

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROCESSO NA QUALIDADE FINAL DE UMA JUNTA DE ALUMÍNIO (2024-T351) SOLDADA POR FSW – FRICTION STIR WELDING⁽¹⁾

Fernanda Potomati⁽²⁾
Camilo Bento Carletti⁽³⁾
Ivan Dalla Valle Epiphanyo⁽⁴⁾
Marcelo Pavan Kuri⁽⁵⁾
Nelson Guedes de Alcântara⁽⁶⁾
Jorge Fernandez dos Santos⁽⁷⁾

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de diferentes parâmetros do processo de soldagem FSW - *Friction Stir Welding* em uma liga Al2024-T351, de forma a correlacioná-los com as medidas de ciclos térmicos, microestrutura (via microscopia eletrônica de varredura), e propriedades mecânicas (ensaio de tração e microdureza). Os resultados de tração e microdureza mostraram que as soldas produzidas com maior velocidade de soldagem (soldas frias) apresentam resistência mecânica mais próxima a do metal de base, do que as soldas produzidas com baixa velocidade de soldagem (quentes). Com relação à análise microestrutural, as soldas quentes apresentaram um maior efeito do aporte térmico pela ação de superenvelhecimento de precipitados.

Palavras-chave: *Friction stir welding*; Ciclos térmicos; Alumínio; Propriedades mecânicas.

(1) 60º Congresso Anual da ABM, 25 e 28 de julho de 2005, Belo Horizonte.

(2) Mestranda do PPG-CEM / DEMa - UFSCar. Rod. Washington Luiz Km 235 – 13565-905 – São Carlos – SP.

(3) Doutorando do PPG-CEM / DEMa - UFSCar.

(4) Mestrando do PPG-CEM / DEMa - UFSCar.

(5) Mestrando PPG-CEM / DEMa - UFSCar.

(6) Professor adjunto do DEMa - UFSCar e Diretor Executivo do CCDM.

(7) Pesquisador Sênior do GKSS Forschungszentrum – Alemanha.

1 INTRODUÇÃO

O processo FSW – *Friction Stir Welding* foi desenvolvido e patenteado pelo *The Welding Institute* (TWI), em 1991 [1]. Consiste na utilização de uma ferramenta rotativa, não consumível, cujo pino penetra na junta a ser soldada e através da ação de atrito entre a ferramenta e chapas, gera calor suficiente para plastificar o material e promover a união das peças [2].

A rotação e a pressão imposta pela ferramenta combinam processos de extrusão e forjamento do material a ser soldado, assim o processo pode ser visualizado como uma extrusão *in-situ*, na qual, a matriz de extrusão é formada entre a chapa de apoio, a ferramenta (pino e *shoulder*) e o metal de base frio ao redor do material aquecido pela rotação da ferramenta [2]. A Figura 1 ilustra o princípio de funcionamento do processo.

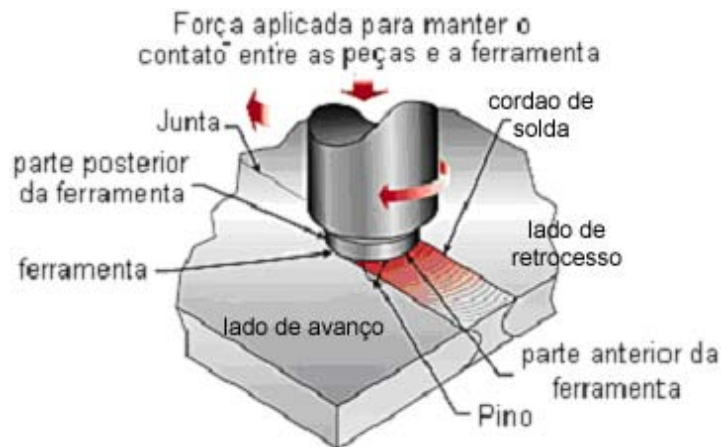


Figura 1. Ilustração do processo FSW. Fonte: www.mts.com

O perfil do pino força o transporte de material do lado de avanço da ferramenta para o lado de retrocesso, onde é consolidado pela pressão de compressão exercida pela ferramenta, formando o cordão de solda [3]. A ilustração da ferramenta é observada na Figura 2.



