



UNIVERSIDAD MICHOCANA  
DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO

## Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales

Cuerpo Académico Consolidado CA-105: Ingeniería y Tecnología de Metales, Cerámicos y Aleaciones

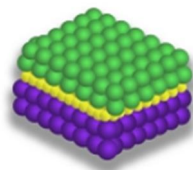


INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN  
METALURGIA Y MATERIALES

### Comportamiento de la distribución de dureza en uniones en T realizadas por el proceso FSW

C.E. MORALES-BAZALDUA<sup>1</sup>; A.F. MIRANDA-PEREZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V., Ciencia y Tecnología No. 790, Saltillo 400, C.P. 25290, Saltillo, Coahuila, México.



FORO DE INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN EN MATERIALES. **VOL. 15** (2018) 1-8

Editores: E.A. Aguilar, E. Bedolla, C.A. León

© Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la UMSNH  
Morelia, MÉXICO.

ISSN 2448-6892





---

## Comportamiento de la distribución de dureza en uniones en T realizadas por el proceso FSW

C.E. MORALES-BAZALDUA<sup>1</sup>; A.F. MIRANDA-PEREZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V., Ciencia y Tecnología No. 790, Saltillo 400, C.P. 25290, Saltillo, Coahuila, México.

---

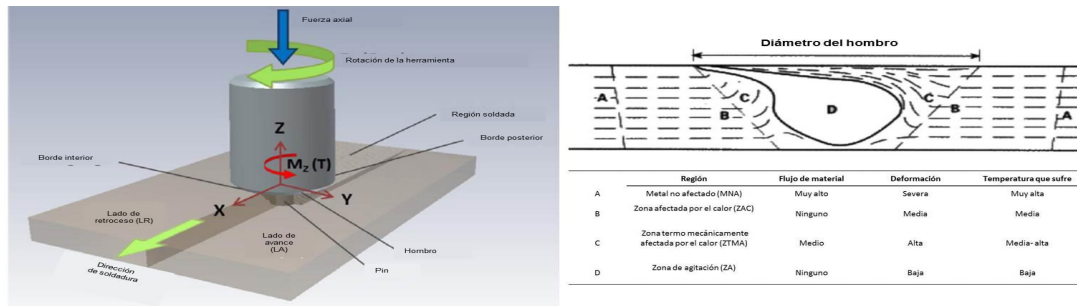
### Introducción

El proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW, por sus siglas en inglés) es una técnica en estado sólido desarrollada por el TWI en 1991, trabaja por debajo del punto de fusión de los materiales empleando una herramienta de soldadura cilíndrica, con un pin de geometría específica (**Figura 1**). Por medio del calor generado por la fricción entre la herramienta y el metal, este último se suaviza y fluye en dirección de la unión, evitando con esto las problemáticas ocurridas en procesos por fusión, obteniendo uniones de excelentes propiedades mecánicas, alta calidad y menor distorsión [1]ó[5]. Durante el proceso se produce alto grado de deformación, esto aunado a las temperaturas alcanzadas, producen cambios a nivel microestructural formando las siguientes zonas características; zona de agitación (ZA), zona termo mecánicamente afectada (ZTMA), zona afectada por el calor (ZAC) y metal no afectado (MNA) [5]. Las propiedades mecánicas de la unión dependen del control de la microestructura y los distintos mecanismos ocurridos durante el proceso, esto a través de la adecuación de las variables del proceso, por lo que es de suma importancia controlar tales aspectos para establecer el buen desempeño de la unión en su respectiva aplicación [6], [7].

El proceso FSW, en la actualidad es empleado en distintos sectores industriales, siendo capaz de unir materiales difíciles de soldar por procesos convencionales como las aleaciones de aluminio de alta resistencia así como materiales compuestos, aleaciones de magnesio e inclusive algunos aceros [2], [8], [9]. Ofreciendo además la fabricación de uniones en distintas configuraciones como las uniones skin-stringer (unión en T), las cuales proveen refuerzo, resistencia y rigidez al producto sin incrementar su peso [2], [10]ó[12], no obstante, la información sobre ellas es escasa, por lo que en el presente trabajo el objetivo es estudiar el comportamiento de la distribución de la dureza y su relación con aspectos microestructurales cuando se llevan a cabo uniones soldadas de



la aleación 2024 en configuración en T por medio del proceso FSW, empleando parámetros óptimos.

