



II CAIM 2010  
Segundo Congreso Argentino  
de Ingeniería Mecánica  
San Juan - Noviembre 2010

## SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN (FSW) DE ALUMINIO

Ariel Burgos<sup>(1)</sup>, Hernán Svoboda<sup>(2, 4)</sup> y Estela Surian<sup>(1, 3)</sup>

<sup>(1)</sup> **Secretaría de investigación - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Lomas de Zamora  
Camino de Cintura y Juan XXIII, Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina**

Tel/Fax: +54-01142827880 - E-mail: [arielburgo@gmail.com](mailto:arielburgo@gmail.com)

<sup>(2)</sup> **Laboratorio de Materiales y Estructuras - Facultad de Ingeniería INTECIN, Universidad de Buenos Aires,  
Las Heras 2214, C.A.B.A., Argentina**

<sup>(3)</sup> **DEYTEMA – Centro de Desarrollo y Tecnología de Materiales - Facultad Regional San Nicolás -  
Universidad Tecnológica Nacional - Colón 332, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina**

<sup>(4)</sup> **Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917, C.A.B.A., Argentina**

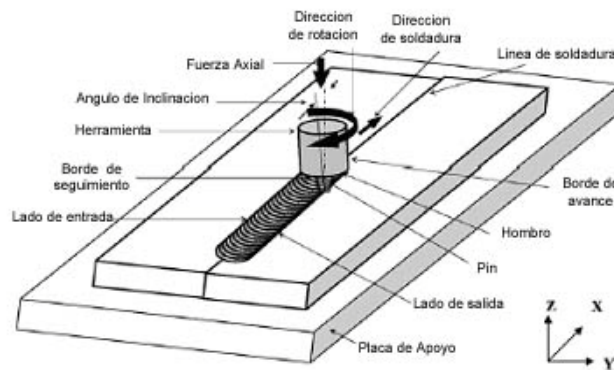
### RESUMEN

El proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) fue patentado en 1991 [1] por el Instituto Inglés de Soldadura (The Welding Institute), convirtiéndose en uno de los más revolucionarios de los últimos tiempos. Permite la soldadura de diversos materiales en fase sólida sin necesidad de utilizar consumibles para lograrlo. Sus principales ventajas radican en bajos requerimientos de preparación de junta y ausencia de refuerzos, logrando un menor nivel de tensiones residuales sin registrar defectos de solidificación, cuestión que se traduce en una alta productividad y excelentes propiedades mecánicas de la unión soldada, superiores a las obtenidas por procesos convencionales. Inicialmente fue desarrollado para la soldadura de aluminio y sus aleaciones, dado que los procesos por arco eléctrico presentaban dificultades para obtener soldaduras con bajos niveles de defectos [2]. El objetivo del presente trabajo fue estudiar las soldaduras de un aluminio AA1050 de 3 mm de espesor, obtenidas por el proceso de FSW, analizando el efecto de las geometrías de herramienta y de las variables de dicho proceso sobre las características del cordón de soldadura generado y de sus propiedades mecánicas resultantes. A este fin, se empleó una máquina herramienta adaptada [3] y se analizaron dos geometrías de herramienta: pin cónico y pin cuadrado, a partir de las cuales se realizaron dos tipos de soldaduras: juntas a tope y cordón sobre chapa. Se evaluaron diversos parámetros de proceso: velocidad de rotación, velocidad de avance y fuerza axial. Sobre las uniones soldadas se caracterizó la macroestructura, se realizaron perfiles de microdureza y se evaluaron las propiedades mecánicas a través de ensayos de tracción, plegado de cara y de raíz. Se obtuvieron uniones libres de defectos con buenas propiedades mecánicas para ambas geometrías analizadas. Sin embargo, en ciertos casos, se observó la presencia de defectos en la raíz de las uniones soldadas, típicos de la aplicación de este proceso en espesores finos [4].

**Palabras Claves:** Soldadura por fricción-agitación, FSW, aluminio, macroestructura, propiedades mecánicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de FSW, es un método de soldadura en estado sólido ideado por The Welding Institute (TWI) a comienzos de los años 90 y patentado en 1991[1], demostrando tener un gran potencial para la realización de uniones de cualquier tipo de aleación y en especial de aleaciones no ferrosas de bajo punto de fusión, donde las aleaciones de aluminio ocupan un lugar de privilegio. En FSW se emplea una herramienta no consumible compuesta principalmente por un hombro cilíndrico y un pin concéntrico en el extremo inferior, el cual se inserta en el material a soldar aplicando una fuerza axial al mismo tiempo que se le imprime un movimiento de rotación y de traslación. En la Figura 1 se observa un esquema del proceso FSW y sus principales variables.



**Figura 1.** Esquema del proceso de soldadura por FSW [1].

Se procede a la inserción de la herramienta hasta que el hombro de la misma hace contacto con las superficies a soldar, aplicando para el caso una fuerza axial controlada por el desplazamiento vertical de la mesa de sujeción del material a unir o del cabezal portaherramienta. El contacto provocado, genera calor debido a la fricción elevando la temperatura del sistema. La rotación y el avance de la herramienta a la temperatura de trabajo, dan como resultado la conformación de un flujo plástico de material que, favorecido por la geometría de dicha herramienta, es agitado y mezclado hasta resultar en una unión metalúrgica en fase sólida.

