

## Evolución microestructural de la ZAC en la unión soldada con MIG sobre una aleación de aluminio AA7020<sup>(\*)</sup>

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

**Resumen** El presente estudio evalúa los cambios acaecidos a lo largo de la zona afectada por el calor, ZAC, bajo dos ópticas diferentes pero complementarias: la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC). Se han obtenido cambios claros y definidos en cuanto a la morfología y tamaño de los precipitados observados por TEM a lo largo de la ZAC, los cuales se correlacionan con los diferentes barridos de DSC.

**Palabras clave** Aleación de aluminio. Microestructura. Calorimetría diferencial de barrido. Soldadura. Microscopía electrónica de transmisión.

### Stress corrosion crack growth rate in dissimilar metal welds

**Abstract** The aim of the present study is to evaluate the changes through the HAZ, analyzed under two different but complementary techniques. These are Transmission Electronic Microscopy (TEM) and Differential Scanning Calorimetry (DSC). The results shown that there are remarkable changes in size and morphology of the precipitates, being in accordance with the results obtained by DSC.

**Keywords** Aluminum alloys. Microstructure. DSC. Arc welding. MET.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio de medias prestaciones de la serie AW 7XXX se emplean, cada día con mayor frecuencia, en la fabricación de estructuras soldadas, debido al desarrollo industrial y tecnológico de los diferentes métodos de soldeo que hacen, cada vez, más competitivo el empleo de estas estructuras, lo que requiere, a la vez, un mayor conocimiento, tanto de la unión soldada como del proceso de soldeo o de la evolución microestructural a lo largo de la ZAC, de este tipo de uniones.

Muchos investigadores han realizado estudios sobre el comportamiento mecánico de la unión soldada<sup>[1 y 2]</sup>; otros, se han dedicado a la fenomenología metalúrgica, bien sobre los fenómenos inherentes a las inmediateces de la interfase de la unión o sobre modelos o simulaciones de la estructura soldada<sup>[3 y 4]</sup>; también, están los que han realizado comparaciones entre diferentes métodos de sol-

deo<sup>[2]</sup> o quienes se han dedicado a los tratamientos post-soldeo<sup>[5]</sup>. Sin embargo, son pocas las investigaciones que se han dedicado al estudio de la evolución microestructural a lo largo de la ZAC sobre probetas soldadas.

## 2. MATERIALES

El material base empleado para la ejecución de las uniones soldadas procede de una plancha de aluminio de la aleación AA7020 obtenida por laminación con dimensiones de 1.000 × 1.000 × 5 mm. El material de aporte empleado en la unión soldada, tal como se recomienda en diversas bibliografías<sup>[6 y 7]</sup>, es de la familia Al-Mg, la aleación AA5356, en forma de alambre de 1,2 mm de diámetro. El gas protector empleado fue una mezcla de 75 % Argón y 25 % Helio a un flujo de 12 l/min.

Las composiciones químicas de los materiales base y de aporte se muestran en la tabla I.

(\*) Trabajo recibido el día 19 de septiembre del 2002 y aceptado en su forma final el día 14 de julio del 2003.

(\*) Universidad de Los Andes de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Departamento de Tecnología y Diseño.

(\*\*) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, ETSII, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera S/N. 46022 Valencia.

**Tabla I.** Composición química (% en masa)*Table I. Chemical composition (% in mass)*

	Zn	Mg	Si	Cr	Mn	Fe
Material base AA 7020	5,1	1,2	0,2	0,3	0,2	0,3
Aporte AA 5356	0,1	5,0	-	0,1	0,2	-

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento de soldeo empleado fue MIG DC, debido a su vasto empleo y su relativo bajo costo. Se realizaron las uniones sobre placas cuyas dimensiones eran de  $350 \times 150 \times 5$  mm, ejecutando la soldadura sobre la longitud más larga en la dirección perpendicular al sentido de laminación. Las placas se cortaron inicialmente con cizalla, para después fresar las caras que iban a soldarse. Las placas se fijaron por la parte posterior mediante un par de caballetes, con la finalidad de minimizar la distorsión generada durante el soldeo.