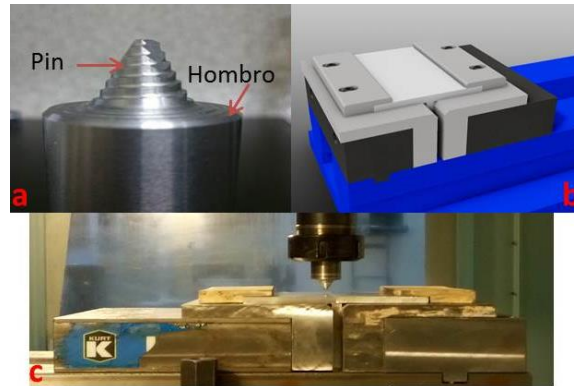


**Figura 1** Proceso de soldadura por fricción agitación y diagrama de zonas microestructurales en las uniones resultantes [13].

## Metodología

Placas de aluminio 2024 T3 y T351 de 8 mm de espesor se unieron en configuración en T por medio del FSW utilizando un sistema de sujeción especializado en una máquina CNC y una herramienta de WC (**Figura 2**) de 25 mm de diámetro de hombro con pin roscado piramidal de 15 mm de diámetro y 11 mm de alto. Los parámetros empleados fueron obtenidos mediante una optimización por red neuronal de base radial (RNFBR) con algoritmo genético, donde la velocidad de avance se mantuvo constante en 5 mm/min, variando solamente la velocidad de rotación (**Tabla 1**).

Se prepararon metalográficamente las muestras, atacándose con HF 3% por alrededor de 15 segundos para caracterizarse por medio de microscopía óptica y observar su estructura general, así como con una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10% por alrededor de 5 minutos para analizar partículas por medio de MEB/EDS. Además, se realizó un perfil horizontal de indentaciones de microdureza Vickers a través de la placa a tope de 100 indentaciones a 0.5 mm de distancia entre ellas a una carga de 300 gr.



**Figura 2** a) Herramienta de soldadura de WC empelada, b) sistema de sujeción utilizado para realizar uniones en T y c) proceso de soldadura por FSW de uniones en T.

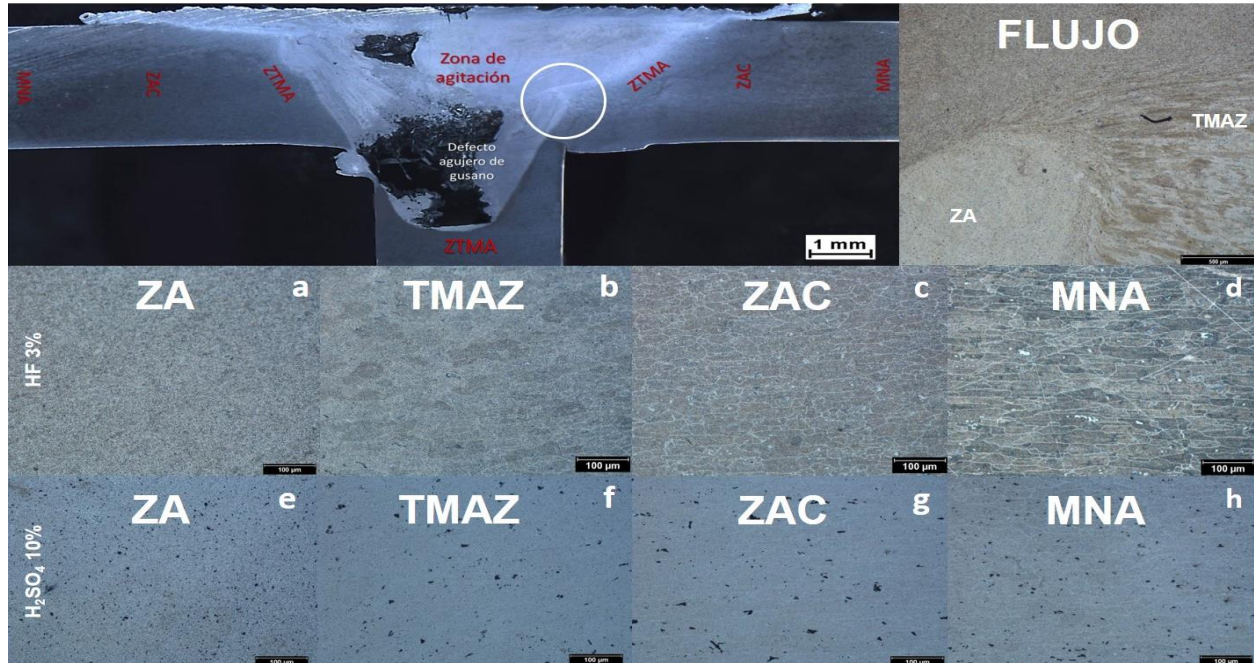
**Tabla 1** Parámetros de proceso empleados para realizar las uniones soldadas.