Entre las ventajas principales de dicho proceso se encuentran el bajo nivel de tensiones residuales, la ausencia de porosidad y de fisuración en caliente de la unión obtenida; a su vez, no necesita de preparación de junta ni de consumibles para soldar, no requiere del mecanizado de refuerzos y se trata de un proceso automático [2].

El diseño de la herramienta es de fundamental importancia en lo referente a la calidad de la unión y la productividad del proceso. En este sentido existen diversos diseños de herramientas para FSW [2]. Aspectos como el diámetro del hombro, el diámetro del pin, la geometría del pin y la longitud del pin, son algunos de los más significativos entre las características de dichas herramientas.

En cuanto a la máquina, si bien aquella específica para esta aplicación tiene todavía un alto costo, existen antecedentes respecto de la adaptación de máquinas herramientas a la soldadura por FSW [3-5]. Los requerimientos mecánicos de la misma se centran en la velocidad de rotación, la velocidad de avance y las fuerzas axiales que debe soportar, por cuanto la rigidez de la máquina es una cuestión relevante.

En este proceso el aporte de calor es relativamente bajo en comparación con los procesos de soldadura por fusión habitualmente empleados. En éstos, el nivel de tensiones residuales y los defectos asociados a la solidificación (porosidad y susceptibilidad a la fisuración en caliente) generan uniones cuya integridad es cuestionada, principalmente en aleaciones de aluminio para aplicaciones aeronáuticas o aeroespaciales. En este sentido la soldadura por FSW se transforma en una alternativa potencial, encontrando numerosas aplicaciones para este tipo de industrias en el último tiempo [2].

Sin embargo existen diversos aspectos por estudiar en el contexto de la soldadura por FSW. La optimización de los procedimientos de soldadura y el efecto de la geometría de la herramienta son áreas de interés tecnológico que requieren un mayor desarrollo. El presente trabajo pretende analizar las soldaduras confeccionadas por el proceso FSW de chapas de aluminio AA1050 de 3 mm de espesor con dos geometrías distintas de herramienta: de pin cuadrado y de pin cónico bajo diferentes condiciones operativas.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se utilizó una chapa de aleación de aluminio AA1050 de 3 mm de espesor laminada en frío como material base. Sobre éste, se practicaron ensayos de tracción según la norma ASTM E8M [6] y de microdureza Vickers, determinándose para el caso el límite 0,2 %  $\sigma_{0,2} = 90$  MPa, la resistencia a la tracción  $\sigma_{UTS} = 100$  MPa, el alargamiento a rotura  $\epsilon_{rot} = 10$  % y la microdureza HV = 41.

El proceso de soldadura por FSW se llevó a cabo en una fresadora universal N° 2, adaptada para tal fin, de 5 HP de potencia y con un rango de 80 - 1200 rpm de velocidad de giro y de 15 - 279 mm/min de velocidad de avance.

Las herramientas fueron desarrolladas empleando para su confección un acero H13 templado desde los 1050 °C y revenido a 500 °C, obteniéndose una dureza final de 51 HRc. En la Figura 2 se observa un esquema de ambas herramientas. En la Tabla 1 se exponen las dimensiones de cada una de ellas.



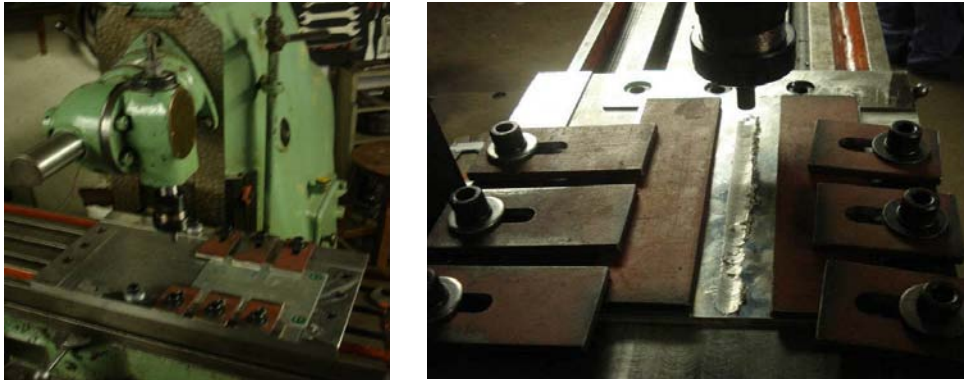
**Figura 2.** Esquema de las herramientas utilizadas - a) pin cuadrado; b) pin cónico

**Tabla 1.** Dimensiones de herramientas con pin cuadrado y cónico.

Parámetro \ Pin	Cuadrado	Cónico
Ø Hombro	12 mm	12 mm
Geometría hombro	Cóncava cónica [5°]	Cóncava cónica [5°]
Longitud del pin	2,2 y 2,8 mm	2,4 y 2,8 mm
Longitud del lado	3,25mm	-
Ø Pin en base cono	-	4,7 mm
Ángulo del cono	-	9°
Vol Est./Vol Din.	1,55	1,09

Se realizaron juntas a tope (T) de 200 x 140 mm y cordones sobre chapa (BOP) en muestras de 150 x 70 mm. En la Figura 3 se pueden observar las placas montadas sobre los dispositivos adaptados y la soldadura lograda con los mismos.

