

## STUDY OF THE FACTIBILITY OF FRICTION STIR WELDING APPLIED TO THE FABRICATION OF MONOLITHIC FUEL ELEMENTS

Cabot P. \*, Moglioni A. \*, Mirandou M\*\*, Balart S.\*\*

\*: ENDE, CAC, CNEA

\*\* : UAM, CAC, CNEA

[cabot@cnea.gov.ar](mailto:cabot@cnea.gov.ar), [moglioni@cnea.gov.ar](mailto:moglioni@cnea.gov.ar), [mirandou@cnea.gov.ar](mailto:mirandou@cnea.gov.ar),  
[balart@cnea.gov.ar](mailto:balart@cnea.gov.ar),

### ABSTRACT

The monolithic U-Mo fuel elements consist in a foil of a U-Mo alloy encased in Al. One of the technics that is being tried to apply in their fabrication is Friction Stir Welding in the “no contact at the interface” mode. The Laboratory of Welding at ENDE-CAC-CNEA (Argentina) has a great experience in the conventional form of this technic so has started to work on this new application. This work describe the experiments performed to obtain the operative parameters. In the first experiments AA6061 T6 (Al) plates and sheats of AISI 316 (SS) were used to obtain the optimum operative parameters of the process. Weldings were performed and evaluated for different operative variables such speed, angle and diameter of the tool and tool-interfase gap keeping the rotation speed constant. Tensile test, pressure leak-proof test, bending test, non-destructive test and metallography were used to characterize the weldings. Finally, SS and U-Mo foils were encase using the parameters selected from the first experiments.

The samples prepared with U-Mo alloy will be used as diffusion couples and in the studies of interdiffusion under irradiation.

# ESTUDIO PARA LA APLICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW) A LA FABRICACIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES MONOLÍTICOS.

Cabot P.\*, Moglioni A.\*, Mirandou M\*\*, Balart S.\*\*

\*: ENDE, CAC, CNEA

\*\* : UAM, CAC, CNEA

[cabot@cnea.gov.ar](mailto:cabot@cnea.gov.ar), [moglioni@cnea.gov.ar](mailto:moglioni@cnea.gov.ar), [mirandou@cnea.gov.ar](mailto:mirandou@cnea.gov.ar),  
[balart@cnea.gov.ar](mailto:balart@cnea.gov.ar),

## 1. RESUMEN

La fabricación de elementos combustibles monolíticos U-Mo implica el encapsulado de una lámina de U-Mo en una matriz de Al. Se está estudiando la aplicación del proceso friction stir welding (FSW) para la obtención de estos elementos combustibles. El laboratorio de Soldadura del ENDE-CAC-CNEA tiene una amplia experiencia en el proceso indicado y se encuentra trabajando en el tema. Este trabajo describe las experiencias realizadas para determinar parámetros operativos óptimos. Como materiales de experimentación se emplearon láminas de AA6061 T6 (Al) y, en reemplazo de U-Mo, láminas de acero inoxidable AISI 316 (SS). En ese sentido se realizaron y evaluaron soldaduras a solape y de áreas Al-Al y Al-SS modificando, para una misma velocidad de giro, las siguientes variables operativas: velocidad de avance, ángulo y diámetro de la herramienta y distancia herramienta-interfase.

Se muestran los resultados de caracterización de las soldaduras obtenidas, exámenes metalográficos, ensayos mecánicos de tracción y hermeticidad. Se discuten los ensayos no destructivos por ultrasonido y corrientes inducidas. Finalmente se realizaron encapsulados Al/U-Mo aplicando los parámetros seleccionados. Estos encapsulados serán usados como pares de difusión, y permitirán comenzar con los estudios de interdifusión bajo irradiación.

## 2. INTRODUCCION

La conversión a U levemente enriquecido de los reactores de investigación y producción de radioisótopos de alto flujo, exige mayor contenido de U que el disponible en los elementos combustibles (EC) actuales. Las aleaciones de U-Mo en fase gamma brindarían esta posibilidad [1]. Se han desarrollado con este material, EC dispersos que están en la etapa de calificación. Dos inconvenientes se presentan en la actualidad: a) los últimos ensayos de irradiación, mostraron una importante interacción con la matriz de Al y la generación de una porosidad que produce un comportamiento inaceptable. b) la densidad de U permitida por la fabricación de EC dispersos de U-Mo, no es suficiente para el empleo de éstos en los reactores de alto flujo [2,3].

