

## CARACTERIZACIÓN DE DEFECTOS POR SEM DE UNA SOLDADURA POR FRICCIÓN Y AGITACIÓN (FSW) EN CHAPAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO.

L. E. Feloy, D. A. Vucetich(\*), A. C. Gonzalez

Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata,  
(UNLP), 1900, BA, Argentina

(\*) Facultad de Ingeniería de La Plata (UNLP), BA, Argentina

(\*). Email: danilo.vucetich@ing.unlp.edu.ar

### RESUMEN

La soldadura por fricción y agitación es un proceso de unión de materiales en fase sólida. Una herramienta cilíndrica con un movimiento de rotación se introduce en la línea de soldadura por medio de una fuerza axial, el roce producido por la herramienta con el material base produce un aumento en la temperatura suficiente para llevar el material a un estado plástico en el cual es capaz de fluir y así lograr la unión.

Durante los últimos años el grupo de trabajo que desarrolla este proceso en la Facultad de Ingeniería, ha logrado obtener soldaduras sanas en chapas de aluminio de alta resistencia, dentro de los parámetros de las normas correspondientes. Pero al someter a las uniones a ensayos de tracción, se ha podido observar un comportamiento errático en los resultados. Este fenómeno motivó al análisis de las muestras mediante microscopía electrónica para intentar explicarlo, desde la microestructura de la soldadura.

Los resultados obtenidos muestran la nucleación de micro defectos en las uniones de diferentes morfologías. Las dos preponderantes son la aparición de agrupaciones de poros ordenados en las superficies de deformación experimentadas por el material y un segundo tipo de defecto que aparenta ser una ruptura a través del borde de grano del material.

Lo encontrado mediante este análisis permitió plantear una serie de hipótesis al respecto de la generación de estas discontinuidades. Entre estas, surgió la relación que todo este conjunto de fenómenos puede tener con la temperatura equicohesiva del material. Si esta hipótesis se corrobora, se podría explicar de buena manera, el comportamiento mecánico de la unión en función a las variables de entrada del proceso.

### INTRODUCCIÓN.

Desde hace un tiempo, el grupo de trabajo en Friction Stir Welding de la Facultad de Ingeniería, perteneciente al grupo ProInTec I&D, centró sus esfuerzos en conocer el proceso de soldadura por fricción-agitación. Desde entonces, se trabajó sobre la soldadura a tope de distintas aleaciones de aluminio, con el objetivo de generar el conocimiento suficiente que permita la realización de soldaduras sanas en aleaciones de aluminio de alta resistencia.

Para esto, se desarrollaron herramientas, se realizaron decenas de metros de soldadura y se ensayaron las muestras mediante métodos destructivos y no destructivos. Los resultados de estos ensayos permitieron avanzar en el conocimiento y, por lo tanto, avanzar sobre las aleaciones deseadas.

Durante las experiencias realizadas, se adquirió la norma ISO 25239 con la que se comenzó a estandarizar la realización de muestras para caracterizarlas y, de manera interna, certificarlas. Así fue que se creó, además de lo previsto por la norma para la realización de las muestras, un protocolo de medición de temperatura del proceso, un protocolo de inspección visual para una primera aceptación, un protocolo de inspección con tintas penetrantes de alta definición, un protocolo de ensayo mediante rayos x, un protocolo de ensayos mecánicos mediante el ensayo de tracción y un protocolo de análisis micrográfico mediante ataque químico y microscopio óptico.

Bajo estas condiciones se realizaron decenas de muestras de soldaduras variando los parámetros de velocidad de avance y velocidad de giro persiguiendo el objetivo de obtener una soldadura lo más eficiente posible. Los resultados de los ensayos de tracción fueron analizados desde distintos puntos de vista para tratar de encontrar patrones que indicaran un camino certero hacia la selección de parámetros de proceso que conlleven una soldadura de alta eficiencia.

En el proceso, se encontró una condición de los resultados que, si bien no parecía ser la herramienta para destrabar el camino hacia el objetivo general, podía encausar su resolución. Ordenando los valores de resistencia máxima a la tracción en función de la velocidad de giro de la herramienta y la velocidad de avance, se pudo observar que presentan dos comportamientos bien diferenciados. A partir de un cierto valor de velocidad de giro, los resultados del ensayo se vuelven aleatorios, alternando valores altos y bajos sin razón aparente. Por debajo de este valor, los resultados se vuelven previsibles ordenándose en función a los parámetros mencionados.

En trabajos anteriores, se estudiaron en profundidad los datos obtenidos y se desarrolló una hipótesis que puede explicar el cambio en el comportamiento de las uniones sometidas a ensayos de tracción. La hipótesis resultante es que en un cierto rango de velocidades de giro de la herramienta, se supera la temperatura equicohesiva del material y cambia el mecanismo de deformación plástica. A partir del punto en el que comienza el deslizamiento por borde de grano, comienzan a multiplicarse las probabilidades de nuclear defectos en estas regiones.

