTRUTURA - Tempo de envelhecimento

Para alcançar o máximo efeito de endurecimento por precipitação (sem deformação a frio), a liga alumínio-cobre precisa ser:

1. Solubilizada no campo da fase da solução sólida- $\alpha$  (aprox. 5150C); 2. Resfriada rapidamente até temperatura ambiente ou abaixo desta;
3. Envelhecida artificialmente entre as temperaturas de 130 à 1900C (em estufa).

#### EVOLUÇÃO DA MICROESTRUTURA - tempo de envelhecimento

A liga 2219 contém 6,3% Cu, 0,3% Mn, 0,25% Zr, 0,1% V e 0,06% Ti. Esta liga tem um grande alcance de resistência (25 a 69 ksi), boa soldabilidade, boa resistência a corrosão sob tensão e excelentes propriedades a elevadas temperaturas para uma liga de alumínio. A estrutura da liga 2219 nas condições de endurecimento por envelhecimento é mostrada na figura abaixo e consiste essencialmente de precipitados

SÉRIE 8XXX

As ligas da série 8xxx envolvem um grande número de composições com uma miscelânea de elementos de liga. As ligas conformadas contendo Li (2,4% a 2,8%) foram desenvolvidas para uso aeroespacial e criogenia.

As ligas da série 8xxx envolvem um grande número de composições com uma miscelânea de elementos de liga. As ligas conformadas contendo Li (2,4% a 2,8%) foram desenvolvidas para uso aeroespacial e criogenia.

Ligas Fundidas de Alumínio:

As ligas fundidas de alumínio tem sido desenvolvidas visando a qualidade de fundição, fluidez e molhabilidade, assim como, as propriedades de resistência mecânica, corrosão e ductilidade. Assim, devido a diferença das características requeridas, as ligas de alumínio para fundição vão ter composições químicas diferentes das ligas trabalhadas.

Na tabela abaixo são listadas as composições químicas, bem como suas aplicações.

## **Titânio**

O Titânio e suas ligas tem sido usado amplamente devido as suas características peculiares, como alta resistência a corrosão e elevada biocompatibilidade.

Em razão destes motivos tem sido usado amplamente nas industrias farmacêutica, alimentícia, galvanoplastia, química e derivados, papel e celulose,siderúrgicas, **aeronáuticas, espaciais**, biomedicina, mineração, petróleo e petroquímicas,e inúmeras outras , pois a cada dia se desenvolvem novas aplicações.

O Titânio é um elemento metálico bem conhecido por sua boa performance em relação a resistência à corrosão, sendo quase tão resistente quanto a platina, também possui grande resistência mecânica, além de baixa condutividade térmica e elétrica, ser leve, forte e de fácil fabricação. Tem baixa densidade em relação ao aço, algo em torno de 40%, porém é mais pesado que o alumínio em 60%, sendo duas vezes mais resistente que ele. E quando puro é bem dúctil e fácil de trabalhar , tem o ponto de fusão alto sendo bem útil como um metal refratário. Portanto tais características fazem com que o titânio seja muito resistente contra os tipos usuais de fadiga.

O Titânio é o nono elemento em abundância no planeta terra. Existem diversos minerais que possuem Titânio, no entanto apenas uma pequena parcela dos mesmos ocorrem no planeta terra, em volumes e concentrações consideráveis economicamente. Destes minerais os que se apresentam como principais fontes comerciais de titânio são:

Propriedades Mecânicas Do Titânio

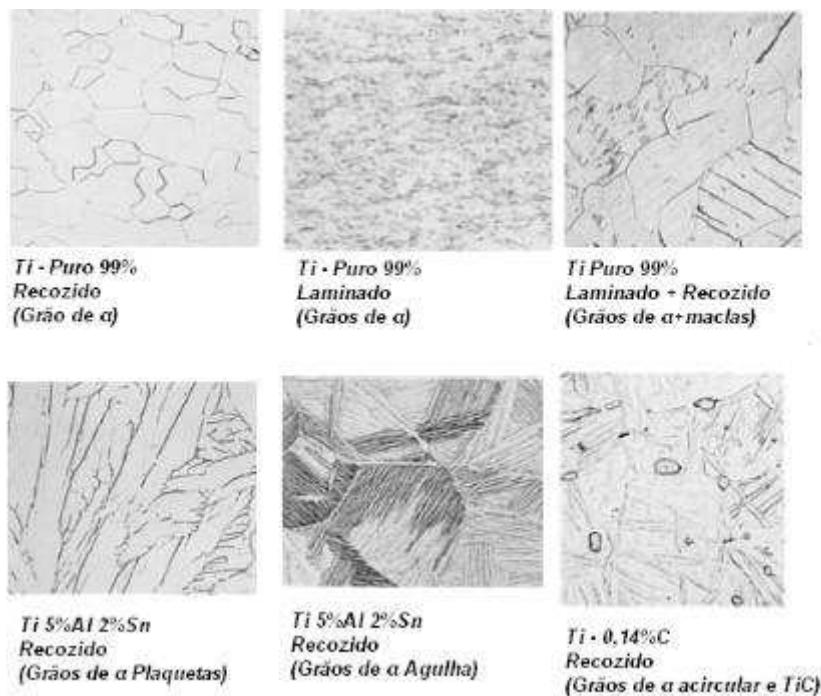
O titânio comercialmente puro apresenta tensão limite de resistência à tração variando entre 240 e 690 Mpa, e sua ductilidade varia de um alongamento de 20 a 40 %, e a redução de área varia entre 45 e 65 %, dependendo dos teores de elementos intersticiais. Além de possuir o modulo de elasticidade de 103 GPa, porém nas ligas de titânio o módulo de elasticidade é mais alto, podendo chegar a 124 GPa, em relação ao alumínio (70 GPa) e magnésio (43 GPa) é bem maior, porém inferiores aos dos

