

Consideraciones sobre la soldabilidad de la aleación AA 5186 mediante el procedimiento GMAW



Valentín Miguel-Eguía*

Alberto Martínez-Martínez **

José A. Padilla-Sevilla*

Juana Coello-Sobrino*

María Carmen Manjabacas-Tendero*

Antonio Calatayud-Colomer*

Dr. Ingeniero Industrial

Ingeniero Técnico Industrial

Ingeniero Técnico Industrial

Dr. Ciencias Químicas

Dr. Ciencias Químicas

Dr. Ingeniero Aeronáutico

* UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA. Escuela de Ingenieros Industriales Albacete.

Avda. España, s/n - 02006 Albacete. Tfno: +34 967 599 200. valentin.miguel@uclm.es

** UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA. Instituto de Desarrollo Regional.

Avda. España, s/n - 02006 Albacete

Recibido: 28/09/2012 • Aceptado: 03/01/2013

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5395>

SOME CONSIDERATIONS ABOUT THE WELDABILITY OF THE AA 5186 ALUMINUM ALLOY BY GMAW PROCESS

ABSTRACT

- The aluminum alloys of the 5XXX series present a high weldability. However, at the present time, several proposals have been proposed for improving the behavior of these joints. These proposals are based on either specific chemical contents of the alloy elements or mechanical works on the weld beads. Moreover, industrial welding processes are carried out selecting operating parameters that sometimes have not been experimented sufficiently before. In this research paper GMAW welded joints of AA 5186 aluminum alloy have been researched. The influence of current, welding speed and shielding gas flow on the appearing porosity and on metallurgical segregation. The range of the values selected for the welding parameters have been taken from the industrial experience and with total penetration tests. It has been experimented with a heat input values from 325 to 830 kJ/m, with gas flows from 2 to 26 l/min and with welding speeds from 25 to 100 cm/min. The influence of gas nature has been also considered and tests have run with argon and argon-helium mix. Results demonstrated that shielding gas flow must be similar for the root and the heat of the bead. Welding speed allows control the microstructure that is obtained in the joint. High velocities lead to achieve uniform and non segregated metallurgical structures.
- **Key Words:** weldability, AA 5185, GMAW, heat affected zone, mechanical properties.

RESUMEN

Las aleaciones de aluminio de la serie AA 5XXX presentan una buena soldabilidad. Recientemente se han planteado propuestas para la mejora del comportamiento de estas uniones basadas bien en formulaciones específicas de los elementos que forman parte de la aleación, bien en operaciones mecánicas llevadas a cabo sobre el cordón de soldadura, aunque habitualmente los procedimientos de soldadura industriales son ejecutados con parámetros que no han sido experimentados suficientemente.

En el presente trabajo de investigación se analiza el comportamiento mecánico de uniones soldadas de la aleación 5186 realizadas mediante el proceso GMAW automático. Se investiga la influencia de la intensidad de soldadura, gas de protección y velocidad de soldeo sobre la porosidad y la segregación. Los rangos de variación de los parámetros se han establecido teniendo en cuenta la experiencia industrial en la realización de este tipo de uniones. Se ha experimentado con un calor aportado variable desde 325 a 830 kJ/m, un caudal de gas comprendido entre 2 y 26 l/min y con velocidades de soldadura desde 25 a 100 cm/min. También se ha considerado la influencia de la naturaleza del gas experimentando con argón y con mezcla argón-helio. Los resultados obtenidos justifican el empleo de caudales de gas de protección similares para la raíz del cordón que los empleados en la boquilla de soldadura. La intensidad de corriente, dentro de los límites de aplicación razonables,

no presenta una influencia importante en el proceso. En cambio, la velocidad de soldadura permite ajustar la estructura obtenida en el cordón de soldadura favoreciendo las altas velocidades las estructuras poco segregadas con una precipitación uniforme de compuestos que mejoran el comportamiento de la unión.

Palabras Clave: soldabilidad, AA 5185, GMAW, zona afectada térmicamente, comportamiento mecánico.

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio de la serie 5xxx son consideradas aptas para aplicaciones que requieran uniones soldadas. Existe una cierta gama de composiciones químicas disponibles, siendo el magnesio el elemento más representativo de su composición, presentándose en proporciones que van desde el 3,5 al 5,5 %. La formación de solución sólida del aluminio con Mg y la deformación plástica son los responsables de que la aleación adquiera una resistencia aceptable.

