

SOLDAGEM DA LIGA DE ALUMÍNIO 1050 COM O AÇO INOXIDÁVEL 304 PELO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA CONVENCIONAL

Eder Paduan Alves ^(1,*), Francisco Piorino Neto ⁽¹⁾, Chen Ying An ⁽²⁾

(1) Instituto de Aeronáutica e Espaço - IAE / Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial - CTA

(2) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

(*) ederep@yahoo.com.br

Resumo: O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de junções no estado sólido de materiais dissimilares alumínio AA 1050 e aço inoxidável AISI 304, que possam ser utilizadas nas tubulações de reservatórios de propelentes líquidos e demais tubulações dos Veículos Lançadores de Satélites. As junções são obtidas pelo processo de soldagem por fricção rotativa convencional que combina o calor gerado entre o atrito de duas superfícies e deformação mecânica. Foram realizados testes de soldagem com diferentes parâmetros de processo e medido a quantidade de calor na interface da solda. Os resultados foram analisados por meio de ensaios mecânicos de tração, microdureza Vickers, ensaios metalográficos e MEV-EDX. A resistência da junta variou com o aumento do tempo de fricção e com a utilização de diferentes valores de pressão. Obtiveram-se junções com propriedades mecânicas superiores a da liga de alumínio AA 1050, com a fratura ocorrendo no alumínio longe da interface de ligação. A temperatura monitorada na região de contato entre os dois materiais durante o processo apresentou um valor de 376°C. A análise feita pelo EDX na interface da junção mostrou que ocorre interdifusão entre os principais elementos químicos dos materiais envolvidos. O processo de soldagem por fricção convencional demonstrou ser um ótimo método para obtenção de junções entre materiais dissimilares que não são possíveis pelos processos de soldagem por fusão.

Palavras Chave: soldagem por fricção, parâmetros de soldagem, materiais dissimilares.

Abstrac: The purpose of this work is the development of solid state joints of dissimilar material AA 1050 aluminum alloy and AISI 304 stainless steel, which can be used in the pipes of tanks of liquid propellants and other pipes of the Satellite Launch Vehicle. The joints were obtained using welding process by conventional rotary friction, which combines the heat generated from friction between two surfaces and mechanical deformation. Tests were conducted with different welding process parameters and measured the amount of heat at the interface of bonding. The results were analyzed by means of tensile tests, Vickers microhardness, metallographic tests and SEM-EDX. The strength of the joints varied with increasing friction time and the use of different pressure values. Joints with superior mechanical properties of the AA 1050 aluminum alloy could be obtained at a frictional time of 34 seconds, with the fracture occurring away from the interface of bonding in the aluminum metal. The temperature monitored in the region of contact between the two materials during the process had a value of 376°C. The analysis by EDX at the interface of the junction showed that occur interdiffusion between the main chemical components of the materials involved. The welding process by conventional rotary friction proved to be a good method for obtaining joints between dissimilar materials that are not possible by the fusion welding processes.

Keywords: friction welding, welding parameters, dissimilar materials.

1. INTRODUÇÃO

As dificuldades na soldagem das ligas de alumínio com o aço pelos processos de soldagem por fusão resultam das fases intermetálicas que são formadas entre o alumínio e ao aço em elevadas temperaturas (Fe_3Al , FeAl , FeAl_2 , Fe_2Al_5 , FeAl_3). O diagrama de fases Fe-Al mostra essas fases intermetálicas bem definidas [1]. Essas fases são geralmente duras e frágeis.

Os processos de soldagem por fusão existentes até o momento, não possibilitam a obtenção de junções entre materiais dissimilares com boas propriedades mecânicas que possam ter aplicações estruturais. Até mesmo os processos de soldagem por fusão que apresentam uma ZTA (Zona Termicamente Afetada) bem reduzida, como é o caso do processo de soldagem a laser e por feixe de elétrons, geram junções com propriedades inferiores a do metal base.