aços (205 GPa). Já o módulo de cisalhamento do titânio e de suas ligas, do mesmo modo, atinge valores intermediários entre os do alumínio e do aço, variando entre 34 e 48 GPa.

Adições de elementos de ligas em teores expressivos aumentam a resistência mecânica em comparação com o titânio comercialmente puro. Estes elementos de liga, como Al, V, Cr, Fe, Mn e Sn, são adicionados tanto em sistemas binários como em sistemas ternários e mais complexos em geral. Por outro lado, simultaneamente ao aumento de dureza/resistência mecânica, ocorre redução de ductilidade. As ligas de titânio podem atingir tensão limite de resistência à tração superior a 1370 MPa com ductilidade satisfatória (alongamento de até 15 %). Porém, comercialmente estão disponíveis ligas de titânio com resistência à tração na faixa de 690 a 1030 MPa, fundidas em forno de indução e depois trabalhadas mecanicamente, que possuem ductilidade satisfatória (alongamento de 10 a 20 %). Ligas fundidas por indução, e depois trabalhadas, podem atingir resistência à tração ainda mais elevada, porém com baixa ductilidade, o que restringe bastante o campo de aplicações destas ligas produzidas por este processo.

As principais aplicações do titânio e suas ligas na indústria atualmente estão concentradas em componentes para a indústria aeronáutica, implantes cirúrgicos dentais e ortopédicos.

Abaixo estão alguns exemplos de micrografias de ligas de titânio



Microestruturas Fases Alfa e Beta

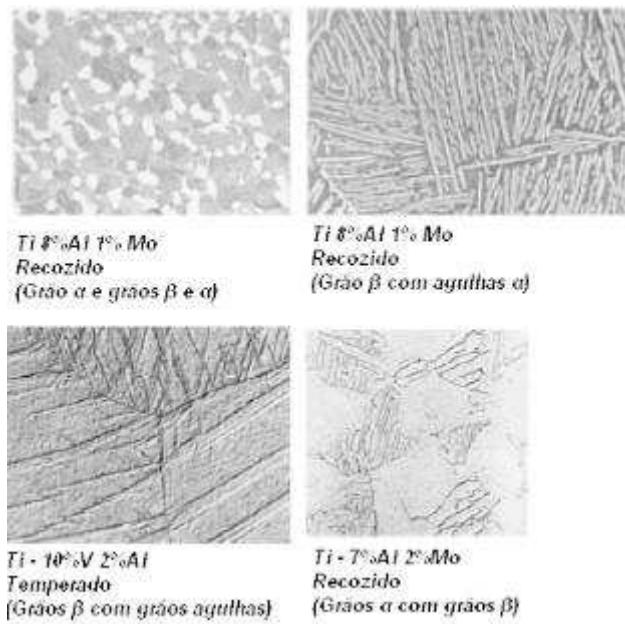


Figura 12 – Microestrutura Titânio. FONTE: TWI Welding

Além do uso em componentes de turbinas, as ligas de titânio também podem ser usadas na estrutura das aeronaves. Na faixa de temperaturas de 150 a 500 °C as ligas de titânio são os materiais mais adequados.