Figura 2. Ilustração da ferramenta usada no processo FSW.

A microestrutura resultante do processo FSW é proveniente da ação da alta taxa de deformação imposta pelo processo e pelo desenvolvimento dos ciclos térmicos. Deste modo, Threadgill *et al* [4] propuseram a divisão da mesma em quatro regiões, como apresentado na Figura 3.

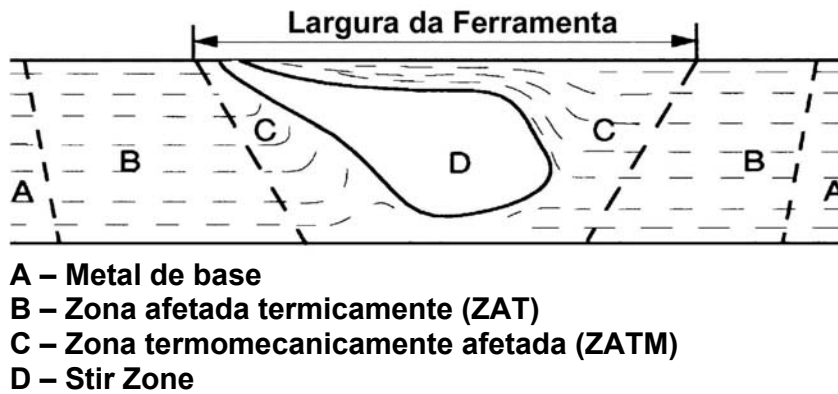


Figura 3. Regiões da junta soldada.

Metal de base: esta região por estar bem distante do cordão de solda não é afetada pelo calor e pela taxa de deformação produzida pelo processo.

Zona Afetada Termicamente (ZAT): aparentemente não há diferença entre o metal de base e a ZAT, contudo, esta região está relacionada com transformações metalúrgicas que ocorrem no cordão de solda, podendo ocorrer alteração na densidade de linhas de discordância, reações de dissolução e precipitação de partículas endurecedoras, afetando a resistência mecânica da junta.

Zona Afetada Termomecanicamente (ZATM): apresenta recristalização parcial dos grãos. Nesta região, os ciclos térmicos são responsáveis pela aceleração do envelhecimento (super envelhecimento) e processo de recuperação.

Stir Zone: o material do *stir zone* é completamente recristalizado devido à alta taxa de deformação o qual é submetido, com microestrutura muito fina e grãos equiaxiais menores que 10 μm [4].

Para obtenção de soldas de boa qualidade o material deve desenvolver temperaturas próximas a da temperatura eutética, pois nessas condições atinge-se alto grau de formabilidade, sem que ocorra fusão do material. Contudo, deve existir também um tempo mínimo de contato entre a ferramenta e a peça a ser soldada.

Caso o tempo de contato entre a ferramenta e a peça não seja suficientemente longo, ou a temperatura atingida esteja abaixo da ideal, há a formação de uma “solda fria”, já que o material não foi satisfatoriamente plasticizado pelo calor gerado. Em contrapartida, se a energia térmica gerada for maior do que o necessário obtém-se uma “solda quente”, que resulta, no caso de ligas de alumínio, no comprometimento das propriedades mecânicas devido aos fenômenos de recozimento [5].

Apesar de já estabelecido o conhecimento de geração de calor por atrito no processo FSW, tal desenvolvimento não é tão trivial, já que a mesma depende de uma série de parâmetros de processo, tais como, velocidade de rotação, velocidade de translação da ferramenta (velocidade de soldagem), projeto da ferramenta e comprimento do pino. Segundo modelo de geração de calor proposto por Chao *et al* [6] o aporte térmico nas peças a serem soldadas é demonstrado pela equação 1:

$$Q = \frac{\pi\omega\mu F(r_0^2 + r_0 r_i + r_i^2)}{45(r_0 + r_i)} \quad \text{equação 1}$$

Onde: **Q** - aporte térmico; π - constante; **F** – força de compressão; ω - velocidade de rotação (rpm); r_0 – raio do rebaixo (*shoulder*); μ - coeficiente de fricção; r_i – raio do pino.

Assim, altas velocidades de rotação serão responsáveis por uma maior geração de calor, dependendo da força compressiva aplicada e da geometria do pino. Já a utilização de altas velocidades de translação promoverá uma redução efetiva do calor por unidade de comprimento, ou seja, aporte térmico menor [7].