Muestra	Velocidad de rotación	Velocidad de avance	Tiempo de permanencia	Profundidad de penetración del pin
1	1170			
2	1174			
3	1175	5	5	11.3
4	1180			

## Resultados y Discusión

### Microestructura

Las uniones en configuración en T (aleación 2024 T3 para placa a tope y 2024-T351 para larguero) se unieron satisfactoriamente, sin embargo, macroscópicamente se observa que presentan discontinuidades como agujero de gusano ubicado entre la placa a tope y el larguero, debiéndose a la inadecuada combinación de los parámetros del proceso. La **Figura 3** muestra las micrografías de la muestra soldada a 1800 rpm y 5mm /min, se identifican las zonas microestructurales. La ZA presenta granos finos, equiaxiales así como partículas fraccionadas distribuidas homogéneamente debido a la recristalización sufrida, además se observa el flujo tomado por el material. La ZTMA presenta granos grandes, alargados, deformados, así como partículas de mayor tamaño comparado con la zona anterior. La ZAC muestra granos mejor definidos, de mayor tamaño así como partículas a través de ellos. Debido a que el MNA no es severamente afectada por la temperatura y deformación presenta granos elongados y partículas de mayor tamaño distribuidas heterogéneamente a través de ellos.



**Figura 3** Desarrollo microestructural de la muestra 4. Incisos a, b y c; revelan la microestructura general con solución HF 3%, e, f, g y h; revelan las partículas a través de la unión con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10%.