Se ha propuesto el reemplazo de las partículas dispersas de U-Mo, por una lámina de esta aleación, denominado elemento combustible monolítico (ECM). Esto contribuiría favorablemente a la resolución de los problemas mencionados en el párrafo anterior

[4,5]. El programa RERTR (ANL USA) ha comenzado ensayos de irradiación de miniplacas prototipo.

Un importante problema técnico es que la laminación en caliente usada en la fabricación de los EC dispersos, no es aplicable para envainar la lámina de aleación. Entre otros procesos ensayados el de soldadura por fricción-agitación (FSW), en su variante sin contacto, es promisorio. El laboratorio de Soldadura del ENDE CAC CNEA tiene una amplia experiencia en este proceso y ha iniciado este estudio para su aplicación [6].

El FSW convencional, a tope, se basa esencialmente en la utilización de una herramienta cilíndrica de un perfil especial, la cual se inserta entre las superficies de encuentro de las piezas a unir con una cierta velocidad de rotación y bajo una fuerza determinada. El avance de la herramienta a lo largo de la junta produce la dispersión de los óxidos, la plastificación localizada del material y la soldadura, Fig. 1a.

En su forma no convencional el FSW permite la soldadura de láminas superpuestas (solape) sin contacto de la herramienta con la interfase. De esta forma la herramienta va insertada sólo en la lámina superior con su extremo ligeramente por arriba de la interfase, Fig.1b. Esta característica de unir sin producir alteraciones a nivel de interfase, convierten al FSW en un método potencialmente adecuado para fabricar elementos combustibles monolíticos, los cuales no admiten mezcla entre U-Mo y la vaina de Al. Las principales características del proceso son: soldadura en fase sólida, no requerimiento de protección gaseosa ni material de aporte, proceso mecanizado.

Este trabajo describe las experiencias realizadas para determinar parámetros operativos óptimos. Como materiales de experimentación se emplearon láminas de AA6061 T6 (Al) y, en reemplazo de U-Mo, láminas de acero inoxidable AISI 316 (SS). Se presentan los resultados obtenidos en soldaduras a solape y de áreas Al-Al y Al-SS modificando variables operativas.

Se muestran los resultados de caracterización de las soldaduras obtenidas, exámenes metalográficos y ensayos mecánicos de tracción, plegado y hermeticidad. Se discute la factibilidad de la aplicación de los ensayos no destructivos por ultrasonido y corrientes inducidas en la caracterización de las soldaduras. Finalmente se realizaron encapsulados Al-Al y Al/U-Mo aplicando los parámetros seleccionados.

### 3- TRABAJO EXPERIMENTAL

#### 3.1-Soldaduras a solape (lineal).

Se efectuaron un conjunto de soldaduras a solape modificando las variables operativas: velocidad de avance ( $v$ ), ángulo ( $\alpha$ ) y diámetro de hombro ( $D$ ) de la herramienta, diámetro de pin ( $d$ ), distancia herramienta-interfase ( $h$ ) y velocidad de giro ( $\Omega$ ), para obtener los parámetros operativos óptimos. Las soldaduras incluyeron:

- **Al-Al:** soldaduras de una pasada entre láminas de Al de 2.0 mm de espesor con las siguientes variables de proceso

#### Constantes

Vel. de giro  $\Omega$  : 1380 r.p.m  
Angulo  $\alpha$  : 1,5°  
Diámetro hombro  $D$ : 19 mm  
Espesor chapas Al: 2mm  
Distancia pin-interfase  $h$ : 0,10 mm

#### Variables

Vel. de avance  $V$ : 9 y 12 cm./min.

Diámetro de pin d: 6 mm  
Limpieza: Cepillado mecánico

- **Al-SS:** soldadura entre láminas de Al de 2.5 mm y SS de 0.5 mm de espesor con las siguientes variables de proceso:

#### Constantes

Vel. de giro  $\Omega$  : 1380 r.p.m  
Espesor chapas: Al: 2mm- SS:0,5mm  
Limpieza: Cepillado mecánico  
Diámetro de pin d: 6 mm

#### Variables

Vel. de avance V: 9 y 12 cm./min.  
Angulo  $\alpha$ :  $0^\circ$ ,  $0,5^\circ$  y  $1,5^\circ$   
Diámetro hombro D: 19 y 24 mm  
Distancia pin-interfase h: 0,15 , 0,10 y 0,05 mm

De estas soldaduras se extrajeron probetas normalizadas para ensayos de tracción y plegado, probetas para ensayos de despegue, para exámenes metalográficos y ensayos no destructivos.