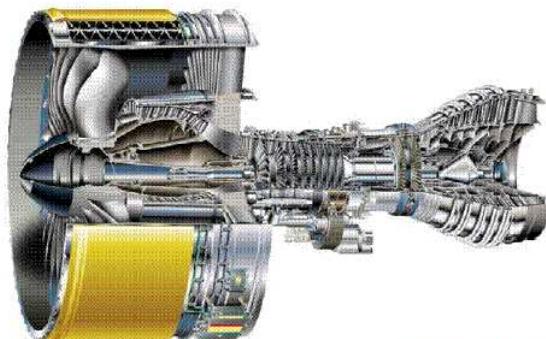


Figura 13 – Componentes de um motor. FONTE: Metals Handbook Vol. 4

As ligas de titânio apresentam densidade (peso específico) e resistência mecânica intermediárias entre as ligas de alumínio e os aços. Ligas de titânio indicadas para aplicação em aeronaves são: Ti-6Al-4V, Ti-3Al-2,5V, Ti-662 (Ti-6Al-6V-2Sn- 0,5Cu-0,5Fe), em componentes como dutos de ar condicionado, eliminadores de gelo, suportes de asas, suportes de motores e diversos tipos de prendedores.

Ligas de titânio também podem ser usadas na fabricação de componentes navais, como palhetas de turbinas a vapor, conectores, eixos de transmissão, molas em motores de alto desempenho, braços de suspensão e barras de torção. As ligas de titânio apresentam elevada resistência à corrosão causada pela água do mar e por isso são bastante adequadas para esse tipo de aplicação, na qual se sobressai a liga Ti-6Al-4V.

## **Novos avanços na soldagem na indústria aeronáutica**

A soldagem na indústria aeronáutica continua a ter desenvolvimentos interessantes; Rebites estão sendo substituído sem ritmo acelera do por soldas.

A Redução de rebites em componentes estruturais em aviões não é só uma tendência e sim uma realidade com ganhos consideráveis em perda de peso e redução de tempo de fabricação; à cada dia os processos de soldagem vem ganhando espaço na indústria aeronáutica; Soldagem por Difusão a laser, feixe de elétrons, solda por atrito, estão sendo bastante utilizados na industria aeronáutica para unir metais dissimilares ou não.

A soldagem por fricção vem expandindo seu papel em aeronaves civis e aplicações aeroespaciais.

Em grandes aviões comerciais a solda a laser éutilizada para substituir rebites em grandes partes da fuselagem.



Imagen do artigo Trends in Joining of Aerospace Materials

Figura 14 – Fotografia de uma aeronave. FONTE: [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

Alguns processos estão sendo utilizados pela indústria aeroespacial e também se mostram como promessas para serem utilizados na indústria aeronáutica, dentre as quais: solda por fricção e plasma, que já estão sendo usados para aplicações críticas em foguetes.

A atual tendência de aumentar o uso de peças em aviões mais recentes abre novas oportunidades e desafios.

Alguns processos que não parecem ter ganhado ampla aplicação incluem a soldagem por difusão em ligas de alumínio e linear fricção união de lâminas para rotores.

A natureza da soldagem na indústria aeronáutica é caracterizada pela baixa produção da unidade, custo unitário elevado, extrema confiabilidade, e as condições operacionais severas. Estes resultados apontam para as características de fontes de calor, mais caros e mais concentrado, como arco a plasma, feixe de laser e solda por feixe de elétrons, como os processos de escolha para a solda dos componentes críticos

## Soldagem por fricção (FRW)

Neste processo, a junção dos metais é conseguida por meio de deformação mecânica. Como não há fusão, os defeitos associados a fenómenos de solidificação de fusão que não estão presentes e uniões tão forte como o material de base pode ser feita.

Este processo pode juntar componentes com uma seção transversal relativamente simples. É usado para a união dos componentes do trem de aterragem de alumínio.

Atrito (desgastando) de solda linear foi considerado pela General Electric e Pratt&Whitney como uma alternativa para a fabricação e reparo de rotores de liga de alta temperatura para motores a jato

Embora pouco foi divulgado sobre esses processos, eles não parecem ter evoluído para aplicações comerciais.

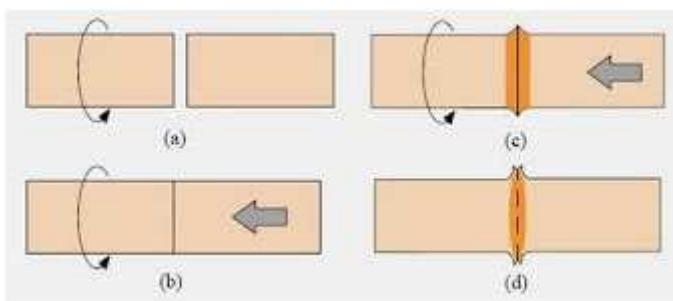


Figura 15 – Sequência de soldagem por fricção . FONTE: [www.wikipédia.com](http://www.wikipédia.com)

## Friction Stir weld (FSW)

TWI inventou este processo em 1991. É um processo de estado sólido, que se junta a metais por deformação mecânica. Neste processo, uma de ferramenta

cilíndrica, com uma ponta de prova perfilado é girada rapidamente e inserida na linha de junção entre duas partes do chapa, em juta de topo umas em conjunto, como mostrado na Figura 3. Este processo pode ser usado em ligas de alumínio soldáveis como a série 2xxx e 7xxx usado em estruturas de aeronaves.