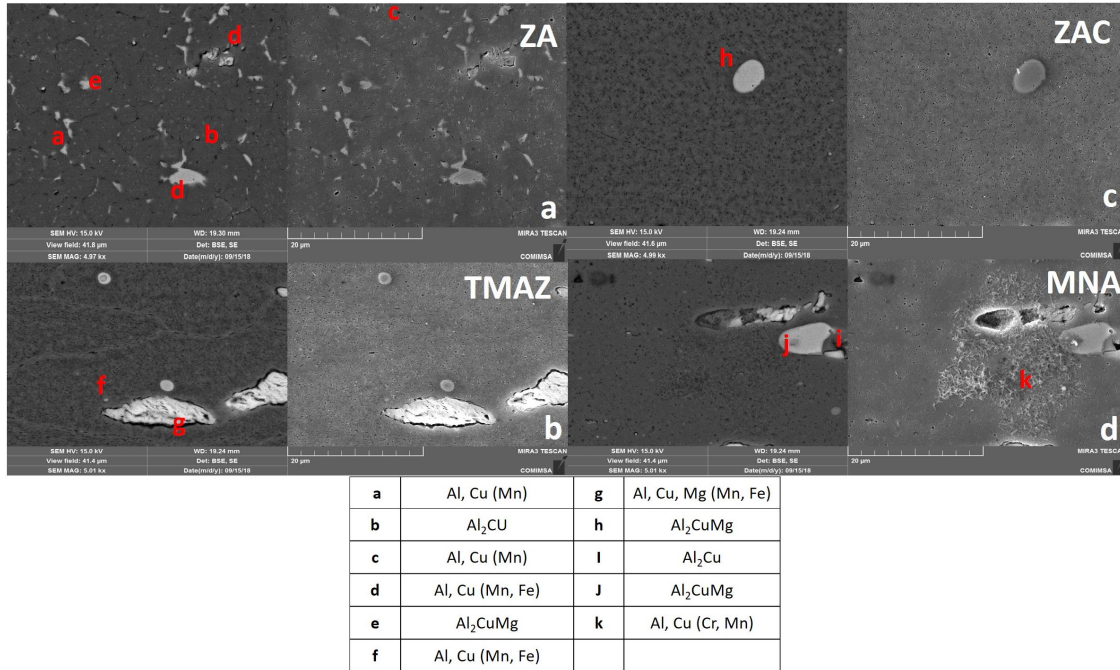
La **Figura 4** presenta el análisis mediante MEB/EDS realizado a 5000x y 10000x aumentos, observando partículas de precipitados circulares como en el inciso **b**, **i** de tono gris oscuro y tamaño pequeño identificados como fase  $\beta$ , ubicados solos a través de la matriz de aluminio o aglomerados en clústeres con otras partículas, como en el MNA. Algunos otros (**e**, **h**, **j**) de tono gris claro brillante, redondeadas, identificados en la ZTMA y ZAC. Además se observan otras partículas intermetálicas de segunda fase irregulares, de tono gris claro brillante, identificadas como contenedoras de Fe, Mn con composición variable como AlCuFeMnSi, Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe, (Al,Cu)<sub>6</sub>Mn y AlCuFeMn [14], [15].

#### *Análisis de dureza*

Los perfiles realizados en la sección transversal de las soldaduras muestran valores globalmente menores a los del MB (137 Hv). El comportamiento de la dureza a través de las uniones se relaciona con el desarrollo microestructural de cada zona a través de los mecanismos sufridos de acuerdo a la variación de la temperatura, como son la disolución, precipitación, crecimiento de granos y recristalización, entre otros [6], [9], [16]. El análisis de las partículas endurecedoras de la aleación 2024 T3/ T351 es clave para entender el comportamiento de la dureza a través de la unión, estas son las zonas GPB (Guinier Preston Bararytski), las cuales se disuelven durante el



calentamiento precipitando en fase  $S\phi(Al_2CuMg)$  fina sin cambiar su dureza, sin embargo cuando se mantiene calentando el material, estos precipitados se engruesan y pierden su endurecimiento [6].



**Figura 4** Micrografías obtenidas de microscopia electrónica de barrido, se identifican algunas partículas a través de la unión.

El MNA presenta valores de dureza altos, muy similares a los del MB, debido a que los granos y partículas son de mayor tamaño, y no son afectadas por la temperatura o deformación durante el proceso, solamente influenciada por la cantidad de las zonas GPB que durante el envejecimiento natural formarán la fase  $S\phi$  recuperando los valores de dureza. En la ZAC se observa una drástica disminución causado por el ablandamiento dado por el engrosamiento y disolución de los precipitados  $S\phi$  durante la soldadura. Esta zona se divide en dos secciones; ZAC1 alcanza los 235 °C disolviendo las zonas GPB, sin poder recuperar la fase endurecedora y la ZAC2 (oscila los 300 °C) disolviendo casi totalmente las zonas GPB y precipitando la fase  $S\phi$  engrosada perdiendo su dureza drásticamente. La ZTMA alcanza temperaturas de 406 °C, donde la mayoría de los precipitados se disuelven, dejando gran cantidad de soluto para precipitar en forma limitada una fracción de zonas GP engrosadas, produciendo bajos valores de dureza que comienzan a recuperarse en la siguiente zona. En la ZA (alcanza 456 °C - 505 °C), se disuelven los precipitados restantes, produciendo una recrystalización dinámica severa que refina los granos y



precipita inmediatamente zonas GPB que, posterior a la soldadura propiciará valores de dureza similares a los del MB sin procesar.

