

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA TENSÃO RESIDUAL EM PLACAS
DE ALUMÍNIO 7050-T7451 SOLDADAS POR FRICTION STIR WELDING (FSW)
USANDO ONDAS ULTRASSÔNICAS LONGITUDINAIS CRITICAMENTE
REFRATADAS (L_{CR})**

S. A. García, A. A. Santos

Rua Engenheiro Humberto Soares de Camargo, N° 631, Cidade Universitária,
Campinas, SP, Brasil, CEP: 1308083-780. shirleyruano@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas

RESUMO

Neste trabalho, o perfil de tensões residuais em placas soldadas foi determinado mediante o uso de ondas ultrassônicas criticamente refratadas (L_{CR}). Esta técnica baseia-se na medição do tempo de percurso (TOF) no interior do material. De acordo com a teoria acustoelástica, a variação da velocidade das ondas ultrassônicas tem uma relação com a alteração dos padrões da tensão. A placa de alumínio 7050-T7451 soldada pelo processo FSW foi testada usando ondas ultrassônicas L_{CR} produzidas a duas frequências (3.5 MHz e 5 MHz). As medições foram feitas antes e depois da soldagem. O TOF foi medido no sentido longitudinal da solda a distâncias diferentes do centro. A influência da temperatura no tempo de percurso da onda foi considerada. Finalmente, a partir das medições na placa soldadas, as tensões residuais são calculadas e o perfil de distribuição de tensão residual obtido é comparado com o perfil teórico esperado.

Palavras-chave: liga de alumínio, friction stir welding, tensão residual, avaliação não destrutiva, método ultrassônico.

INTRODUÇÃO

Ligas de alumínio tem sido de grande importância na indústria do transporte moderno devido à combinação da elevada resistência mecânica, resistência à corrosão e baixo peso, que são fatores cruciais na fabricação de estruturas. A liga de alumínio 7050 é uma das ligas de maior resistência usada amplamente na indústria aeronáutica. Dentre outras aplicações, é comumente empregada na fabricação de estruturas que suportam a fuselagem da aeronave. Como qualquer estrutura mecânica, a possibilidade de incorporar uma etapa de soldagem na fabricação ou montagem da mesma, poderá gerar uma série de vantagens e desvantagens nos processos. A economia do material em contraposição à perda de propriedades mecânicas, devido principalmente aos efeitos térmicos, é um dos problemas que envolvem soluções de compromisso, que a pesquisa em tecnologia de soldagem tenta resolver. Particularmente, as ligas de alumínio da série 7xxx, endurecidas por precipitação, apresentam serias dificuldades na soldagem por fusão. Assim, o processo de união em estado sólido *Friction Stir Welding* (FSW) pode ser uma alternativa tecnológica adequada para melhorar a qualidade das juntas nesse tipo de material.

No processo de soldagem FSW, uma ferramenta não consumível gira rapidamente entre duas placas posicionadas topo a topo, forçando ao material a fluir destruindo a interface de separação entre elas (1). A ferramenta giratória (pino) produz aquecimento por atrito e conseqüente deformação plástica na região soldada, enquanto o material não atinge a temperatura de fusão. Embora o material não seja derretido, o aquecimento localizado e a compressão geram tensões internas (tensões resíduas) que podem afetar de modo importante a utilização e o desempenho da estrutura soldada. Várias pesquisas fornecem informações sobre os efeitos da soldagem FSW no material, dentre as quais Reynolds *et al* (2), que apresentaram algumas relações entre os parâmetros de soldagem, distribuição de durezas e histórico de temperaturas em ligas 7050 soldadas por FSW, e John *et al* (3), que mostraram que apesar de que a soldagem FSW introduz tensões residuais baixas, o crescimento de trincas por fadiga ainda é significativo.

Nas últimas décadas diversas técnicas de medição têm sido testadas para a avaliação das tensões residuais. Métodos destrutivos, baseados na relaxação da tensão mecânica, e métodos não-destrutivos (*non-destructive testing* NDT), os quais

se baseiam na relação entre os parâmetros físicos ou cristalográficos e o estado de tensões/deformações internas. Entre os métodos não-destrutivos destaca-se a técnica de difração raios, a difração de nêutrones e o método ultrassônico, que são comumente mais utilizados. Prime *et al* (4) realizaram medições de tensão residual em placas de alumínio finas soldadas por FSW usando a técnica do contorno (*contour method*); essas medições foram validadas por comparação com o método de difração de nêutrones, ambas medições concordaram dentro dos limites de incerteza na região da solda, mas os processos foram praticamente destrutivos.