La unión se realizó en dos pasadas, con limpieza mecánica previa a la soldadura y, entre la primera y segunda pasada, mediante muela abrasiva y cepillo de acero inoxidable.

Los parámetros de soldeo se muestran en la tabla II.

#### 3.1. Observación microscópica

Se realizaron observaciones microscópicas por TEM a lo largo de la ZAC, aproximadamente, cada 2 mm, hasta alcanzar los 40 mm desde la interface metal base-cordón de soldadura. Los discos de 3 mm de diámetro empleados para la observación por TEM, se extrajeron de laminillas transversales de  $5 \times 5 \text{ mm} \times 150\text{--}200 \mu\text{m}$ , obtenidos mediante corte con hilo diamantado de 0,19 mm de diámetro, adyacentes a las que se tomaron para la calorimetría diferencial de barrido DSC, tal y como se aprecia en la figura 1.

**Tabla II.** Parámetros de soldeo*Table II. Welding parameters*

	Voltaje (V)	Corriente (Amp)	Velocidad (mm/min)	EBA (kJ/cm)
1ª Pasada	21,0	140	525	5,6
2ª Pasada	21,0	140	382	7,7

De las laminillas extraídas se troquelaron discos de 3 mm de diámetro y se adelgazaron mediante pulido mecánico hasta alcanzar unas  $100 \mu\text{m}$  de espesor. Posteriormente, estos discos se atacaron electrolíticamente con un equipo Tenupol 3, hasta perforación, mediante una solución del 20 % de ácido nítrico en etanol, a una temperatura de  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

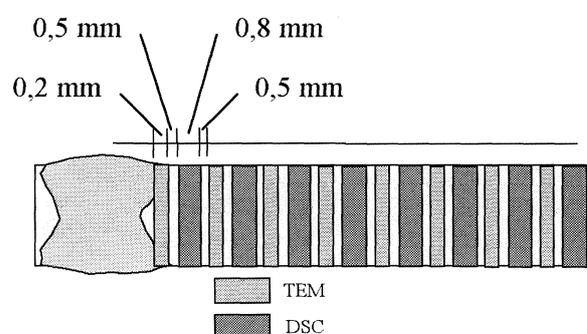
La observación TEM se realiza en un microscopio Philipps EM 400, en campo claro, a diferentes aumentos, con el fin de poder evaluar la calidad y cantidad de los precipitados existentes a lo largo de la ZAC. En el análisis de resultados se presenta una muestra de las micrografías obtenidas.

#### 3.2. Calorimetría diferencial de barrido

La calorimetría diferencial de barrido DSC se realizó, sistemáticamente, a lo largo de la ZAC, con el fin de analizar la evolución de los precipitados en ésta. Los análisis se realizaron hasta una distancia superior a 40 mm, desde la interfase metal base-cordón.

Las muestras para los análisis se extrajeron de posiciones adyacentes a las que se emplearon para la microscopía TEM, como se esquematiza en la figura 1. Las probetas, con un peso cercano a 30 mg y dimensiones aproximadas de  $5 \times 5 \times 0,8$  mm, se alojan dentro del portamuestras de aluminio del calorímetro.

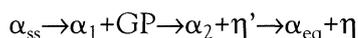
El equipo empleado fue un Perkin Elmer DSC 7, con una velocidad de calentamiento de  $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  desde los 35 hasta los  $410 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los ensayos se realizaron empleando una muestra patrón de aluminio de 99,998 %<sup>[8 y 9]</sup>; el gas protector empleado fue Argón a  $25 \text{ cm}^3/\text{min}$ ; además, se empleó una línea base para mejorar la definición de los resultados obtenidos.