A resistência a fadiga da solda é de 30% -50% em relação à solda por arco com a vida util é comparável à dos painéis rebitadas.

A melhora derivada da ausência de furos é compensada pela presença de uma pequena HAZ, tensões residuais e modificações microestruturais na zona termicamente afetada

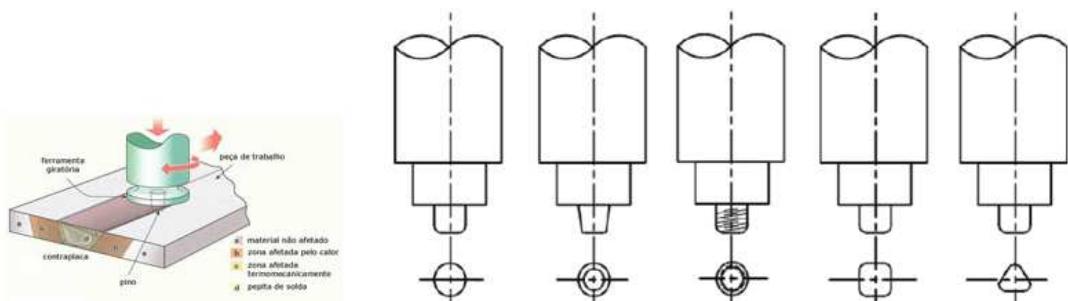


Figura 16 – formatos das ferramentas para processo de soldagem por fricção. FONTE: New Trends In Welding In The Aeronautic Industry

## Soldagem a plasma (PAW)

PAW usa um arco constrito entre um eletrodo não consumível e a poça de fusão (arco transferido) ou entre o eletrodo e o bocal de constrição (arco não transferido).

Se a intensidade do calor do plasma é suficientemente elevado, este processo pode funcionar utilizando a técnica keyhole (buraco de fechadura) semelhante ao do laser ou feixe de elétrons, embora com menor penetração máxima. Um esquema de PAW é mostrado na Figura 6. Este processo é utilizado para a soldagem foguete de combustível sólidos avançados (ASRM) figura 5 para o para o ônibus espacial, O ASRM é feito pela Lockheed de aço liga HP-9-4-30 CV.

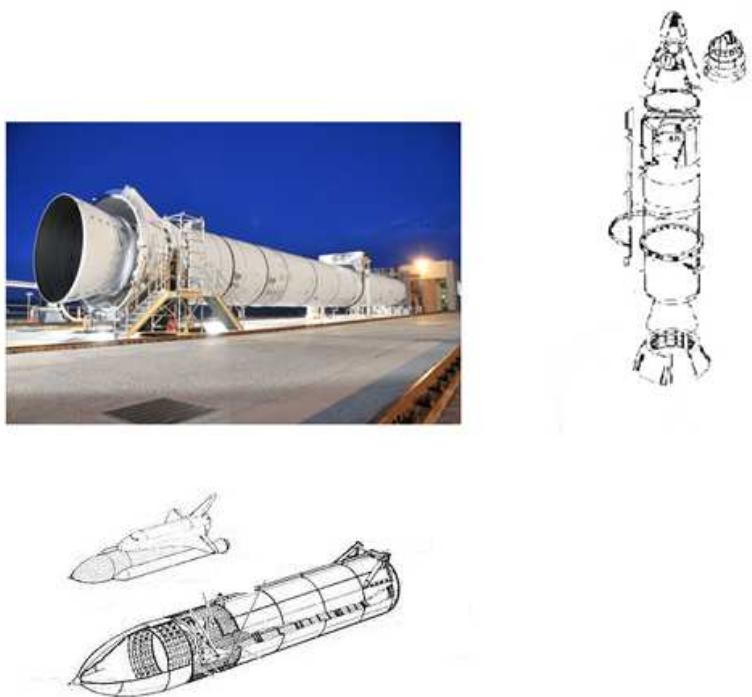


Figura 17 – Foguete de combustível sólido (ASRM) para ônibus espacial. FONTE: [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

Esta variação foi desenvolvida pela indústria aeroespacial para soldagem seções mais espessas de ligas de alumínio, especialmente para o tanque de combustível ônibus espacial externo. Neste processo, a fusão é utilizado técnica keyhole (buraco de fechadura). A parte negativa do ciclo proporciona uma limpeza catódica da peça de alumínio, enquanto que a porção positiva proporciona a penetração desejada e o fluxo de metal fundido.