A medição de tensão usando o método ultrassônico está fundamentada na relação linear entre a velocidade da onda ultrassônica e a tensão no material. Esta relação é conhecida como efeito acustoelástico. Alguns pesquisadores têm usado esse efeito para medições de tensão em materiais de engenharia. Egle e Bray (5) testaram a sensibilidade à tensão dos diferentes tipos de ondas ultrassônicas e provaram que a onda que se propaga da direção paralela e logo abaixo da superfície, conhecida como onda longitudinal criticamente refratada L_{CR} , tem maior sensibilidade. Desde então, a onda L_{CR} tem sido amplamente testada. Andrino *et al* (6) avaliaram o método ultrassônico usando a onda L_{CR} na medição da tensão de relaxação em placas de alumínio soldadas. O método foi também testado por Sadeghi *et al* (7), que obtiveram a distribuição da tensão residual longitudinal através da espessura em placas de alumínio soldadas. Os resultados foram comparados com o método de elemento finitos, obtendo concordância adequada.

O principal propósito deste trabalho é testar a utilização de ondas ultrassônicas L_{CR} na determinação de tensões residuais produzidas no processo de soldagem FSW para obter o perfil de distribuição das tensões ao longo da direção transversal. Em se comprovando sua efetividade, tal técnica pode ser desenvolvida para ser empregada como uma das ferramentas para a avaliação da qualidade das juntas soldadas, permitindo também a ampliação da gama de aplicações desse tipo de solda.

MATERIAS E MÉTODOS

Para determinar as tensões residuais em solda FSW em alumínio, foram desenvolvidos dois tipos de experimentos. O primeiro foi para determinar o efeito da temperatura sobre o tempo de percurso da onda L_{CR} , para que fosse possível a

correção desse parâmetro; já o segundo experimento foi para a medição das tensões nas juntas soldadas, utilizando dois métodos diferentes para a obtenção do TOF.

CORPOS DE PROVA

O material das placas é a liga de alumínio estrutural 7050-T7451. As ligas da série 7xxx têm como principais elementos de liga zinco, magnésio e cobre. Essas ligas são termicamente tratáveis, portanto são endurecidas por precipitação. Segundo a normativa SAE (8) a condição da liga 7050-T7451 é: termicamente tratada por solubilização, submetida a alívio de tensões por estiramento (em 2%) e tratada termicamente por precipitação. A composição química da liga é mostrada na Tabela 1. As dimensões das placas antes da soldagem foram: 210 mm de comprimento, 70 mm de largura e 10 mm de espessura.

Tabela 1. Composição química da liga Al 7050-T7451 em percentagem em peso (ASM, 2011).

Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si
87,3-90,3	5,7-6,7	1,9-2,6	2-2,6	Max. 0,15	Max. 0,12

FRICITION STIR WELDING

A soldagem foi realizada no Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano-CNPEM), Brasil. As placas de alumínio 7050-T7451, posicionadas em junta de topo, foram soldadas utilizando uma máquina TTI[®] específica para esse tipo de soldagem, e uma ferramenta composta de um ombro e um pino cônico roscado de 10,35 mm de comprimento. A velocidade de rotação foi de 225 RPM, velocidade de avanço de 200 mm/min e força no eixo z (eixo perpendicular à superfície da peça) de 67 kN, a ferramenta foi posicionada com um ângulo de inclinação (*tilt*) de 3° em relação ao eixo z. O esquema do processo de soldagem é mostrado na Figura 1 (9).

EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Os elementos que constituem o sistema experimental do método ultrassônico são: transdutores para emissão e recepção da onda, cunhas para geração da onda

LCR, gerador de pulso para os transdutores, sensor para medição de temperatura, placas de condicionamento e digitalização de sinais, e computador para tratamento de dados.

