REVISTA DE METALURGIA, 43 (2)
MARZO-ABRIL, 111-116, 2007
ISSN: 0034-8570

Comportamiento a fatiga de uniones soldadas GMAW de la aleación de aluminio AA 7020*

C.A. Bloem**, M. D. Salvador***, V. Amigó*** y A. Vicente***

Resumen El objetivo de la presente investigación es evaluar la influencia del acabado del sobrecordón en la respuesta a fatiga de las uniones soldadas realizadas sobre una aleación Al-ZnMg AA7020. Se determinó que la eliminación total o parcial del sobrecordón ejerce poca influencia en su comportamiento, obteniéndose en ambos casos una respuesta similar, donde la mejora de uno respecto del otro no es superior al 3%.

Palabras clave Aleaciones de aluminio. Soldadura MIG. Fatiga.

Fatigue behavior of GMAW welded Aluminium alloy AA7020

Abstract The aim of this investigation is to evaluate the influence on the fatigue behavior by the finishing of the bulge in a welded aluminium-zinc-magnesium alloy AA7020. It was determined that total or partial elimination of the bulge has very little influence on its behavior, giving a very similar result on both cases, where one is better than the other by only 3%.

Keywords Aluminium alloys. MIG welding. Fatigue.

1. INTRODUCCIÓN

El aluminio se está empleando, cada día, con mayor profusión, hecho que no escapa a las grandes estructuras, construcciones que, de una manera u otra, requieren de métodos de ensamble o sujeción. Dentro de estos procedimientos, es quizá la soldadura el procedimiento de unión que se emplea con más frecuencia y la razón de ello se fundamenta en que es el método de unión más fiable, seguro, económico y de fácil ejecución. Dentro de los diferentes métodos de soldadura, es, sin duda, el procedimiento de soldadura por arco con protección gaseosa y electrodo consumible, GMAW (MIG), el más utilizado por su versatilidad, seguridad, facilidad, excelente calidad, bajo coste y la ventaja de la ausencia de fundentes y/o protectores sólidos que, a la larga, pueden perjudicar la calidad de la unión soldada[1].

Es bien conocido que las aleaciones de aluminio envejecibles deben su buen comportamiento a la calidad y nivel de precipitados dentro de la matriz[2-5], razón por la que, fundamentalmente, las uniones soldadas de estos aluminios pierden gran parte de sus propiedades mecánicas[1, 2 y 6-8]. La evolución microestructural a lo largo de la ZAC ha sido suficientemente descrita en estas aleaciones, tanto bajo condiciones de laboratorio[9] como en su aplicación industrial[10].

Diversos son los estudios del efecto que produce el acabado superficial de la unión soldada en el comportamiento mecánico[11-13]. No obstante, estas inves-

* Trabajo recibido el día 3 de octubre de 2005 y aceptado en su forma final el día 22 de enero de 2007.
** Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Departamento de Tecnología y Diseño, Mérida, Edo. Mérida, Venezuela. Fax 00-58-74-402806 e-mail cbloem@ula.ve
*** Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, ETSII, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera S/N. 46022 Valencia, España.

tigaciones se han realizado en su mayoría bajo condiciones de laboratorio y no relacionadas a variables de uso industrial.

Es sabido que el acabado superficial juega un papel decisivo en el comportamiento mecánico, no obstante, los estudios realizados se han basado en emplear la soldadura tal cual, comparándola con un acabado de pulido espejo[14]. En otros casos, se ha evaluado el empleo del granallado como un medio para incrementar la resistencia y la vida de las uniones soldadas [12, 15 y 16], sin embargo, en el uso industrial la soldadura, o se deja tal cual o, en el mejor de los casos, se desbasta mediante el empleo de un esmeril.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

Para la elaboración de las probetas a ensayar se empleó una aleación de la familia Al-Zn-Mg, la AA7020, suministrada por ALUMAFEL en láminas de 5 mm de espesor, en estado T6, cuya composición se recoge en la tabla I. El metal de aporte utilizado (véase la tabla I) corresponde a una aleación AA 5356, en forma de alambre, con un diámetro de 1,2 mm.

Finalmente, como gas de protección se utilizó una mezcla de argón y helio en una relación 3/1 y con un caudal de 12 l/min.

2.2. Proceso de soldadura

Con la finalidad de evaluar el efecto que produce el acabado superficial sobre la calidad de la unión soldada, se soldaron cuatro placas, dos para cada variable. Las dimensiones de las placas antes del soldeo eran 350x150x5 mm, fueron extraídas de una misma plancha y se soldaron en la dirección perpendicular a la dirección de laminación, a lo largo de la longitud de 350 mm.

