



OTIMIZAÇÃO EMPÍRICA DOS PARÂMETROS DA SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA PARA MATERIAIS DISSIMILARES

E.P. Alves^{1,*}; C.Y. An²; F. Piorino Neto¹; R.C. Toledo²; P.I.G. Tenório²

1 Instituto de Aeronáutica e Espaço - Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial
Av. Brigadeiro Faria Lima, 1941 - São José dos Campos/São Paulo, CEP.: 12227-000,
Brasil.

Telefone: (12) 3208-6000

2 Laboratório Associado de Sensores e Materiais - Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais

Av. dos Astronautas, 1758 - São José dos Campos/São Paulo, CEP.: 12227-010, Brasil.

Telefone: (12) 3208-6580

*eder.padua@yahoo.com.br

RESUMO: O processo de soldagem por fricção rotativa (RFW) é um dos mais utilizados no mundo para a fabricação de componentes bimetálicos que requerem alta resistência mecânica, repetibilidade e alto padrão de qualidade. Todo o processo ocorre em estado sólido a temperaturas abaixo do ponto de fusão dos materiais envolvidos, tendo como principais mecanismos de ligação, a difusão e a mistura mecânica. Este trabalho teve como objetivo a otimização empírica dos parâmetros do RFW para materiais dissimilares, para tal utilizou-se a liga de alumínio AA 6351-T6 e o aço inoxidável AISI 304L, avaliando as juntas obtidas por meio de um teste de tração mecânica.

PALAVRAS-CHAVE: soldagem por fricção rotativa; materiais dissimilares; otimização.

ABSTRACT: The rotary friction welding process (RFW) is one of the most used in the world for the manufacture of bimetallic components that require high mechanical strength, repeatability and high standard of quality. The entire process occurs in solid state at temperatures below the melting point of the materials involved, having as main bonding mechanisms, the diffusion and mechanical alloying. The aim of this work is the empirical optimization of the parameters of the RFW for dissimilar materials, AA 6351-T6 aluminum alloy and AISI 304L stainless steel, and the obtained bonded joints was evaluated by tensile strength tests.

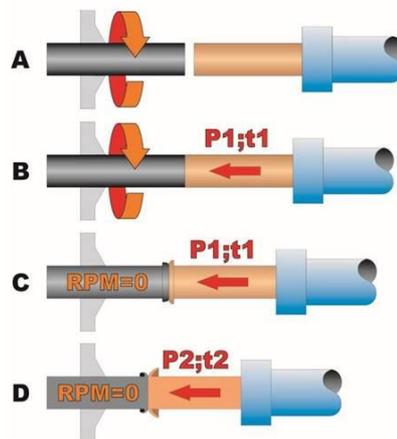
KEYWORDS: friction welding; dissimilar materials; optimization.

1. INTRODUÇÃO.

1 A união de materiais dissimilares por processos de soldagem por fusão tem sido um grande
2 desafio para a engenharia, uma vez que estes apresentam grandes diferenças nas suas propriedades
3 físicas, químicas, além da temperatura de fusão [1]. Quando eles são submetidos a um processo de
4 soldagem, é muito difícil evitar que ocorram variações em sua composição química no momento em
5 que ocorre a fusão. Essa nova composição química após a solidificação normalmente leva a
6 formação de fases intermetálicas frágeis e à formação de uma ampla zona termicamente afetada
7 (ZTA) [2].

8 O processo de soldagem por fricção rotativa (SFR) é um processo especial que ocorre no
9 estado sólido onde a junção entre os materiais é produzida em temperaturas inferiores a temperatura
10 de fusão dos materiais envolvidos. Ele fornece alta produtividade, excelente repetibilidade, baixo
11 custo, e encontra a sua maior aplicação na produção de junções entre materiais dissimilares usados
12 nos setores aeroespacial, nuclear, naval e automotivo [3].
13

1 Na SFR, uma das peças é fixada e submetida a uma determinada rotação por uma unidade
2 motora (RPM), e a outra é posicionada, alinhada e movida por um pistão hidráulico até tocar a peça
3 que está em rotação. Após isto, é aplicada uma pressão P_1 por um determinado tempo (t_1), seguido
4 da frenagem da rotação (RPM=0) e subsequente aplicação de P_2 durante um tempo t_2 , finalizando a
5 soldagem. Na Figura 1, podem ser vistas as principais etapas do processo [4].