**Figura 1.** Esquema del patrón de corte para las probetas TEM y DSC.*Figure 1. Cutting schedule of TEM and DSC samples.*

## 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 4.1. Calorimetría diferencial de barrido

Para poder realizar un análisis por DSC es necesario definir la secuencia de precipitación de estas aleaciones, así como los rangos de temperatura a las que se suceden las transformaciones. La secuencia de precipitación, ampliamente aceptada y discutida en la bibliografía<sup>[9,10]</sup>, para las aleaciones de la serie 7XXX, es la siguiente:



A continuación, se delimitan los rangos de temperatura del proceso de precipitación-disolución, los cuales se basan en datos de la bibliografía<sup>[4, 8 y 9]</sup>, donde se observan tres zonas claramente definidas.

La primera, una zona endotérmica (valles), que comprende desde los 100 hasta los 190 °C, aproximadamente, y corresponde a la disolución de las Zonas de Guinier Preston GP.

La segunda, una zona exotérmica (picos), que comprende desde los 200 hasta los 290 °C, y corresponde a la formación de la fase metaestable  $\eta'$ .

La tercera, es una zona en la que se suceden, casi simultáneamente, tres diferentes fenómenos: disolución de la fase  $\eta'$ , formación de la fase  $\eta$  y disolución de ésta.

Los diferentes análisis calorimétricos DSC, están representados en la figura 2 y se presentan escalonados en función de la distancia desde la interfase metal base-cordón, con la finalidad de facilitar el análisis. Como se puede notar, aparece una pequeña escala en el eje de las ordenadas, que indica la magnitud de los intercambios energéticos. Los picos o crestas indican reacciones exotérmicas o de disolución de precipitados y, los valles, reacciones endotérmicas o formación de precipitados.

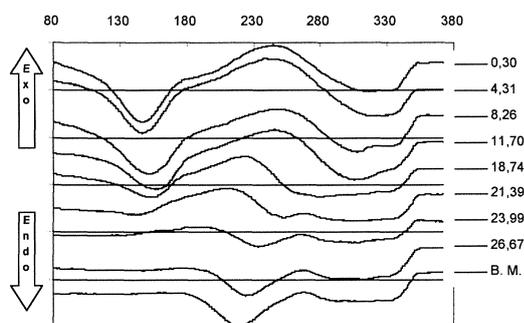


Figura 2. Diferentes DSC a lo largo de la ZAC.

Figure 2. DSC scanning through the HAZ.

Se puede apreciar en la figura 2, en la región que corresponde a la disolución de las GP's (100~190 °C) cómo, a medida que nos alejamos de la interfase metal base-cordón, hay una disminución de la energía así como un desplazamiento del valle hacia mayores temperaturas, lo que indica que, durante el soldeo en esa región, hasta los 18~20 mm, pueda existir una disolución total o parcial de los precipitados, con una precipitación de esas estructuras del tipo GP. El desplazamiento del valle hacia mayores temperaturas indica que el precipitado es más estable, lo cual concuerda con la distribución mas homogénea de los precipitados a medidas que nos alejamos de la interfase.

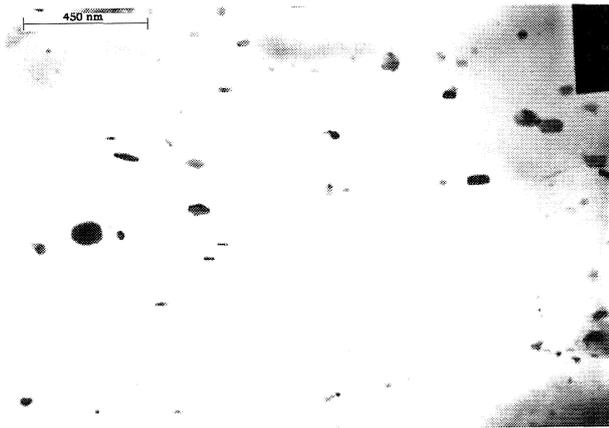
Por otro lado, la ausencia de GP'S después de estos 20 mm indica claramente que, durante el soldeo, esta región sólo ha sufrido de un sobre-envejecimiento y no ha existido una disolución de los precipitados, tal y como se observa por TEM.

