

Evolución microestructural de la aleación de aluminio 6061 durante el proceso de soldadura MIG

Jaime Torres S.*

Resumen

En este artículo se establece una correlación entre las variables del proceso de soldadura, como la intensidad de la corriente, la tensión, la velocidad de soldadura, las temperaturas pico, grados de microdureza alcanzadas y la evolución de la precipitación en la lámina de una aleación de aluminio 6061 a las distancias de 7, 13 y 20 mm del centro del cordón. Se utilizó un programa de elementos finitos de propósito general, para predecir el efecto del calor aportado en la soldadura GMAW sobre los valores de las propiedades mecánicas. Se encontró que el perfil de microdureza depende fuertemente de la distribución de los precipitados, y esta distribución depende, a su vez, de los ciclos térmicos que sufre el material durante el proceso de soldeo, siendo el ancho de la zona crítica más angosta cuanto más alta es la velocidad de aportación.

Palabras clave: Soldadura MIG, zona afectada por el calor, barridos de microdureza, temperaturas pico, elementos finitos, calorimetría diferencial de barrido, microscopía electrónica de transmisión, termocuplas, sobreenvjecimiento.

Abstract

This article refers a correlation between the welding variables process like the current intensity, voltage, welding flow velocity, peak temperatures, failure location, reached micro hardness and the evolution of the precipitation, in 6061 aluminum alloy sheets, to the distances of 7, 13 and 20 mm from heat input. A traditional finite element analysis software (FEA) has been used to predict the effects of heating, provided by Gas Metall Arc Welding Process on the mechanical properties. It was found that the hardness profile depends greatly on the precipitate distribution and this depend of the heat cycles over the material in the welding process, where the critic zone became to be shorter when the welding flow velocity is higher.†

Key words: MIG welding, Weld Heat-Affected Zone, Micro hardness curves, Peak Temperatures , Finite Elements, Differential Scanning Calorimetric, Transmission Electron Microscopy, Thermocouples, over aged zone.

Fecha de recepción: 25 de febrero del 2002

* Profesor del Departamento de Ingeniería Básica de la Universidad del Norte. Ingeniero Metalúrgico UPTC, International Welding Engineer, IiW Mannheim; PhD. en Ingeniería Industrial, UPV, España. jtorres@uninorte.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Para estudiar las modificaciones que se presentan en los valores de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061-T6, después de ser soldada mediante el proceso GMAW, se ha utilizado un programa de elementos finitos de propósito general, el ALGOR™, mediante el cual se realizaron los análisis térmicos a partir de una distancia de 1.5 mm y hasta cubrir una distancia de 101.5 mm. Con el fin de estudiar la evolución de los precipitados en la zona afectada por el calor y en el depósito se han realizado ensayos de calorimetría diferencial de barrido, de microscopía electrónica de transmisión y de ensayos de microdureza partiendo del centro del cordón de soldadura hasta abarcar el metal base de la aleación. El estudio de los ciclos térmicos en soldadura es un campo de investigación amplio y complejo dentro del cual se aplican diferentes herramientas, desde las soluciones analíticas hasta los modelos computacionales.

Esta investigación hace uso de una de las herramientas más utilizadas en la actualidad para generar un modelo lo más simple posible, pero buscando siempre obtener la mayor precisión, de tal manera que permita describir adecuadamente los fenómenos térmicos ocurridos durante los ciclos de soldeo, y que dan origen a los cambios en las propiedades del material. Con el fin de comprobar la efectividad del modelo se han medido las cotas de temperatura en todos los ejercicios de soldadura a las distancias de 7, 13 y 20 mm del centro del cordón, utilizando para ello tres termocuplas de contacto y lectura digital, previamente calibradas, cuyos resultados se muestran en la tabla 1. En esta tabla se puede apreciar que la desviación porcentual de estas mediciones con respecto al modelo es bastante aceptable, y va desde -4.57 hasta $+8.87\%$. En la posición de soldeo vertical ascendente, las temperaturas del modelo estuvieron siempre por encima de los valores obtenidos por medición directa con termopares. También parece razonable afirmar que la desviación porcentual no tiene un comportamiento uniforme, y no parece depender mucho del calor de aporte, como se puede apreciar en la tabla 1. Dos razones permiten afirmar lo anterior. En primer lugar, el contacto de las tres termocuplas para la posición vertical fue menos efectivo que el de la posición plana, en razón de que el ángulo de avance de la pistola de soldar dificultó la toma de lectura con las termocuplas. La otra razón puede estar en el hecho de que el tamaño de la zona estable es menor cuanto más alta es la entrada de calor.