Tendo como objetivo principal a obtenção de junções entre a liga de alumínio AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 para aplicações estruturais e que possam ser utilizadas no setor aeroespacial, foram realizados diversos estudos e análises dos processos de soldagem. Dentre eles, o que apresentou os melhores resultados foi o processo de soldagem por fricção rotativa convencional.

No presente estudo, a liga de alumínio AA 1050 (comercialmente puro, com 99,5 % Al) e o aço inoxidável AISI 304 austenítico foram unidos por meio do processo de soldagem por fricção rotativa convencional. Para definição dos parâmetros de soldagem e analisar a resistência da junta soldada, foram realizados ensaios mecânicos de tração. Após a obtenção dos melhores resultados, onde a fratura ocorreu longe da interface de ligação, na liga de alumínio AA 1050 (menor resistência), foi otimizado o processo e analisada a interface de ligação por microscopia óptica, microscopia eletrônica por EDX, e ensaio de microdureza Vickers. Também foi analisada a temperatura na interface de ligação durante a realização da soldagem.

2. PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA CONVENCIONAL

O processo de soldagem por fricção é classificado pela American Welding Society (AWS) como um processo de união no estado sólido cuja ligação é produzida a temperaturas menores do que a temperatura de fusão dos materiais bases [2].

Todo o aquecimento responsável pela união é gerado mecanicamente por atrito entre as peças a serem soldadas. Esse aquecimento ocorre devido a uma das peças que está fixa ser pressionada sobre a outra peça que está em alta rotação [3]. O atrito entre as superfícies possibilita uma rápida elevação da temperatura na interface de ligação, fazendo com que a massa se deforme plasticamente e flua em função da aplicação de pressão e da força centrífuga, gerando uma rebarba (flash). Com a rebarba são removidas as impurezas e óxidos da superfície, promovendo a criação de uma superfície com ótima adesão física e química. A elevação da temperatura na interface de ligação e aplicação de pressão nessa superfície faz com que ocorra difusão entre os dois materiais, e conseqüentemente, a sua união. Nos equipamentos de soldagem por fricção rotativa convencional, os principais parâmetros utilizados para a realização do setup são: P1 (pressão – fase de aquecimento); t1 (tempo – fase de aquecimento); P2 (pressão - fase de recalque); t2 (tempo – fase de recalque); RPM (rotação por minuto). A Figura 1 mostra as etapas do processo.

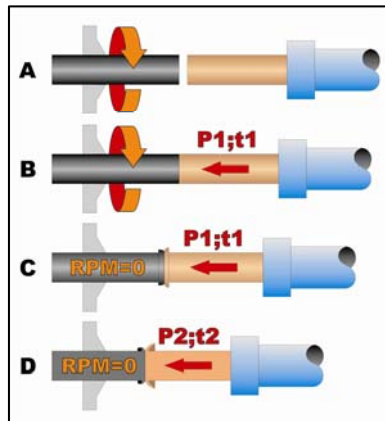


Figura 1 - Etapas do processo de soldagem por atrito convencional. **A)** Período de aproximação; **B)** Aplicação de P_1 , t_1 ; **C)** Término de aplicação de P_1 , t_1 , e frenagem da máquina ($RPM=0$); **D)** Aplicação de P_2 , t_2 e término da soldagem.

A Figura 2 mostra o esquema básico de um equipamento de soldagem por fricção convencional. Normalmente a sua estrutura é bastante rígida a fim de proporcionar estabilidade ao equipamento que trabalha em altas rotações e sofre a ação de grandes pressões de recalque. Os equipamentos modernos são automáticos e permitem que todos os parâmetros sejam ajustados, controlados e monitorados diretamente no painel de controle.