Otros elementos característicos de estas aleaciones son el Mn, que suele aparecer combinado en la forma $Al_6(MnFe)$, el Si y el Fe que aparecen como impurezas. Como consecuencia, existen segundas fases que contienen Fe, Mn y Si [1]. El Mn ayuda a mantener la estructura granular de la chapa, en tanto que el Fe y el Si en pequeños porcentajes permiten alcanzar algunas propiedades físicas, favoreciendo este último una estructura recristalizada fina [2]. Cabe indicar también la presencia de otros elementos, como el Cr que suele actuar como afinador de grano combinado en la forma $Al_{12}Mg_2Cr$ y el Cu, que suele adicionarse para mejorar la resistencia a la corrosión [1]. No obstante la acción específica de cada uno de los elementos en la aleación es objeto de diversas interpretaciones en función de los porcentajes en los que estén presentes [2-4].

Aunque las aleaciones de la serie 5xxx son consideradas en general como aptas para el soldeo con unas características aceptables para los usos a las que suelen ir destinadas [2], existe cierto interés científico en mejorar el comportamiento de las uniones soldadas de estos materiales basándose en el diseño de la propia aleación, esto es, seleccionando minuciosamente los elementos y contenidos de los mismos o la combinación de determinados elementos.

Otra posibilidad de mejorar las propiedades mecánicas de este tipo de uniones consiste en el control de la operación de soldadura. Así, uno de los aspectos a tener en cuenta tiene que ver con la defectología que aparece, como son los defectos existentes en la raíz del cordón. Una práctica posible para mejorar la calidad de la soldadura en aleaciones de aluminio soldadas mediante la técnica MIG consiste en refundir la raíz del cordón mediante la técnica TIG aplastando la zona. Este tratamiento además de evitar defectos mejora el comportamiento frente a doblado de la aleación [5].

La diferencia de dureza existente en el cordón, la zona

afectada térmicamente y el metal base depende de la aleación empleada como metal de aporte y del tratamiento mecánico del metal base. Las diferencias de dureza obtenidas pueden ser elevadas. Peel et al [6] obtienen diferencias de dureza superiores a 55 HV en una aleación AA 5083 de dureza 130 HV soldada mediante fricción. Calcraft et al [7] trabajan con dos aleaciones diferentes, AA 5456 y AA 5383 de dureza 98 HV, obteniendo durezas de 85 y 75 HV en la ZAT y el cordón respectivamente. Las soldaduras fueron realizadas con un metal de aporte AA 5356. Las experiencias indicadas corresponden a procesos de soldadura básicamente homogéneos ya que no se ha empleado material de aporte [6] o éste es de composición similar a la del metal base [7]. Resulta indicado elegir consumibles de soldadura de composiciones similares al metal base en aleaciones de la serie 5xxx con altos contenidos en Mg [8].

El gas empleado en la protección en la soldadura GMAW de aleaciones de aluminio influye significativamente en el proceso. Generalmente el argón y las mezclas argón-helio suelen ser empleadas para estos fines. Aunque son bien conocidas algunas propiedades de estos gases, su influencia sobre el fenómeno del transporte en el arco, la formación del cordón y la calidad de la soldadura debe ser considerada. Algunos autores establecen efectos negativos del exceso de flujo de gas [9], [10]. Zao et al [11] realizan una modelización que permite deducir que en una mezcla argón-helio, conforme aumenta el contenido de este último, se produce un mayor grado de contracción en el arco, así como mayor tamaño de las gotas-spray generadas en éste.

En el presente trabajo se investiga el efecto de diversos parámetros en el proceso de soldadura automática GMAW de una aleación AA 5186 estableciendo como indicadores del comportamiento de la unión la resistencia y la dureza del material, así como la aptitud al doblado. Se analiza el efecto de los diferentes parámetros sobre la microestructura de las diversas zonas de la unión, así como la defectología encontrada mediante inspección radiográfica.

Las aleaciones AA 5186 se caracterizan porque proporcionan un elevado valor del producto resistencia a tracción x alargamiento, $R_m \times A$. La resistencia a tracción supera los 275 MPa y el alargamiento en la rotura es superior a 17,5%, por lo que el producto de ambos valores es superior a 6500 e incluso a 7500 en composiciones bien controladas. Las aleaciones AA5186 no solo proporcionan un elevado valor del producto $R_m \times A$, sino también un alto valor de A , lo que favorece el doblado de la chapa y facilita su uso en construcciones mecánicas [12]. El empleo de las aleaciones AA 5186 es típico en depósitos para almacenamiento y transporte de líquidos en las que la chapa es soldada mediante la técnica GMAW, empleando parámetros establecidos como consecuencia de la experiencia adquirida en el proceso y teniendo en cuenta como únicos indicadores los defectos observados en la inspección de las uniones. No existen estudios experimentales específicos con este tipo de aleaciones dirigidos a la evaluación de los parámetros de soldeo en la calidad metalúrgica de la unión.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material ensayado es chapa de 5 mm de espesor de la aleación AA 5186 laminada en frío. La composición química ha sido facilitada mediante certificado del suministrador y se detalla en la Tabla I. En la Tabla II se indican las propiedades mecánicas de la aleación en estado de recepción obtenidas experimentalmente mediante la realización de ensayos de tracción. Los cupones de soldadura tenían unas dimensiones de 250 x 200 mm², Fig. (1).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,1220	0,1770	0,0490	0,3770	4,7470	0,0020	0,0040	0,0190