Tabla 1

Comprobación con termopares de las cotas de temperaturas alcanzadas en los ejercicios de soldadura seleccionados

Calor de aporte (kj/cm)	Dist. (mm)	Temperaturas medidas (°C)				Temp. modelo	Desv. %
		T1	T2	T3	T Med		
4.32	7	465	458	459	460.7	419.8	8.87
4.32	13	309	310	302	307	297.6	3.06
4.32	20	335	228	234	232.3	224.5	3.35
5.56	7	548	552	533	551.3	543.9	3.18
5.56	13	426	419	423	422.6	413	2.27
5.56	20	329	330	325	328	318.6	2.86
3.27	7	399	398	397	398	389.8	2.06
3.27	13	285	281	290	285.3	274	3.96
3.27	20	215	216	210	213.6	204.5	4.26
3.68	7	439	440	448	442.3	429.2	2.96
3.68	13	308	296	309	304.3	300.7	1.18
3.68	20	228	227	224	226.3	223.3	1.19
2.74	7	410	411	409	410	401.3	2.12
2.74	13	285	286	281	284	272.2	2.39
2.74	20	215	210	211	212	204.2	3.67
4.05	7	491	496	496	494.3	489	1.07
4.05	13	359	355	352	353.3	345.6	2.17
4.05	20	263	262	265	263.3	254.1	3.49
5.35	7	388	389	391	389.6	398.3	-2.23
5.35	13	280	284	287	283.6	290.3	-2.36
5.35	20	215	219	216	216.6	220.6	-1.84
6.33	7	450	455	448	451	462.2	-2.48
6.33	13	323	321	320	321.3	332.9	-3.61
6.33	20	243	240	235	240.6	251.6	-4.57

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este artículo se estudia el comportamiento de la dureza de la aleación AA6061-T6, después de soldar, cuya composición química promedio fue de 0.782%Si, 1.097%Mg, 0.248%Fe, 0.116%Cu, 0.0160%Mn, 0.0015%Cr, 0.0138%Ti. Se utilizaron chapas de 300x100x4.8mm, las cuales se soldaron bajo el proceso GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) con material de aporte AWS ER4043 de 1.19 mm de diámetro. La soldadura se hizo a tope en posición plana sobre una junta diseñada en I simple

dejando un intersticio de separación entre chapas de 2mm con una sola pasada y utilizando como gas de protección argón puro. Los parámetros de soldeo se pueden observar en la tabla 2. Para la identificación y estudio de los precipitados se diseñaron los ensayos de calorimetría diferencial de barrido, utilizando para ello un equipo Perkin Elmer DSC7 y un microscopio electrónico de transmisión Phillips EM 400 para muestras seleccionadas.

3. RESULTADOS

Los resultados de la modelización para los ejercicios de soldadura seleccionados se muestran en las figuras 1 a 6, en las que se pueden observar la distribución de temperaturas calculadas de acuerdo con los valores de los parámetros utilizados durante el proceso de soldadura que sirvieron de base para calcular la cantidad de calor de aporte efectivo y la estimación de las características de la zona afectada por el calor, las cuales dieron origen a los perfiles de dureza.

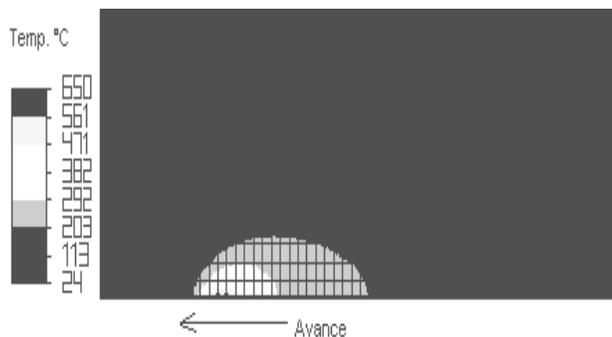


Figura 1. Distribución de temperaturas calculadas para el ejercicio de soldadura (120A 18V, 5.26 mm/s y 4.32kj/cm). J. Torres [8]