Especialmente, y a fin de estudiar la capacidad de sellado de las uniones **Al-Al** se prepararon probetas para ensayos de presión-hermeticidad (pillow test) con tamaños de cámara soldada de 150 mm x 100 mm y 100 mm x 100 mm.

### 3.2. Soldaduras de encapsulados.

Se prepararon cinco conjuntos compuestos por dos chapas de Al y una lámina de SS. En una de las chapas de Al de cada conjunto se mecanizó una cavidad para alojar la lámina de SS. El conjunto fue ensamblado, Fig.2, y soldado en una cara mediante pasadas sucesivas con un solapado de un milímetro; se invierte el conjunto, se mecaniza y se repite la operación para conformar el encapsulado.

Las soldaduras se ejecutaron empleando los parámetros óptimos obtenidos y comprendieron seis pasadas sobre cada cara, Fig.3.

Los encapsulados obtenidos se seccionaron en dirección transversal a la de soldadura y las probetas resultantes fueron examinadas metalográficamente, Fig. 4.

Dos encapsulados adicionales se prepararon para evaluar la sensibilidad del ensayo ultrasónico a la detección de despegue. Con ese objeto en uno de ellos se introdujeron despegues artificiales suprimiendo de ex profeso una pasada intermedia sobre una de las caras.

Se fabricaron dos encapsulados de láminas de la aleación U-7%wtMo. Las láminas eran 11,5 mm de largo x 5,5 mm de ancho x 0,93 mm de espesor con ángulos redondeados. Uno de ellos se usó para la caracterización metalográfica y el otro está siendo sometido a recocidos de difusión a 300 °C.

## 4- RESULTADOS

### 4.1. Soldaduras a solape.

Los exámenes metalográficos de secciones transversales a la dirección de soldadura de probetas **Al-Al** y **Al-SS**, muestran uniones libres de defectos y despegues. La

macrografía de la Fig. 5 corresponde a una soldadura Al-SS atacada químicamente, ésta revela una interfase definida, y tres zonas típicas del proceso en el aluminio: agitación (1), termomecánicamente afectada (2), y térmicamente afectada (3).

La Fig. 6 corresponde a una ) Se observa una estructura continua de granos finos y equiaxiales de aproximadamente  $10\ \mu\text{m}$ , lo que indica que la recristalización atraviesa la interfase.

En todos los ensayos de tracción, las probetas *Al-Al* rompieron en la zona afectada térmicamente (ZAC), mientras que las probetas *Al-SS* fallaron en la soldadura. Esta diferencia en el comportamiento de las juntas, se atribuye a los distintos mecanismos de unión a nivel de interfase. En uniones Al-Al se produce una dispersión de óxidos y recristalización, mientras que en Al-SS existe la dispersión de óxidos pero no se observa ningún tipo de interpenetración, distorsión de granos, formación de nuevas fases, ni recristalización del SS.

Los resultados de resistencia a la tracción obtenidos en estos ensayos vs. velocidad de avance, ángulo de inclinación y diámetro de la herramienta, se presentan en los gráficos de las figuras 7, 8 y 9. Cada punto corresponde a un promedio de seis ensayos. De éstos se deducen los parámetros óptimos de proceso en relación con la mayor resistencia mecánica de junta resultando:  $h = 0.10\ \text{mm}$ ,  $V = 9\ \text{cm/min.}$ ,  $\alpha = 0,5^\circ$  y  $D = 24\ \text{mm}$ .

El gráfico 1 de la figura 7 muestra que en la soldadura *Al-Al* el cambio de velocidad de avance prácticamente no influye en la resistencia de la unión soldada, resultando en todos los casos una eficiencia de junta del orden del 60 %. El ligero aumento de resistencia (10%) con el aumento de velocidad está asociado al menor aporte térmico sobre la ZAC (zona 3 Fig. 5), mientras que en las soldaduras *Al-SS*, contrariamente al caso anterior, se observa una pérdida de resistencia del 25 % con el aumento de velocidad. Dicha pérdida corresponde a un menor calor aportado en la interfase, que afecta la adhesión. Velocidades de 12 cm./min producen soldaduras de resistencia errática.