Tabla I: Composición química de la aleación AA 5186

Límite elástico R _p (MPa)	Resistencia tracción R _m (MPa)	Alargamiento rotura A %
100	220	21,2

Tabla II: Características mecánicas de la aleación AA 5186

Las muestras soldadas y los valores de los parámetros de soldeo considerados se indican en la Tabla III. La distancia de la antorcha a la superficie del material, así como el

diámetro de la boquilla de la antorcha empleada, aparece también en dicha tabla. El material de aportación utilizado fue alambre de aleación AA 5186 de 1,2 mm de diámetro. Las uniones fueron efectuadas a tope sin preparación de bordes. Se experimentó con argón puro comercial como gas de protección y con una mezcla 65% argón-35% helio.

Los valores correspondientes a los parámetros de soldeo experimentados fueron establecidos teniendo en cuenta la estabilidad de arco, la obtención de uniones a penetración completa y la experiencia industrial en este tipo de aplicaciones. De este modo se determinó un valor de referencia para todos los parámetros. El rango de variación de los mismos fue considerado a partir de los anteriores valores con el objetivo de evaluar las tendencias de comportamiento de la unión. También fueron considerados valores encontrados en aplicaciones similares en la literatura [7], [13].

Para investigar la influencia de los parámetros del proceso en el comportamiento del material, se realizaron ensayos de microdureza, tracción y doblado. Mediante inspección radiográfica se evaluó la defectología existente en cada uno de los cordones. Finalmente, se ha llevado a cabo un análisis metalográfico mediante microscopía óptica.

Se realizaron lecturas de microdureza *Vickers* 100 en los que la disposición de las medidas a realizar se estableció según la norma UNE EN ISO 9015-2 [14]. Las zonas medidas en cada una de las uniones se indican en la Fig. (2).

Ensayo	Intens. (A)	Tensión (V)	Caudal gas raíz (l/min)	Caudal gas cordón (l/min)	Veloc. Soldeo (cm/min)	Distanc. antorcha (mm)	Ø antorcha (mm)	Gas
C-1	210	23,1	5	18	35	10	16	Argón
C-2	211	23,6	5	26	35	10	16	Argón
C-3	212	24	5	8	35	10	16	Argón
C-4	212	24	5	13	35	10	16	Argón
C-5	200	23,6	5	22	35	10	16	Argón
C-6	200	23,5	5	2	35	10	16	Argón
C-7	201	24,2	0	18	35	10	16	Mix
C-8	210	24	5	16	65	9	16	Mix
I-1	100	19	5	16	35	9	20	Mix
I-2	160	27	5	16	35	9	20	Mix
I-3	200	29,5	5	16	35	9	20	Mix
I-4	250	26,6	5	16	35	9	20	Mix
V-1	210	24	5	16	35	9	20	Mix
V-2	210	24	5	16	50	9	20	Mix
V-3	210	24	5	16	65	9	20	Mix
V-4	210	24	5	16	25	9	20	Mix
V-5	210	24	5	16	85	9	20	Mix
V-6	210	24	5	16	100	9	20	Mix