El objetivo de este trabajo es analizar mediante la técnica de microscopía electrónica la posibilidad de existencia de defectos y su morfología en los cordones de soldadura teóricamente sanos.

## **DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

Como fue mencionado durante la introducción, decenas de muestras fueron realizadas según lo especificado en la norma ISO 25239 en sus capítulos 2 y 5. Se realizaron en chapas planas de dimensiones especificadas en la norma mencionada. La máquina utilizada para tal fin, fue una fresa de 3 ejes controlada por un CNC Siemens.

La herramienta utilizada para realizar las uniones es un desarrollo propio que consta de un cuerpo fabricado en acero y un pin obtenido de una herramienta para roscar. La figura 1 muestra una imagen de la herramienta antes de ser utilizada.

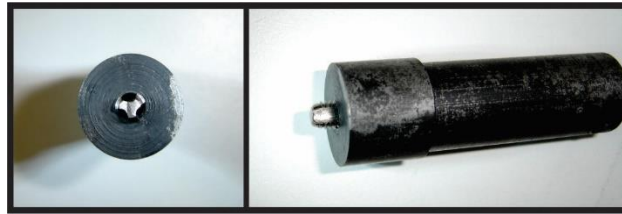


Figura 1: herramienta desarrollada para el proceso.

Para lograr el efecto del ángulo de inclinación de la herramienta, debido a la imposibilidad de girar el usillo de la máquina, se mecanizó un bloque de acero que actuaría como respaldo con 3° de inclinación y de esta manera inclinar las chapas a ser soldadas.



Figura 2: Chapas dispuestas en respaldo para ser soldadas.

Antes de realizar las muestras, se preparaban las chapas para la medición de temperatura del proceso. Para esto, se realizaron perforaciones en las que se introdujeron termocuplas tipo K de 0,5 mm de diámetro, para asegurarse una respuesta rápida frente a los cambios de temperatura. El esquema de la posición de las termocuplas se muestra en la figura 3. Aunque se sabe que el método no es capaz de dar la temperatura exacta del proceso, debido a que la termocupla interfiere en el flujo y por lo tanto en la temperatura puntual, se entiende que es el método que puede brindar más aproximadamente la temperatura de la región.

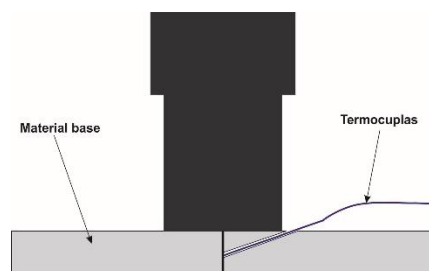


Figura 3: Esquema de introducción de termocupla para la medición de temperatura.

Una vez terminadas las muestras, se verificaba su sanidad según los procedimientos mencionados en la introducción del presente trabajo. El orden en el cual se practicaban es:

- Inspección Visual.
- Ensayo de tintas penetrantes.
- Ensayo mediante rayos X

Certificada su condición de sanidad, se procedía a la obtención mediante mecanizado de las probetas de tracción. La región de la muestra destinada a tal fin y las dimensiones de la probeta, se encuentran definidas por la norma mencionada en el presente trabajo. El ensayo de las probetas se realizó con extensómetro hasta la rotura obteniendo como dato de análisis la resistencia máxima a la tracción, tal como dice la norma.

Paralelamente a los ensayos de tracción se realizaron análisis micrográficos de la sección transversal del cordón de soldadura. Las muestras para este estudio fueron obtenidas de la región determinada por la norma mencionada, pulidas y atacadas químicamente mediante un protocolo desarrollado bajo la misma norma. Estas muestras fueron observadas en un microscopio electrónico.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES.

En la referencia [7], se presentaron y analizaron los resultados de los ensayos mecánicos de las soldaduras realizadas. En la figura 4, se muestra, en particular, los resultados de los ensayos de tracción en función a la velocidad de giro y velocidad de avance de la herramienta con el objetivo de crear el contexto del análisis microestructural.