6 **Figura 1.** (A) Período de aproximação; (B) Aplicação da P_1 , t_1 ; (C) Término de aplicação de P_1 ,
7 t_1 , e frenagem da máquina (RPM =0); (D) Aplicação de P_2 , t_2 e término da soldagem.

8 Este trabalho teve como objetivo a otimização empírica dos parâmetros do processo de
9 soldagem por fricção rotativa para materiais dissimilares, para tal utilizou-se a liga de alumínio AA
10 6351-T6 e o aço inoxidável AISI 304L. As junções obtidas foram avaliadas por meio de ensaio
11 mecânico de tração.

12 2. MATERIAIS E MÉTODOS

13 Os pinos cilíndricos utilizados neste trabalho foram usinados em torno mecânico
14 convencional com diâmetro de 14,8 mm e comprimento de 100 mm (aço inoxidável) e 110 mm
15 (liga de alumínio), com rugosidade superficial média $R_a = 3,2 \mu\text{m}$, valor normalmente obtido com
16 este processo de usinagem utilizando ferramentas comuns.

17 Após a operação de usinagem, realizou-se a limpeza das superfícies dos pinos com acetona e
18 secagem com pano de algodão, esse procedimento teve como objetivo eliminar possíveis elementos
19 contaminantes como óleos, graxas, fluidos decorrentes da usinagem. Posteriormente, os pinos foram
20 armazenados em dessecadoras; momentos antes da soldagem, os pinos passaram por uma limpeza
21 química com uma substância denominada deoxidizer, onde os mesmos foram imersos nessa
22 substância química por alguns segundos, e posteriormente lavado em água filtrada e secada
23 termicamente.

24 As amostras de soldagem por fricção rotativa convencional- As soldas foram realizadas
25 utilizando-se uma máquina de soldagem por fricção rotativa convencional, marca GATWICK, com
26 velocidade relativa (RPM) fixa de 3200 RPM e velocidade de deslocamento do pistão constante.

27 Os corpos-de-prova soldados foram usinados de acordo com a Norma ASTM – E 8M [5], e
28 submetidos a ensaios de tração em uma máquina da marca ZWICK 1474, utilizou-se uma célula de
29 carga de 100 kN, a temperatura ambiente de 25°C, e com uma velocidade de ensaio de 3 mm/min.

30 Para a definição dos parâmetros utilizados no equipamento de soldagem por fricção rotativa,
31 otimização do processo e qualificação dos procedimentos adotados, foram realizados cerca de 160

1 ensaios mecânicos de tração, divididos em três etapas: (a) definição prévia de parâmetros; (b)
2 otimização do processo; e (c) qualificação do processo e procedimentos de soldagem.

3 A maior parte dos ensaios mecânicos de tração foram realizados nas duas primeiras etapas, e
4 que tiveram como objetivo principal a definição prévia dos parâmetros de P1, t1, P2 e t2 para cada
5 combinação dos materiais dissimilares liga de alumínio e aço inoxidável, com pino de alumínio de
6 geometria regular, unidos pelo processo SFR. A alteração de uma ou mais variáveis envolvidas no
7 processo implica de forma direta nas propriedades mecânicas da interface de ligação, gradiente de
8 temperatura, e nos valores de RC (redução do comprimento do pino de alumínio). É importante
9 ressaltar que os valores desses parâmetros não são fornecidos pela literatura devido às grandes
10 variações de materiais, ligas, diâmetros, e estar relacionado com as características do equipamento
11 de soldagem fornecido por diversos fabricantes.

12 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

13 Na primeira etapa de testes, fixaram-se os valores de P1, t1, t2, RPM (fixo do equipamento)
14 se baseando em trabalhos anteriores [2,6] e variou-se os valores de P2 de 500 a 1500 MPa em
15 intervalos de 100 MPa, obteve-se o valor de P2 tido como ideal para esses parâmetros adotados,
16 valor em que se atingiu a resistência mecânica máxima da junção (linha em destaque na Tabela 1).

17 Na Tabela 1 podem ser vistos os resultados obtidos dos ensaios mecânicos de tração
18 realizados durante a etapa de definição de parâmetros de soldagem, mostraram a importância de
19 cada parâmetro e sua influência na resistência mecânica da junção.

20 **Tabela 1.** Resultado de estudos de parâmetros do processo SFR fixando-se os valores de P1,
21 t1, t2 e RPM, e variando-se os valores de P2.