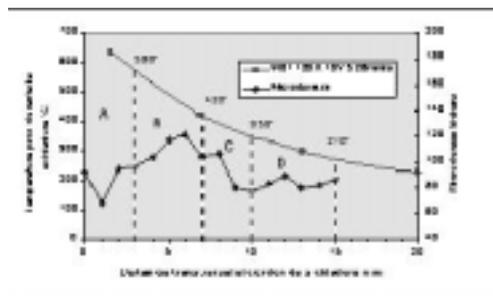


Figura 2. Temperatura pico en la ZAC, obtenida mediante elementos finitos y perfil de microdureza para el ejercicio de soldadura (120A, 18V, 5.26 mm/s y 4.32kj/cm). J. Torres [8]

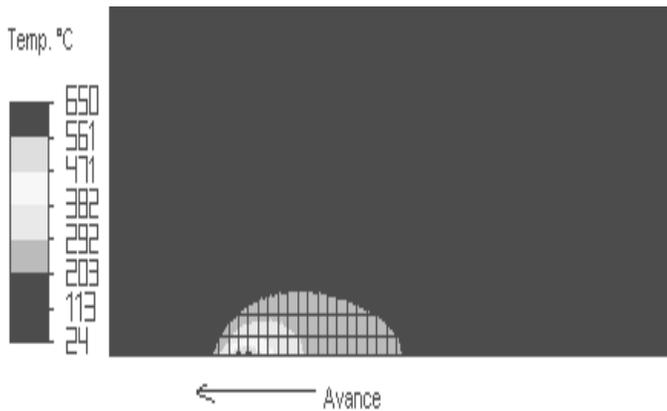


Figura 3. Distribución de temperaturas calculadas para el ejercicio (120A, 18V, 4.34 mm/s y 5.56kj/cm). J. Torres [8]

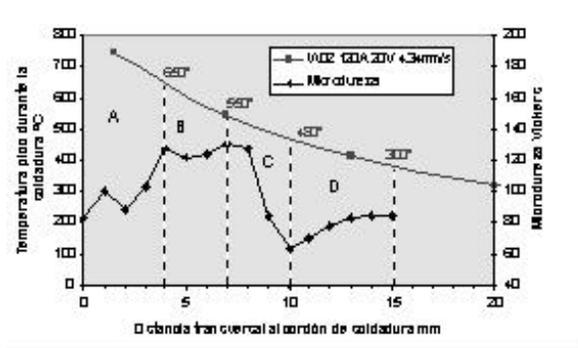


Figura 4. Temperatura pico en la ZAC, obtenida mediante elementos finitos y perfil de microdureza para el ejercicio (120 A 18V, 4.34 mm/s y 5.56kj/cm). J. Torres [8].

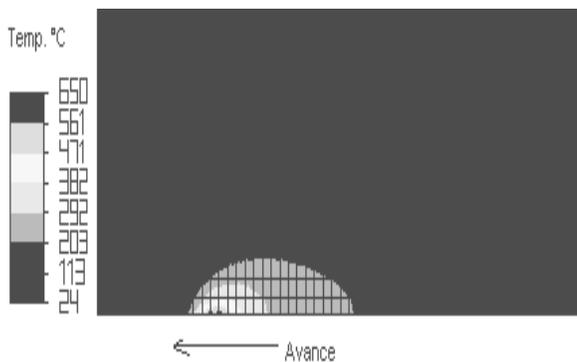


Figura 5. Distribución de temperaturas calculadas para el ejercicio (140A 18V, 7.15 mm/s y 2.74kj/cm). J. Torres [8]

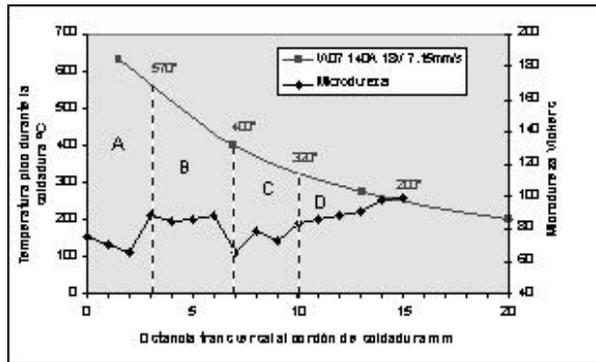


Figura 6. Temperatura pico en la ZAC, obtenida mediante elementos finitos y perfil de microdureza para el ejercicio (140A 18V, 7.15 mm/s y 2.74kj/cm).
J. Torres [8]

Una correlación entre las variables del proceso de soldadura y las temperaturas alcanzadas a diferentes distancias puede realizarse utilizando los datos de la tabla 2, bajo la consideración de que tanto el modelo de elementos finitos como las mediciones de temperatura con termocuplas dieron resultados comparables y con desviaciones razonablemente bajas, y asumiendo que todos los otros cálculos y mediciones durante el proceso de soldadura, como la velocidad de avance, la intensidad de la corriente, la tensión o voltaje y las mediciones de microdureza, fueron hechas fielmente.

