

# A INFLUÊNCIA DO ENCAPSULAMENTO DO ALUMÍNIO NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO DE AÇO INOXIDÁVEL 304 E ALUMÍNIO 6351<sup>1</sup>

Wanderlei Rodrigues Monteiro<sup>2</sup>  
Carlos de Moura Neto<sup>3</sup>  
Olivério Moreira de Macedo Silva<sup>4</sup>

## Resumo

Neste trabalho é estudada a influência do encapsulamento do alumínio no processo de soldagem por fricção de aço inoxidável 304 e alumínio 6351. Primeiramente, foram fabricados corpos-de-prova, submetidos a soldagem de topo, com o intuito de serem levantados parâmetros de soldagem. Após a soldagem de topo, os corpos-de-prova foram ensaiados por ensaios mecânicos de tração, para obtenção dos valores do limite de resistência à tração da junta soldada. Os corpos-de-prova que apresentaram melhores resultados em tração foram preparados metalograficamente e examinados por: microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise química dispersiva de raios x (EDS) e ensaiados em microdureza Vickers (HV). Com base nos resultados obtidos, foi estudada e projetada uma nova geometria, especialmente desenvolvida para o caso de materiais dissimilares. A geometria desenvolvida possibilita o encapsulamento do alumínio pelo aço inoxidável, diminui a sua deformação plástica, e aumenta a área de contato e o ancoramento mecânico entre os dois materiais.

**Palavras-chave:** Soldagem; Atrito; Metais dissimilares; Encapsulamento.

## THE INFLUENCE OF THE ALUMINUM ENCAPSULATION BY THE 304 STAINLESS STEEL AND 6351<sup>1</sup> ALUMINUM WELDING BY FRICTION TECHNIQUE

## Abstract

In this work it is studied the influence of the aluminum encapsulation of 304 stainless steel and 6351 aluminum in welding processs by friction technique. Initially, the welded samples were tested in top welding, in order to define welding parameters. The top welded specimens were submitted to tension tests to determine ultimate tension strength values. After that, the specimens that had presented the best results were processed metallographically and observed with optical microscopy, scanning electronic microscopy, energy dispersive of X-ray detection and Vickers micro hardness. The observation was implemented to study a geometry especially developed to the case of dissimilar materials. The developed geometry makes possible the aluminum encapsulation by the stainless steel, decreasing its plastic deformation, increasing the area of contact and the anchoring between the two materials.

**Key words:** Welding; Friction; Dissimilar materials; Encapsulation.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *Eng. Mecânico, Mestre em Engenharia, Tecnologista do CTA-IAE – São José dos Campos – SP.*

<sup>3</sup> *Eng. Metalurgista, Prof. Associado da Divisão de Eng. Mec-Aer do ITA (Sócio da ABM).*

<sup>4</sup> *Eng. Mecânico, Doutor, Tecnologista do CTA-IAE – São José dos Campos – SP.*

# 1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho, são estudadas as junções de materiais dissimilares: aço inoxidável AISI 304 alumínio 6351, materiais utilizados para a fabricação de componentes na área espacial. Para a realização das juntas foi utilizado o método de soldagem *Friction Welding (FW)*, denominado, neste trabalho, **soldagem por fricção (atrito)**. Inicialmente, foram realizados estudos e experiências práticas sobre soldagem por fricção de materiais similares para levantamento dos aspectos mais importantes deste processo de soldagem. Os materiais utilizados foram aço carbono SAE 1020 e aço inoxidável AISI 304. Os primeiros testes realizados com materiais dissimilares, como os utilizados neste trabalho, mostraram que não somente a preparação (limpeza), e também a rugosidade da superfície de fricção do aço inoxidável, são parâmetros muito importantes, que influenciam diretamente na resistência mecânica à tração da junta soldada. Assim, decidiu-se estudar a influência da rugosidade da superfície de fricção do aço inoxidável AISI 304, na resistência mecânica à tração da junta soldada por fricção. Não houve preocupação com o nível de rugosidade da liga de alumínio, pois ela molda-se perfeitamente à superfície do aço inoxidável, devido à grande diferença da resistência mecânica entre a liga de alumínio e o aço inoxidável. Os corpos-de-prova obtidos pelo processo de soldagem foram preparados por usinagem e, posteriormente, submetidos a ensaios mecânicos para determinação da resistência mecânica máxima à tração das juntas soldadas. Os corpos-de-prova que apresentaram melhores resultados à tração foram estudados metalograficamente.