### **Soldagem a Laser (LBW)**

Este processo, junto com soldagem por feixe elétrons pode empregar grandes fontes de calor concentradas por soldagem, com as vantagens de uma maior precisão e qualidade da solda e menores distorções.

Este processo é utilizado para a soldagem e perfuração e de componentes de motores de jato feitas de ligas resistentes ao calor, tais como o Hastelloy X.

Combustores parte da turbina a jato JT9DPW4000, PW2037 e F-100-22019-PW da Pratt& Whitney são soldadas a laser

Soldagem a laser em breve irá substituir rebites na união de longarinas para a placa de pele no Airbus 318 e 3XX aircraft<sup>20</sup>. Economias significativas deverão ser feitas através da substituição de juntas rebitadas por juntas soldadas por laser. Rebitagem tem um consumo de 40% da produção total de horas de trabalho do estrutura aeronave.

**Fig6 detalhe das longarinas do airbus soldadas por laser**



Imagen Do ArtigoNew Trends In Welding In The Aeronautic Industry

Figura 17 – Detalhe das longarinas do airbus soldadas por laser. FONTE: [www.efw.eb](http://www.efw.eb)

## SOLDAGEM POR FEIXE DE ELETRONS (EBW)

Como mencionado acima, a elevada intensidade do feixe de electrons gera soldas com pequena ZTA e pouca deformação, como mostrado na Figura 5 e na Figura 6. Este processo apresenta a vantagem sobre o laser (LBW) que não tem problemas com a reflexão do feixe sobre o metal fundido, no entanto, necessário para operarem uma camara de vácuo

Esta característica faz com que este processo seja especialmente apropriado para a soldagem de ligas de titânio pelo fato do titânio não poder ser soldada a atmosfera aberta; ligas de titânio são amplamente utilizados por militares em aeronaves devido ao seu peso de sua densidade ser mais leve e sua alta resistência e desempenho em temperaturas elevadas.

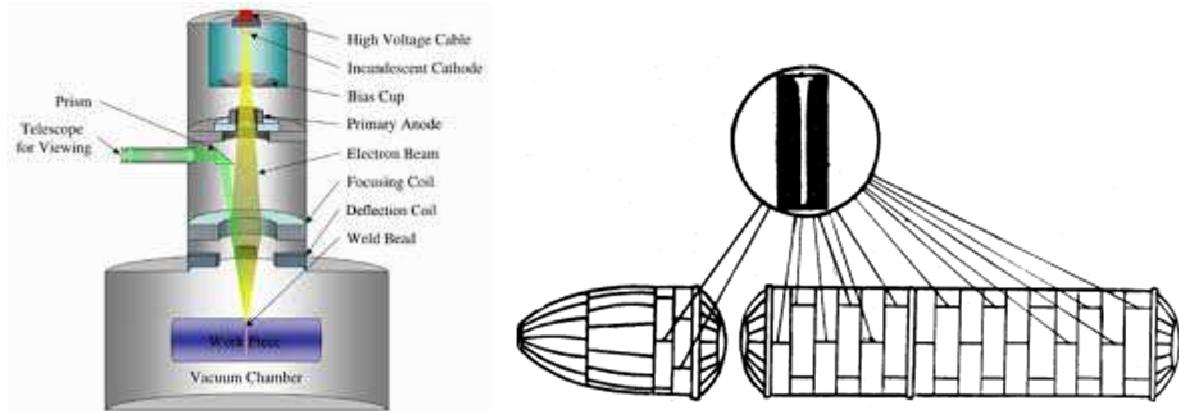


Figura 18 – Detalhe dos arranjos das soldas longitudinais do tanque de combustivel de foguetes soldada por feixe de eletrons. Fonte: New Trends In Welding In The Aeronautic Industry

A aplicação de EBW para soldagem de componentes de titânio utilizados em aeronaves militares esta em constante expansão.

O processo esta sendo utilizado em recuperação de pás de turbinas danificadas principalmente em peças que sofrem danos em operação devido a colisão com objetos não identificados isto e um grande avanço tecnológico pois o par de pás para turbinas novas custam em media 42.801 mil dolares enquanto o par de pás recuperadas custam em media 6 855 mil dolares uma redução de 84% nos custos



Figura 19 – pás de turbinas de titanio recuperadas por solda na industria militar Fonte: Artigo Electron Beam Weld Repair and Qualification of Titanium Fan Bladesfor Military Gas Turbine Engines

## Aplicação

O processo de soldagem por feixe de elétrons pode ser aplicado em quase todos os materiais, em juntas de metais dissimilares e em várias faixas de espessura, permitindo alta precisão e alta velocidade de soldagem.