Las variables de proceso para este trabajo, tanto en junta a tope como sobre chapa, fueron las siguientes: velocidad de rotación ( $V_r$ ), velocidad de avance ( $V_a$ ), fuerza axial ( $F_a$ ) y el ángulo de inclinación de la herramienta.



**Figura 3.** Montaje de las placas y la soldadura practicada sobre las mismas.

La fuerza axial, fue considerada como dependiente de la continuidad del flujo plástico en el seno del cordón; se la estableció como el resultado de una inspección ocular en tiempo real sobre el trabajo – la continuidad del cordón y la ausencia de defectos apreciables a simple vista fueron los aspectos buscados. Aquella fue medida por medio de la instrumentación de un extensómetro eléctrico (SG) ubicado en el cabezal vertical de la fresadora de modo de medir su deformación ante la aplicación de carga axial durante la soldadura [3]. En este sentido, la fuerza quedó fijada por el desplazamiento vertical de la mesa.

El ángulo de inclinación de la herramienta utilizado en todas las muestras fue de  $1,5^\circ$ , excepto para una en la que se empleó uno de  $3,5^\circ$ .

En la Tabla 2 y 3 se presentan los parámetros empleados en las distintas soldaduras realizadas. Adicionalmente se expone un índice de velocidad ( $I_v$ ) definido como el cociente entre la velocidad de rotación y la velocidad de avance [ $V_r / V_a$ ].

**Tabla 2.** Condiciones de soldadura de las probetas (T y BOP) con pin cuadrado.

Parámetro \ Identificación	1Cu-T	2Cu-T	3Cu-T	4Cu-T	1Cu-B	2Cu-B	3Cu-B	4Cu-B
Tipo de unión	A tope	A tope	A tope	A tope	BOP	BOP	BOP	BOP
Long. Pin [mm]	2,8	2,8	2,8	2,8	2,2	2,2	2,2	2,2
Diagonal Pin [mm]	4	4	4	4	3,6	3,6	3,6	3,6
Ángulo de Inclinación Hta. [°]	3,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$V_r$ [rpm]	680	680	680	514	514	680	514	680
$V_a$ [mm/min]	73	73	73	73	51	73	73	146
$I_v$ [rev./mm]	9,32	9,32	9,32	7,04	10,08	9,32	7,04	4,66
$F_a$ [kN]	≈1,6	≈1,7	≈2	≈2,2	≈1,5	≈1,3	≈1,6	≈1,1

Como puede verse, para la herramienta con pin cuadrado se evaluaron los efectos de la velocidad de rotación (514 y 680 rpm), de la velocidad de avance (51, 73 y 146 mm/min), de la fuerza axial (1,1 a 2,2 kN) y del ángulo de inclinación de la herramienta ( $3,5^\circ$  y  $1,5^\circ$ ), para juntas a tope (T) y cordones sobre chapa (BOP).

En la Tabla 3 se exponen los parámetros de las soldaduras realizadas con la herramienta de pin cónico.

**Tabla 3.** Condiciones de soldadura de las probetas (T y BOP) con pin cónico.

Identificación	1Co-T	2Co-T	1Co-B	2Co-B	3Co-B	4Co-B
Parámetro						
Tipo de unión	A tope	A tope	BOP	BOP	BOP	BOP
Long. Pin [mm]	2,8	2,8	2,4	2,4	2,4	2,4
Ángulo de Inclinación Hta. [°]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Vr [rpm]	680	680	680	680	680	680
Va [mm/min]	146	146	98	146	206	279
Iv [rev/mm]	4,66	4,66	6,94	4,66	3,30	2,44
Fa [KN]	≈1,5	≈1,6	≈1,4	≈1,7	≈1,7	≈1,4

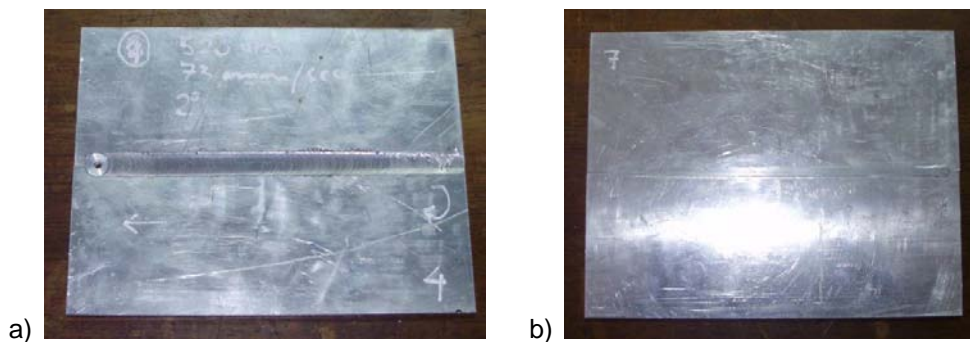
Nótese que para esta herramienta se evaluaron los efectos de la velocidad de avance (98, 146, 206 y 279 mm/min) para una velocidad de rotación de 680 rpm. La fuerza axial se encontró entre 1,4 y 1,7 kN. Se realizaron juntas a tope (T) y cordones sobre chapa (BOP).