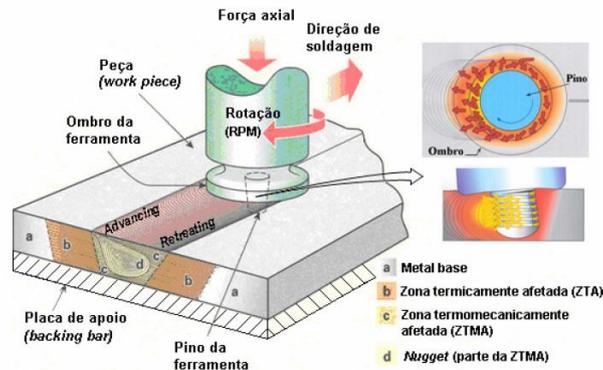


Figura 1. Processo de soldagem por FSW-Friction Stir Welding. (CRUZ, 2009).

Para cada frequência de geração de ondas ultrassônicas foram usados 3 transdutores da marca Panametrics/Olympus®, um emissor e dois receptores de onda. Como a onda LCR é uma onda longitudinal que se refrata paralela à superfície, é necessário ajustar o ângulo de incidência do feixe acústico em função das velocidades da onda longitudinal no meio “1” (material da cunha) e da onda longitudinal refratada no meio “2” (alumínio). Para isso é utilizada a *Lei de Snell*. Esse ângulo, formado com o eixo perpendicular à superfície da peça, é conhecido como primeiro ângulo crítico. No experimento foram utilizadas cunhas de Rexolite® usinadas para um ângulo de incidência calculado de cerca de 22°. Os transdutores receptores são posicionados a distâncias diferentes, empregando uma barra para suporte utilizada como base para acomodar as cunhas e transdutores. O conjunto completo, conhecido como *probe*, é mostrado na Figura 2.

O gerador de pulsos utilizado para a emissão e recepção das ondas foi o modelo 5072PR Panametrics®, a aquisição e digitalização dos sinais foi realizada por placas acopladas a um Controlador Embarcado PXI 8108 da National Instruments®, que funciona como um PC normal com processador Intel Core 2 Duo T9400, com sistema operacional Windows XP. A temperatura foi adquirida por meio de um termopar tipo K e um módulo de condicionamento de NI 9211 da National Instruments®, ligado a um módulo Ethernet / ENET-9163 NI WLS. A leitura dos

dados adquiridos foi feita dentro da plataforma LabView®, a frequência de amostragem dos sinais foi de 250 MHz.

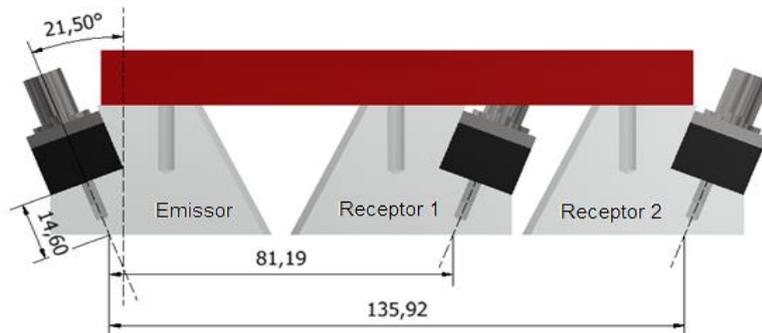


Figura 2. Conjunto *probe*: suporte base, cunhas e transdutores.

DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PERCUSO (TOF)

Dentro do trem de pulsos detectado pelos transdutores ultrassônicos, só o primeiro pulso corresponde à onda L_{CR} . A obtenção do TOF dessa onda foi feita por dois métodos diferentes.

O primeiro foi pela medição do tempo entre o ponto inicial do sinal (“*trigger*”), até o segundo cruzamento com zero (amplitude nula), depois do primeiro pico da onda L_{CR} para cada receptor. A outra forma para encontrar a variação da velocidade da onda é mediante a subtração do TOF de dois transdutores posicionados a diferentes distancias. Esse tempo tem que ser medido no mesmo ponto para cada receptor. Considerando que a forma de onda L_{CR} captada por cada receptor seria a mesma, é possível utilizar o processamento de correlação cruzada para essas ondas.

No primeiro caso, é necessária a identificação do primeiro pico da onda L_{CR} , para que o programa identifique automaticamente o segundo cruzamento com zero em cada receptor. E no segundo caso, a determinação do tempo por correlação cruzada foi feita de forma automática pelo programa de aquisição de dados, conforme desenvolvido por Pereira (10).