Tabla III: Condiciones experimentales de soldadura

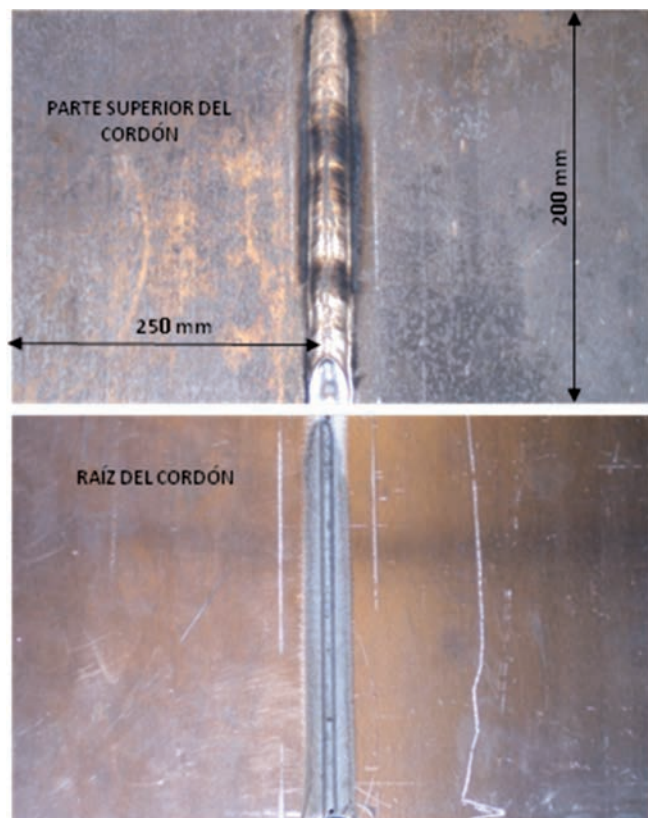


Fig. 1: Dimensiones de los cupones de soldadura y aspecto general de ambas caras de una unión soldada

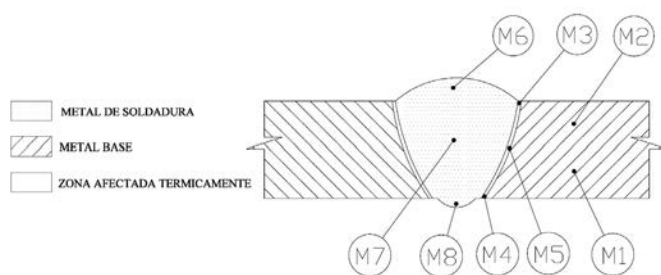


Fig. 2: Zonas de medición de microdurezas, UNE EN ISO 9015-2[14]

Para evaluar la resistencia a la tracción de las uniones, se mecanizaron probetas de ensayo conforme a la norma UNE EN ISO 4136 [15]. Los sobreespesores, tanto de la zona del cordón como de la raíz fueron convenientemente desbastados. Se efectuaron dos ensayos de tracción de cada una de las uniones realizadas, promediándose los valores de resistencia a la tracción obtenidos.

Los ensayos radiográficos se han llevado a cabo en todas las muestras soldadas conforme a lo establecido en las normas UNE-EN 1435 [16] y UNE-EN 1435/1M [17]. El equipo radiográfico utilizado fue de la marca Philips modelo Macrotank G-200 que utiliza Ir-192, la clase de tecnología radiográfica es A y la tensión del tubo es de 140 kV.

Los ensayos de doblado se llevaron a cabo de acuerdo

con la norma UNE EN ISO 5173 [18]. Los ensayos fueron realizados con mandrino de doblado empleando el puente de flexión de una máquina universal de ensayos. Se ensayaron dos probetas de cada uno de los cupones de soldadura, correspondientes a la parte del cordón y de la raíz, respectivamente, Fig. (3).

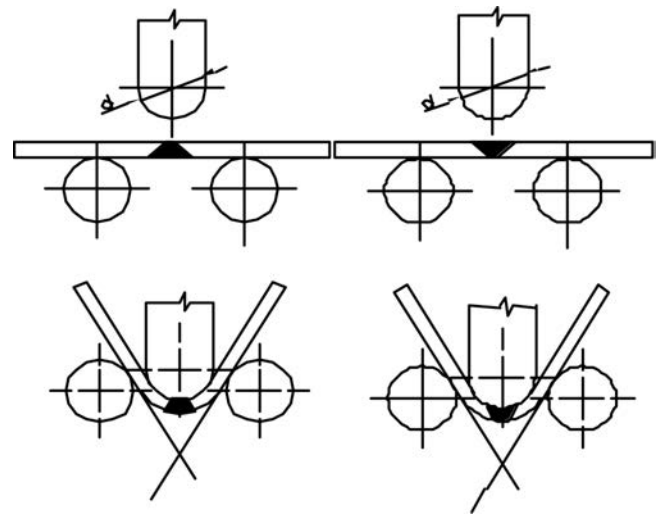


Fig. 3: Ensayos de doblado realizados sobre probetas en la raíz y en la cabeza del cordón, UNE EN ISO 5173[18]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA

En la Tabla IV se recopilan los resultados de defectología obtenidos mediante Rayos X. Como puede observarse, la porosidad es un defecto, prácticamente inevitable en la soldadura de la aleación. El argón como gas de protección se comporta mejor ya que las disconformidades obtenidas son del 20%, teniendo en cuenta que a partir de 8l/min, de 5 ensayos sólo uno de los cordones es no conforme. En condiciones similares de soldadura, ensayos I2, I3, I4, V1, V2 y V3 con mezcla Ar-He, se obtienen 3 disconformidades, lo que supone un 50%. Si se consideran todos los ensayos efectuados con gas mezcla, exceptuando el C7 en el que el cordón de raíz carece de protección, las disconformidades son 5 de 11 ensayos, aproximadamente el 50% también.