Las placas se ajustaron a un par de caballetes con la finalidad de mantener la distancia y el paralelismo entre las mismas durante el proceso de soldadura.

Tabla I. Composición química del metal base y de aporte

Table I. Chemical composition of filler and parent metal

Aleación	Mg	Si	Cr	Mn	Zn
Base AA 7020	1,20	0,17	0,31	0,20	5,05
Aporte AA 5356	5,00		0,12	0,15	0,10

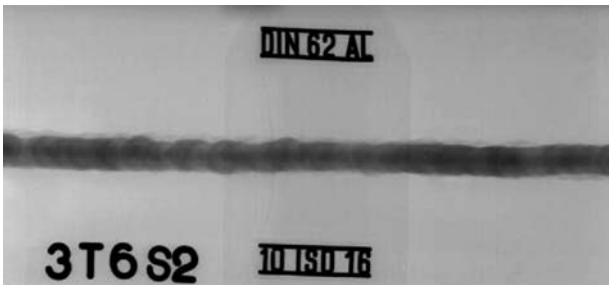

Figura 1. Radriografía de la unión soldada.

Figure 1. Welded union radiography.

La limpieza de las juntas a soldar se realizó mediante una suave pasada de un disco abrasivo, manteniendo en lo posible la morfología de la junta.

Las soldaduras se efectuaron en dos pasadas, realizándose entre la primera y segunda pasadas, una limpieza mecánica con disco abrasivo e inspección mediante líquidos penetrantes. Las condiciones de soldeo se recogen en la tabla II [10].

En un caso, el sobrecordón fue eliminado en su totalidad mediante muela abrasiva y, en el otro, sólo se alisó éste con el fin de suavizar los bordes de la unión soldada y de uniformizar el acabado superficial, es decir, la rugosidad en la zona soldada y en la ZAC, empleándose así, variables de uso industrial con la finalidad de obtener resultados mas cercanos a la realidad tecnológica.

La calidad de la soldadura se evaluó por inspección óptica, líquidos penetrantes antes y después de eliminar o retocar el sobrecordón y, por último, se radiografió, descartando aquellas probetas que presentasen defectos, tal como se aprecia en la figura 1 donde se muestra una de las radiografías realizadas.

2.3. Estudio metalográfico

Se prepararon probetas para microscopía óptica y electrónica de barrido, de la sección transversal del cordón y de la zona afectada por el calor (ZAC), con el fin de evaluar el tamaño, forma, morfología y demás características microestructurales del cordón y su intercara metal base-cordón. De igual manera, se realizaron

Tabla II. Condiciones de soldeo.

Table II. Welding conditions

Pasada	V (V)	I (A)	Vel. (mm/min)	EBA (kJ/cm)
Primera	21,0	140	525	5,6
Segunda			382	7,7

análisis cuantitativos por energías dispersivas de rayos X, mediante microsonda EDX de Oxford Instruments Ltd., en las inmediaciones de la intercara metal base cordón.

La microestructura de la unión y distribución de los precipitados se observó mediante un microscopio óptico Microphot FX de Nikon y un microscopio electrónico de barrido JSM6300 de JEOL. Finalmente, la evolución de los precipitados a lo largo del cordón de soldadura y la ZAC se ha estudiado en un microscopio electrónico de transmisión EM400 de Phillips, utilizando la técnica de campo claro.

2.4. Caracterización mecánica

Se realizaron ensayos de tracción de acuerdo con la norma ASTM E-8m, a una velocidad de solicitación de 5 mm/min, en una máquina universal de ensayos Instron 4204.

Los ensayos de fatiga a flexión a cuatro puntos se realizaron sobre una bancada de ensayos de fatiga diseñada para ese fin. La razón de emplear el ensayo de flexión a cuatro puntos se fundamentó en la posibilidad de ejercer, durante los ensayos, esfuerzos de tracción y compresión, homogéneamente distribuidos a lo largo de la ZAC, empleándose una relación de esfuerzos R=-0,1.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Aunque pudiera intuirse que el hecho de dejar parte del sobrecordón pudiera influir decisivamente en el comportamiento a fatiga, al disminuir sensiblemente la vida a fatiga por ser en sí un concentrador de esfuerzos, podría ser beneficioso en la respuesta estática de la unión soldada, por otorgar una mayor área efectiva en la zona de la junta y, por ello, la necesidad de analizar el efecto de su eliminación en el comportamiento estático y dinámico de la unión.