En cuanto a la segunda y tercera región, las referentes a la precipitación de  $h'$ , disolución de  $h'$  y formación de  $h$ , al ser estos fenómenos bastante complejos ya que se involucra el soluto disuelto de las GP's y el remanente de la matriz, se requiere de otro tipo de análisis para poder discutir sobre éstos. Sin embargo, se puede notar cómo, a medida que se aleja de la interfase, la temperatura del pico de formación de  $h'$  (200~290 °C) se desplaza hacia temperaturas menores, producto de la estabilidad de las estructuras tipo GP que tienden a transformarse directamente en  $\eta'$ .

Evidentemente, la mejor forma de comprobar estas evoluciones mediante TEM sería poder realizar los análisis en la misma muestra, si bien, es cierto que, al no ser ello posible, se han obtenido las muestras de forma alternada (Fig. 2), de manera que, entre dos muestras de DSC, existe siempre una muestra de TEM e, igualmente, entre dos de TEM se tiene, siempre, una muestra para DSC. Este patrón permite disponer de muestras a lo largo del cordón, que nos indiquen de manera complementaria la evolución de los precipitados, tanto en sus mecanismos de formación y disolución como en su cantidad y tamaño. Por ello, se realiza un estudio complementario mediante microscopía electrónica de transmisión que permita seguir la evolución formulada por el DSC.

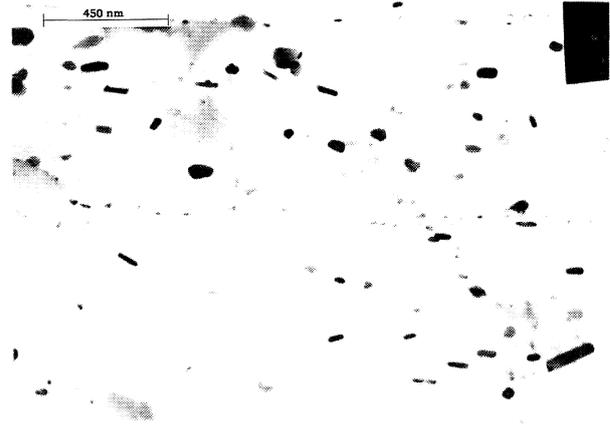
### 4.2. Observación microscópica TEM

En las figuras 3 a 8 se presenta una muestra de las diferentes observaciones microscópicas realizadas a lo largo de la ZAC, en las que se puede apreciar



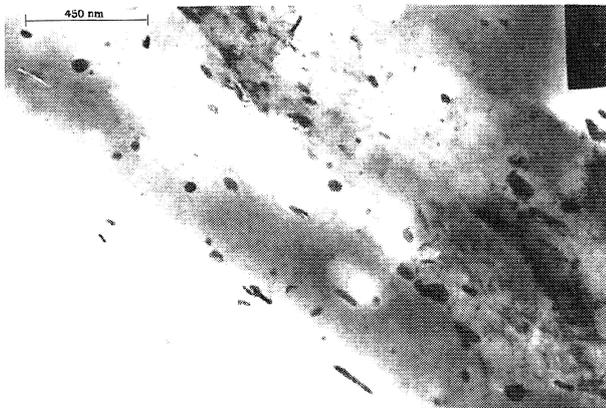
**Figura 3.** Precipitados en la ZAC a 0,6 mm de distancia de la interfase.  $\times 21.500$ .