3.2. MICRODUREZA

El análisis de los valores de microdureza obtenidos permite afirmar que no existen diferencias significativas entre las diversas zonas de la unión soldada. En términos generales la zona afectada térmicamente y el metal base tienen aproximadamente la misma dureza de valor medio 85HV. El cordón de soldadura presenta valores de dureza relativamente más bajos, pero próximos al valor indicado. Desde este punto de vista la unión se comporta de manera bastante uniforme en todos los casos como cabía esperar dado el ligero endurecimiento mecánico que presenta el

material en estado de recepción. No se puede establecer ningún tipo de correspondencia entre los parámetros de soldeo y los valores de dureza obtenidos en las diversas zonas de la unión.

Ensayo	Aa	Ab	B	C	D	Ea	Eb	F	G	CONFORMIDAD
C-1	X								X	SI
C-2	X								X	SI
C-3									X	SI
C-4	X					X				NO
C-5	X								X	SI
C-6	X					X		X		NO
C-7	X	X								NO
C-8	-		-	-	-	-	-	-	-	-----
I-1	X				X					NO
I-2								X		SI
I-3	X									SI
I-4	X									NO
V-1	X									NO
V-2	X									NO
V-3	X									SI
V-4	X									SI
V-5	X							X		SI
V-6	X									NO

Tabla IV: Resultados de la defectología detectada mediante rayos X. Aa-poros; Ab- porosidad vermicular; B-escoria; C-Falta de fusión; D-Falta de penetración; Ea-Fisura longitudinal; Eb-Fisura transversal; F-Mordedura de borde; G-Otros defectos

Ensayo	Rm (N/mm ²)	Posición de la rotura	Aspecto de la rotura	Morfologías de rotura.
C-1	336	Cordón de soldadura	Sup. regular, corte a 45º aprox.	
C-2	336	Cordón de soldadura	Sup. regular, corte a 45º aprox.	
C-3	344	Cordón de soldadura	Sup. regular, corte a 45º aprox.	
C-4	328	Cordón de soldadura	Sup. regular, corte a 45º aprox.	
C-5	335	Cordón de soldadura	Sup. regular, corte a 45º aprox.	
C-6	305	Cordón de soldadura	Sup. irregular, con numerosos poros y defectos.	
C-7	359	Cordón de soldadura	Sup. regular, corte a 45º aprox.	
C-8	336	Cordón de soldadura	Sup. irregular, con numerosos poros.	
I-1	129	Cordón de soldadura	No existe penetración en toda la sección.	
I-2	320	Cordón de soldadura	Superficie irregular.	
I-3	343	Cordón de soldadura	Superficie irregular, con numerosos poros.	
I-4	308	Cordón de soldadura	Superficie irregular	
V-1	331	Cordón de soldadura	Superficie irregular con numerosos poros	
V-2	313	Cordón de soldadura	Superficie irregular con numerosos poros	
V-3	-----	-----	-----	
V-4	346	Cordón de soldadura	Superficie irregular	
V-5	367	Metal base	Superficie regular, corte a 45º aprox.	
V-6	345	Unión soldadura, metal base	Superficie regular, corte a 45º aprox.	

Tabla V: Resultados de los ensayos de tracción

3.3. COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN

La resistencia a tracción de las uniones realizadas se indica en la Tabla V. Los valores establecidos se obtuvieron como media de dos ensayos por cupón de soldadura. Como puede observarse, ignorando el resultado para la muestra I-1 cuyo fallo ha sido debido a falta de penetración del cordón, únicamente en el caso de la soldadura realizada con un caudal de argón muy pobre, 2 l/min, el valor de resistencia es bajo. De hecho, caudales de 8l/min ya proporcionan resultados adecuados de resistencia a la tracción. La sección de rotura también es analizada en referencia a la defectología observada en la misma, siendo convenientemente indicado en la Tabla V. También se muestran distintas macrografías de la tipología de rotura que se indica. Como puede observarse, la presencia de poros en la rotura no está necesariamente correlacionada con la resistencia a la tracción obtenida.

A pesar de los resultados obtenidos en la inspección radiográfica el índice de soldabilidad, considerado como la relación entre la resistencia a la tracción de la unión soldada y del material base, Ec. (1), no es inferior a 0.8, correspondiente al ensayo C6, efectuado sin gas de protección [19].

$$I_s = \frac{R_{m-uniónC1}}{R_{m-metalbase}} = \frac{305}{367} = 0,83 \tag{1}$$

La velocidad de soldadura no influye significativamente en el índice de soldabilidad de la aleación ya que no se observa una tendencia de comportamiento en la resistencia a la tracción de las uniones efectuadas. Los valores más distantes presentan una diferencia inferior al 15%.