De maneira simplificada, a obtenção de soldas quentes e frias deve-se à combinação de parâmetros ótimos de velocidade de rotação e velocidade de translação da ferramenta. A razão $\frac{\Omega}{v}$ determina a classificação térmica das soldas por FSW, que pode ser quente (*hot weld*), média (*medium weld*) ou fria (*cold weld*).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram soldadas por FSW, chapas de 4mm de espessura da liga de alumínio 2024-T351 em junta de topo na direção de laminação das chapas. As soldas foram realizadas no instituto GKSS-Forschungszentrum (Geesthacht-Alemanha) utilizando o robô *Neos Tricept 805*.

O pino e o *shoulder* da ferramenta utilizada foram de 5 e 15mm de diâmetro, respectivamente. O comprimento do cordão de solda é de 500mm.

Os parâmetros de soldagem foram variados como mostra a tabela 1, obtendo-se 6 soldas diferentes. Em relação aos parâmetros adotados F_z é a força de compressão, Ω é a velocidade de rotação e v é a velocidade de soldagem (translação). A força de compressão foi mantida constante durante a realização de cada cordão e a velocidade de rotação foi constante para todas as amostras e igual a 800rpm. A classificação e denominação das amostras também estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Denominação das amostras e parâmetros de soldagem utilizados.

Amostra	Parâmetros		Classificação Térmica
	Força (kN)	Ω/v	
H11	11	$\frac{800rpm}{100mm/min} = 8$	Quente
H14	14	$\frac{800rpm}{100mm/min} = 8$	
M11	11	$\frac{800rpm}{200mm/min} = 4$	Média
M14	14	$\frac{800rpm}{200mm/min} = 4$	
C11	11	$\frac{800rpm}{400mm/min} = 2$	Fria
C14	14	$\frac{800rpm}{400mm/min} = 2$	

Para o levantamento das medidas de temperatura foram utilizados termopares tipo K, de 4mm de diâmetro, dispostos em ambos os lados da junta, na direção perpendicular à de soldagem. O primeiro foi colocado a uma distância de 1mm da periferia da base da ferramenta e os restantes com incrementos crescentes de 1, 2, 3, 4, 5 e 6mm respectivamente. Todos a 2mm de profundidade da superfície da chapa.

Ensaio de tração e microdureza foram realizados no metal de base e nas amostras soldadas, com exceção da amostra C11 que apresentou defeitos de vazios que impossibilitaram os ensaios de tração e de microdureza. As amostras para os ensaios de tração foram retiradas transversalmente à direção de soldagem, assim como as medições de microdureza também foram realizadas transversalmente, em todas as zonas afetadas pela soldagem. A distância entre as indentações foi de 0,5mm. A microestrutura da região dos termopares a 2mm de distância da periferia da base da ferramenta foram analisadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Medidas de Temperatura, Tensão de Escoamento e Microdureza

A partir das medidas dos ciclos térmicos de cada tipo de solda, foi possível determinar a temperatura máxima atingida durante a soldagem na região dos termopares localizados a 2mm do cordão de solda.

O gráfico da Figura 4 relaciona o aporte térmico (temperatura máxima) com os parâmetros de processo e com as tensões de escoamento.

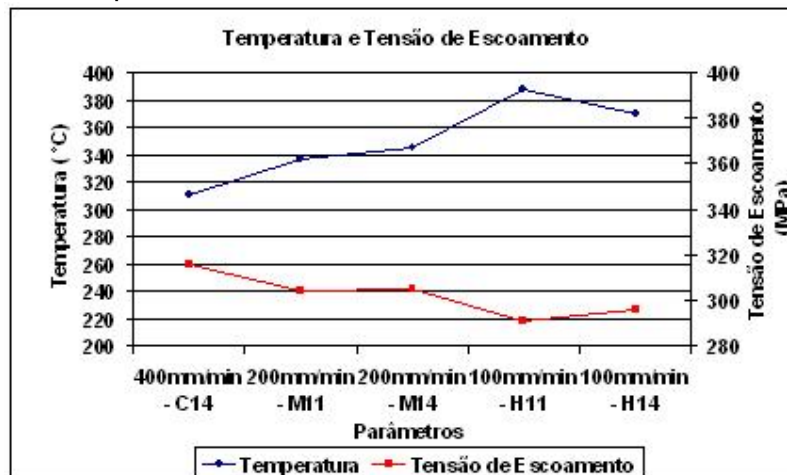


Figura 4. Gráfico da relação entre temperatura máxima e tensão de escoamento.