En la figura 2 se representan los resultados promedios obtenidos de los diferentes ensayos de tracción realizados. En ésta, se aprecia como el efecto de dejar el sobrecordón afecta decisivamente en el comportamiento estático de la unión, siendo éste el responsable directo de una mayor resistencia mecánica estática, pues, como se sabe, el material de aporte empleado en estas aleaciones de aluminio, posee una menor resistencia mecánica que el metal base.

Al dejar parte del sobrecordón en estas probetas, éste genera una mayor sección transversal efectiva y por tanto disminuye el esfuerzo real sobre esa región, siendo el sobrecordón, por tanto, el responsable de esta mejor respuesta estática.

Adicionalmente, se evaluó la microestructura de la zona del cordón notándose que, por efecto del pro-

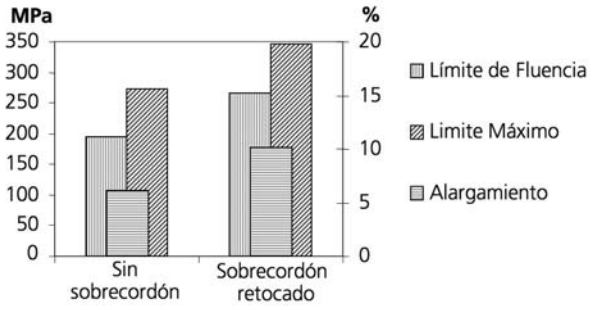

Figura 2. Respuesta mecánica estática.

Figure 2. Statical mechanical behavior.

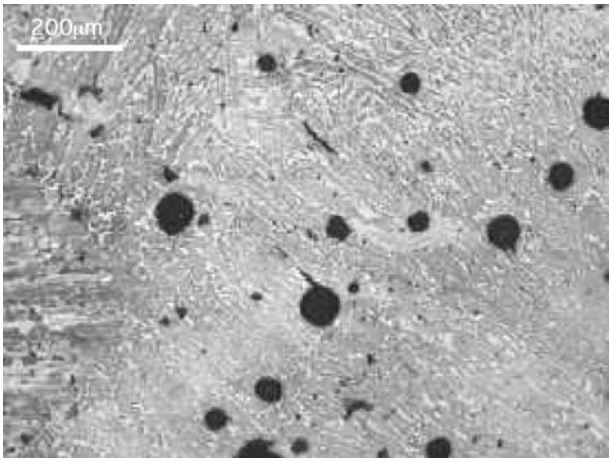

Figura 3. Fotografía de la intercara metal base cordón. Ataque Weck.

Figure 3. Interface parent metal weld. Weck etching.

pio proceso de soldeo, se presenta una serie de microporos en las inmediaciones del límite entre los dos cordones aplicados, así como en el centro de éstos, tal como se aprecia en la figura 3.

Del análisis de energías dispersivas de rayos X (EDX) en el centro del cordón, se aprecia una pequeña dilución de elementos aleantes desde el metal base hacia el cordón, como se describió con anterioridad[17], y donde se indica que esta dilución genera una nueva aleación Al-Zn-Mg mucho más pobre en zinc que la del metal base, pero con una pequeña contribución al endurecimiento del cordón.

La evolución microestructural a lo largo de la ZAC, como la describen Bloem *et al.*[10 y17] y Su *et al.*[18] presenta una heterogeneidad, tanto en el nivel como en la calidad de los precipitados. Pero, en todo caso, el mecanismo de endurecimiento sigue siendo el mismo y, por tanto, cualquier cambio en la respuesta mecánica entre estas uniones será respuesta de las variables del sobrecordón. En la figura 4 se aprecia es-

Figura 4. Micrografía de la ZAC 165000X.

Figure 4. HAZ Micrography 165000X.

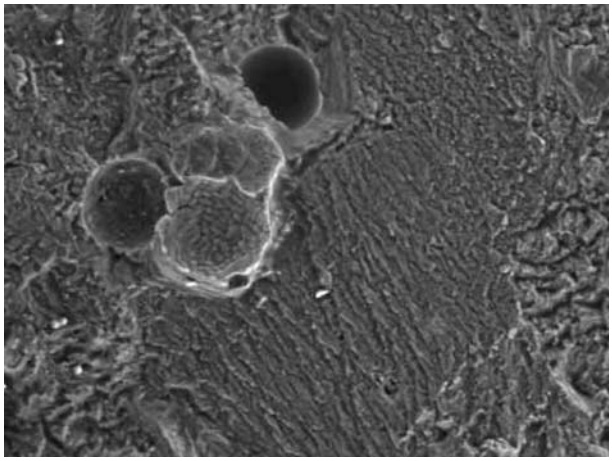

Figura 5. Fractografía de fatiga en la zona del cordón de soldadura.250X.