## Vantagens

Uma das grandes vantagens do feixe de elétrons é o baixo aporte de calor com que este processo efetua as soldagens. As outras vantagens da utilização do processo de soldagem por feixe de elétrons são: possibilidade de soldar materiais com espessuras elevadas; obtenção de cordão com pequena largura em relação à profundidade atingida; menores tensões residuais; qualidade metalúrgica da solda superior à de outros processos devido à ausência de ar e possibilidade de soldagem em locais de difícil acesso ou inacessíveis.

## Desvantagens

As desvantagens do processo de soldagem por feixe de elétrons são, dentre outras: emissão de raios X; exigência de vácuo; limitação do tamanho da peça, o qual está vinculado ao tamanho da câmara de vácuo.

## SOLDAGEM POR DIFUSÃO (DFW)

A soldagem por difusão é o processo de soldagem no estado sólido que produz soldas através de aplicação de pressão em temperatura elevada com deformação ou sem deformação macroscópica com ou sem movimentos relativos das peças.

A indústria aeronáutica e a maior usuária da solda por difusão. Este processo provou ser particularmente útil quando combinado com conformação superplástica de ligas de titânio. Neste caso, as geometrias complicadas podem ser obtidas em apenas uma etapa de fabricação. A qualidade e baixo custo da junta permite, em alguns casos, a substituição de componentes de alumínio rebitados por componentes de titânio.

A aplicação da solda por difusão com conformação superplástica reduziu de 76 Peças e 1000 rebites de alumínio para uma versão de titânio com apenas 14 peças e 90 rebites com uma economia total de 30% dos custos.

O sucesso da solda por difusão com conformação superplástica, titânio estimulado muitas pesquisas com o objetivo de realizar em alumínio processo com semelhante.

A diferença fundamental entre solda por difusão em titânio e solda por difusão em alumínio é que no titânio a solda pode dissolver seus óxidos, e o alumínio não pode. Portanto, o óxido residual na interface de uma junta de alumínio reduz drasticamente a resistência da solda por difusão. Este problema tem impedido a solda por difusão com conformação superplástica sejam utilizados nas ligas de alumínio

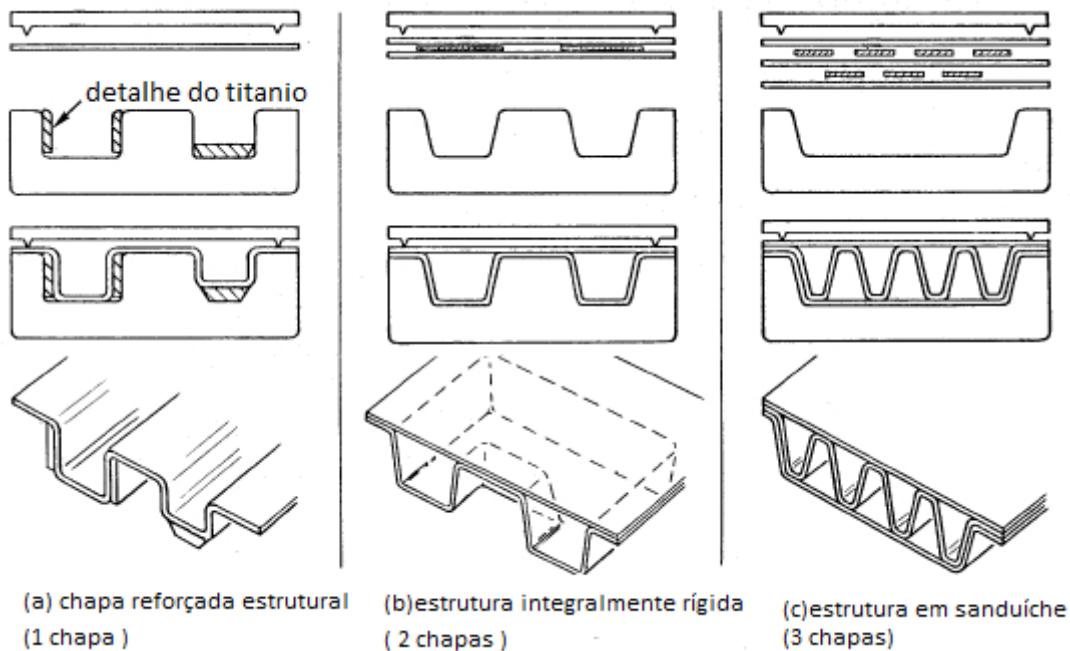


Figura 20 – Fabricação de estruturas reforçadas de titâniio soldadas por difusão combinada com conformação superplástica. Fonte: Do Artigo New Trends In Welding In The Aeronautic Industry.