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Para verificada a evolução do tempo de percurso, e conseqüentemente a redução da velocidade da onda ultrassônica, em função do aumento da temperatura

lida na placa através do termopar, foi utilizado o mesmo equipamento de medição já apresentado. As medições foram tomadas numa posição fixa sobre a placa enquanto a temperatura variava, mediante a regulagem do ar condicionado do laboratório. O tempo de percurso foi determinado pelo método do segundo cruzamento com zero da onda captada pelo receptor 1.

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO NAS PLACAS

Para materiais isotrópicos, é possível analisar a tensão do material de acordo com a equação (A) (11). Uma vez que a variação de velocidade é medida entre dois transdutores numa posição fixa, a variação do tempo de percurso (TOF) pode estar diretamente relacionada com a variação tensão. Existem alguns outros fatores que influenciam a medições em metais, tais como a temperatura ou a textura do material, e estes também modificam o TOF da onda, podendo influenciar na magnitude das tensões calculadas pela equação (A). Considerando que a temperatura está controlada, que todas as medidas foram feitas na mesma direção de laminação e que não há uma influência significativa da microestrutura no caso desse tipo de solda em alumínio, hipótese ainda por ser comprovada, a equação (A) pode ser empregada na estimativa das tensões geradas.

$$d\sigma = \frac{E}{L_{11} \cdot t_{ref}} dt \quad (A)$$

Onde t_{ref} é o tempo de propagação da onda dentro do material no estado livre de tensão, L_{11} é a constante acustoelástica para a onda se propagando na direção de aplicação da força e E é o módulo de elasticidade do material. Os valores de L_{11} e E foram tomados do trabalho desenvolvido por Pereira (10).

Depois da soldagem, o conjunto soldado foi usinado na superfície até obter um acabamento adequado. A *probe* foi colocada em direção paralela à união soldada, e foi movimentada na direção perpendicular. Foram realizadas medições cada 5mm nos extremos da placa e cada 2.5mm dentro da zona soldada. Para o tempo de percurso no estado livre de tensão t_{ref} , considerou-se a média do TOF dos extremos da placa soldada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dois tipos de resultados foram obtidos das medições realizadas, um para o efeito da temperatura, que seria corrigido durante as medições nas soldas, e outro para as tensões nas soldas. Tais resultados são apresentados a seguir, em conjunto com a sua análise.

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS ONDAS L_{CR}

O gráfico com os tempos de percurso obtidos em função da temperatura da barra pode ser visto na figura 3. A linha de tendência e a equação da reta foram obtidas utilizando o programa Microsoft Excel®. Pela equação de reta da linha de tendência, observa-se que o tempo de percurso aumenta com uma taxa de 10,373 ns por °C. Utilizando como temperatura padrão o valor de 23°C, os valores obtidos de tempo de percurso da onda nos experimentos com ondas L_{CR} foram corrigidos.

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NAS PLACAS SOLDADAS

Determina-se apenas um dos componentes do tensor de tensão paralela à união soldada (tensão residual longitudinal). Cada ponto da distribuição de tensão residual medida pelo método ultrassônico representa a tensão através do caminho de propagação e na profundidade de penetração (próximo à superfície) da onda L_{CR}. A profundidade de penetração das ondas depende da frequência, sendo que a menor frequência significa maior profundidade de penetração dentro da placa (12).

A distribuição tensão residual na direção perpendicular à união soldada é mostrada nas figuras 4(a) e 4(b) utilizando frequência de 3.5 MHz e 5 MHz respectivamente. O TOF foi determinado pelo método do segundo cruzamento com o zero para cada receptor utilizado (TOF Receptor 1 e TOF Receptor 2) e pelo método da correlação cruzada. Todas as distribuições obtidas apresentam um padrão similar. A diferença entre os resultados obtidos usando o TOF para cada frequência do receptor, pode significar que existe um gradiente de tensão ao longo da superfície da placa. Isso pode ser justificado pela influência da variação dos parâmetros de soldagem. Embora a velocidade de rotação e de avanço da ferramenta mantem-se-constante, a força exercida dentro do material pode mudar

devido a vários fatores, entre eles a dureza do material que poderia variar pela deformação ocorrida.