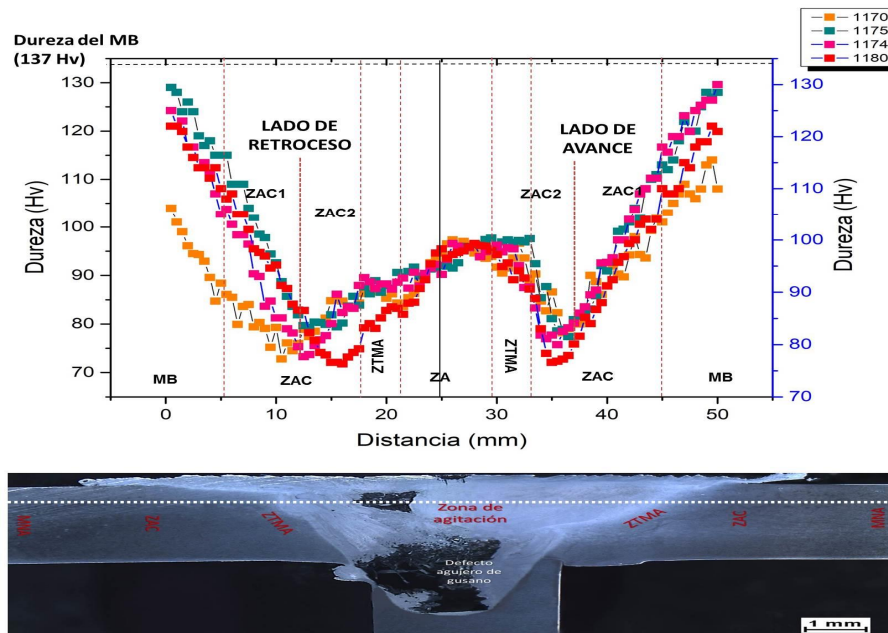


Fig. 1 Desarrollo de micro dureza presente en algunas de las muestras soldadas.

## Conclusiones

Se realizó el análisis de la relación evolución microestructural-dureza en uniones en configuración en T, llevada a cabo por medio del proceso FSW, con parámetros óptimos obtenidos de una RNFBR, derivándose las siguientes conclusiones:

- Las uniones realizadas en T por FSW presentan discontinuidades tales como agujero de gusano; esto no afecta al desarrollo de dureza-microestructura, pero sí a la calidad de la unión.
- La dureza a través de las uniones es menor que la del metal antes de ser procesado.
- La intersección ZAC2/TMAZ presenta la menor dureza, debido a que las zonas GPB se disuelven, precipitando fase  $S\alpha$  engrosada.
- La dureza, se recupera en la ZA ya que las condiciones de temperatura y deformación permiten la reprecipitación de fase fina  $S\alpha$
- Se encuentran como fases endurecedoras partículas de  $Al_2Cu$ ,  $Al_2CuMg$ .
- La relación microestructura-dureza en uniones en T se comporta de la misma manera que en uniones a tope, siendo explicados por los mecanismos microestructurales.



- Es importante controlar la temperatura, el tiempo de permanencia, calentamiento y enfriamiento de la soldadura, para vigilar el comportamiento de crecimiento y disolución de precipitados, por lo que como trabajo a futuro se propone medir estos aspectos en las zonas por medio de termopares al emplear distintos conjuntos de parámetros de proceso con el fin de optimizar la calidad de las juntas, así como la microestructura y con esto, las propiedades mecánicas.