*Figure 3. Precipitates on HAZ to 0,6 mm of the interface.  $\times 21500$ .*



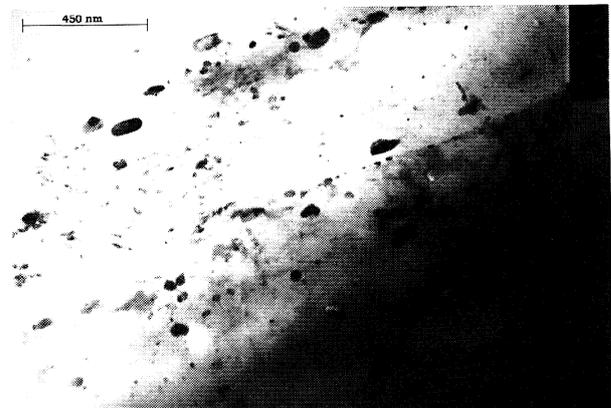
**Figura 4.** Precipitados en la ZAC a 3,2 mm de distancia de la interfase.  $\times 21.500$ .

*Figure 4. Precipitates on HAZ to 3,2 mm of the interface.  $\times 21500$ .*



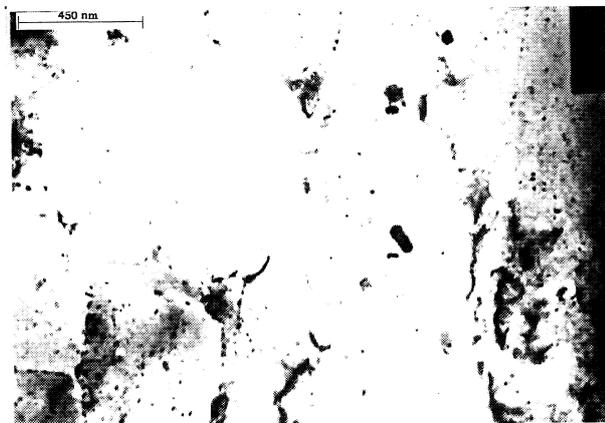
**Figura 5.** Precipitación en la ZAC a 8,5 mm de distancia de la interfase.  $\times 21.500$ .

*Figure 5. Precipitation on HAZ to 8,5 mm of the interface.  $\times 21500$ .*



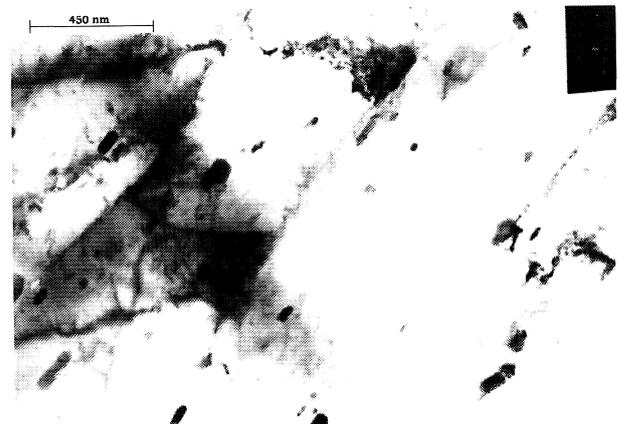
**Figura 6.** Precipitación a 11,2 mm de distancia de la interfase.  $\times 21.500$ .

*Figure 7. Precipitates on HAZ to 17,7 mm of the interface.  $\times 21500$ .*



**Figura 7.** Precipitados en la ZAC a 17,7 mm de distancia de la interfase.  $\times 21.500$ .

*Figure 7. Precipitates on HAZ to 17,7 mm of the interface.  $\times 21500$ .*



**Figura 8.** Precipitación a 25,6 mm de la interfase.  $\times 21.500$ .

*Figure 8. Precipitates to 25,6 mm of the interface.  $\times 21500$ .*

una variación sustancial en los precipitados presentes.