Dado que la deformación se concentra en el cordón de soldadura debido a su menor resistencia en comparación con el metal base, y teniendo en cuenta la anchura del cordón, el alargamiento normalizado en tracción no es representativo del comportamiento de la unión. Por ello se ha establecido como indicador de la deformación la estricción en la rotura [20]. Dado que la anchura de cordón varía notablemente con la velocidad de soldeo, se ha normalizado la estricción dividiéndola por la mencionada anchura, denominando ξ al indicador de la

deformación obtenido de esta manera. Considerando que la mayor parte de la deformación se produce en el ancho de la probeta, b y no en la dimensión del espesor, se ha procedido al cálculo de la estricción despreciando la variación de espesor en el material, conforme a la Ec. (2), Fig. (4).

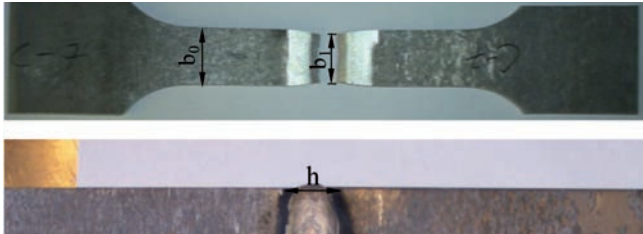


Fig. 4: Definición del indicador de deformación plástica ξ a partir de la estricción y de la anchura del cordón de soldadura

$$\xi = \frac{\frac{b_0 - b_1}{b_0} \cdot 100}{h} \quad (2)$$

En la Fig. (5) se representan los valores obtenidos en los ensayos realizados en función de la velocidad de soldadura. Se considera también como indicador comparativo de la tenacidad de la unión el producto de la resistencia a tracción del material y el valor ξ . Como se observa en la Fig. (5) ambos indicadores son equivalentes. Los valores se han obtenido promediando dos ensayos por cupón de soldadura, observándose una gran repetibilidad. Se puede establecer que las velocidades de soldadura más elevadas conducen a mayor tenacidad en la unión obtenida. En particular, cabe destacar los altos valores obtenidos para una velocidad de soldadura de 85 cm/min. Este ensayo corresponde a una de las probetas que rompió por el metal base. La otra probeta, que rompió por el cordón, presenta los valores que se indican en la Fig. (5), por lo que puede considerarse bastante fiable. En consecuencia, se puede afirmar que velocidades de soldadura superiores a 60 cm/min conducen a resultados de tenacidad en la unión comparativamente mayores que para menores velocidades de soldeo.

3.4. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

La estructura metalográfica obtenida, en términos generales puede describirse como la zona de metal base, consti-

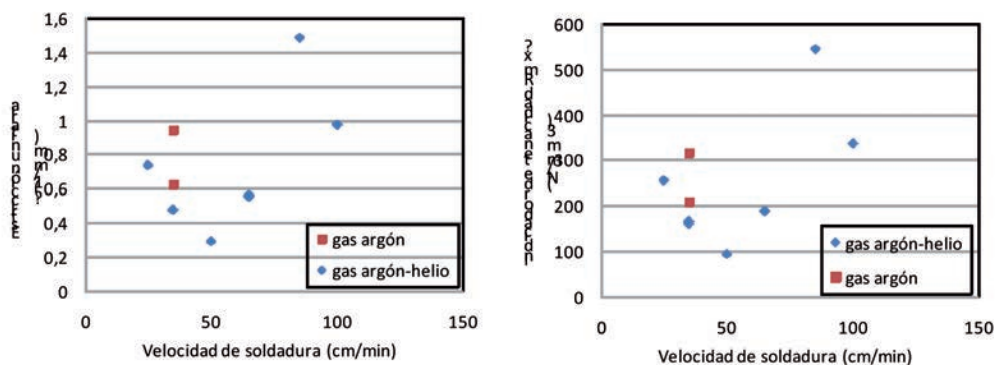


Fig. 5: Indicadores de la deformación, ξ , y de la tenacidad, $Rm\xi$, en función de la velocidad de soldadura; Intensidad 210A

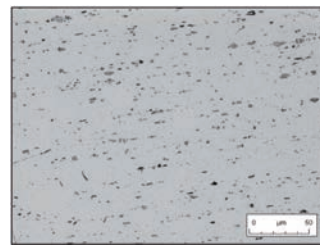


Fig. 6: Metal base. Ataque con HF 0,1%. 100X

tuida típicamente por compuestos precipitados de acuerdo a lo indicado en la literatura distribuidos en la dirección de laminación del metal de manera más o menos uniforme, aunque se aprecian algunos tamaños de compuesto grandes.