Relacionando os parâmetros de processo e as temperaturas, é possível verificar que os resultados obtidos estão coerentes com a equação 1. A diminuição da velocidade de soldagem acarreta no aumento do atrito, o que contribui para um aumento da temperatura. A variação da força de compressão também ratifica a equação, uma vez que há um aumento da temperatura com um aumento da força aplicada (M11 e M14). No entanto, nos pontos H11 e H14 este comportamento não é observado. Desta forma, pode-se afirmar que a força efetivamente aplicada durante o processo de soldagem da amostra H14 não atingiu o valor experimental de 14kN.

Observando as temperaturas máximas de cada solda e as respectivas tensões de escoamento obtidas do ensaio de tração, nota-se que quanto maior a temperatura, menor é o valor da tensão de escoamento. Este fato é claramente observado quando se comparam as soldas de diferentes classificações térmicas.

Entre as soldas M11 e M14, a diferença de temperatura não foi suficiente para promover uma mudança significativa na tensão de escoamento.

A Tabela 2 mostra os resultados do ensaio de tração para o metal de base e para as amostras soldadas.

Tabela 2. Resultados obtidos a partir dos ensaios de tração das soldas e do metal de base.

	Metal de Base	Solda Fria C14	Solda Média M11	Solda Média M14	Solda Quente H11	Solda Quente H14
$\sigma_{e0,2}$ (MPa)	336	316	304	305	291	296
ε em $\sigma_{e0,2}$ (%)	0,74	0,70	0,73	0,67	0,70	0,67
$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (MPa)	477	454	446	445	415,6	427
ε em $\sigma_{m\acute{a}x.}$ (%)	17,1	14,2	10,9	10,9	5,7	7,7
σ_r (MPa)	473	450	443	441	415	425
ε em σ_r (%)	17,5	14,8	11,8	11,8	5,6	8,09

Nota: $\sigma_{e0,2}$ - tensão de escoamento, ε - deformação, $\sigma_{m\acute{a}x.}$ - limite de resistência, σ_r - tensão de ruptura

As soldas quentes apresentaram uma deformação muito pequena quando comparadas ao metal de base.

Os resultados mostram que as soldas frias apresentam propriedades mecânicas mais próximas a do metal de base.

A força de compressão é um parâmetro que deve ser bem controlado, pois valores elevados aumentam o aporte térmico, afetando a resistência mecânica final da solda. No entanto, baixos valores desse parâmetro, em soldas frias, prejudicam a consolidação do cordão de solda, gerando defeitos de vazios, como os observados para a amostra C11, na Figura 5.

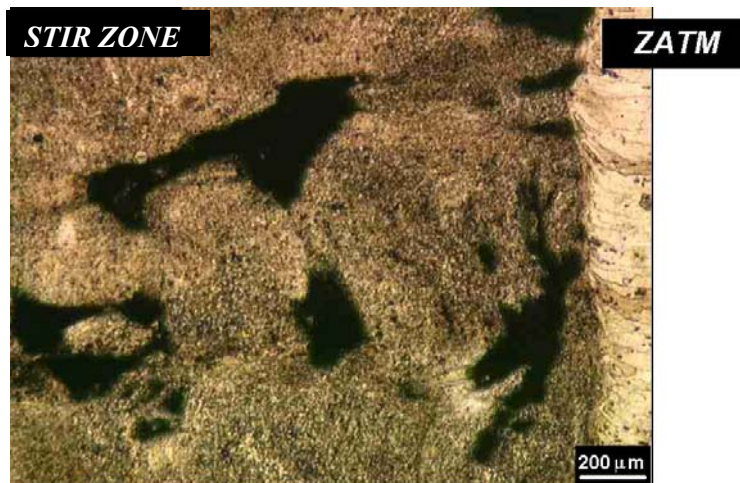


Figura 5. Defeito na solda C11 (vazio).