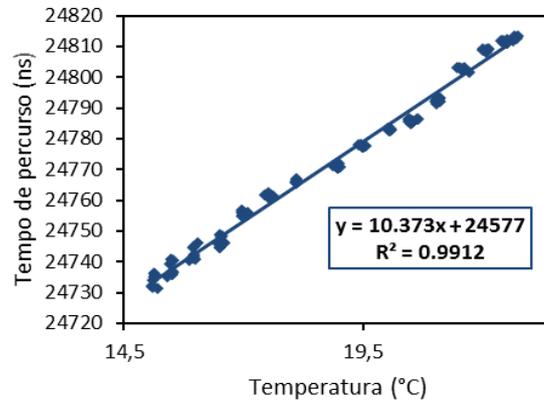


Figura 3. Tempo de percurso da onda LCR em função da temperatura.

A figura 5 apresenta uma média das tensões para cada frequência e a distribuição teórica esperada. Em cada distribuição calculada, observa-se que na região da união soldada (perto da posição 0), houve um aumento do TOF em relação ao tempo para o estado livre de tensões do material original, o que levou a valores mais altos de tensões para estas regiões. As medições fora da união soldada apresentam valores menores. Parte desses valores de tensão corresponderiam à zona térmica e termomecanicamente afeitada. Segundo a tendência da distribuição teórica, em regiões distantes da solda é esperado que as tensões se aproximassem ao valor nulo. Isto não acontece para todas as medições feitas, aparentemente devido à largura curta da placa final soldada, não é possível ter uma região suficientemente afastada da solda. Houve também alguma possível flexão devido à soldagem.

Os valores máximos de tensão calculados estão em torno de 150 MPa, que corresponde a aproximadamente 35% do limite de escoamento. Para ambas frequências, os valores máximos foram atingidos a 2,5 mm do centro da solda na região de avanço com respeito do processo de soldagem. Para 3.5MHz a variação entre os valores de tensão máxima determinada com cada método de aquisição é de 30Mpa, e para 5 MHz é de 5Mpa.

Na figura 5, a diferença máxima entre os valores de tensão determinados nas duas frequências para cada posição de medição é de 20 MPa. Esta diferença é aceitável, pois para cada frequência a profundidade de penetração é diferente.