Sobre las chapas soldadas se practicaron cortes transversales para la obtención de probetas para ensayos de plegado de cara y raíz, de muestras para macrografías (determinación de la geometría del cordón en la sección transversal, área y detección de defectos), de muestras para ensayos de microdureza Vickers y probetas para ensayos de tracción. A su vez, se realizó una macrografía sobre un corte longitudinal de una probeta de tracción ensayada para observar la evolución de la fractura.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

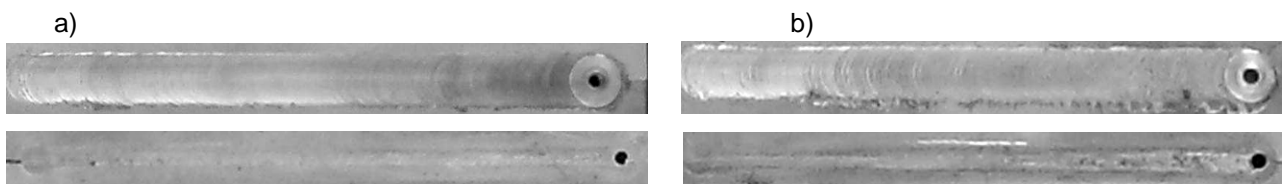
#### 3.1 Inspección visual

En la Figura 4 se presentan imágenes del aspecto superficial de la cara y la raíz de una de las probetas soldadas por FSW en junta a tope (T).



**Figura 4.** Probetas soldadas a tope (T): a) cara; b) raíz.

En la Figura 5 se muestran en detalle el aspecto superficial de la cara y la raíz de uniones soldadas T.



**Figura 5.** Detalles de la cara y la raíz de probetas soldadas T: a) 2Cu-T; b) 4Cu-T.

Como puede verse, se logra obtener buenos acabados superficiales y buena penetración para las condiciones adecuadas de soldadura. Sin embargo, también se observaron casos con falta de penetración, exceso de material fuera de la junta (rebaba) y excesiva reducción de espesor en el cordón. Estos defectos estarían asociados a una longitud de pin corta en el primer caso y a un exceso de carga axial en el segundo. Asimismo, suelen encontrarse también anomalías en la raíz de algunas juntas a tope vinculadas a una falta de flujo plástico en dicha zona.

### 3.2 Caracterización macrográfica

De las distintas probetas soldadas se extrajeron cortes transversales para observación metalográfica. En la Figura 6 se ilustran las macrográficas obtenidas para las probetas soldadas a tope con pin cuadrado.

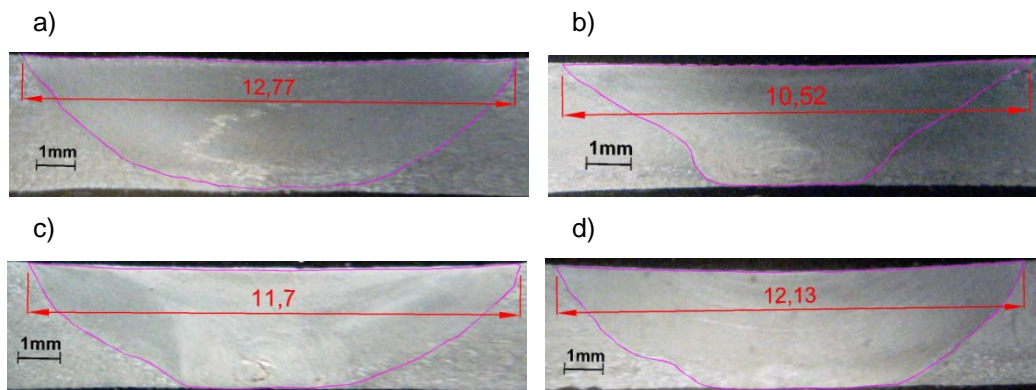


Figura 6. Macrográficas de probetas soldadas T con pin cuadrado: a) 1Cu-T; b) 2Cu-T; c) 3Cu-T y d) 4Cu-T.

En todos los casos se observa una buena penetración y la ausencia de defectos macroscópicos que comprometan seriamente las propiedades de la unión. Sin embargo, en la zona de la raíz se detectó la presencia de óxidos alineados. A su vez, se puede ver que la reducción local del espesor en la zona del cordón o *Weld Nugget* (WN) es leve. Es de notarse que la geometría del WN se ve modificada como consecuencia de la variación de los parámetros empleados, alternando entre una geometría semielíptica y otra en forma de V. En este mismo sentido, el área del WN también se ve afectada por dicha variación. En la Tabla 4 se exponen los valores de área de los WN medidos para cada muestra.

Tabla 4. Áreas del WN medidas sobre las muestras Cu-T.