El gráfico 2 en la figura 8, indica como influye la variación del ángulo de inclinación de la herramienta ( $\alpha$ ) en la resistencia a la tracción de junta, para distintos valores de distancia pin-interfase ( $h$ ). Para  $h$  óptimo, el efecto de un cambio en  $\alpha$  es despreciable, pero para valores de  $h = 0.05\ \text{mm}$  y  $h = 0.15\ \text{mm}$ , el aumento de  $\alpha$  va acompañado con una disminución de resistencia. De acuerdo a estos resultados el uso de  $\alpha = 0.5^\circ$  es ventajoso, pero va en detrimento de la calidad superficial (rugosidad) de la soldadura, por lo cual el empleo de un  $\alpha$  pequeño debe ser compensado con un biselado del borde exterior del hombro de la herramienta.

La resistencia a la tracción de junta versus diámetro de hombro está representada en el gráfico 3 de la figura 9. El mismo indica que la resistencia aumenta con el diámetro. Un aumento del diámetro del hombro genera más calor de fricción y prolonga el ciclo térmico, lo cual posiblemente favorezca los mecanismos de unión, la adhesión y la coalescencia de la soldadura.

En los ensayos de despegue, Fig. 10, las probetas *Al-Al* rompieron fuera de soldadura, mientras que las de *Al-SS* rompieron en la interfase soldada.

El ensayo de plegado longitudinal realizado con un punzón de 27 mm de diámetro en las uniones *Al-Al* no evidenció ningún tipo de falla, Fig. 11, mientras que las uniones *Al-SS* fallaron en la zona de mayor deformación.

En los ensayos de presión-hermeticidad, las muestras soportaron hasta  $130\ \text{Kg/cm}^2$  de presión sin evidenciar pérdidas. Esto resulta equivalente a una carga por unidad de longitudinal de  $30\ \text{Kg/mm}$ . Este valor de carga es inferior a los  $38\ \text{Kg/mm}$  obtenido en tracción, lo cual es entendible si se considera que en este último caso la soldadura es sometida a un esfuerzo combinado de tracción y despegue, Fig. 12.

## **4.2. Soldaduras de encapsulados**

La micrografía de la Fig. 13 corresponde a una sección de un encapsulado. El ataque electrofítico del SS muestra ambas interfases Al-SS sin defectos y permite distinguir la microestructura original del SS sin ningún tipo de deformación adicional introducida por el proceso de soldadura.

La micrografía de la Fig. 14 muestra un detalle de una de las interfases Al-SS. Se observa definida, libre de defectos y despegues, coincidente con una área de soldadura en la que la distancia pin-interfase fue tal que la herramienta no tocó el SS. En la Fig. 15 se observa una zona defectuosa de la soldadura Al-SS producida por el contacto del extremo del pin con el SS que produjo un desprendimiento de este último hacia la matriz de Al. Además se puede apreciar una severa deformación de la estructura de granos del SS.

Una despegue, que constituye otro tipo de falla en una de las interfases entre Al-SS se observa en la Fig.16.

El ensayo ultrasónico por inmersión mediante un barrido C permitió detectar despegues de origen artificial, pero no pequeños despegues observados metalográficamente.

La micrografía de la Fig. 17 muestra una imagen SEM de una sección transversal del encapsulado de U-Mo/Al. Se observa una interfase sana y sin daños en el U-Mo ocasionados por la herramienta durante el proceso de soldadura.

## **5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.**

El FSW no convencional permite la soldadura lineal y de áreas de aleaciones de aluminio entre sí y con otras aleaciones, entre ellas SS y U-Mo. Con un control adecuado de sus variables es posible encapsular laminas de SS o U-Mo en una matriz de Al. Por tal motivo el proceso se considera potencialmente apto para la fabricación de elementos combustibles monolíticos.

De todas las variables estudiadas, la distancia pin-interfase resulta ser la que más influye sobre la resistencia mecánica de la junta y la de más difícil control, esto último se debe a que la misma depende de muchos factores: precisión del equipo, dilatación térmica del sistema, tolerancias dimensionales de las chapas, y precisión del mecanizado previo a la soldadura de la segunda cara. Todo lo anterior se magnifica cuando no se cuenta con un equipo adecuadamente instrumentado.