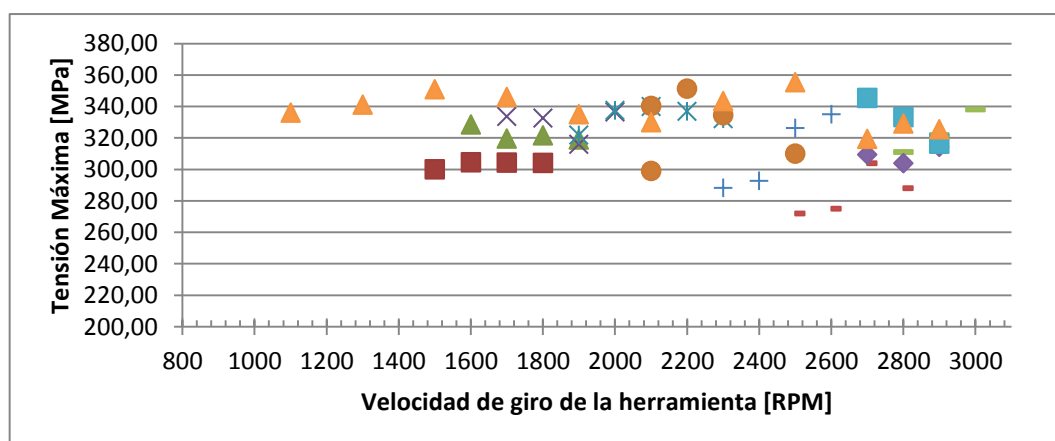
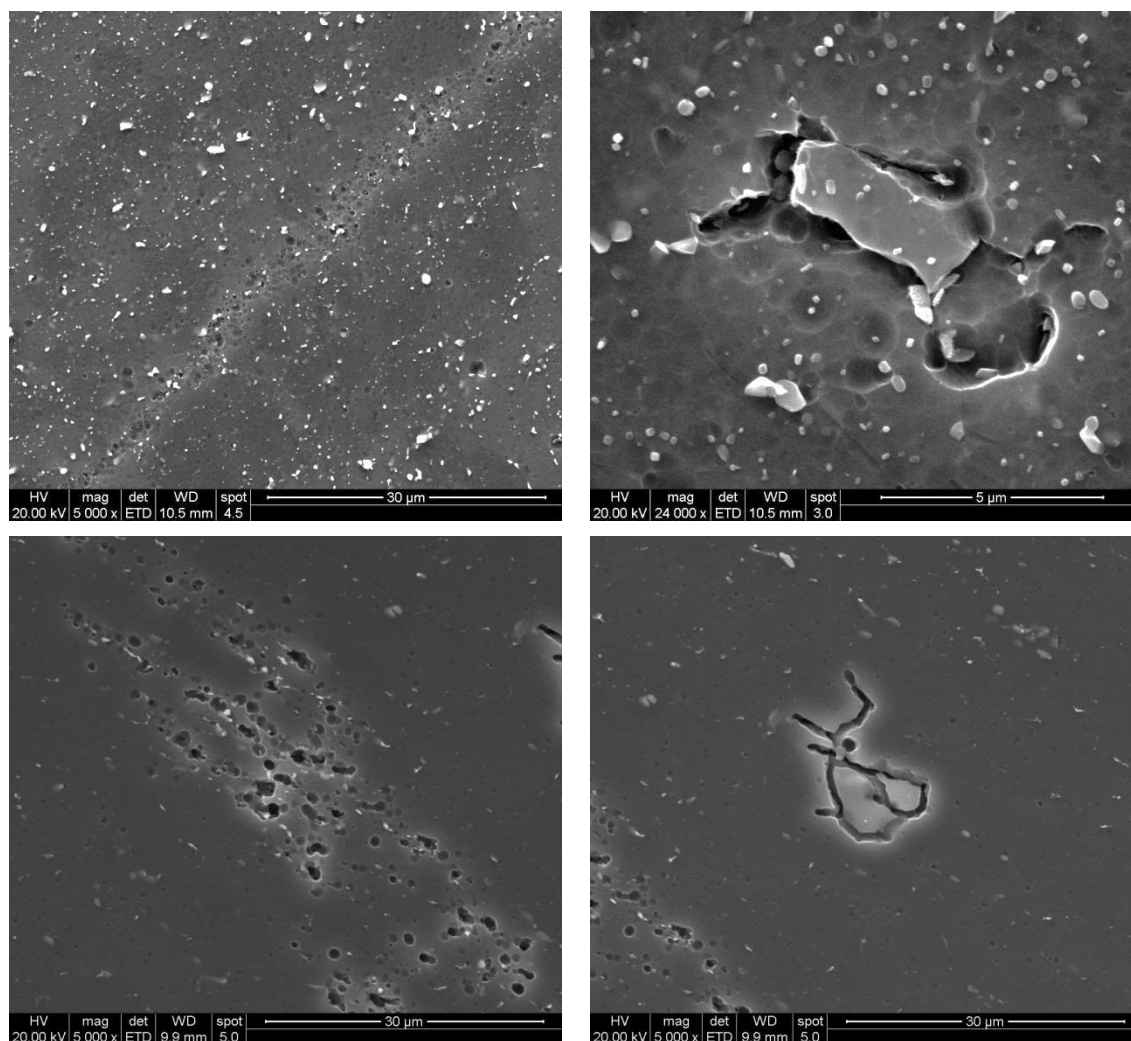


Figura 4: Gráfico de Resistencia máxima a la tracción vs velocidad de giro. Los valores de referencia son de velocidad de avance en mm/min.