## 1.1 Processo de Soldagem por Fricção (Atrito) - FW

A soldagem por fricção é um processo que ocorre no estado sólido e produz soldagem pela rotação ou movimento relativo de duas peças sob forças compressivas produzindo calor e deslocando material plasticamente nas superfícies de atrito. Mesmo considerado um processo no estado sólido, sob determinadas condições pode ocorrer um filme fundido na interface. Porém, as características finais da solda não devem exibir evidências de um estado fundido. A solda resultante deste processo é caracterizada pela ausência de uma zona de fusão, por uma estreita zona termicamente afetada (ZTA) e pela presença de material deformado plasticamente, denominado de *flash*. A qualidade da solda é dependente: do tipo de material; das características da junta; dos parâmetros de soldagem e dos tratamentos pós-soldagem. Existem vários parâmetros de processos importantes em soldagem por fricção. Os mais importantes são: velocidade relativa das superfícies de fricção; pressão normal (pressão axial); tempo de aquecimento da interface; taxa de deslocamento axial; temperatura das superfícies de fricção; natureza do material; rigidez e elasticidade das superfícies de fricção; tempo requerido para parar o fuso; duração da força de recalque.<sup>[1]</sup>

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar a influência do encapsulamento do alumínio no processo de soldagem por fricção de aço inoxidável 304 e alumínio 6351. Na soldagem pelo processo de fricção de materiais dissimilares, como estudado neste trabalho, é muito importante conhecer seus principais parâmetros de soldagem. Devido à grande diferença da resistência mecânica existente entre os materiais, ocorre grande dificuldade em conseguir alcançar parâmetros ideais para uma perfeita consolidação da junta soldada. Para tanto, foram adotadas as seguintes metodologias.

- caracterização dos materiais como recebidos;
- realização de ensaios mecânicos de tração para verificação da resistência mecânica a tração da junta soldada; e
- caracterização das juntas soldadas, por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise química por energia dispersiva de raios x (EDS) e microdureza Vickers (HV).

## 1.3 Motivação do Trabalho

A motivação para o estudo de juntas de materiais dissimilares pelo processo de soldagem por fricção é decorrente da necessidade do desenvolvimento de um Sistema de Controle de Rolamento (SCR) desenvolvido no País, para ser utilizado no Veículo Lançador de Satélites (VLS-1), do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA).<sup>[2]</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram o aço inoxidável AISI 304 e a liga AA6351, ambos na forma de tarugos, com dimensões 25,4 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento.

### 2.1 Caracterização dos Materiais como Recebidos

A caracterização consistiu de análise química, exames metalográficos e ensaios de dureza dos materiais como recebidos.

### 2.2 Soldagem

Durante a fase de fricção das superfícies a serem soldadas pelo processo de soldagem, ocorre aumento da temperatura na interface, causando uma grande deformação (*flash*) da superfície de fricção do alumínio. Conforme a temperatura aumenta, aumenta também a deformação, dificultando cada vez mais a obtenção de valores ideais, para que ocorra a soldagem. As Figuras 1 e 2 apresentam exemplos da deformação do alumínio e do embutimento do aço inoxidável no alumínio, ocorridos durante o processo de soldagem. À esquerda da Figura 1 são apresentados os corpos-de-prova obtidos pelo processo de soldagem por fricção utilizando-se os mesmos diâmetros da superfície de fricção para os dois materiais. Para os da direita, foram utilizados diâmetros menores para o aço inoxidável 304. Na Figura 2 observa-se o embutimento do aço inoxidável na superfície do alumínio causado pela pressão axial e o aumento da temperatura na interface de soldagem.