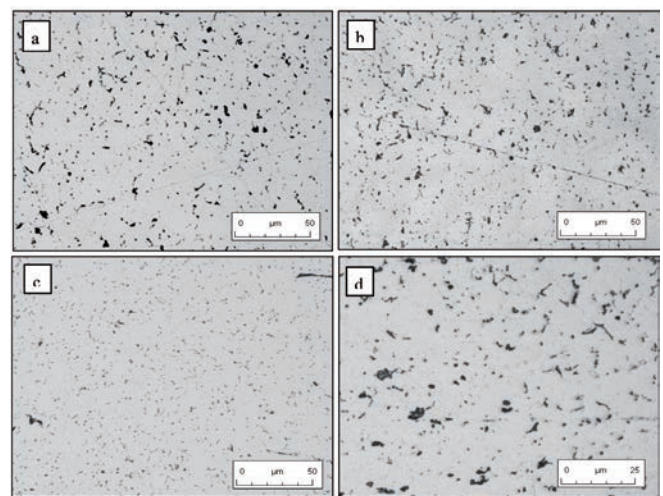


Fig. 7: Zona afectada térmicamente de diversas probetas soldadas bajo los mismos parámetros de soldadura. Ataque con HF 0,1%. a; Muestra C.1 b; Muestra C3. c y d; Muestra C4.

La zona afectada térmicamente, que constituye una estrecha franja en torno al cordón, presenta una estructura de compuestos precipitados de mayor tamaño que en el metal base. La precipitación de compuestos también es mayor por lo que cabe interpretar que el metal base tiene una estructura de solución sólida sobresaturada+compuestos intermetálicos precipitados, Fig. (6). El metal base que es calentado en la

zona de metal afectado térmicamente por la soldadura, conduce a una solución sólida con menor grado de sobresaturación de soluto, pero con mayor número de compuestos precipitados que, en gran medida conducen a la coalescencia y crecimiento, generalmente en borde de grano, Fig. (7). Así mismo, el cordón de soldadura presenta una estructura muy homogé-

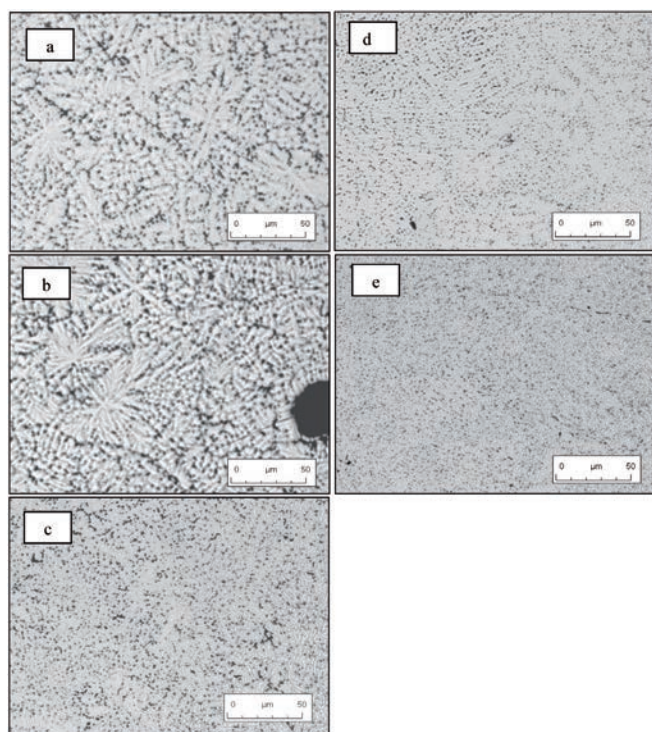


Fig. 8: Microestructura correspondiente a la zona central del cordón de soldadura. Ataque con HF 0,1%. 100X. a; Muestra V1. b; Muestra V2. c; Muestra V3. d; Muestra V5. e; Muestra V6.

nea de crecimiento dendrítico con compuestos precipitados interdendríticamente.

Desde el punto de vista de la estructura metalográfica obtenida, sí que se aprecian diferencias en función de los parámetros de soldeo, particularmente en función de la velocidad de soldadura, Fig. (8).