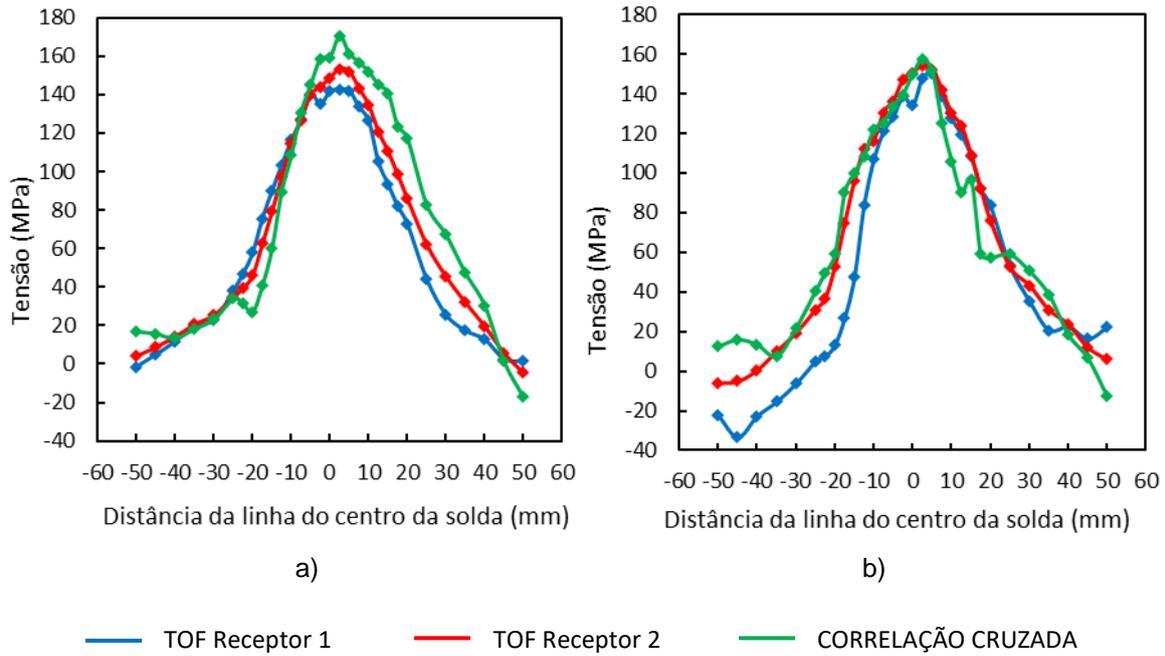


Figura 4. Distribuição da tensão residual na placa soldada. a) Para 3.5 MHz. b) Para 5MHz.

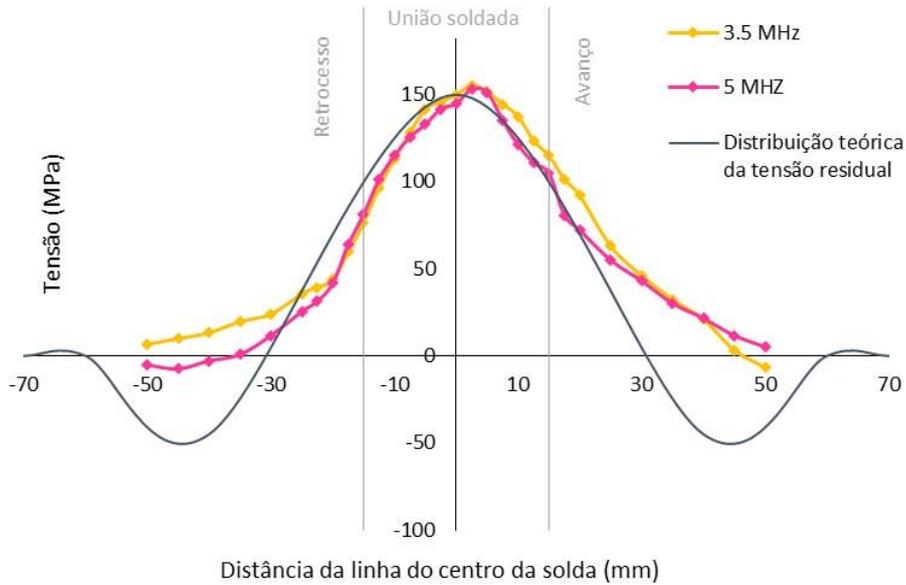


Figura 5. Distribuição da tensão residual na placa soldada.

Os erros encontrados podem ser explicados pelo fato de que os resultados apresentados acima são valores relativos, pois as medidas são tomadas, em comparação com um ponto de referência onde o estado de tensão não é conhecido. A ausência de um valor de referência introduz erros potencialmente significativos nas medições. Além disso, a constante acustoelástica utilizada foi avaliada no

material original, antes das placas serem soldadas, o que pode influenciar no resultado final para a magnitude de tensões.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pelo método exposto, apresentam boa concordância com o perfil de tensões esperado. Embora as estimações de tensão não sejam validadas por outra técnica, os valores determinados se encontram dentro dos limites aceitáveis, abaixo do limite de escoamento.

O processo de soldagem utilizado foi de caráter experimental, o que quer dizer que a ferramenta e os parâmetros de soldagem utilizados ainda estão sendo testados e não corresponderam aos parâmetros ótimos que se utilizariam num processo industrial. Por isso, os valores encontrados podem ser ainda reduzidos ou alterados para essa soldagem.

O processo de soldagem traz mudanças no material que podem atenuar o sinal. A dificuldade de localizar o mesmo ponto de referências para todas as medições realizadas faz que o método de determinação do TOF pelo segundo cruzamento seja mais susceptível a erros. Porém, nestes experimentos, a determinação do TOF no a maiores distâncias (receptor 2) também deu resultados similares. Portanto, a variação da velocidade da onda medida mediante a determinação do TOF para distancias de separação de transdutores maiores pode também ser adequada.

A principal vantagem da utilização de ondas ultrassônicas LCR na determinação de tensões residuais é que medições não-destrutivas podem ser efetuadas a uma profundidade relativamente elevada (vários milímetros). Além disso, o tempo de medição é curto e o processo completamente automatizável e portátil, o que indica que este método pode ser utilizado como método de controle de tensões residuais em linhas de produção.