Tabla 2

Temperaturas alcanzadas a 7,13 y 20 milímetros de distancia del centro de la soldadura según modelo y termocuplas

Condiciones de soldeo			Temperatura alcanzada °C		Distancia (mm)	Ejercicio WPS
I	V	v	TERMOCUPLA	MODELO		
120	18	4.34	551.3	543.9	7	02-03
			422.6	413.0	13	
			328.0	318.6	20	
120	18	5.26	461.7	419.8	7	01-03
			307.1	297.6	13	
			232.3	224.5	20	
140	20.5	5.32	389.6	398.3	7	09-02
			283.6	290.3	13	
			216.6	220.6	20	

Condiciones de soldeo			Temperatura alcanzada °C		Distancia (mm)	Ejercicio WPS
I	V	v	TERMOCUPLA	MODELO		
140	24.0	6.00	451.0	462.2	7	10-03
			321.3	332.9	13	
			240.6	251.6	20	
120	20.0	6.60	442.3	429.2	7	04-01
			304.3	300.7	13	
			226.3	223.3	20	
120	18	6.60	398.0	389.8	7	03-01
			285.3	274.0	13	
			213.6	204.5	20	
140	18	7.15	410.0	401.3	7	07-04
			284.0	277.2	13	
			212.0	204.2	20	
140	20	7.30	294.3	489.0	7	08-02
			353.3	345.6	13	
			263.3	254.1	20	

Cuando se utilizó una velocidad de soldeo de 4.34 mm/s, la temperatura medida con termocuplas a una distancia de 7 mm del centro del foco de calor fue de 551 °C y para el modelo fue de 543.9°C. Cuando la velocidad de soldeo fue de 5.26 mm/s, estas temperaturas fueron de 461.7 °C y 419.8 °C, esto es, 89.3 y 124.1°C menos que cuando se utilizó la velocidad anterior más baja. Para una velocidad de soldeo de 7.15 mm/s(1.6 veces mas alta que en el primer caso), las temperaturas alcanzadas a una distancia de 7 mm del centro del foco de calor fueron de 410 °C según la medición hecha con termocuplas y de 401.3 °C según el modelo, esto es, 141 y 142.6 °C menos que cuando se utilizó la velocidad más baja de soldeo.

A una distancia de 13 mm del centro de la fuente de calor, las temperaturas alcanzadas fueron: 422.6°C medida con termocuplas y 413.0°C simulada con el modelo cuando se utilizó la velocidad de 4.34 mm/s. Cuando la velocidad fue de 5.26 mm/s, las temperaturas medidas con termocuplas y la simulada con el modelo fueron 307.1°C y 297.6°C, mientras que cuando se utilizó la velocidad de 7.15 mm/s, estas temperaturas fueron 284°C y 272.2°C, es decir, 138.6 y 135.8°C menos que cuando se utilizó la velocidad más baja de 4.34mm/s. A una distancia de 20 mm del centro del foco de calor y utilizando las velocidades de 4.34, 5.26 y 7.15 mm/s se registraron las siguientes diferencias de temperatura con respecto a la velocidad más baja: 95.7 y 94.1 °C entre la segunda y la primera velocidad utilizada y 116 y 114.4°C entre la velocidad de 7.15 y la de 4.34 mm/s medidas con termocuplas y simuladas con el modelo, respectivamente.

Se puede apreciar que a 20 mm del centro de la fuente de calor las diferencias de temperatura debidas al efecto de la velocidad de enfriamiento fueron más bajas que a 13 y que a 7 mm, por lo cual se puede afirmar que las velocidades altas de soldeo afectan muy poco el perfil de microdureza de la zona afectada por el calor, y puesto que cada velocidad de soldeo afecta el comportamiento de la dureza de una manera particular, debido precisamente a que los perfiles de dureza en las aleaciones endurecibles por precipitación dependen fuertemente de la distribución de los precipitados, se pueden definir varias zonas:

La *zona a* va de 0 a 3 mm y corresponde a la zona fundida de la soldadura, y de acuerdo con la exploración de las fotomicrografías para esa zona, como se puede observar en la figura 7a, consiste de finos granos equiaxiales caracterizados por la recrystalización y la disolución de los precipitados endurecedores de la aleación. Según las curvas de barrido de microdureza de todas las muestras ensayadas, se observa un punto de dureza mínima, el cual se encuentra ubicado entre 1 y 2 mm del centro del cordón, con valores de dureza que oscilan entre los 58 y 80 HVN, y temperaturas entre los 590 y 800° C (obtenidas de la simulación térmica mostrada anteriormente). Estas temperaturas son muy superiores a las de disolución de los precipitados estables y metaestables b'' , b' , y b reportados por Malin [1], Yutaka[3], Gupta[6], y esto coincide con los resultados de los ensayos de DSC y de TEM que se muestran en la figura 8a y en la 9. A partir de los 2 mm se aprecia un incremento de la dureza hasta alcanzar valores de 85 a 125 HVN a una distancia situada a los 3 mm del centro del cordón de soldadura. La temperatura a esta distancia alcanzó valores entre los 570 y 650°C de acuerdo con la velocidad de soldeo que se aplicó en cada caso.

Parece razonable afirmar, analizando los termogramas de la figura 8^a, en la que se observan los picos exotérmicos a 190°C y endotérmicos a 260°C para la misma *zona a* de los tres ejercicios de soldadura y que indicarían la formación de b'' y la disolución de b' , resultantes del ensayo de calorimetría diferencial de barrido y de las fotografías TEM mostradas en la figura 9, tomadas a los discos sacados a esa distancia del centro del cordón de soldadura, en las que se puede apreciar los precipitados groseros de más de 100 nanómetros de longitud, que esta caída e incremento en la dureza es debido a la disolución de precipitados b' y a la formación de precipitados endurecedores b'' durante el enfriamiento. Fue en este plano donde se presentaron las fracturas en la prueba de tracción.

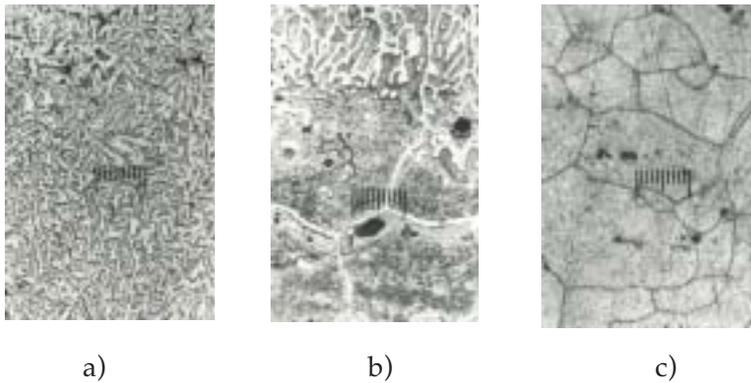
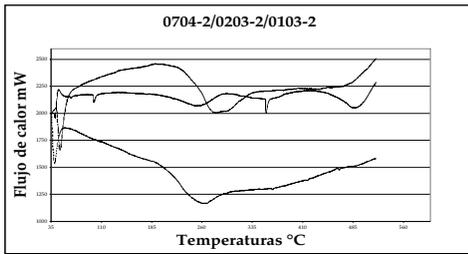


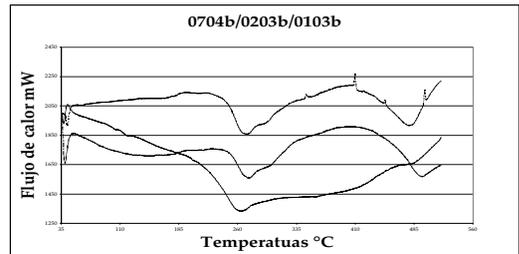
Figura 7. Fotomicrografía óptica de las soldaduras: a) *Zona de la soldadura.* b) *Línea de fusión.* c) *Metal base.* J. Torres [8]