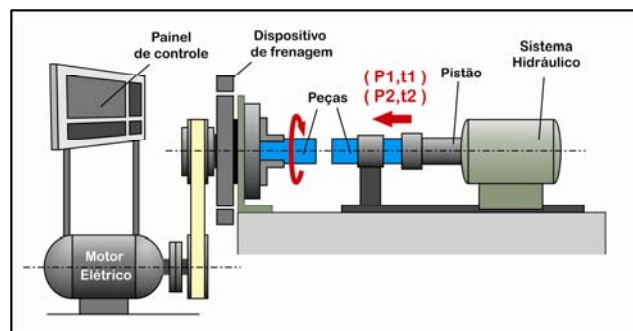


Figura 2 – Equipamento de soldagem por fricção rotativa convencional.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais e preparação das superfícies

Os materiais utilizados neste trabalho foram à liga de alumínio AA 1050 (comercialmente puro, 99,5 % Al), e o aço inoxidável austenítico AISI 304. Ambos dos materiais foram usinados em torno mecânico convencional com diâmetro de 14,8 mm e comprimentos de 100 mm e 110 mm, respectivamente. Após a usinagem foram submetidos a uma limpeza com acetona para remover contaminantes orgânicos como óleos, graxas, etc. Nas Tabelas 1 e 2, são apresentadas as composições químicas e as propriedades mecânicas dos materiais.

Tabela 1 – Composições químicas nominais dos materiais, %.

Alumínio AA 1050	ELEMENTOS, %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	0,07	0,26	<0,001	ND	<0,001	-	<0,002	<0,007
Aço Inoxidável 304	Si	S	P	Mn	C	Cr	Ni	-
	0,38	0,024	0,036	1,67	0,054	18,2	8,0	-

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no estudo atual.

MATERIAL	PROPRIEDADES MECÂNICAS				
	Tensão σ (MPa)		Deformação ε (%)		Módulo de Elasticidade E (GPa)
	Escoamento	Máxima	Máxima	Ruptura	
Alumínio AA 1050	44,70	78,48	21	43	59,12
Aço Inoxidável 304	354,69	643,79	48	63	177,10

3.2 Equipamento de soldagem por fricção

Foi utilizada uma máquina de soldagem por fricção rotativa convencional da marca GATWICK com velocidade de rotação fixa de 3200 RPM, P1= 300 Psi, t1=32 s, P2=200 Psi e t2= 2s. Os materiais foram posicionados conforme mostra Figura 3.

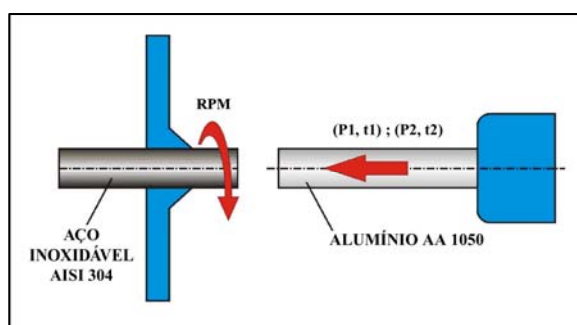


Figura 3 – Vista esquemática do posicionamento dos materiais antes da soldagem.

3.3 Análises metalográficas

As juntas foram cortadas no sentido transversal da solda, embutidas numa matriz de baquelite, polidas e examinadas na região da interface, no lado do alumínio e no lado aço inoxidável 304 de acordo com a norma ASTM-E3. O alumínio foi atacado com reagente Keller e o aço inoxidável com reagente eletrolítico ácido oxalíco a 10% e analisado em um microscópio da marca LEICA DMRXP.

3.4 Análises da interface de ligação por MEV- EDX

Tendo como objetivo verificar o principal mecanismo de ligação por fricção, a difusão, foram realizadas análises através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDX), na interface da solda, região central e extremidades para se verificar. Utilizou-se para essa finalidade um microscópio eletrônico marca JEOL – Mod. JSM 5310, alocado no LAS – INPE.