En la fotografía de la figura 3, correspondiente a una distancia de 0,6 mm desde la interfase metal base-cordón, dentro de la ZAC, se aprecia cómo el nivel de precipitación es heterogéneo en cuanto a morfología y tamaño, ya que combina una precipitación tipo esferoide con otra más acicular, aunque estas formas son las que se encuentran, en mayor o menor grado, en todas las secciones estudiadas, con tamaños variados, producto de las variaciones térmicas generadas durante el proceso de soldeo que, debe recordarse, es a dos pasadas. Esta baja densidad de precipitados, descrita por diversos autores<sup>[3 y 4]</sup>, indica que en esta zona se produce una disolución total de los precipitados, producto del aporte térmico durante el soldeo.

En la figura 4, correspondiente a 3,2 mm desde la interfase, se aprecia un incremento en la diferencia del tamaño de los precipitados, respecto a las observaciones realizadas a 0,6 mm de distancia de la interfase. Además, la distribución de los precipitados es muy diversa, advirtiéndose zonas de precipitación escasa e incluso zonas libres de precipitación. Los análisis realizados en estas muestras proporcionan contenidos de, hasta un 2,75 % de partículas semi-coherentes,  $\eta'$ , a los 3,2 mm, frente a 1,34 % de contenido de esta misma fase, a 0,6 mm de la interfase. La composición de estos precipitados se obtuvo mediante EDX, pero no fue posible estimar, con precisión, al la misma presentar un contenido muy alto en aluminio de la matriz, aunque su proporción se encuentra muy cercana al  $MgZn_2$ .

En la figura 5, correspondiente a una distancia de 8,5 mm desde la interfase, se presenta una gran similitud al caso anterior, en cuanto a tamaño y forma de los precipitados. No obstante, el tamaño de estos precipitados, esferoides y aciculares, es ligeramente inferior a los observados a 3,2 mm, lo que parece indicar que la temperatura alcanzada durante el soldeo en esta región fue lo suficientemente elevada como para disolver y homogeneizar la estructura, pero el calor remanente sólo sirvió para generar una precipitación de menor tamaño que el caso anterior, de acuerdo con los hallazgos publicados<sup>[3 y 10]</sup>. De la misma forma, puede comprobarse en los gráficos de DSC (Fig. 2), la gran similitud de las curvas hasta los 11,70 mm, lo que confirma la semejanza de los mecanismos de precipitación y disolución que acaecen a estas distancias de la interfase de los cordones de soldadura.

Precisamente, muy cerca de esta distancia, a 11,2 mm, tal como se recoge en la figura 6, se apre-

cia una precipitación un poco más grosera de los precipitados más estables de  $MgZn_2$ . Sin embargo, también se aprecia una precipitación muy fina y dispersa. Una de las escasas diferencias encontradas en el análisis de DSC radica en la aparición de un pequeño pico de formación del precipitado estable,  $\eta$ , a 8,3 mm de distancia, mientras que resulta inapreciable a 11,70 mm. La razón posible de la precipitación más grosera es que, durante el soldeo, la temperatura alcanzada no llegó a disolver en la totalidad los precipitados presentes y que, con el calor remanente, sirvió para que los que no se disolvieron totalmente crecieran e, igualmente, para generar una precipitación fina.

Sin embargo, a mayores distancias, se aprecia una diferencia sustancial en los gráficos de DSC, donde desaparecen, prácticamente, los picos correspondientes a formación y disolución de GPs, así como un desplazamiento cada vez más importante del pico correspondiente a la formación de los precipitados,  $\eta'$ . A la distancia de 17,7 mm, (Fig. 7), se observa una menor formación de precipitados, aunque persiste una fina distribución de precipitados esféricos,  $\eta'$ . Esto indicaría que, durante el soldeo, aún en esta región, ha existido una disolución parcial, engrosamiento y precipitación.