El control de calidad post-soldadura por ultrasonido para verificar la ausencia de despegues y contactos del pin con la interfase, en encapsulados, demostraron no poseer la sensibilidad necesaria para detectar ese tipo de defectos. Los ensayos preliminares para la aplicación de otros métodos, como corrientes inducidas y termografía dinámica, no dieron aún resultados satisfactorios.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a Ricardo Montero por el apoyo en el trabajo de metalografía y a Sara Novas y Adriana Domínguez por las sesiones en el SEM.

También deseamos mencionar a Suelen Barg y Temu Matila por su aporte a este trabajo y Alejandro García por los ensayos de ultrasonido.

## Referencias

- [1] M. K. Meyer, G.L Hofman, S.L. Hayes, C.R. Clark, T. C. Wienckw, J.L. Snelgrove, R. V. Starin, K.H. Kim, “Low temperatures irradiation behavior of Uranium-Molybdenum Alloy Dispersion fuel”. J. Nucl.Mat.,304, (2002), 221-236.
- [2]A. Leenaers, S. Van den Berghe, E. Koonen, C. Jalousse, F. Huet,, M. Trotabas , M. Boyard, S. Guillot, L Sannen , M. Verwerft, “Post-irradiation examination of Uranium-7wt%Molybdenum Atomized dispersion fuel”. J.Nucl. Mater.335 (2004) 39-47.
- [3] G.L Hofman, Y.S. Kim, M.R. Finlay, J.L. Snelgrove, S.L. Hayes, M. K. Meyer, C.R. Clark and F. Huet. “Recent observations the postirradiation examination of low-enriched U-Mo miniplates irradiated to high burnup”. 8<sup>th</sup> International Topical Meeting Research Reactor Fuel Management (RRFM), Munich, Germany, March 21-24, 2004.
- [4] C.R. Clark, G.C.Knighton, M.K.Meyer, G.L.Hofman. “Monolithic Fuel Plate Development at Argonne nacional Laboratory”. International Meeting on Reduced Enrichment for Research ans Test Reactors, Chicago, USA, 6-10 Octubre 2003.
- [5] C.R. Clark, S.L. Hayes, M.K. Meyer, G.L.Hofman and J.L. Snelgrove. “Update on U-Mo Monolithic and Dispersion Fuel Development”. 8<sup>th</sup> International Topical Meeting Research Reactor Fuel Management (RRFM), Munich, Germany, March 21-24, 2004.
- [6] P.Cabot, A. Moglioni. E. Carella. “Soldadura por Friccion Agitación (FSW) de AA 6061T6”. CONAMET/SAM Santiago, Chile, Noviembre 2002.
- [7] S. Barg. “Desarrollo del proceso FSW para la fabricación de elementos combustibles monolíticos” Informe de actividad de la estadía de intercambio UFSC (Brasil)-UNSAM-CNEA (Argentina), Septiembre de 2004

**Anexo: Figuras**

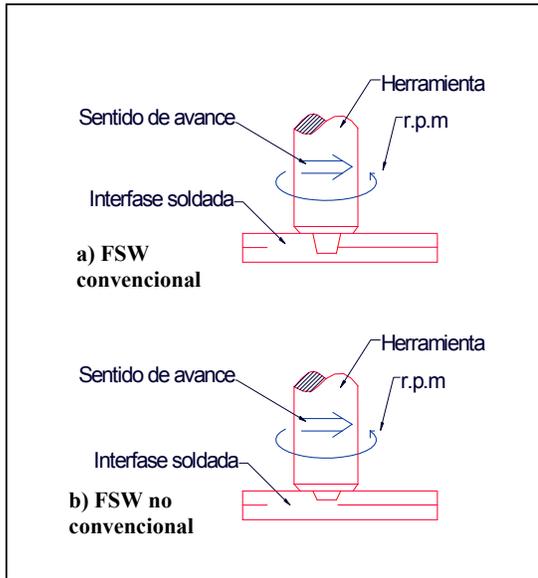


Fig.1. Esquema de los procesos de soldadura.

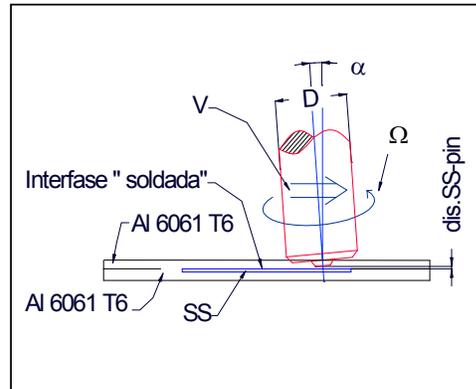


Fig.2. Esquema del encapsulado.