Este mesmo defeito não foi encontrado na solda fria C14, produzida com uma maior força de compressão.

O gráfico da Figura 6 mostra o perfil de microdureza da solda H11, que representa o comportamento das demais amostras. Este perfil é característico de soldas FSW em ligas de alumínio encontrados na literatura [8,9].

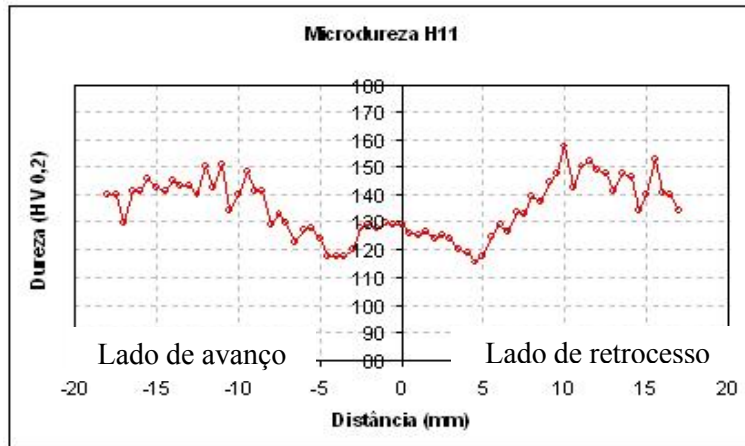


Figura 6. Perfil de microdureza da solda quente H11.

A partir deste perfil é possível determinar as zonas da região da solda. Observa-se um patamar, o que coincide com a região recristalizada do *stir zone*. Um valor mínimo de dureza (distância aproximadamente de 5mm) presente em ambos os lados da solda representa a transição da zona ZATM para a ZAT. Essas delimitações condizem com o trabalho de Leonard [10].

A partir das temperaturas máximas dos ciclos térmicos medidos pelos termopares posicionados a 2mm da periferia da ferramenta, ou seja, a uma distância de aproximadamente 5 mm do centro do *stir zone* e dos valores de microdureza medidos nessa mesma distância para cada amostra, foi possível construir um gráfico que correlaciona a temperatura, microdureza e parâmetros de soldagem. A Figura 7 apresenta o gráfico obtido.

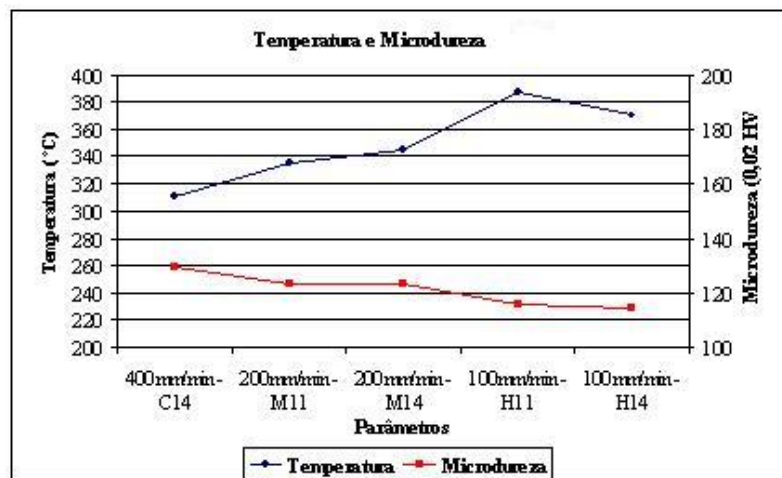


Figura 7. Gráfico da relação entre temperatura máxima e microdureza.

Correlacionando os valores mínimos de microdureza medidos na transição da ZAT para ZATM com as temperaturas máximas, nota-se um comportamento análogo ao observado para os resultados de tensão de escoamento, ou seja, os maiores valores de temperatura estão relacionados a menores medidas de microdureza.

Ciclo Térmico e Análise Microestrutural via MEV

Observando a Figura 8, pode-se verificar a diferença entre os ciclos térmicos de uma solda quente e de uma solda fria. A Figura 8a mostra o ciclo térmico da

solda fria C14, e na figura 8b observa-se o ciclo térmico da solda quente H14. Ambos os gráficos são referentes ao ciclo térmico medido pelo termopar posicionado a 2mm da periferia da ferramenta (cerca de 5mm do centro da “*stir zone*”), do lado de avanço da ferramenta.