Parámetro \ Identificación	1Cu-T	2Cu-T	3Cu-T	4Cu-T
Ángulo de Inclinación Hta. [°]	3,5	1,5	1,5	1,5
Iv [rev./mm]	9,32	9,32	9,32	7,04
Fa [kN]	≈1,6	≈1,7	≈2	≈2,2
Área del WN [mm <sup>2</sup> ]	31,4	17,3	24,8	28,5

Como puede verse en la Tabla 4, las probetas 1Cu-T y 2Cu-T fueron soldadas con el mismo Iv y similar carga axial, pero con diferentes ángulos de inclinación de la herramienta. Este último parámetro sería el que explicaría la mayor área del WN observada para la probeta 1Cu-T y su geometría semielíptica. Asimismo las probetas 2Cu-T y 3Cu-T fueron soldadas con el mismo Iv, pero con cargas axiales promedio levemente diferentes. Se puede observar que al aumentar esta carga se tiene un incremento del área del WN. Este efecto estaría asociado a la cantidad de calor aportado al material, que no sólo depende del Iv sino también

de la fuerza axial aplicada. En cambio, siendo que la probeta 4Cu-T se soldó con un  $lv$  menor pero a mayor carga axial que la 3Cu-T, se observa también un leve incremento en el área medida del WN, cuestión que estaría asociada en este caso a una compensación de dichos parámetros (disminución de  $lv$ , aumento de  $Fa$ ).

En la Figura 7 se observan las macrografías de las probetas BOP soldadas con el pin cuadrado, mientras que en la Tabla 5 se exponen los valores de las áreas de WN medidas sobre estas muestras.

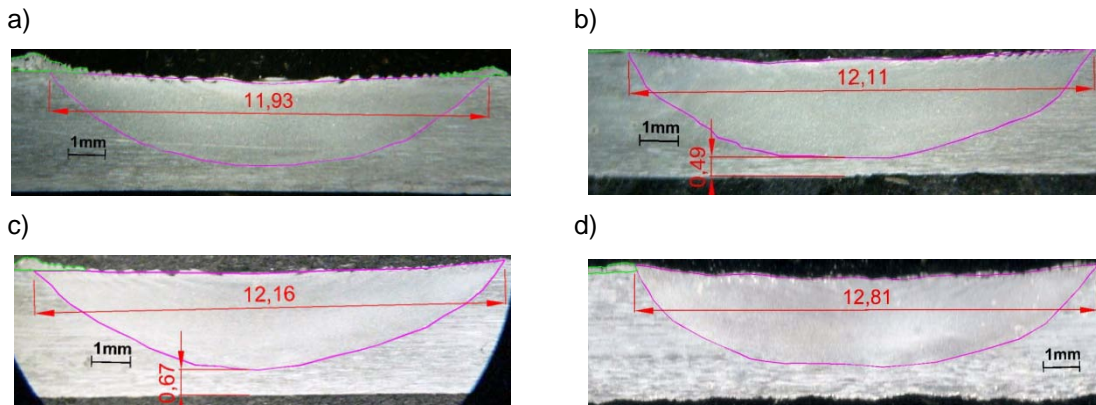


Figura 7. Macrografías de probetas BOP con herramienta pin cuadrado: a) 1Cu-B; b) 2Cu-B; c) 3Cu-B y d) 4Cu-B.

Tabla 5. Áreas del WN medidas sobre las muestras Cu-B.

Parámetro \ Identificación	1Cu-B	2Cu-B	3Cu-B	4Cu-B
$lv$ [rev/mm]	10,08	9,32	7,04	4,66
$Fa$ [kN]	≈1,5	≈1,3	≈1,6	≈1,1
Área del WN [mm <sup>2</sup> ]	19,8	23,3	21,2	23,8

Como puede verse, se tienen geometrías semielípticas para todas las configuraciones analizadas, sin observarse diferencias significativas. Las muestras realizadas con mayor velocidad de rotación (2Cu-B y 4Cu-B: 680 rpm) mostraron mayores áreas que aquellas realizadas con menor velocidad de rotación (1Cu-B y 3Cu-B: 514 rpm).

En la Figura 8 se observan las macrografías obtenidas de las probetas T soldadas con el pin cónico, mientras que en la Tabla 6 se exponen los resultados de las áreas medidas en cada caso.

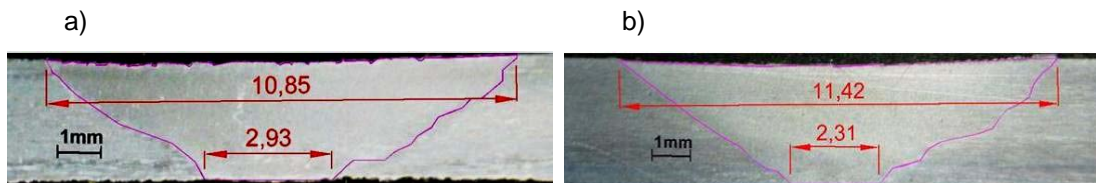


Figura 8. Macrografías de probetas soldadas T con pin cónico: a) 1Co-T; b) 2Co-T.

Tabla 6. Áreas del WN medidas sobre las muestras Co-T.

Parámetro \ Identificación	1Co-T	2Co-T
$lv$ [rev./mm]	4,66	4,66
$Fa$ [kN]	≈1,5	≈1,6
Área del WN [mm <sup>2</sup> ]	19,4	21,8

Consistentemente con lo denotado anteriormente, al aumentar la carga axial se observa un incremento en el área del WN.