3.5 Monitoramento da temperatura durante a soldagem

O monitoramento da temperatura foi realizado por meio de um termopar do tipo TK (cromel-alumel), fixado na região central da interface de solda, lado do aço inoxidável AISI 304 a uma distância de 0,12 mm do pino de alumínio AA 1050, conforme mostrado na Figura. 4. Para aquisição dos dados utilizou-se um sistema denominado TDL (Termopar Data Logger), acoplado ao notebook que forneceu em tempo real o gráfico da variação da temperatura durante o processo. A Figura 4 mostra o sistema TDL e o posicionamento do termopar.

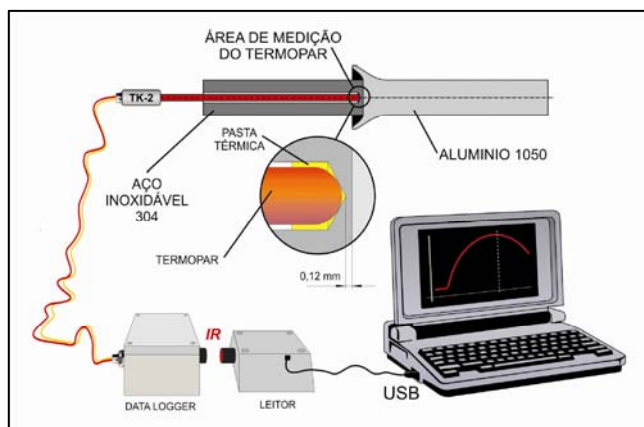


Figura 4 – Sistema TDL composto de termopar tipo K, Data Logger, leitor IR (infravermelho) e notebook para monitoramento da temperatura.

4 RESULTADOS

4.1 Macroestrutura

Em nível macroestrutural observou-se na soldagem por fricção rotativa convencional, a formação de uma rebarba com simetria circular, diferentes formatos, e também reduções significativas no comprimento do pino cilíndrico de alumínio AA1050 de acordo com os parâmetros adotados. A Figura 5 mostra as interfaces que foram unidas (5a), a rebarba gerada pela soldagem (5b) e corpo de prova para ensaio de tração após a usinagem (5c).



Figura 5 – Interfaces dos pinos que foram unidas (a); rebarba gerada pelo processo (b); corpo de prova para ensaio e tração (c); (Amostras sobre papel milimetrado).

4.2 Resistência Mecânica da Junta Soldada por Fricção

Os resultados dos ensaios de tração para os diferentes parâmetros de soldagem t_1 , P_2 e t_2 utilizados, são mostrados na Tabela 1. A junção que apresentou melhor resistência mecânica (σ Máx.) refere-se ao corpo de prova número 8, com resistência mecânica superior ao material de

menor resistência mecânica, a liga de alumínio AA 1050. O tempo de fricção t_1 e a pressão de soldagem P2 foram os parâmetros que mais influenciaram na resistência da junta. Na soldagem de materiais dissimilares como o alumínio AA 1050 (comercialmente puro – 99,5%) e o aço inoxidável AISI 304, o tempo de fricção $t_1 = 32s$ permitiu a elevação da temperatura na interface a valores suficientes para que ocorresse a soldagem. A pressão de soldagem $P_2 = 200$ psi, aplicada no tempo $t_2 = 2s$ na interface aquecida, fez com que a solda fosse finalizada e apresentasse a resistência mecânica desejada. Os resultados também mostraram que à medida que aumentamos a pressão de soldagem P2, a resistência da junta também aumenta até atingir o seu limite e depois começa a diminuir novamente. A velocidade relativa (RPM), a pressão P1 e o tempo t_1 , são fundamentais para que ocorra a elevação da temperatura na interface e a difusão dos materiais envolvidos, enquanto que a P2 e t_2 são as responsáveis pela finalização da soldagem. Quando não ocorre a interação entre esses diversos parâmetros envolvidos no processo, a junção perde em qualidade e resistência mecânica.

Tabela 3 – Resultados obtidos nos ensaios de tração.