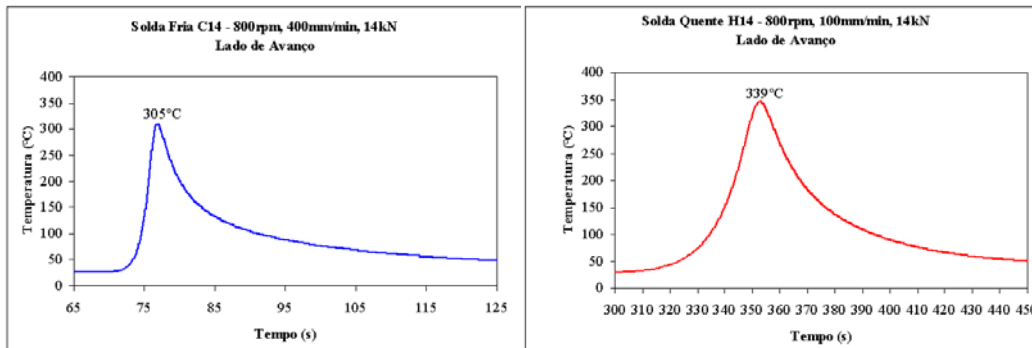
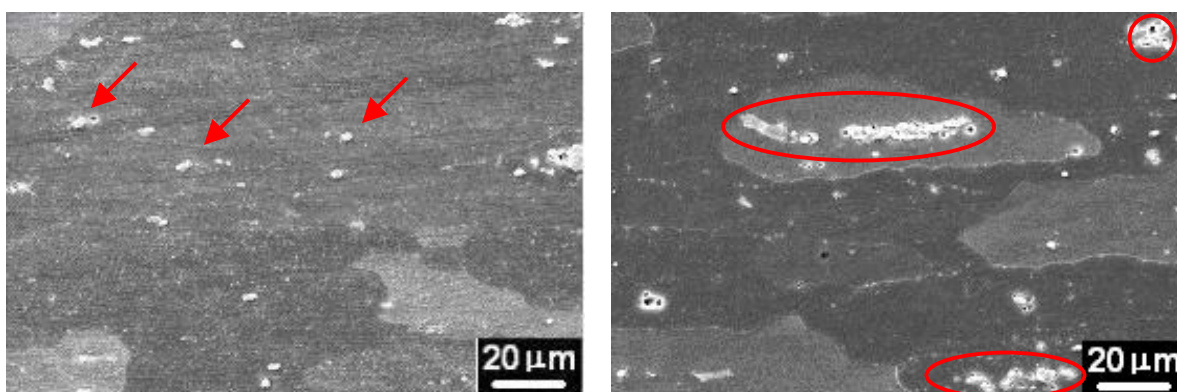


Figura 8. Comparação dos ciclos térmicos entre solda fria e quente.

Nota-se que a temperatura máxima atingida na solda fria é menor do que na solda quente. Fato explicado devido à maior velocidade de soldagem na realização da solda fria.

Para a liga 2024, as temperaturas de solubilização e de envelhecimento são, respectivamente 495 e 190°C, para o tratamento térmico de endurecimento por precipitação. De acordo com a análise dos ciclos térmicos, nas soldas frias o metal permanece um menor período de tempo acima de 190°C, do que as soldas quentes. Conseqüentemente, os efeitos dos ciclos térmicos são menores, e as transformações metalúrgicas, como crescimento de precipitados, ocorrem com maior dificuldade nas soldas frias.

Comparando as microestruturas da mesma região dos ciclos térmicos apresentados acima, pode-se observar a diferença na distribuição dos precipitados entre a solda fria e a solda quente (Figura 9).



9a: Região a 2mm do cordão. Solda fria C14. (lado de avanço)

9b: Região a 2mm do cordão. Solda quente H14. (lado de avanço)

Figura 9. Análise microestrutural via MEV.

Na Figura 9a os precipitados estão indicados por setas, é possível observar que estão distribuídos homogeneamente, enquanto que na figura 9b os precipitados estão aglomerados em algumas regiões, mostrando, nesta última, que o processo de superenvelhecimento da liga está mais avançado do que na solda fria.