Observando la figura 8, que corresponde a la distancia de 25,6 mm, se aprecia la aparición de la estructura tipo mosaico correspondiente a lo que sería el metal base, con una ausencia de los precipitados finos del tipo  $\eta'$ , aunque permanecen los groseros en menor cantidad pero de mayor tamaño. La presencia de la estructura tipo mosaico revela que, durante el proceso de soldeo, la temperatura alcanzada no fue suficiente como para recrystalizar esta región, por lo que se infiere que, durante el soldeo, lo único que ha acontecido en esta región es un crecimiento de los precipitados. Esto mismo es lo que se constata cuando comparamos los gráficos de DSC correspondientes a la distancia de 26,6 mm y el del metal base, que resultan prácticamente iguales y diferenciados de aquellos correspondientes a distancias a la interfase inferiores.

En resumen, se puede asumir que, debido al proceso de soldeo, se generan en la ZAC tres zonas claramente definidas: la primera, desde la interfase metal base-cordón hasta los 7-12 mm, donde suceden los principales fenómenos de formación y solución de GP's, así como de  $h'$ ; la segunda, desde estos 12 mm hasta los 20 mm, aproximadamente, donde la temperatura de formación de los precipitados,  $\eta'$ , va disminuyendo; la tercera y última, a partir de estos 20 mm, donde se estabiliza la fase  $h$

con una mayor presencia de los precipitados estables de  $MgZn_2$ .

## 5. CONCLUSIONES

Se evaluó la evolución de los precipitados a través de la ZAC mediante microscopía electrónica de transmisión y calorimetría diferencial de barrido, que han resultado herramientas fundamentales para la observación de los precipitados presentes así como de la formación de otros, cuando se somete el soluto a nuevos tratamiento térmicos mediante el DSC.

Los procesos de formación de  $\eta'$  y  $\eta$  son fenómenos complejos al involucrar tanto el soluto proveniente de las GP's como el soluto remanente en la matriz.

La mayor estabilidad de las GP's hace que la temperatura de formación de  $\eta'$  sea menor.

El nivel de precipitación de  $\eta'$  es bastante más complejo debido al solapamiento de picos en el registro de DSC, por lo que sería necesario el empleo de otras técnicas para apoyarlo.

Se observan tres zonas completamente diferenciadas en la ZAC: la primera, es una zona de disolución total y precipitación, a distancias cercanas a la interfase con el cordón de soldadura. La segunda, es una zona de disolución parcial, precipitación y

sobreenvejecimiento, mientras que, la tercera, se fundamenta en el sobreenvejecimiento y, por tanto, la disolución y la precipitación son, básicamente, nulos.

## REFERENCIAS

- [1] V. MALIN, *Weld. Res. Supplement* (1995) 305-318.
- [2] J.M. GOMEZ DE SALAZAR, A. UREÑA, E. VILLAUZ, S. MANZANEDO e I. BARRENA, *Rev. Metal. Madrid* 34 (1998) 276-280.
- [3] T. MA DEN OUDEN, *Mater. Sci. Eng. A266* (1999) 198-204.
- [4] N. RYUM, *Z. Metallkd.* 66 (1975) 377-388.
- [5] D. BUSQUETS, *Estudio del comportamiento a fatiga de uniones soldadas de aluminio de alta resistencia para su empleo en la industria del transporte*, U.P.V. España, 1987.
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Specialty handbook Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International, 1993.
- [7] Alubook: <http://www.alu-info.dk/html/alulib/modul/albook40.htm>, feb 2001.
- [8] C. GARCIA-COROVILLA y E. LOUIS, *Metall. Trans. A* 21 (1990) 2.277-2.280.
- [9] C. BLOEM, M. SALVADOR y V. AMIGÓ, *Rev. Cienc. Ing.* 21-3 (2000).
- [10] B.I. BJORNEKLETT, O. GRONG, O.R. MYHR y A.O. KLUKEN, *Sci. Technol. Weld. Joining.* 4-3 (1999) 161-169.