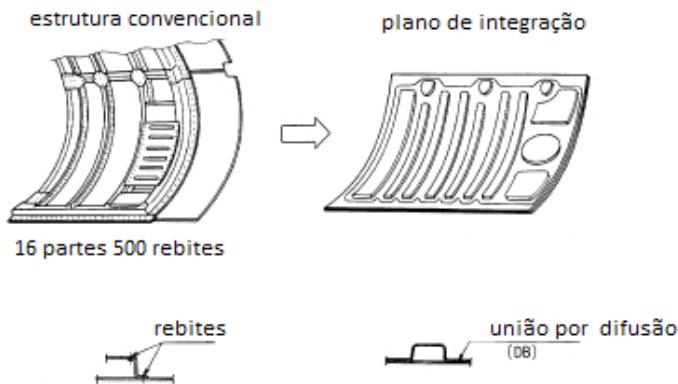


Figura 24 – Escotilha de saída do BAE125/800 feita de titâniio soldada por difusão com conformação superplástica. Fonte: New Trends In Welding In The Aeronautic Industry

### **Parametros do processo:**

Os parâmetros do processo que devem ser considerados são a temperatura, a pressão, o tempo de soldagem ou contato entre as peças, a deformação das superfícies de contato, a qualidade superficial (rugosidade superficial e condições de limpeza) e a atmosfera protetora.

#### **Temperatura**

O processo de geração do calor é feito por energia elétrica que pode ser na forma de indução, resistência ou alta frequência. As temperaturas de processo ficam abaixo da linha "solidus" ou acima da temperatura de recristalização da liga, em média 0,7.  $T_s$  (em Kelvin).

A temperatura promove um rompimento das camadas de óxido, causando interferência na estrutura cristalina do material e contribuindo para uma orientação favorável dos íons necessários para a difusão. As temperaturas podem atingir 1000°C ou mais, favorecendo a ligação entre inoxidáveis ou refratários. No entanto, uma temperatura de processo alta demais leva ao aumento do grão e, por conseguinte, à queda das propriedades mecânicas.

#### **Pressão**

A pressão de soldagem, que pode ser aplicada por processo hidráulico, pneumático ou mecânico, fica pouco abaixo do limite de escoamento na temperatura de soldagem. Em conjunto com o calor, serve para provocar uma deformação plástica nas superfícies rugosas, que faz aumentar o contato das superfícies e possibilita a união dos materiais.

#### **Tempo de soldagem**

O tempo de soldagem pode variar de 10 minutos até várias horas. Existe uma relação inversa entre tempo e temperatura: quando a temperatura de soldagem aumenta, o tempo de soldagem diminui, e vice-versa.

## Estado das superfícies

As exigências quanto ao estado de superfície na união, no que diz respeito à qualidade da superfície ( $R_j = 1$  até  $6 \mu\text{m}$ ), são desvantagens do processo.

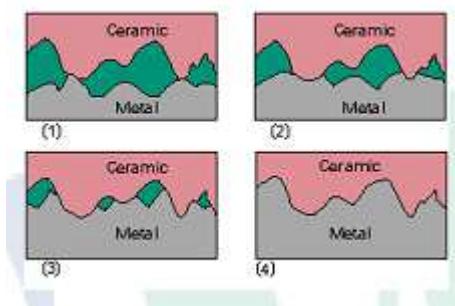


Figura 21 – Sequencia de soldagem por difusão. Fonte: [www.ewf.eb](http://www.ewf.eb)

## Limpeza das superfícies

A limpeza das superfícies de união, após uma usinagem fina, é feita por decapagem química. Gorduras e óleos são removidos com álcool, acetona ou tricloretileno, com ação de ultrassom.

## Atmosfera de proteção

Para a soldagem de materiais metálicos, pode-se usar vácuo como atmosfera de proteção, a qual deve ser mantida durante o processo de união, de baixa a média, entre  $10^3$  e  $10^{16}$  Torr. Além do vácuo, pode se trabalhar também com gás de proteção, seja argônio ou hélio, ou banho de sal ( $\text{BaCl}_2$ ).

## Materiais:

Alguns dos materiais comuns soldados por esse tipo de processo para a indústria aeronáutica e aeroespacial são: boro, titânio, Alumínio, cerâmica, composto, Grafite, magnésio, entre outros.

Vantagens	Desvantagens
União dissimilar	Não adequado para altas produções
Propriedades dos metais não afetadas pela soldagem	Investimento Inicial alto
Pouca distorção	Limitação quanto à geometria das peças
União de varias juntas simultaneamente	Requer altissima preparação da superficie
Juntas de alta qualidade	Requer elevado custos com aquecimento das peças

### Equipamento :

Tipicamente um forno com um interior a vácuo ou em atmosfera inerte e um prensa hidráulica para aplicar a pressão necessária. Outro tipo de equipamentos podem substituir a prensa hidráulica por um compressor a ar que aplica uma pressão isoestática.