La *zona b*, cuyo ancho va de 3 a 7 mm, está constituida por una estructura de granos recuperados, como se observa en la figura 7b. En esta zona se alcanzaron temperaturas del orden de los 350 y 650 °C. Estos valores están dentro del rango de temperaturas de precipitación y disolución de b' propuesto por Gupta[6]. Se puede apreciar en los termogramas de la figura 8b para los ejercicios de soldadura seleccionados, picos exotérmicos a 160,194 y a 225°C, los cuales indicarían la formación de precipitados b'' , mientras que los picos endotérmicos a 263, 271 y 265°C estarían indicando la disolución de precipitados b' . La anterior afirmación se puede justificar por la presencia de los precipitados groseros, bastones de 100hm de longitud y agujas delgadas de 50hm de largo, como se muestra en la figura 10, dimensiones que concuerdan con las reportadas en estudios previos: los precipitados en forma de agujas, b'' , con longitudes entre 20 y 50 hm parcial o completamente coherentes con la matrix [7], los precipitados groseros en forma de bastones, b' , de aproximadamente 50 a 700 hm de longitud. Las curvas de barrido, como se aprecia en la figura 6, muestran una dureza relativamente estable entre los 3 y los 6 mm, con una diferencia de dureza promedio de 20 unidades entre crestas y valles, mientras que los valores mínimos de dureza se encuentran en un amplio intervalo que va de 60 a 115 HVN y temperaturas que oscilan entre los 400 y 610 °C; aunque el punto de dureza mínima se halla comúnmente entre los 420 y 450°C. La máxima dureza se encuentra entre los 85 y 130 HVN, a temperaturas que varían entre los 540 y 650°C.

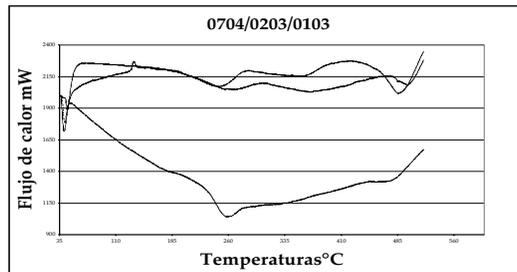
De nuevo, parece razonable afirmar que el leve incremento en la dureza y estabilidad de la misma, que se presenta a esta distancia del centro de la soldadura, es debida a la precipitación de b' a expensas de los precipitados que se disolvieron por efecto del calor aportado por el proceso, como lo demuestra la gran densidad de precipitados de este tipo, observados en los discos cortados a esta distancia y vistos en el microscopio electrónico de transmisión.



8a



8b



8c

Figura 8. Termogramas correspondientes a las zonas a) *plano cortado a 3mm.*
 b) *plano cortado a 6mm.* c) *plano cortado a 13mm del centro del cordón de soldadura.*
 J. Torres [8]

La zona c, cuya extensión está comprendida entre 7 y 10 mm, alcanzó temperaturas, según la energía de aporte suministrada, entre los 350 y 550 °C, y está caracterizada por granos gruesos, como se aprecia en la figura 8c. En este plano se presenta una reducción acentuada de la dureza a medida que se aumenta la distancia al centro del cordón de soldadura hasta alcanzar un valor mínimo que se encuentra entre los 62 y los 79 HVN. Aquí se registraron temperaturas comprendidas entre los 380 y 400 °C, como se puede apreciar en las curvas de barrido de las figuras 2, 4 y 6 y en las figuras 1, 3 y 5, donde se muestra la distribución de temperaturas para las soldaduras seleccionadas. Haciendo el análisis de los termogramas resultantes del ensayo de calorimetría diferencial de barrido, figura 8c, se observan picos exotérmicos a los 202, 190 y 194 °C, que indican la formación de precipitados b'' y picos endotérmicos a las temperaturas de 256, 255 y 266 °C, que indican la disolución de precipitados b'. Los resultados de los ensayos con microscopia electrónica de transmisión (fotografías TEM de la figura 11 tomadas a los discos sacados a 13 mm del centro del cordón de soldadura) muestran una alta densidad de precipitados en forma de agujas y en forma de bastones, con longitudes de 50 y 129 nm, respectivamente.

Parece razonable afirmar que el descenso de dureza observado es debido a la disolución de las agujas b'' , que es el precipitado responsable del endurecimiento, y a la gran densidad de precipitados groseros b' que se observa en esa zona.

La *zona d* está comprendida entre 10 y 25 mm y alcanzó temperaturas por debajo de los 380 °C; a partir de este punto se aprecia una recuperación de la dureza desde un valor mínimo, hasta alcanzar valores cercanos al metal base, la recuperación es más lenta que la reducción observada en la *zona c*, por lo cual esta zona es más ancha. Los cálculos de las energías y de las temperaturas de los picos resultantes de los ensayos con el Calorímetro Diferencial de Barrido revelan picos endotérmicos a 215°C con -0.83 J/g , 306°C con -1.76 J/g y a 498°C con -0.85 J/g (figura 12). Puesto que las áreas de los picos son muy pequeñas, es de esperarse que la cantidad de disolución y/o formación de precipitados también lo sea. A 25 mm de distancia del centro del cordón de soldadura no se alcanzaron temperaturas más allá de 240 °C (temperatura límite de estabilidad de b'') en ninguno de los ejercicios de soldadura realizados, lo cual coincide con los resultados del análisis mediante microscopia electrónica de transmisión (figura 13), en los que se observó poca densidad de precipitados en agujas finas y alta densidad de bastones gruesos.