Nº	P1 (MPa)	t1 (s)	P2 (MPa)	t2 (s)	RC (mm)	LR (MPa)
1	300	7	500	4	9,5	258
2	300	7	600	4	10	261
3	300	7	700	4	11	270
4	300	7	800	4	11	284
5	300	7	900	4	12	286
6	300	7	1000	4	12	276
7	300	7	1000	4	13	274
8	300	7	1100	4	13	282
9	300	7	1100	4	14	279
10	300	7	1200	4	14	298
11	300	7	1200	4	14	294
12	300	7	1300	4	14	291
13	300	7	1300	4	15	293
14	300	7	1400	4	15	284
15	300	7	1400	4	15	287
16	300	7	1500	4	16	242
17	300	7	1500	4	16	236

22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39 A segunda etapa teve como objetivo otimizar os parâmetros, de forma a melhorar a resistência
40 mecânica da junção. Para tal, fixou-se os valores de P1, P2 e RPM e variou-se os valores de t1 e t2.
41 Na Tabela 2 podem ser vistos os melhores resultados obtidos no final dessa etapa.

42 O ajuste do tempo (t1 e t2) no processo resultou no aumento da resistência mecânica na
43 junção, aproximando-a ao valor da liga de alumínio utilizada no processo (~324 MPa), linha em
44 destaque na Tabela 2, dessa forma, tomou-se esses valores como ideais para os parâmetros de P1,
45 t1, P2, t2 e RPM.

Tabela 2. Resultado de estudos de parâmetros do processo SFR fixando-se os valores de P1, P2 e RPM, e variando-se os valores de t1 e t2.

Nº	P1 (MPa)	t1 (s)	P2 (MPa)	t2 (s)	RC (mm)	LR (MPa)
1	300	5	1200	2	12	304
2	300	5	1200	4	13	298
3	300	7	1200	2	13	296
4	300	7	1200	4	14	291
5	300	4	1200	2	12	295
6	300	7	1200	4	14	294
7	300	10	1200	4	14	276
8	300	10	1200	2	13	282
9	300	14	1200	2	14	214
10	300	14	1200	4	15	195

A terceira etapa que compreende a qualificação do processo e dos procedimentos de soldagem adotados, consistiu na fabricação de novas junções utilizando-se os parâmetros otimizados. Foram realizados novos testes de soldagem utilizando os parâmetros tidos como ideais e melhorados os procedimentos de preparação das amostras antes da realização das operações de soldagem. Os valores dos resultados dos ensaios mecânicos de tração foram semelhantes (Tabela 3), evidenciando a grande repetibilidade do processo.

Tabela 3. Resultados dos ensaios mecânicos.

Nº	P1 (MPa)	t1 (s)	P2 (MPa)	t2 (s)	RC (mm)	σ_R (MPa)
1	300	5	1200	2	14	315
2	300	5	1200	2	14	327
3	300	5	1200	2	13	318

Junções dissimilares de aço inoxidável AISI 304 e a liga de alumínio AA 6351-T6 foram fabricadas utilizando o processo SFR e apresentaram ruptura na liga de alumínio, longe da interface de ligação, conforme pode ser visto na Figura 2.



Figura 2. Foto do corpo de prova nº 2, antes e após a realização de ensaios de tração mostrando a fratura no lado da liga de alumínio com 327 MPa.

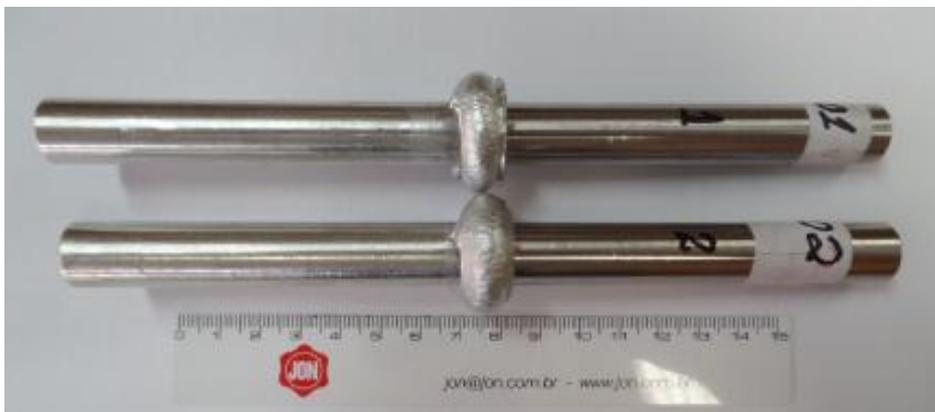
Em paralelo a esse estudo realizou-se uma análise macrográfica das junções soldadas nos forneceu informações importantes do processo SFR. A aparência do “flash” e a observação da

1 redução de comprimento do pino fabricado com a liga de alumínio após a realização da soldagem,
2 possibilitaram a compreensão e entendimento de todo o processo.