CDP	P1	t1 (s)	P2	t2 (s)	σ_t Max
1	300	7	300	2	72.0
2	300	17	200	1	64.12
3	300	17	300	1	69.63
4	300	27	200	1	62.94
5	300	32	100	1	47.45
6	300	32	100	2	53.37
7	300	32	200	1	70.63
8	300	32	200	2	80.08
9	300	32	300	1	74.23
10	300	32	400	1	76.54

A Figura 6 mostra os corpos de prova de N° 5 e N° 8, depois que foram retirados da máquina de ensaio de tração após a realização dos ensaios. O corpo de prova N° 8 que apresentou o melhor resultado teve seus parâmetros repetidos na soldagem de novos corpos de prova, e apresentou resultados semelhantes com a ruptura ocorrendo longe da interface de solda.

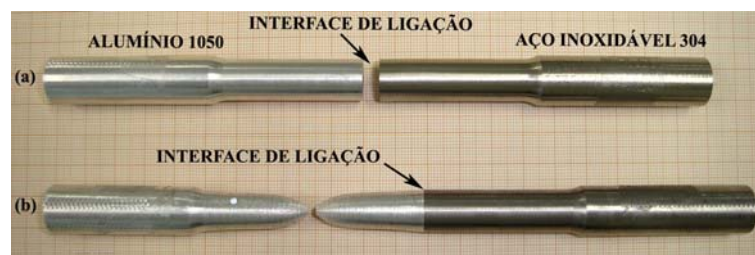


Figura 6 – Corpo de prova N° 5 (a) – ruptura na interface; corpo de prova N° 8 (b) – ruptura longe da interface de ligação.

4.3 Ensaios de microdureza Vickers

Os testes de microdureza Vickers foram realizados da interface da solda para o alumínio AA 1050 e também da interface da solda para o aço inoxidável AISI 304, região central. Na liga de alumínio AA 1050 ocorreram um ligeiro aumento dos valores de microdureza Vickers à medida que aproximamos da interface (pontos 1, 2, 3 e 4), do ponto 5 ao ponto 20 o valor médio das medidas obtidas (30,9 HV) representa a microdureza típica da liga de alumínio AA 1050 (30,0 HV) [4]. No lado do aço inoxidável AISI 304 os resultados também mostraram um aumento dos valores de microdureza a medida que os pontos se aproximam da interface de ligação. Essa variação nos valores de microdureza ocorreu do ponto 1 (maior valor), até o ponto 12. Do ponto 13 ao ponto 20,

o valor médio das medidas obtidas (198,8 HV) refere-se ao valor de microdureza típica do aço inoxidável AISI 304 utilizado nesse trabalho.

Na liga de alumínio AA 1050, o aumento dos valores de microdureza Vickers próximos à interface de ligação deve-se, provavelmente, a grande deformação plástica sofrida pelo alumínio AA 1050 e a elevação da temperatura nessa região. Já no aço inoxidável AISI 304, tudo indica que o aumento dos valores de microdureza nas regiões próximas da interface de ligação seja decorrente da elevação da temperatura e do deslocamento do fluxo de calor nessas regiões, visto que o esse material não sofre deformações plásticas consideráveis durante a soldagem, como acontece com a liga de alumínio AA 1050

A Figura 7 mostra a variação dos valores de microdureza Vickers por meio dos gráficos Microdureza HV x Distância da Interface de Ligação, para a liga de alumínio AA 1050 (a) e para o aço inoxidável AISI 304 (b). As linhas pontilhadas expressam os valores de microdureza HV dos materiais utilizados neste trabalho.