En la Figura 9 se observan las macrografías obtenidas de las probetas BOP realizadas con el pin cónico, mientras que en la Tabla 7 se exponen los resultados de las áreas medidas sobre estas muestras.

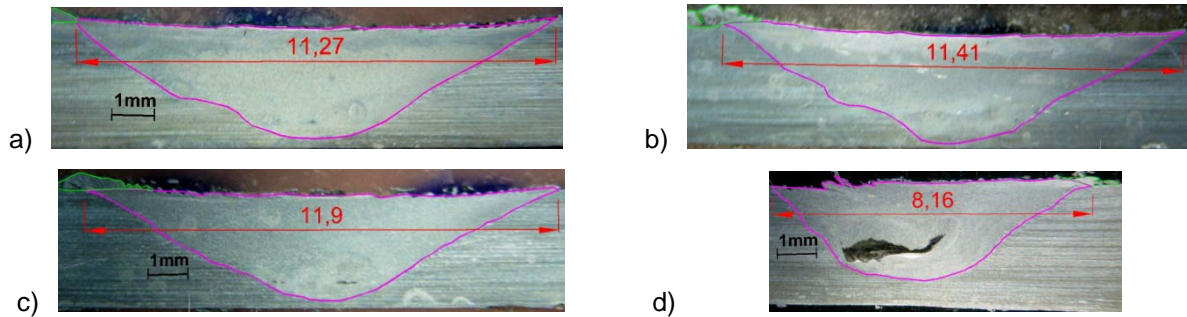


Figura 9. Macrografías de probetas BOP realizadas con pin cónico: a) 1Co-B; b) 2Co-B; c) 3Co-B y d) 4Co-B.

Tabla 7. Áreas del WN medidas sobre las muestras Co-B.

Parámetro \ Identificación	1Co-B	2Co-B	3Co-B	4Co-B
<b>Iv [rev./mm]</b>	6,94	4,66	3,30	2,44
<b>Fa [KN]</b>	≈1,4	≈1,7	≈1,7	≈1,4
<b>Área del WN [mm<sup>2</sup>]</b>	17,4	16,9	16,8	12,8

Como puede verse en la Figura 9, al disminuir Iv se reduce el aporte de calor por cuanto el volumen de material plastificado sufre una merma. De esta manera se favorece la formación de defectos asociados con esta insuficiencia de flujo plástico de material como se observa en la muestra 4Co-B. A su vez, el área del WN se ciñe al decrecer el Iv, consistentemente con lo denotado anteriormente.

Por otro lado, es de distinguir que las soldaduras resueltas con la herramienta de pin cuadrado (probetas 3Cu-B y 4Cu-B) presentan una mayor área del WN en comparación con aquéllas confeccionadas con la herramienta de pin cónico (probetas 1Co-B y 2Co-B). Esto estaría acorde con lo reportado por la bibliografía al respecto de un mayor flujo plástico de material generado por la primera de las herramientas y como consecuencia de una relación entre volumen estático y el dinámico del pin también mayor. En línea con lo anterior, el pin cuadrado presenta accesoriamente una componente de extrusión cíclica debida específicamente a su geometría y que se traduce en un incremento del flujo plástico y en una intensificación del refinamiento de grano [7]. Cabe aclarar que los valores de fuerza axial alcanzados en cada caso quedaron definidos por la posición vertical de la mesa que permitía una buena soldadura sin exceso de material expulsado y con suficiente flujo plástico de material.

### 3.2 Perfiles de microdureza

En la Figura 10 se presentan los perfiles de microdureza obtenidos para las probetas T realizadas con las dos geometrías de herramienta analizadas. Su observación infiere una escasa variación de la dureza a lo largo de la junta soldada. Sin embargo, es de destacar que en el cordón de soldadura (WN) y en la zona térmicamente afectada (HAZ) la dureza es levemente inferior a la del material base (alrededor de unos 35

HV de promedio), valor que sólo se ve superado en el inicio de la zona termomecánicamente afectada (TMAZ) donde se llega a igualar prácticamente el valor de referencia.