Um controle total da temperatura e pressão aplicada aos componentes é necessária.

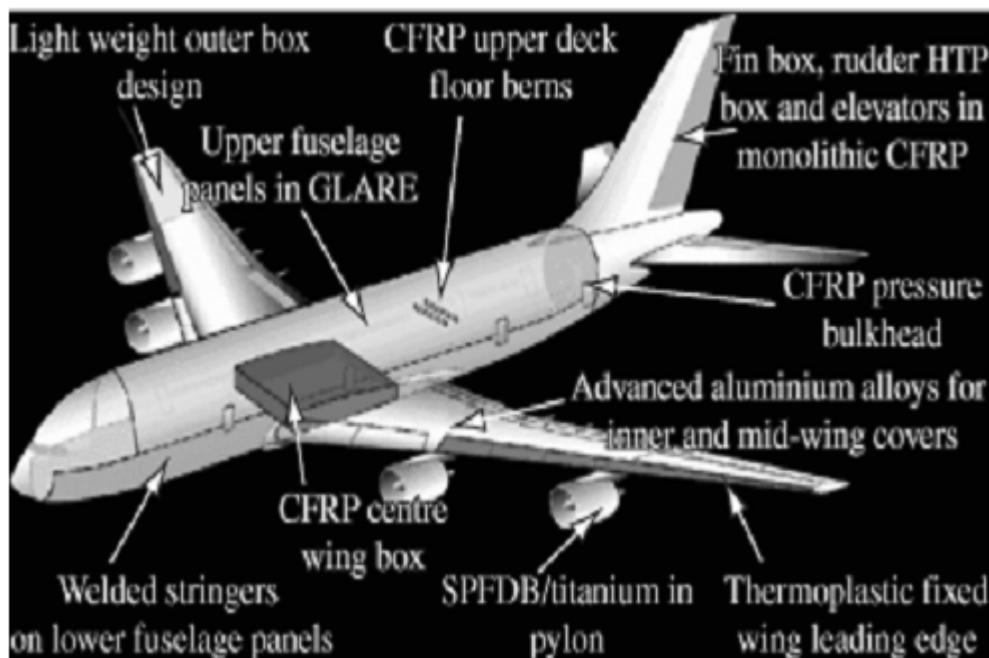


Figura 22 – Componentes soldados em uma aeronave. Fonte: [www.ewf.eb](http://www.ewf.eb)

## **Soldagem por Ultrassom**

A Soldagem por ultrassom tem como objetivo unir peças por vibrações mecânicas na faixa ultrassônica associada com pressão, a Soldagem é feita no estado sólido, sem fusão do material base.

### **Processo**

O processo de Soldagem é realizado através de um transformador eletroacústico, o qual transforma uma corrente alternada em oscilações longitudinais mecânicas de frequência de 22 KHz, por exemplo;

O componente denominado sonotrodo é o agente que promove as vibrações.

Durante a Soldagem as peças são fixadas na "bigorna". O sonotrodo transmite oscilações tangenciais para a peça.

Se a força de pressão e a amplitude dos movimentos relativos entre as superfícies a soldar forem suficientemente fortes, então ocorre fluidificação.

Os filmes de sujeira, água e óxido são rompidos.

As superfícies, aquecidas e aplaniadas, se aproximam e forças de ligação de superfícies entram em ação.

O aquecimento é limitado a uma camada muito fina.

Soldam-se chapas finas, folhas ou fios (espessura de 0,003 até 2 mm) de metais macios (alumínio, ouro), também em chapas mais espessas de aço e não ferrosos, vidro ou mesmo cerâmica.

A solda por ultrassom, pode ser usada para unir os principais metais, destacamos os principais: Alumínio, Cobre, Ouro, Magnésio, Molibdênio, Níquel, Paládio, Platina, Prata, Tântalo, Estanho, Titânio, Tungstênio, Zircônio, além dos Aços.

## **Bibliografia**

### **Sites:**

[www.aerospacematerials.com.au](http://www.aerospacematerials.com.au)

[www.arquivosaeronauticos.com.br](http://www.arquivosaeronauticos.com.br)

[www.qualidadeaeronautica.com.br](http://www.qualidadeaeronautica.com.br)

[www.embraer.com.br](http://www.embraer.com.br)

[www.infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br)

### **Livros:**

Livro Materiais de Aviação – Coleção – ANAC – Marcio Alves Suzano