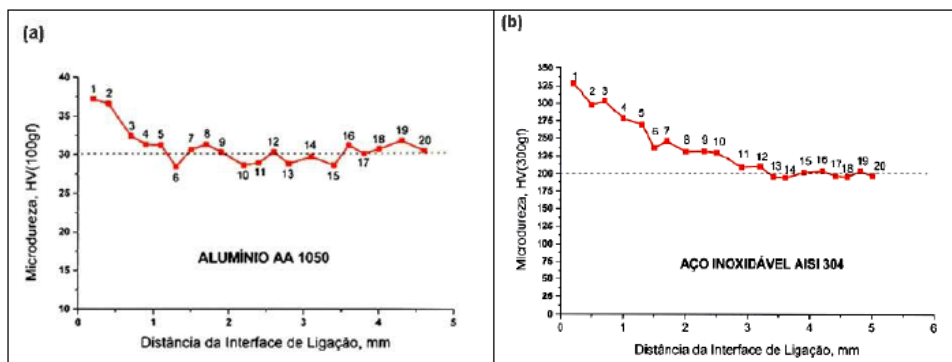


Figura 7 – Gráfico Microdureza HV x Distância da Interface de Ligação – (a) alumínio AA 1050; (b) aço inoxidável AISI 304.

4.4 Análises metalográficas da interface de ligação

Na Figura 8 é visto uma fotomicrografia da junção entre a liga de alumínio AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304, tirada na região central da amostra com aumento de 100 X. A ZTA é muito pequena, não perceptível por meio de microscopia óptica. A região de interface é caracterizada por uma linha reta com algumas imperfeições de forma decorrentes do processo de soldagem por fricção. Tanto no lado do alumínio quanto do aço inoxidável não são observadas mudanças microestruturais próximas da região de interface, como ocorre nos processos de soldagem por fusão. Toda deformação plástica decorrente dos parâmetros utilizados no processo, ocorreram na liga de alumínio AA 1050 devido ao fato desse material apresentar menor resistência mecânica e menor temperatura de forjamento a quente.

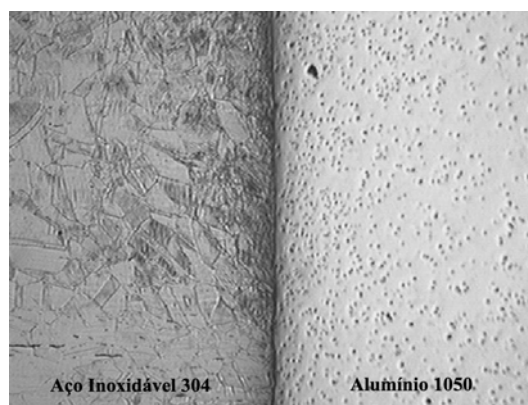


Figura 8 – Fotomicrografia da interface de soldagem entre a liga de alumínio AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 com aumento de 100 X.

4.5 Análise da interface de ligação por EDX

A análise semiquantitativa por varredura de linescan – EDX foi realizada na região central da interface de ligação e também nas periferias. Os resultados foram muito parecidos, com pouca variação da camada de difusão entre os principais elementos químicos que compõem a liga de alumínio AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 como o Fe e o Al. Pode ser visto na Figura 9 que ocorre interdifusão entre o Fe e o Al, o que caracteriza o mecanismo de ligação no processo de soldagem por fricção, a difusão. O Al se difundiu menos no Fe do que o Fe no Al, sendo que uma das razões para isso é o menor diâmetro do átomo de Fe em relação ao Al. Outra razão para as diferentes distâncias da zona de difusão e raio são as diferentes concentrações entre o Fe e o AL contidas em cada material.

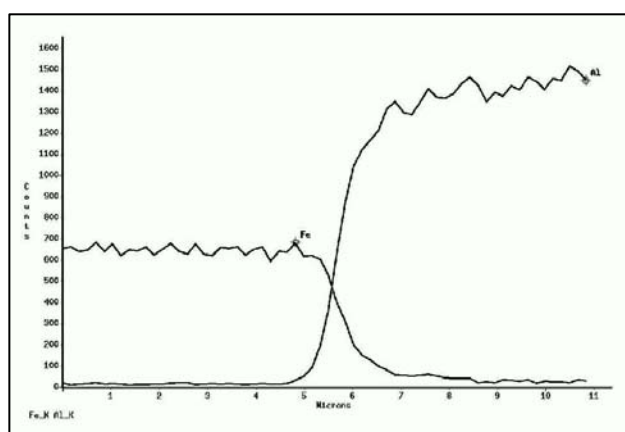


Figura 9 – Análise semiquantitativa por EDX mostrando a interdifusão entre os principais elementos da liga de alumínio AA 1050 (Al) e do aço inoxidável AISI 304(Fe).