Figure 5. Welded zone Fatigue fractograpy. 250X.

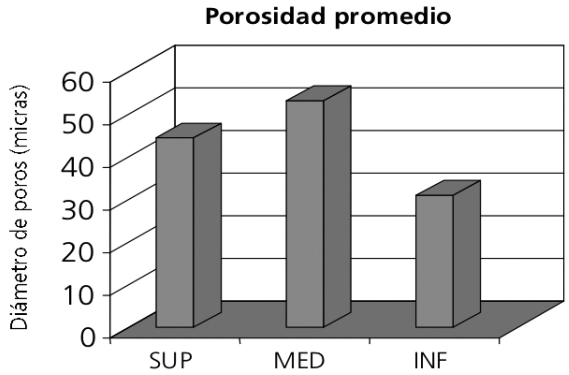

Figura 6. Histograma representando la distribución del diámetro promedio de los poros sobre tres zonas de la intercara, superior, centro e inferior.

Figure 6. Porosity diameter histogram showing the distribution of them on three zones of the interface, up, middle and down.

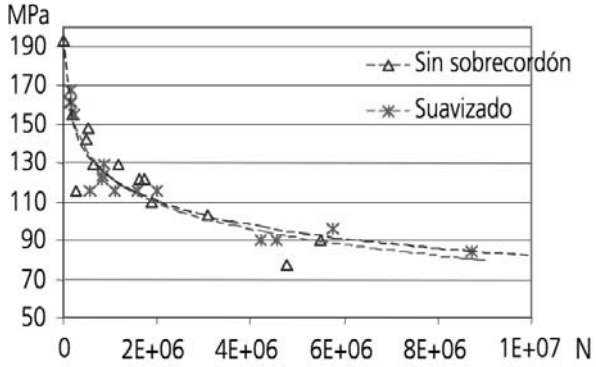

Figura 7. Curva S-N de las uniones soldadas con y sin sobrecordón.

Figure 7. Fatigue curve of bulge finished or removed welded unions.

te mecanismo de endurecimiento por anclado de las dislocaciones entre los precipitados.

Como se observa en las figuras 3 y 5, a pesar de que las juntas fueron radiografiadas, existe un volumen significativo de microporosidad que, eventualmente, junto a los concentradores de tensiones y la rugosidad superficial, puede repercutir en el comportamiento a fatiga de la unión. Esta porosidad, de naturaleza casi esférica, indica que se debe al desprendimiento de hidrógeno, producto de pequeñas cantidades de grasa o disolvente orgánico en la junta[17]. Sin embargo, el nivel de porosidad es similar en todos los casos, por lo que debería repercutir de igual manera en las dos condiciones. En la figura 5, se aprecia una superficie de fractura por fatiga, donde la fractura cambia de dirección y velocidad al encontrarse con uno de estos poros.

El diámetro promedio de los poros presentes en las diferentes uniones soldadas está comprendido entre los 30 y 50 µm, tal como se recoge en la figura 6. En ésta, puede apreciarse el nivel promedio de porosidad en tres zonas diferentes del cordón. Tal como se aprecia, es el centro del cordón el lugar donde se observa un mayor tamaño promedio de poros atribuible a la imposibilidad de escapar los gases. Estos resultados se corresponden con los obtenidos por Lefebvre *et al.*[19], quienes no sólo evalúan el tamaño sino que también evalúan la morfología de éstos. No obstante, esta porosidad es similar en las dos condiciones analizadas, por lo que cualquier cambio en la respuesta de la unión se deberá, fundamentalmente, a la morfología del sobrecordón.