Para poder comprender la aleatoriedad en el comportamiento mecánico de las soldaduras obtenidas con velocidades de giro de la herramienta superiores a 1900 RPM, se seleccionaron muestras para tratarlas y observarlas en el microscopio electrónico. El objetivo perseguido era buscar indicios de deformación plástica del material por el mecanismo de deslizamiento por borde de grano. Estas muestras habían sido ya analizadas a través del microscopio óptico y todas ellas habían sido declaradas libres de defectos.

En la figura 5 se muestra una selección de imágenes de las distintas muestras donde se pueden observar los defectos encontrados.



*Figura 5: Selección de imágenes de defectos encontrados en las muestras analizadas.*

Como se puede observar en las imágenes, las muestras no estaban libres de defectos como se había determinado con el análisis del microscopio óptico.

En particular, se encontraron dos tipos de defectos. En las imágenes encolumnadas a la izquierda de la figura 5, se puede observar un tipo de defecto en forma de poros agrupados. Esta agrupación no parece ser aleatoria. Los poros se encuentran distribuidos según las superficies de deformación plástica que el material sufrió durante las soldaduras. Estas regiones porosas se encontraron en menor o mayor medida en todas las muestras que se analizaron bajo el microscopio electrónico.

El otro tipo de defecto encontrado en las muestras es el que se puede observar en la columna derecha de la figura 5. Claramente la morfología de este defecto no se puede catalogar como poros y su agrupación tampoco está en concordancia con lo observado en el defecto anterior. Lo que se observa en este tipo de defecto es una fractura entre planos del material siguiendo una forma determinada. Si se compara esta geometría con la estructura de granos que se puede observar en las micrografías de las soldaduras, es posible decir que esas fracturas que explicaron anteriormente, podrían ser colapsos del borde de grano debido al exceso de deformación plástica.



## CONCLUSIONES.

Una conclusión es cierta, la aleatoriedad en el comportamiento mecánico de las muestras se encuentra ampliamente justificada por el contenido de defectos microscópicos en el cordón de soldadura.

Por otro lado, uno de los objetivos de este trabajo se centró en intentar corroborar, o acercarse a la validación, de la hipótesis de que el comportamiento mecánico de los cordones de soldadura realizados por Friction Stir Welding en chapas de aluminio de alta resistencia, se encontraba influenciado por el mecanismo de deformación plástica que había sufrido el material en función a la temperatura equicohesiva. Traducido esto a las experiencias realizadas, se podría decir que todas las muestras soldadas a velocidades inferiores a 1900 RPM se encontraron por debajo de la temperatura equicohesiva, mientras que las muestras que se realizaron por encima de la velocidad mencionada sufrieron temperaturas superiores y, por lo tanto, se generaron defectos que comprometen al comportamiento mecánico.

Parte del análisis descripto se encuentra en concordancia con la hipótesis. Si se da por cierta la especulación de que el segundo defecto descripto en el trabajo es por cierto un colapso en el borde de grano, entonces la hipótesis planteada en esta investigación se encuentra cerca de ser verificada. Para lograrlo totalmente faltarían algunos ensayos mecánicos sobre el material.

Queda pendiente la explicación del origen de la aglomeración de poros observada. Una posible explicación de este fenómeno, se podría basar en la condición de que, al estar deformándose el material a alta velocidad y mediante el mecanismo de deslizamiento por borde de grano, se podría generar un flujo turbulento que propiciara la nucleación de poros. Por supuesto que esta hipótesis deberá ser corroborada.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Tang, W., y otros, y otros.** Heat Input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding. *Process. Manuf. Sci.* 1999, págs. 163 - 171.
2. **International Standard Organization.** ISO 25239-2. *Friction Stir Welding - Aluminium - Part 2: Design of weld joints.* 2011.
3. **International Standard Organisation.** ISO 25239-5. *Friction Stir Welding - Aluminium - Part 5: Quality and inspection requirements.* 2011.
4. **Mishra, Rajiv y Mahoney, Murray.** *Friction Stir Welding and Processing.* s.l. : ASM International, 2007.
5. **Dieter, George E.** *Mechanical Metallurgy.* s.l. : McGraw-Hill, 1961.
6. **American Society for Metals.** *ASM Specialty Handbook, Aluminium and Aluminium Alloys.* 1996.
7. **Vucetich, Danilo Alvaro, Feloy, Lucas y Gonzalez, Alfredo Carlos.** Mechanical properties vs torque analysis during friction stir welding of aluminum plates. *11th International Symposium on Friction Stir Welding.* Cambridge : s.n., 2016, pág. 11.