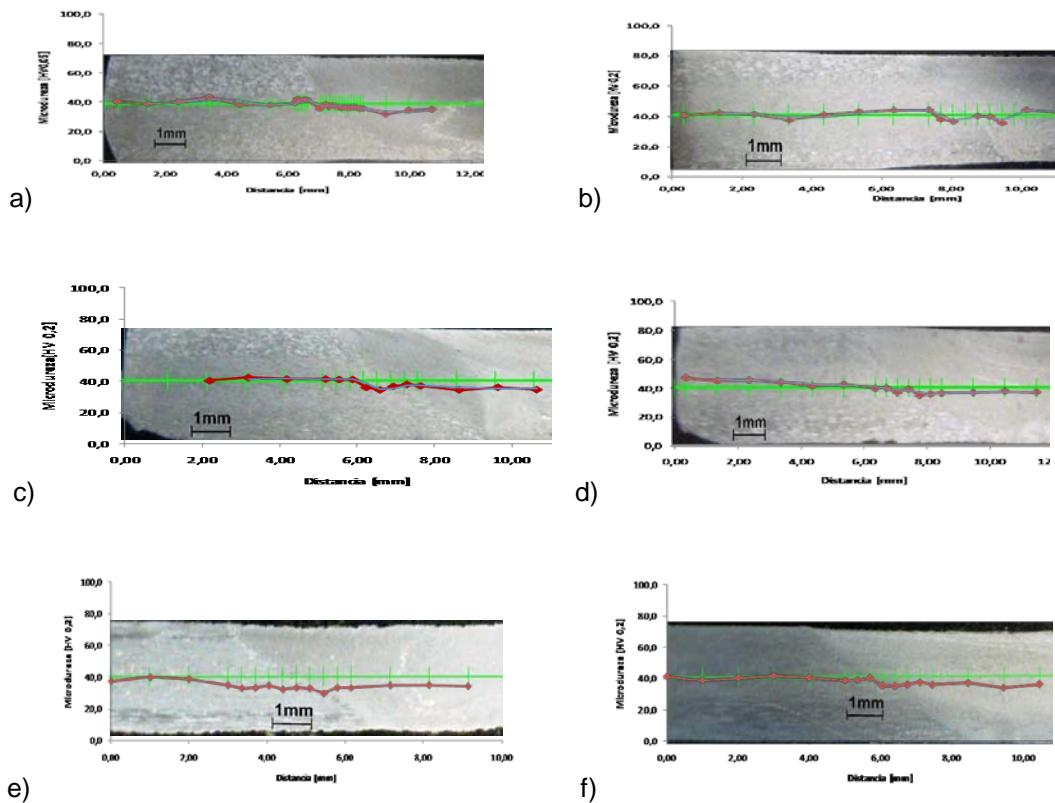


Figura 10. Perfiles de microdureza para las probetas: a) 1Cu-T; b) 2Cu-T; c) 3Cu-T; d) 4Cu-T; e) 1Co-T y f) 2Co-T.

En estos materiales, y durante la soldadura por FSW, son dos los mecanismos identificados que controlan las propiedades de la unión. Cabe aclarar que el material base ya se encontraba previamente deformado en frío por cuanto presentaba un grado de endurecimiento por este hecho. Por lo tanto, por un lado tenemos que en el WN, se produce un fenómeno de recristalización y un fuerte refinamiento de grano. Para este caso, el efecto de ablandamiento por la recristalización es levemente superior al de endurecimiento por afinamiento de grano, cuestión que se refleja en una dureza del WN ligeramente inferior a la del material base. Por otro lado durante la soldadura, en la HAZ, un calentamiento del material base sin deformación plástica provocada por el FSW, se traduce en un leve ablandamiento de dicha zona, tal como se la identificó anteriormente. Esta misma evolución del perfil de microdureza se observó para las distintas muestras soldadas.

### 3.3 Propiedades mecánicas

#### 3.3.1 Plegado

Los plegados de cara fueron satisfactorios en todos los casos. En la Figura 11 se observan las imágenes de los plegados de raíz de las probetas soldadas con ambas geometrías a tope. Como puede verse el radio del plegado es pequeño, por lo que el nivel de deformación asociado al mismo es sumamente severo. La zona de la raíz es la más crítica en este tipo de soldaduras, siendo el diseño de la herramienta el aspecto clave, debido a que se requiere de una longitud adecuada de pin a fin de generar el flujo plástico suficiente para producir una soldadura libre de defectos en dicha zona.

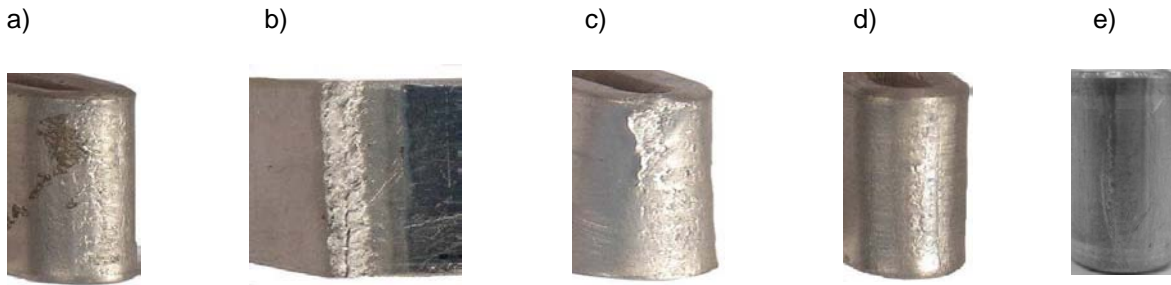


Figura 11. Detalle de los plegados de raíz de probetas soldadas: a) 1Cu-T; b) 2Cu-T; c) 3Cu-T; d) 4Cu-T y e) 1Co-T.

En este sentido, un pin demasiado largo, impide el flujo de material plastificado por debajo de la herramienta generando un exceso de calor en la base, cuestión que lleva como consecuencia la adherencia de la probeta a la placa de apoyo y por consiguiente la aparición de defectos en la raíz de la junta. Estos aspectos se ponen de manifiesto en el plegado de raíz de la unión. Para el caso, podemos observar la probeta 2Cu-T que presentó un ángulo de plegado muy bajo a causa de la presencia de los defectos antes mencionados. En cambio, la probeta 3Cu-T logró plegarse a 180° mostrando defectos leves, mientras que las probetas 1Cu-T, 4Cu-T y 1Co-T, siendo que también fueron plegadas a 180°, no denotaron defecto alguno.