Fig.3. Equipo de soldadura.

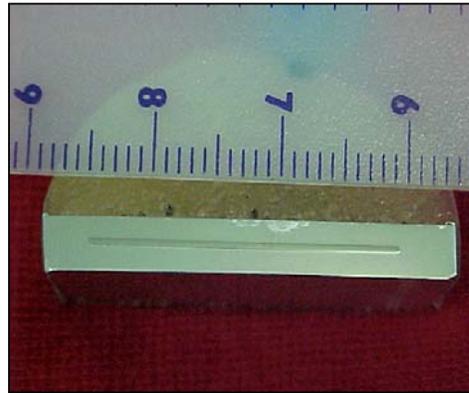


Fig.4. Corte transversal de un encapsulado.

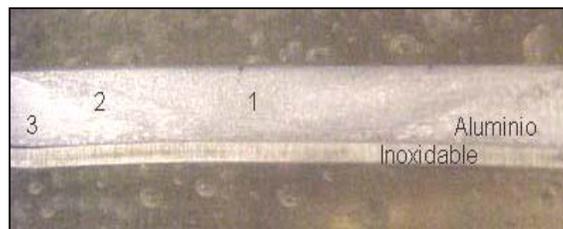


Fig. 5. Macrografía de una sección transversal a la dirección de soldadura de una probeta Al-SS atacada químicamente. [6]

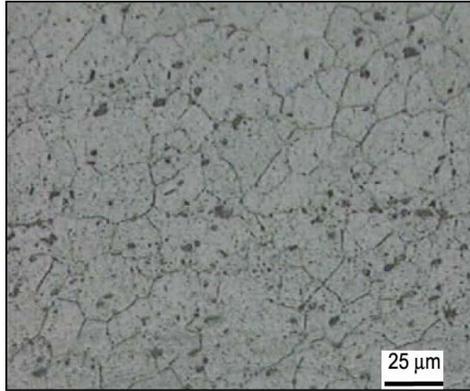


Fig. 6. Micrografía de la unión Al-Al pulido hasta paño de 1  $\mu$  y con ataque químico [7].

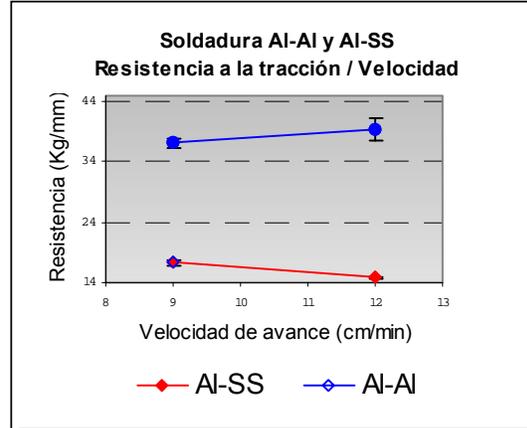


Fig. 7 Soldadura Al-Al y Al-SS. Resistencia a la tracción vs Velocidad. Constantes:  $\Omega=1380$  r.p.m.,  $D = 19$  mm,  $d = 6$  mm,  $h = 0.10$ mm,  $\alpha = 1.5^\circ$

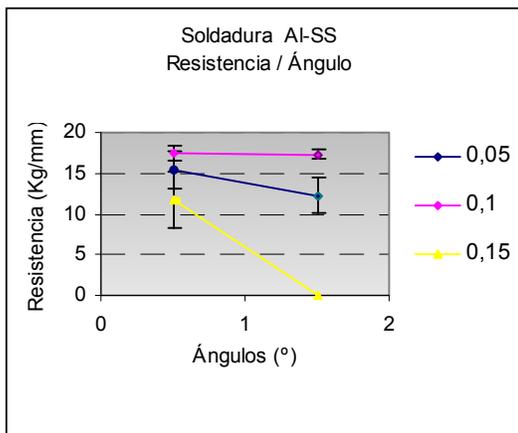


Fig. 8. Soldadura Al-SS. Resistencia vs Ángulo de inclinación para  $h = 0,05$ ,  $0,10$  y  $0,15$ . Constantes:  $\Omega=1380$  r.p.m.,  $D = 19$  mm,  $d = 6$  mm,  $V = 9$  cm/min