As dificuldades encontradas no método utilizado foram a necessidade de ter uma amostra de referência sem tensão que corresponda a mesma estrutura das partes que estão sendo medidas e o problema de separar os efeitos da microestrutura e textura da superfície nas medições da variação da velocidade de propagação de onda utilizada, ainda por ser resolvido.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório Nacional de Nanotecnologia do Brasil (LNNano) especialmente a Victor Ferrinho Pereira e Eduardo Bertoli da Fonseca pela ajuda neste trabalho. Este trabalho foi apoiado pela SENECYT (Programa de Becas Convocatoria Abierta 2013 Segunda Fase) do Equador e pela FAPESP, processo 2013/21616-0.

REFERENCIAS

- [1] MARQUES, P. V. Soldagem: fundamentos e tecnologia/Paulo Villani Marques, Paulo José Modenesi, Alexandre Queiroz—3ª edição atualizada. Belo Horizonte: Editora, 2009.
- [2] REYNOLDS, Anthony P. et al. Relationships between weld parameters, hardness distribution and temperature history in alloy 7050 friction stir welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 10, n. 2, p. 190-199, 2005.
- [3] JOHN, R.; JATA, K. V.; SADANANDA, K. Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys. *International Journal of fatigue*, v. 25, n. 9, p. 939-948, 2003.
- [4] PRIME, Michael B. et al. Residual stress measurements in a thick, dissimilar aluminum alloy friction stir weld. *Acta Materialia*, v. 54, n. 15, p. 4013-4021, 2006.
- [5] EGLE, D. M.; BRAY, D. E. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel. *The journal of the Acoustical Society of America*, v. 60, n. 3, p. 741-744, 1976.
- [6] ANDRINO, Marcilio Haddad; DOS SANTOS JÚNIOR, Auteliano Antunes. STRESS RELAXATION IN WELDING JOINTS OF 5052 ALUMINUM USING THE ULTRASONIC METHOD. In: *Proceedings of 18th International Congress of Mechanical Engineering-COBEM*. 2005. p. 6-11.
- [7] SADEGHI, Seyedali et al. Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates. *Materials & Design*, v. 52, p. 870-880, 2013.
- [8] *Aerospace Material Specification 4050 J*, SAE International, May 2016.
- [9] CRUZ, M. F.; NETO, C. de M. Friction Stir Welding—Review: Potencial de Aplicação na Indústria. Trabalho apresentado no XI Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, São Jose dos Campos-SP, 2009.
- [10] PEREIRA JUNIOR, P. Influência da Anisotropia gerada por laminação sobre a medição de tensões por ultrassom em ligas de alumínio 7050. 2011. 137p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [11] BRAY, Don E.; STANLEY, Roderick K. *Nondestructive evaluation: a tool in design, manufacturing and service*. CRC press, 1996.
- [12] BASATSKAIA, L. V.; ERMOLOV, I. N. Theoretical study of ultrasonic longitudinal subsurface waves in solid media. *Soviet Journal of Nondestructive Testing*, v. 16, n. 7, p. 524-530, 1981.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF RESIDUAL STRESS IN 7050-T7451 ALUMINUM ALLOYS WELDED PLATES BY FRICTION STIR WELDING (FSW) USING ULTRASONIC LONGITUDINAL CRITICALLY REFRACTED (L_{CR}) WAVES.

ABSTRACT

In this study, the profile of residual stresses in welded plates was determined using ultrasonic critically refracted waves (L_{CR}). This technique is based on the measurement of the time-of-flight (TOF) inside the material. According to the acoustoelasticity theory, the speed variation of the ultrasonic waves has a relationship with the change in stress patterns. An Aluminum 7050-T7451 plate welded by the FSW process was tested using L_{CR} ultrasonic waves produced by two frequencies (3.5 MHz and 5 MHz). Measurements were made before and after the welding. The TOF was measured in the longitudinal direction of the weld at different distances from the center. The influence of temperature on the time-of-flight was considered. Finally, from the measurements on the welded plate, residual stresses are calculated and the obtained residual stress distribution profile is compared with the expected theoretical profile.

Key-words: aluminium alloy, friction stir welding, residual stress, non-destructive ultrasonic evaluation, ultrasonic method.