Parece razonable afirmar que a 25 mm del eje central del foco de calor de la soldadura se genera un plano o zona de mínima dureza originado por el engrosamiento y la disolución del precipitado endurecedor b'' coherente.



Figura 9

Fotografía TEM de la *zona a*, 3mm del centro de la soldadura, correspondiente al ejercicio 07-04-2 (21500X), precipitados b' de 70, 90 y 400 nm de longitud.

J. Torres [8]

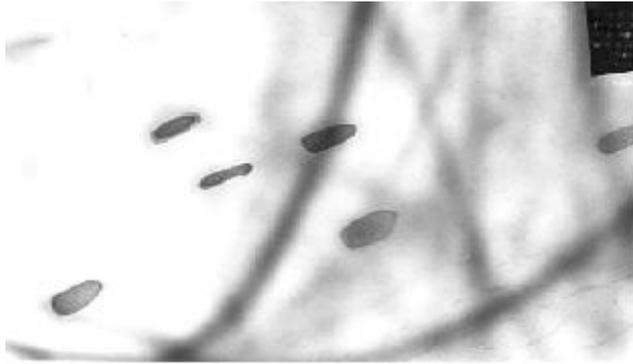


Figura 10. Fotografía TEM de la *zona b*, 7mm del centro de la soldadura, correspondiente al ejercicio 01-03-2 (60400X), precipitados b' de 33 X 99 nm. J. Torres [8]

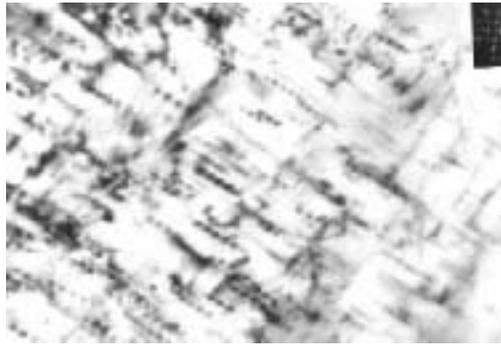


Figura 11. Fotografía TEM de la *zona c*, 13mm del centro de la soldadura, correspondiente al ejercicio 01-03-2 (77400X), precipitados b' de 129 nm y precipitados b'' de 50 nm. J. Torres [8]

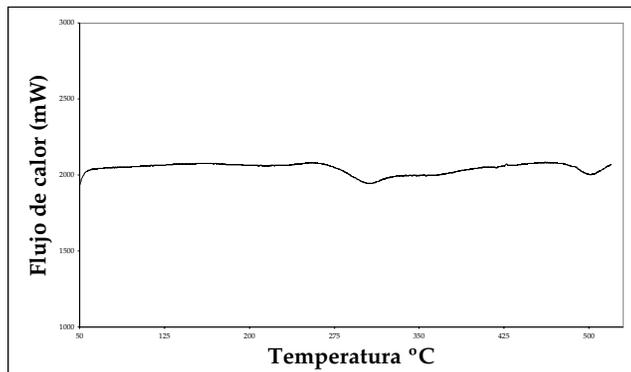


Figura 12. Termogramas correspondientes a la *zona d*, plano cortado a 25mm del centro del cordón de soldadura, correspondiente al ejercicio 120A, 18V y 5.26 mm/s. J. Torres [8]

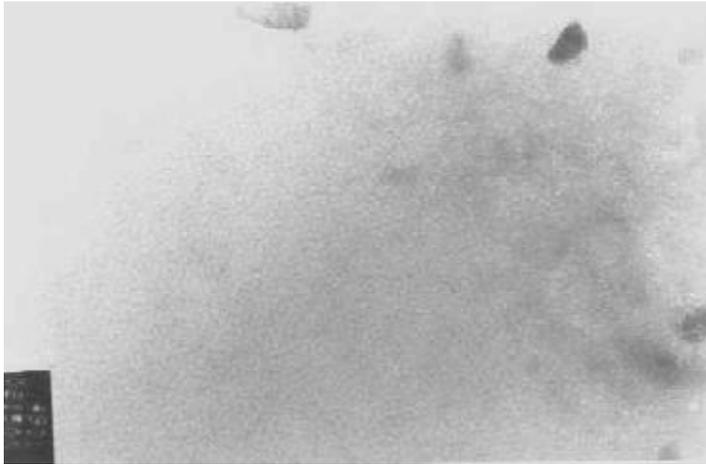


Figura 13. Fotografía TEM de la zona d, a 25 mm del centro de la soldadura, correspondiente al ejercicio 120A, 18V y 5.26 mm/s. (60400X), precipitados b' de 33 X 99 hm. J. Torres [8]