El comportamiento a fatiga de ambas uniones soldadas sin sobrecordón o con un suavizado del mismo, puede observarse a través del registro de la curva S-N obtenida experimentalmente en esta investi-

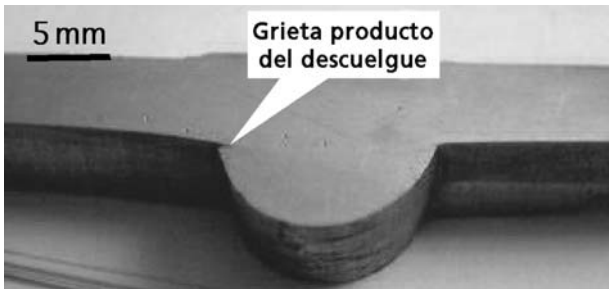

Figura 8. Fotografía donde se aprecia la grieta producto del descuelgue durante el soldeo.

Figure 8. Fotography of a crack produced by the bulge smearing.

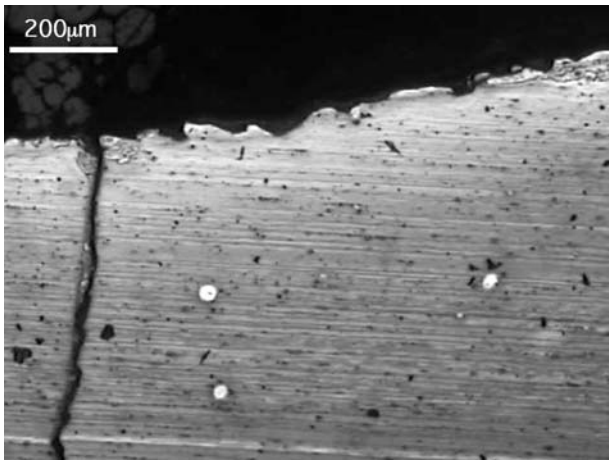

Figura 9. Micrografía que muestra una grieta presente en la ZAC en las cercanías de la intercara MB-Cordón. Ataque Triácida.

Figure 9. Micrography showing a crack in the HAZ near the interface parent metal- weld. Triacid etching.

gación. Se ha realizado un ajuste de los puntos obtenidos mediante mínimos cuadrados, obteniéndose las curvas que se representan en la figura 7 que, a diferencia de las presentadas por Pinho da Cruz[20], presentan un ajuste que se aproxima más al comportamiento general a fatiga, tanto de las aleaciones de aluminio como de las uniones soldadas de estas aleaciones.

Tal como se aprecia en la figura 7, la eliminación total o parcial del sobrecordón no representa un cambio significativo en la respuesta a fatiga de la unión soldada. No obstante, se aprecia como la junta sin sobrecordón presenta una mayor dispersión de los resultados, aunque un ligero mejor comportamiento a altos ciclos (mayores a los $2{\cdot}10^6$ ciclos). Pero, este incremento es sólo de un 3 % y no como se refleja en algunos estudios bibliográficos que indican mayores diferencias.

La similitud entre los dos comportamientos puede deberse a que el suavizado del ángulo diedro entre el sobrecordón y el metal base disminuye de manera

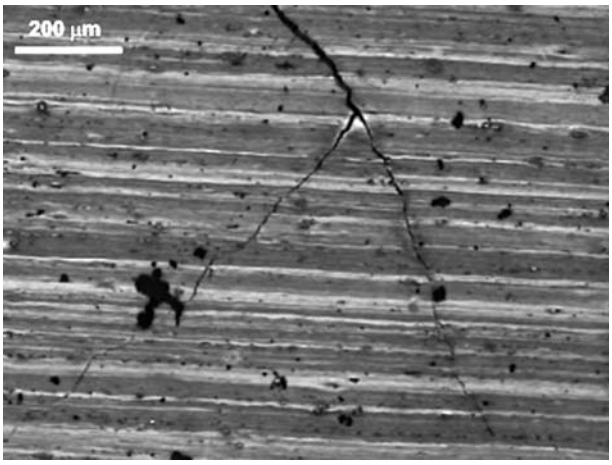

Figura 10. Aspecto de una grieta paralela a la grieta principal. Ataque Weck.

Figure 10. Morphology of a parallel secondary crack. Weck etching.

significativa el efecto concentrador de tensiones del sobrecordón, al igual que con la eliminación de las grietas propias del descuelgue (véase la figura 8), disminuyendo sensiblemente la diferencia del comportamiento a fatiga entre estas dos condiciones, eliminado o suavizado del sobrecordón. No obstante, la rugosidad superficial es un factor determinante en la iniciación de grieta, pues se observó que la mayoría de las grietas comenzaron en el fondo del mecanizado del cordón, como puede apreciarse, igualmente, en la figura 9.