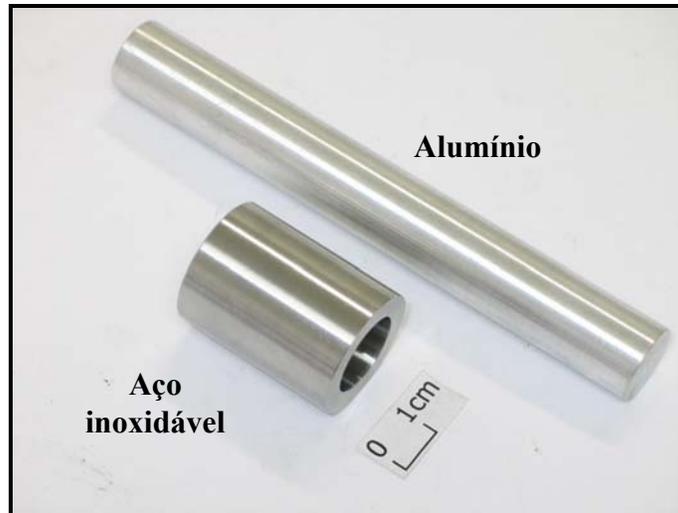


**Figura 1** - Vista geral de corpos-de-prova obtidos pelo processo de soldagem por fricção.



**Figura 2** - Observa-se o embutimento do aço inoxidável no alumínio.

Levando-se em consideração que nos experimentos de soldagem pelo processo de fricção ocorrem expansão da liga de alumínio, difusão entre as ligas e ancoramento mecânico, promoveu-se uma mudança na geometria dos corpos a serem soldados. A nova geometria possibilita maior área de atrito, maior área de ancoramento mecânico e menor deformação da liga de alumínio, devido à limitação promovida pelo **encapsulamento** do alumínio durante o processo de soldagem. As Figuras 3 e 4 apresentam a nova geometria dos corpos-de-prova projetados para promover o encapsulamento do alumínio pelo aço inoxidável. As experiências mostraram que a nova geometria utilizada resolveu o problema da deformação plástica do alumínio, aumentando a área de difusão e o ancoramento mecânico, e possibilitou a obtenção de uma junção de excelente qualidade.



**Figura 3** - Observa-se a nova geometria do corpo-de-prova projetado para proporcionar o encapsulamento do alumínio pelo aço inoxidável.



**Figura 4** - Observa-se a parte do corpo-de-prova usinado em aço inoxidável.

Na Figura 5, observa-se, por exame visual, que houve total preenchimento da folga existente entre o aço inoxidável e o alumínio. Isto ocorreu devido ao aumento da temperatura na superfície de fricção e ao controle promovido pelo encapsulamento do alumínio pelo aço inoxidável, durante o processo de soldagem.



**Figura 5** - Observa-se a deformação do alumínio preenchendo toda a folga entre o aço inoxidável e o alumínio.

### **2.3 Caracterização das Juntas Soldadas**

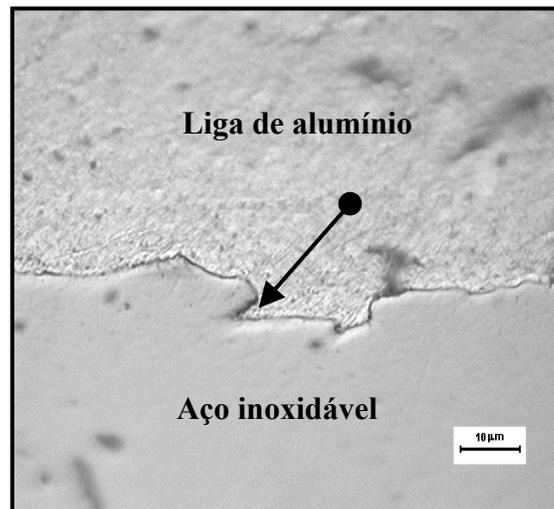
Os corpos-de-prova obtidos pelo processo de soldagem, utilizando a nova geometria, foram preparados por usinagem e, posteriormente, alguns foram submetidos a ensaios mecânicos para a determinação da resistência mecânica máxima à tração. Os corpos-de-prova, com e sem ensaio de tração, foram seccionados no sentido longitudinal (Figura 6), com o objetivo de verificar a interface entre a liga de alumínio e o aço inoxidável. Neste caso, utilizando-se um corpo-de-prova ensaiado, observa-se que ocorreu o destacamento da interface e escoamento da liga de alumínio. Pelo exame com maior ampliação das regiões de interesse (Figura 7), observa-se que ocorreu adesão entre os dois corpos, o que comprova a eficiência do processo. Na Figura 8, utilizando um corpo-de-prova não ensaiado, pode-se observar que ocorreu ancoramento do alumínio na superfície do aço inoxidável.