3 Durante a realização dos testes de soldagem foram observados diferentes formatos de “flash”
4 em função da utilização dos mais variados parâmetros. Estes formatos quando comparados com os
5 resultados finais dos ensaios de tração nos permitem definir geometrias de “flash” e relacioná-las
6 com a resistência da junção.

7 Na soldagem da liga de alumínio AA 6351-T6 com o aço inoxidável AISI 304, foram
8 realizados dezenas de ensaios utilizando diferentes parâmetros de P1, t1, P2, t2. As amostras com os
9 melhores resultados dos ensaios mecânicos de tração, de uma forma geral, apresentaram geometria
10 de “flash” semelhantes, formato anular, com aparência de deformação plástica uniforme em todo o
11 seu contorno.

12 A Figura 3 apresenta a aparência das junções dissimilares envolvendo a liga de alumínio e o
13 aço inoxidável com os parâmetros tidos como ideais.
14



15 **Figura 3.** Formato do “flash” das junções soldadas.

16 Durante as operações de soldagem observou-se diferentes formações de “flashes” quando
17 utilizados diferentes parâmetros, entretanto, ficou evidenciado a grande repetitividade do processo
18 quando utilizado os mesmos parâmetros na confecção um número maior de peças durante a fase de
19 otimização e qualificação, visto as mesmas aparências de “flashes” e resultados dos ensaios
20 mecânicos de tração obtidos e analisados.

21 Durante a soldagem por fricção da junção dissimilar, o aço inoxidável não sofre deformações
22 plásticas e redução do seu comprimento devido ao seu ponto de fusão, dureza e elevada resistência
23 mecânica, entretanto, a rugosidade da superfície de contato é responsável pela formação das novas
24 superfícies de contato do alumínio durante a deformação plástica e conseqüente remoção de
25 camadas de óxidos e impurezas, necessários para a ocorrência de difusão e ligação entre os
26 materiais.

27 **4. CONCLUSÕES**

28 A definição de parâmetros para a realização de soldagem por fricção exige conhecimentos do
29 equipamento, dos materiais que serão unidos, do processo, e do uso de metodologias que
30 possibilitem a definição, otimização e qualificação de junções dissimilares para aplicações
31 estruturais.

32 Na soldagem de junções dissimilares, é de fundamental importância a realização de
33 procedimentos adequados para a devida preparação das superfícies dos materiais que estarão em



1 contato antes da operação de soldagem, pois o acabamento e limpeza das superfícies afeta
2 diretamente na qualidade final da junção.

3

4 *Agradecimentos: Os autores são gratos a CAPES pelo suporte financeiro.*

5

6 **5. REFERÊNCIAS**

- 7 [1] Maldonado-Zepeda C. *The effect of interlayers on dissimilar friction weld properties*. Tese de
8 Doutorado em Ciência Aplicada, University of Toronto, Toronto, 2001.
- 9 [2] Alves, E.P.; An, C.Y.; Piorino Neto, F.; dos Santos, E.F. *Frontiers in Aerospace Engineering*,
10 v. 1, p. 20-26, 2012.
- 11 [3] Machado, I.G. *Soldagem e técnicas conexas: processos*. Porto Alegre: Editora Livraria
12 Conceitual, 1996.
- 13 [4] Alves, E.P. *Caracterização mecânica e estudo do perfil térmico na soldagem por fricção de*
14 *materiais dissimilares*. Tese de Doutorado em Engenharia e Tecnologias Espaciais, Instituto
15 Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.
- 16 [5] American Society For Testing And Materials. *E 8M - 04: standard test methods for tension*
17 *testing of metallic materials [metric]*. [S.l.]: ASTM, 2004.
- 18 [6] Alves, E. P. *Junções de Materiais Dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção*
19 *rotativa*. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologias Espaciais, Instituto Nacional
20 de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.