4.5 Medidas da temperatura na interface de ligação

A temperatura é o parâmetro mais importante de uma junção no estado sólido, por controlar a cinética dos processos termicamente ativados envolvidos em junções difusas. Nas junções que ocorrem em altas temperaturas, a mobilidade atômica aumenta e auxilia os movimentos de deslocamento dos átomos através da interface de ligação [5].

O termopar fixado na região central do pino cilíndrico de aço inoxidável AISI 304 a uma espessura de parede igual 0,12 mm da interface do pino cilíndrico de alumínio AA 1050 (Figura 4), registrou a temperatura máxima de 376°C durante o processo de soldagem em tempo real de 32 segundos (Aproximação + t1 + t2), mostrado na Figura 10. No gráfico foram caracterizadas todas as etapas do processo de soldagem, a aproximação, a 1ª fase (aquecimento), a 2ª fase (recalque), e o término da soldagem. Também foi possível observar como ocorre o resfriamento após a finalização da soldagem.

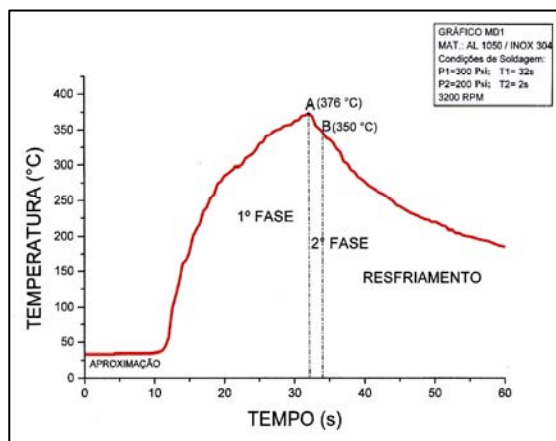


Figura 10 – Gráfico Tempo X Temperatura – Liga de alumínio AA 1050 e Aço Inoxidável AISI 304 com tempo total de 34 segundos

A “aproximação” compreende o momento em que as interfaces dos diferentes materiais estão se aproximando para iniciar a fricção. O início da 1ª fase de soldagem ocorre no momento em que ocorre o contato entre as interfaces dos dois materiais (início da fricção, elevação da temperatura) e termina com a aplicação da pressão P1 (300 Psi) no tempo t1 (32s), quando a máquina de soldagem a fricção é frenada atingindo a rotação igual a zero. Neste exato momento a temperatura na interface de ligação foi igual a 376°C no ponto “A”, e iniciou-se a 2ª fase de soldagem com a aplicação da pressão P2 (200 Psi) no tempo t2 (2s). O ponto “B” marca o término da aplicação do tempo t2 e o fim da soldagem, momento em que foi registrada a temperatura de 350°C.

5 CONCLUSÕES

1. O processo de soldagem por fricção demonstrou ser bastante eficiente na soldagem de materiais dissimilares como o alumínio AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304, visto pelos resultados dos ensaios mecânicos de tração que apresentaram propriedades mecânicas não possíveis de se obter por meio dos processos de soldagem por fusão.

2. Dentre os parâmetros utilizados para realização dos testes de soldagem, aquele que apresentou os melhores resultados nos ensaios de tração, com valores de resistência mecânica superiores ao liga de alumínio AA 1050, foi o de N° 8 (Tab. 3), onde temos P1=300 Psi; t1=32s; P2=200 Psi; t2=2s.