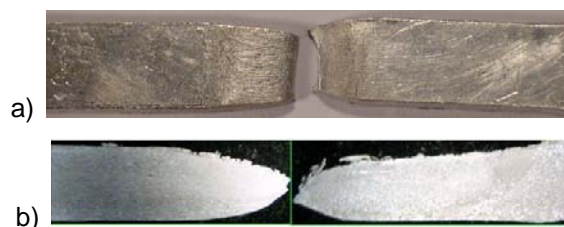
### 3.3.2 Tracción

En la Tabla 8 se plasmaron los resultados de los ensayos de tracción de las probetas soldadas con juntas a tope (Cu-T / Co-T).

Tabla 8. Resultados del ensayo de tracción de las probetas Cu-T y Co-T.

Parámetro \ Identificación	1Cu-T	2Cu-T	3Cu-T	4Cu-T	1Co-T	MB
$\sigma_{\max}$ [MPa]	76	80	78	75	95	100
$\epsilon_{\text{rot}}$ [%]	11,1	9,8	9,5	11,2	11,5	10

La resistencia a la tracción de las uniones soldadas se encuentra entre un 75 y 95% de la correspondiente al metal base. Estos resultados son muy satisfactorios dado que habitualmente los rendimientos de junta obtenidos para este tipo de material, para el caso de haber sido soldada por medio de otros procesos, suelen ser menores. A su vez, no se presentaron variaciones significativas entre las distintas probetas. El mejor comportamiento se obtuvo para la probeta 1Co-T. En cuanto a la ductilidad de la unión, se obtuvieron valores superiores a los registrados por el material base. En general, las probetas con mayor alargamiento son aquellas que presentaron una resistencia a la tracción levemente menor y esto en correspondencia con las macrografías que mostraron una sección del WN más cercana a la semielíptica que a la del tipo V con un menor nivel de óxidos alineados en la zona de la raíz. Sin embargo, la probeta 1Co-T presentó el mayor alargamiento a rotura, junto con la mayor resistencia. Esto estaría asociado principalmente al buen conformado de la raíz y a la ausencia de defectos en dicha zona. Estas observaciones son consistentes con lo recabado en el ensayo de plegado, donde las probetas que esgrimieron un mejor comportamiento se vincularon también con las de mayor alargamiento (1Cu-T, 4Cu-T y 1Co-T). En la Figura 13 se ilustran imágenes de una probeta de tracción ensayada, donde a su vez se puede observar el sitio donde se produjo la rotura.



**Figura 13.** Probeta de tracción de la soldadura 4Cu-T: a) aspecto superficial; b) macrografía de corte longitudinal.

Nótese en la Figura 13b, que la fractura se produce en la zona del WN. Esto es consistente con lo determinado por las pruebas de microdureza. Debe tenerse en cuenta que en dicha zona, el espesor resistente es en general levemente menor que el espesor del material base, por lo tanto y en conjunción con la disminución de la dureza, este sector se constituye en la zona preferencial para la ocurrencia de la fractura.

#### 4. CONCLUSIONES

- La geometría de la herramienta tiene influencia directa sobre el aporte de calor a la confección del cordón de soldadura. Ambas geometrías analizadas presentaron resultados satisfactorios. Sin embargo, comparativamente la herramienta con pin cuadrado mostró un mejor desempeño.
- La longitud del pin está íntimamente ligada al espesor del material que se va a soldar, presentando un valor crítico por encima o debajo del cual se generan defectos o uniones de baja calidad. En este caso 0,2 mm menor al espesor del material fue la que mejor respuesta brindó.
- La geometría de herramienta con pin cuadrado desarrolló un mayor flujo de material, resultando en cordones con más volumen de material plastificado.
- El índice de velocidades ( $v$ ) en conjunción con la fuerza axial ( $F_a$ ), resultaron ser buenos indicadores del calor aportado al cordón de soldadura.
- Los mejores resultados se obtuvieron para índices de velocidad entre 4,66 y 9,32 rev./mm con fuerzas axiales entre 1,5 y 2,2 kN, para ambos tipos de herramienta.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, and C.J. Dawes, *International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8*, 1991.
- [2] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, *“Friction Stir Welding and Processing”*, ASM Int., 2007.
- [3] G. Fernández, A. Burgos y H. G. Svoboda, *“Adaptación de una máquina herramienta para soldadura por friction stir welding (FSW) de aluminio”*, IX Congreso Internacional SAM/CONAMET, 2009.
- [4] H. Idagawa, A. Ramirez, *“Adaptação de uma máquina de fresar para realização de soldagem por atrito com pino (Friction Stir Welding –FSW)”*, XXXII CONSOLDA, 2006.
- [5] F. Franco, H. Sanchez, D. Betancourt y O. Murilo, *“Soldadura por Fricción-Agitación de aleaciones ligeras – Una alternativa a nuestro alcance”*, Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 2009, S1 (3), 1369-1375.
- [6] ASTM E8M, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*, 2008
- [7] K. Elangovana, V. Balasubramanian, *“Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy”*, Journal of Materials Processing Technology 200, 2008, 163–175.