No obstante, en diversas ocasiones se observó que a pesar de que la fractura se produjo dentro del cordón o en la ZAC, paralelamente, se sucedía otra grieta dentro de la ZAC, figura 10, que avanzaba paralelamente a la grieta principal, a unos 5 mm de la intercara. Sin embargo, esta segunda grieta se iniciaba después de la principal, o bien su velocidad de crecimiento era inferior e independiente de la preparación del sobrecordón, de lo que se puede inferir que ambos procedimientos, suavizado o eliminación del sobrecordón, incrementan la vida a fatiga en comparación con la soldadura con el sobrecordón sin ninguna modificación.

Estas grietas paralelas pueden dar respuesta a lo expresado por diversos autores[8, 9 y 19] que indican que, a unos 5 mm de la correspondiente unión, existe una zona de disolución parcial y envejecimiento con un descenso en la resistencia.

4. CONCLUSIONES

En base a los resultados y a las observaciones realizadas puede concluirse que:

— La preparación del sobrecordón repercute decisivamente en la respuesta a fatiga de la unión soldada, mejorando sustancialmente su resistencia.
— La rugosidad superficial es la principal responsable de la respuesta a fatiga de la unión soldada, que mejora sensiblemente cuando se retoca el sobrecordón con un suavizado o eliminado total.
— El inicio de las grietas, tal como podía esperarse, sucede en las entallas, producto de la rugosidad superficial.
— Se produce, no sólo una grieta que es la que provoca la fractura, sino que también aparecen grietas paralelas en distintas zonas de la ZAC.

REFERENCIAS

[1] J.M. GOMEZ DE SALAZAR, A. UREÑA, E. VILLAURIZ, S. MANZANEDO e I. BARRENA, *Rev. Metal. Madrid* 34 (1998) 276-280.

[2] L.F. MONDOLFO, *Aluminium Alloys: Structure and Properties*, Ed. Butterworths, London, Inglaterra, 1976.

[3] AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Aluminium and aluminium alloys, ASM Specialty Handbook,* Ed. ASM International, Ohio, EE.UU., 1993.

[4] P RODRIGO, P. POZA, M.V. UTRILLA Y A. UREÑA, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 298-307.

[5] N. RYUM, *Z. Meta.k.d.* 64 (1975) 377-388.

[6] J. HAGSTRON Y R. SANDSTROM, *Sci. Tech. Welding Joining* 2 (1997) 199-208.

[7] J.M. ALBUQUERQUE, P.A. RAMOS, M.A. GOMES Y A.C. CRUZ, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 126-132.

[8] GAOFENG FU, FUQUAN TIAN Y HONG WANG, *J. Mat. Proc. Tech.* 180 (2006) 216–220.

[9] T. MA Y G. DEN OUDEN, *Mater. Sci. Eng. A*, 266 (1999) 198-204.

[10] C.A. BLOEM M.D. SALVADOR, V. AMIGÓ Y D. BUSQUETS, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 298-303.

[11] B. ATZORI B. Y A. TRENTADUE, *Riv. Ital. Soldatura* 27 (1975) 349-538.

[12] D. BUSQUETS. *Estudio del comportamiento a fatiga de uniones soldadas de aluminio de alta resistencia para su empleo en la industria del transporte*, Ed. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 1987.

[13] D. ZIVKOVIC Y B. ANZULOVIC, *Mater. Des.* 26 (2005) 247-250.

[14] R. Y. HWANG Y C. P. CHOU, *Scrip. Materialia* 38 (1998) 215-221.

[15] F. GATTO Y D. MORRI, *Fatigue behaviour of some welded joints of aluminium alloys*, Ed. Novara, 1979.

[16] W. KÖHLER, *Proc. 2nd Int. Conf. Aluminium Weldments*, Munich, Alemania, 1982, II.7.

[17] C.A. BLOEM, M.D. SALVADOR, V. AMIGÓ Y A. VICENTE, *Rev. Metal. Madrid* 36 (2000) 33-39.

[18] J-Q. SU, T.W. NELSON, R. MISHRA Y M. MAHONEY, *Acta Materialia*, 51 (2003) 713-729.

[19] F. LEFEBVRE , S. GANGULY Y I. SINCLAIR, *Mater. Sci. Eng. A*, 397 (2005) 338-345.

20] J.A.M. PINHO-DA-CRUZ, J.A.M. FERREIRA, J.D.M. COSTA Y L.F.P. BORREGO, *Thin-Walled Structures* 41 (2003) 389-402.