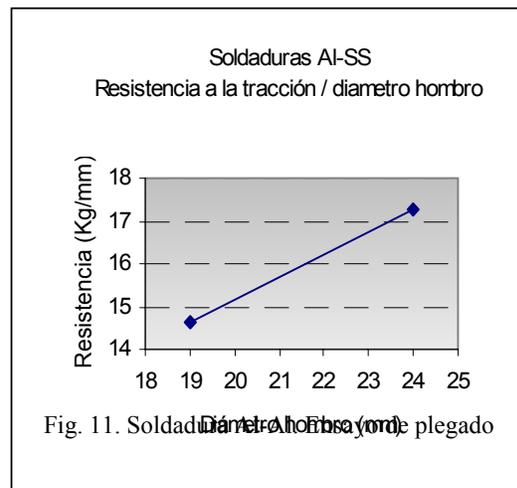


Fig. 9. Soldadura Al-SS. Resistencia vs diámetro del hombro. Constantes:  $\Omega=1380$  r.p.m.,  $d = 6$  mm,  $\alpha = 0,5^\circ$ ,  $h = 0,05$  y  $V = 9$  cm/min

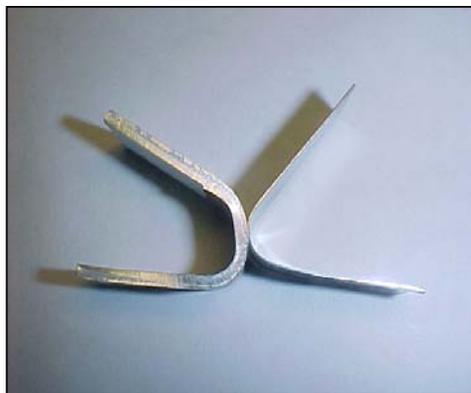


Fig. 10. Soldadura Al-SS. Ensayo de despegue



Fig. 11. Soldadura Al-Al. Ensayo de plegado



Fig. 12. Probetas de Al-Al para ensayo de inflado.

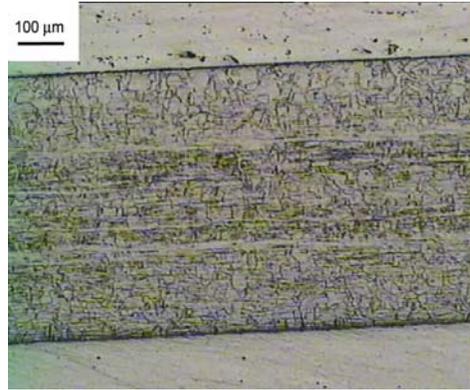


Fig. 13. Sección de un encapsulado. Microestructura del SS revelada por ataque electrolítico.



Fig. 14. Detalle de una de las interfaces Al-SS de un encapsulado pulido a paño con pasta de 1 μm.



Fig. 15. Zona defectuosa de la soldadura Al-SS producida por el contacto del extremo del pin con el SS.

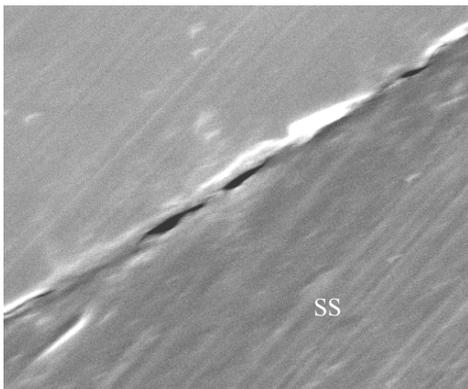


Fig. 16. Detalle de encapsulado. Despegue entre la interfase Al-SS. 2400X

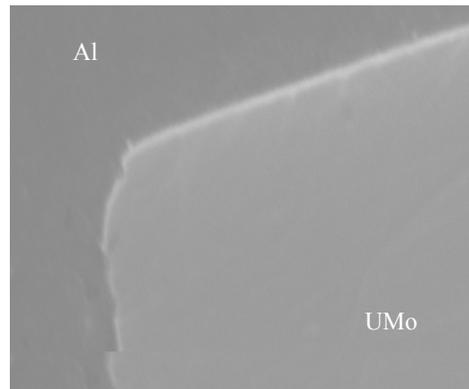


Fig. 17. Imagen de SEM de un ángulo del encapsulado de U-Mo/Al. 750X