4 CONCLUSÕES

As propriedades mecânicas das soldas frias se mostraram mais próximas às do metal de base do que as quentes, devido ao menor aporte térmico ao qual são submetidas.

O processo de envelhecimento e super envelhecimento, com crescimento e aglomeração dos precipitados é acelerado pelo ciclo térmico a que são submetidas as soldas. Nas soldas quentes os processo de super envelhecimento é mais avançado do que nas soldas frias.

Os resultados deste trabalho mostram que é possível obter uma solda de propriedades mecânicas mais próximas a do metal de base com um menor aporte térmico durante a soldagem, o que possibilita a economia de energia e o aumento da produtividade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapesp pelo apoio ao projeto de pesquisa e pela concessão das bolsas de iniciação científica e mestrado, e ao corpo técnico do instituto GKSS – Alemanha pelas soldas realizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MENDEZ, P.F.; EAGAR, T.W. Welding Processes for Aeronautics. **Advanced Materials and Processes**, p.39-43. May/2001.
2. REYNOLDS, A.P.; LOCKWOOD, W.D.; SEIDEL, T.U. Processing-property correlation in friction stir welds. **Materials Science Forum**, v.331-337, p.1719-1724, 2000.
3. GUERRA, M.; SCHMIDT, C.; MCCLURE, J.C.; MURR, L.E.; NUNES, A.C. Flow patterns during friction stir welding. **Materials Characterization**, v. 49, p. 95-101, 2003.
4. THREADGILL, P.; Friction Stir Welding - The State of the Art. **TWI Report**, maio 1999.
5. CARLETTI, C.B.; AMÂNCIO, S.T.; DOS SANTOS, J.F.; ALCÂNTARA, N.G.; BOLFARINI, C. Soldagem por fricção linear – FSW “friction stir welding” de ligas de alumínio, **Soldagem e Inspeção**, em publicação.
6. CHAO, Y.J.; QI, X. Heat transfer and thermo-mechanical analysis of friction stir joining of AA 6061-T6 plates. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRICTION STIR WELDING, 1., 1999, California. **Anais...** p. 1-10.
7. DAWES, C.; SPURGIN, E.J R.; STAINES, D.G. Friction stir welding aluminum alloy 5083 – Increased welding speed. **TWI members report**, 7735.1/98/993.2.
8. BENAVIDES, S.; LI, Y.; MURR, L.E.; BROWN, D.; MCCLURE, J.C. Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum. **Scripta Materialia**, v. 41, n. 8, p. 809-815, jun. 1999.
9. MURR, L.E.; LI, Y.; TRILLO, E.A.; NOWAK, B.M.; MCCLURE, J.C. A comparative study of friction-stir welding of aluminum alloys. **Aluminum Transactions**, v. 1, n. 1, p. 141-154, nov. 1999.
10. LEONARD, A.J. Microstructure and ageing behaviour of FSWs in aluminium alloys 2014A-T651 and 7075-T651. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRICTION STIR WELDING, 2., 2000, Gothenburg. **Anais**.

WELDING PARAMETER EVALUATION ON THE QUALITY OF A 2024-T351 ALUMINUM ALLOY WELDED BY FRICTION STIR WELDING - FSW

Fernanda Potomati⁽²⁾
Camilo Bento Carletti⁽³⁾
Ivan Dalla Valle Epiphanio⁽⁴⁾
Marcelo Pavan Kuri⁽⁵⁾
Nelson Guedes de Alcântara⁽⁶⁾
Jorge Fernandez dos Santos⁽⁷⁾

Abstract

The objective of this work was to evaluate the effects of FSW – Friction Stir Welding process parameters on a 2024-T351 aluminum alloy, by performing welds with different parameters and correlate them with thermal cycles measurements, final microstructure (through scanning electron microscopy), and mechanical properties (tensile and microhardness testing). Tensile and microhardness results showed that the welds performed with higher weld speed (cold welds) had mechanical resistance more similar to the base material as the others (medium and hot welds). The microstructural analysis demonstrated that the hot welds suffered greater influence of the thermal cycles than the colder welds since they presented an advanced over ageing process.

Key-words: Friction stir welding; Thermal analysis; Aluminum; Mechanical properties.