3. A análise semiquantitativa por varredura de linescan – EDX que foi realizada mostrou que ocorre interdifusão entre os principais elementos químicos que compõem a liga de alumínio AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 como o Al e o Fe, caracterizando a difusão como mecanismo de ligação no processo de soldagem por fricção, como relatado por Fukumoto et all [6,7], Fuji et all [8], Kimura et all [9], Yilbas et all [10].

4. Os valores de microdureza Vickers medidos no alumínio AA 1050 e no aço inoxidável 304, medidos próximo à interface de ligação, região central, foram mais altos do que nos metais bases. À medida que os pontos de medição se afastam da interface, eles diminuem até atingir os valores de referência de microdureza para cada material.

5. O monitoramento da temperatura durante a realização dos testes de soldagem da junção que apresentou resistência mecânica superior ao da liga de alumínio AA 1050 registrou a temperatura máxima de 376°C. Isso confirmou que a temperatura na interface de ligação durante a soldagem coincide com a faixa de forjamento á quente da liga de alumínio 1050 (315°C - 430°C), como citado na literatura.

6. Os resultados obtidos nesse trabalho foram de fundamental importância para o entendimento e compreensão das principais características do processo de soldagem por fricção, dos mecanismos de

ligação entre materiais dissimilares, e da viabilidade da aplicação desse processo na produção de junções estruturais que venham a ser utilizadas no setor aeronáutico e aeroespacial.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BANKER, John; NOBILI, Antony. Aluminum-Steel Electric Transition Joints, Effects of Temperature and Time upon Mechanical Properties. Draft 131st Annual Meeting, Seattle, WA, USA, February 17-21, 2002.
- [2] ZEPEDA, Cuauhtemoc Maldonado. The Effect of Interlayers on Dissimilar Friction Weld Properties. 2001. (Thesis of Doctor in Applied Science Graduate Department of Metallurgy & Science) – University of Toronto, Canada.
- [3] WAINER, Emilio; BRANDI, Sérgio Duarte; DÉCORT, Homem de Mello. Soldagem, Processos e Metalurgia – 3ª Edição, 2002.
- [4] Aluminium Alloys – Aluminium 1050 Properties, Fabrication and Applications, Supplier Data by Aalco. Typical Mechanical Properties for Aluminum Alloy 1050. Disponível em: www.azom.com/details.asp?ArticleID=2798#_Alloy_Designations. Acesso em: 20/01/2010.
- [5] BAGNATO, O. R.; Propriedades Mecânicas de Juntas AlSi₁₂ / Al₂O₃ Soldadas por Difusão. 2002. (Tese) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas.
- [6] FUKUMOTO, S. et al. Evaluation of Friction Weld Interface of Aluminum to Austenitic Stainless Steel Joint. Materials Science and Technology, V. 13, Nº 8, p. 686, Aug. 1997.
- [7] FUKUMOTO, S.; TSUBAKINO, H.; OKITA, K.; ARITOSHI, M.; and TOMITA, T.. Friction Welding Process of 5052 Aluminum Alloy to 304 Stainless Steel. Materials Science and Technology, V. 15, p.1080, September 1999.
- [8] FUJI, A.; KIMURA, M.; NORTH, T. H., AMEYAMA, K.; and AKI, M.. Mechanical Properties of Titanium -5083 Aluminum Alloy Friction Joints. Materials Science and Technology, V. 13, p. 673, August 1997.
- [9] KIMURA, Masaaki; SEO, Kenji; KUSAKA, Masahiro; FUJI, Akiyoshi. Observation of Joining Phenomena in Friction Stage and Improving Friction Welding Method. JSME International Journal – Series A, Vol. 46, Nº 3, 2003.
- [10] YLBAS, Bekir S.; AHMET, Z. Sahin; KAHRAMAM, Nafiz; AL-GARNI, Ahmed Z.. Friction Welding of St-Al and Al-Cu Materials. Journal of Materials Processing Technology, V. 49, p. 431-443, April 1994.