CONCLUSIONES

El comportamiento mecánico tras el soldeo se ve fuertemente influenciado por el aporte térmico recibido en el material durante su unión, estableciendo diferentes zonas, donde resultan ser interesantes la línea de fusión y la defectología del cordón, que potencian la falla en esa posición.

El estudio microscópico ha puesto de manifiesto tres zonas claramente diferenciadas: la zona de fusión, que permite la visualización de la defectología másica del cordón de soldadura, la línea de fusión con la observación de los eutécticos presentes y la zona afectada por el calor de la soldadura, que se extiende hasta aproximadamente unos 35 mm, donde se observan regiones recristalizadas y sobreenviejadas.

Las fallas de la unión se producen mayoritariamente en la zona afectada por el calor y en aquellas distancias que se corresponden con los mínimos de dureza.

El estudio pormenorizado de la zona afectada por el calor de aporte realizado a 3,7 y 13 mm de la unión, mediante Calorimetría Diferencial de Barrido y corroborado por la observación con la microscopía electrónica de transmisión, ha permitido la evaluación de los cambios en la precipitación de las fases endurecedoras y la asignación de éstos al perfil de microdureza encontrado.

El análisis realizado con la velocidad de avance durante el soldeo indica que la presencia de zonas GPI, picos entre 90 y 190°C, sólo se detecta en los primeros 3 mm, y muestra cierta uniformidad a mayores distancias e independiente de la velocidad.

Las bajas velocidades de soldeo afectan más significativamente a la zona de fusión, lo cual propicia la disolución de los precipitados endurecedores durante el calentamiento, lo que a la vez hace caer la dureza en esta zona a valores mínimos.

De las cuatro zonas propuestas en este estudio, la más fuertemente afectada es la de dilución, situada a unos 3 mm del centro de la soldadura, donde se registra la caída más acentuada de la dureza. Esta es una zona de alta disolución de los precipitados endurecedores, y es la causa de las fracturas en el 90% de las probetas ensayadas a tracción.

El Programa de elementos finitos utilizado en esta investigación para calcular las temperaturas que se alcanzan a través de la soldadura permite predecir estos valores con una desviación bastante aceptable de + -3% con respecto a las temperaturas medidas con termocuplas.

Referencias

- [1] MALIN, V. Study of Metallurgical Phenomena in the haz of 6061-T6 Aluminum Welded Joints. *Welding Research Supplement*, 1995.
- [2] AKIO HIROSE, Hirotaka Todaka, Hiroto Yamaoka, Nobutaka Kurosawa, and Kojiro F, Kobayashi. Quantitative Evaluation of Softened Regions in Weld Heat-Affected Zones of 6061-T6 Aluminum Alloy- Characterizing of the Laser Beam Welding Process. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1999 .
- [3] Yutaka, Sato, Hiroyuki Kokawa, Masatoshi Enomoto and Shigetoshi Jogan. Microstructural Evolution of 6063 Aluminum during Friction-Stir Welding. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1999.
- [4] MOORE, J.E., BIBBY, M.J. y GOLDAK, J. A comparison of the pint source and Finite Elements Schemes for computing weld cooling. *Proceedings of the JDC university research symposium*, ASM. Toronto, 1985.
- [5] MEYER, B.C., DOYEN, H. EMANOWSKI, D., TEMPUS, G. *et al.* Dispersoid-free-zones in the heat-affected zone of aluminum alloy welds. *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 31A, mayo, 2000.
- [6] GUPTA, A.K., JENA, A.K and LLOYID, D.J. Application of Differential Scanning Calorimetry to the Processing of Aluminum Alloys. *Proceedings of ICAA*, 1998.
- [7] ZHANG, D.L. AND ZHENG, L. *Metall. Mater. Trans*, vol. 27A, 1996.
- [8] TORRES S, Jaime. Optimización de un procedimiento de soldadura MIG para la aleación de aluminio AA 6061-T6 a través del control del calor suministrado. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia (España), 2001.