## Referencias

- [1] R.S., Mishra, P.S. De Nilesh Kumar, *Friction stir welding and processing*, (2014) 1st ed. Switzerland: Springer. p. 338. ISBN 978-3-319-07043-8.
- [2] K. Z. Aleksandar Zivkovic, Andrijana Durdevic, Aleksandar Sedmak, Srdan Tadic, Ivan Jovanovic, Dorde Durdevic, *Friction Stir Welding of Aluminium Alloys- T Joints*, *Struct. Integr. life*, (2015) 15, no. 3, p. 1816186.
- [3] J. M. Lienert Chair, T.J., Mahoney, M.W., Nandan, R., Posada, M.P., Stotler, T.V., Thompson, *Friction Stir Welding*, *in AWS Welding Handbook 9.3*, (2007), American Welding Society, p. 51.
- [4] D. Lohwasser and Z. Chen, *Friction stir welding: From basics to applications*, (2010), 1st ed. Florida: Woodhead Publishing Limited, p.424. ISBN 9781613443453.
- [5] R. Nandan, T. DebRoy, and H. K. D. H. Bhadeshia, *Recent advances in friction-stir welding ó Process, weldment structure and properties*, *Prog. Mater. Sci.*, (2008) 53, no. 6, p. 98061023.
- [6] S. A. Khodir, T. Shibayanagi, and M. Naka, *Control of Hardness Distribution in Friction Stir Welded AA2024-T3 Aluminum Alloy*, *Mater. Trans.*, (2006) 47, no. 6, p. 156061567.
- [7] K. Gangwar, M. Ramulu, A. Cantrell, and D. Sanders, *Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Titanium Alloys: TIMET-54M and ATI-425*, *Int. J. Sci. Basic Appl. Res.*, (2016) 6, no. 10, p. 252.
- [8] S. Debarma, A. Sarkar, and S. C. Saha, *A Comparative Study on the Hardness Behaviour of Friction Stir Welding Aa6063 Lloy*, *J. Technol. Plast.*, (2012) 37, no. 2, p. 8.
- [9] A. Devaraju and B. Manichandra, *Analysis of Microstructural Characterization of Solid State Welded Dissimilar Aluminum Alloy*, *Int. J. Mater. Sci.*, (2017) 12, no. 4, p. 6096615.
- [10] A. Silva, D. Braga, M. A. V. de Figueiredo, and P. M. G. P. Moreira, *Friction stir welded T-joints optimization*, *Mater. Des.*, (2014) 55, p. 1206127.
- [11] J. S. Jesus, J. M. Costa, A. Loureiro, and J. M. Ferreira, *Assessment of friction stir welding aluminium T-joints*, *J. Mater. Process. Technol.*, (2018) 255, p. 3876399.
- [12] M. L. Saremi, S. E. Mirsalehi, and A. Shamsipur, *Investigation on Metallurgical Structure and Mechanical Properties of Dissimilar Al 2024/Cu FSW T-joints*, *Trans. Indian Inst. Met.*, (2016), p. 169.
- [13] Balaji, N., Kannan S., and Arun S., *Performance Analysis of Friction Stir Welding on Aluminium Aa7075 and Aa2024 Alloy Material*, *Int. J. Eng. Res. Adv. Technol.*, (2017) 3, no. 4, p. 10616.
- [14] J.A., DeRose, A., Balkowiec, J., Michalski, T., Suter, K.J., Kurzydowski and P., Shmutz *Microscopic and macroscopic characterization of an aerospace aluminum alloy (AA2024)*, *in Aluminum Alloy Corrosion of Aircraft Structures*, (2013) 6, Boston: WIT Press, p. 23638.
- [15] B. Adamczyk-Cieslak, J. Zdunek, and J. Mizera, *Evolution of microstructure and precipitates in 2xxx aluminum alloy after severe plastic deformation*, *in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (2016) 123, no. 1, p. 5.
- [16] Z. Zhang, B. L. Xiao, and Z. Y. Ma, *Hardness recovery mechanism in the heat-affected zone during long-term natural aging and its influence on the mechanical properties and fracture behavior of friction stir welded 2024Al-T351 joints*, *Acta Mater.*, (2014) 73, p. 2276239.