**Figura 6** – Corpo-de-prova seccionado longitudinalmente, após ensaio mecânico.



**Figura 7** - Fotoestereografia com aumento de 16 X. Observa-se que a fratura ocorreu na estrutura do alumínio.



**Figura 8** – Fotomicrografia da seção longitudinal, sem ataque. Aumento: 1000 X. Observa-se o ancoramento da liga de alumínio na superfície do aço inoxidável (seta).

### 3 DISCUSSÃO

A soldagem por fricção é um processo de união no estado sólido, com a formação de pequena quantidade de componentes intermetálicos na interface da solda como observado pela análise dos resultados obtidos nos experimentos realizados. A relação da mistura mecânica entre materiais dissimilares no estágio de fricção e os produtos de reação não são bem claros. Em função dos parâmetros de soldagem, pode-se ter a formação de um ou outro elemento de segunda fase com características frágil ou dúctil. Observando-se que ocorreu ancoramento mecânico do alumínio na superfície do aço inoxidável, verifica-se que o ancoramento mecânico juntamente com a difusão contribuem significativamente para o aumento da resistência mecânica da junta soldada. Pode-se salientar também que o mecanismo de difusão provoca a formação

de partículas de segunda fase que, dependendo da composição, pode dar origem a fratura frágil ou fratura dúctil, quando o material é submetido a uma solicitação mecânica.

#### 4 CONCLUSÕES

A deformação plástica das ligas de alumínio, devido à pressão e ao aumento da temperatura promovida pelo atrito, é um limitador para se conseguir um aumento na área de difusão e de ancoramento mecânico para o par aço inoxidável - alumínio.

Pelo processo de soldagem por fricção podem ser soldados metais e ligas de natureza diversa, devido à temperatura não muito elevada alcançada durante o processo e ao curto tempo nessa temperatura, reduzindo a formação de fases indesejáveis.

A nova geometria utilizada nos experimentos finais resolveu o problema da deformação plástica do alumínio, aumentando a área de difusão e o ancoramento mecânico, e possibilitou a obtenção de uma junção de excelente qualidade.

Os experimentos mostram que é perfeitamente possível a utilização do processo de soldagem por fricção, na junção do par aço inoxidável – alumínio, para o emprego nas conexões a serem utilizadas no Sistema de Controle de Rolamento (SCR) do Veículo Lançador de Satélites (VLS-1).

#### REFERÊNCIAS

- 1 UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Departamento de Mecânica. Processo de soldagem por fricção – FW. Belo Horizonte. (Relatório) Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/Grupos/Solda/Texto FW.pdf> >. Acesso em: 14 Jul. 2006.
- 2 INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO. **Descrição do sistema de controle de rolamento do VLS-1.** São José dos Campos: IAE, 1987. (Relatório interno)
- 3 PIGORETTI, E. V. **Junção por difusão da liga Ti-6Al-4V ao aço inoxidável AISI 316L.** 1999. Tese. (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- 4 TRAVESSA, D. N. **Ligação por difusão de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ao aço inoxidável AISI 304, com intercamadas de alívio de tensões.** 1998. Tese. (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.