Las velocidades de soldadura más bajas conducen a estructuras de crecimiento ramificado muy segregadas, tal y como se observa con mayor detalle en la Fig. (9), a diferencia de las obtenidas a las velocidades más altas, V5 y V6, que presentan estructuras menos segregadas y con una distribución mucho más uniforme de los compuestos precipitados. La velocidad de 65 cm/min indica claramente la transición en las estructuras metalográficas obtenidas a alta y baja velocidad de soldeo. La justificación a este comportamiento es evidente teniendo en cuenta que una mayor velocidad de soldadura implica un menor calor aportado y un enfriamiento más rápido. La zona de raíz

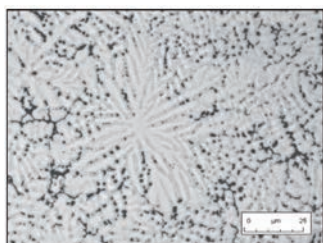


Fig. 9: Estructura del cordón de soldadura (zona central) fuertemente segregada. Probeta V2, HF 0,1%, 200X

del cordón presenta un comportamiento similar con la velocidad de soldadura, lógicamente, pero si se comparan las microestructuras con las de la zona central del cordón se deduce que la velocidad de enfriamiento es menor en la zona de raíz. Así, se observan compuestos precipitados de mayor tamaño en borde de grano en las uniones realizadas a bajas velocidades, V1 y V2. Las uniones realizadas a las mayores velocidades, V5 y V6, presentan una subestructura celular más fina y menos ramificada con precipitación uniforme de los compuestos. No obstante la subestructura es más ramificada que para la zona central del cordón. También se puede considerar la velocidad correspondiente a la unión V3 como de transición entre las tipologías microestructurales analizadas, Fig. (10).

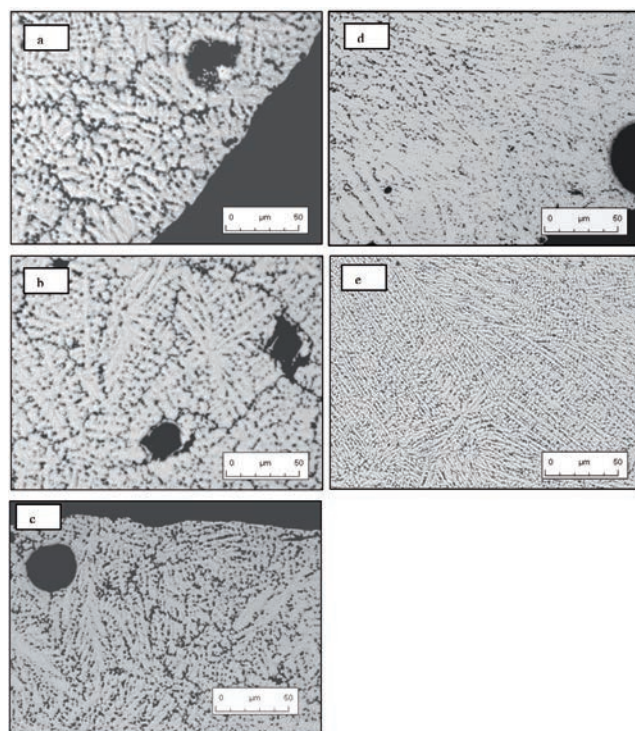


Fig. 10: Estructuras del cordón de raíz en función de la velocidad de soldadura; a-e; Muestras V1, V2, V3, V5 y V6 (35, 50, 65, 85 y 100cm/min).

Es destacable que la formación de poros predomina en la raíz del cordón. La morfología de los poros observados es similar tanto si se usa gas de protección en la zona como si no es así, ensayo C7. No obstante, el empleo de mayores caudales de gas de protección quedaría justificado por la obtención de una estructura metalográfica más uniforme, debido a un enfriamiento más rápido.

Dada la aplicación de este tipo de soldaduras en depósitos y cisternas, resulta importante un buen comportamiento frente a la corrosión, siendo las estructuras metalográficas obtenidas con altas velocidades de soldeo las más adecuadas dado que presentan menor segregación con una distribución de precipitados uniforme y de pequeño tamaño. La presencia de poros, particularmente en la raíz de la soldadura justificaría

Ensayo	Tipos de defectos		
	Fractura	Grietas sin fractura	Observaciones
C-1	-	-	No tiene defectos
C-2	-	X	Grieta profunda
C-3	-	-	No tiene defectos visibles
C-4	-	X	Grieta cerca de los bordes
C-5	-	X	Grietas de gran tamaño
C-6	X	-	Elevado numero de huecos
C-7	-	-	No tiene defectos visibles
C-8	-	X	Grietas cerca de los bordes
I-1	X	-	Grieta debida a falta de penetración
I-2	X	-	
I-3	-	X	Numerosas grietas y poros superficiales
I-4	-	X	
V-1	-	X	Grieta profunda y numerosas grietas más pequeñas. Rotura cerca del limite de soldadura.
V-2	X	-	Numerosos poros superficiales
V-4	-	-	No tiene defectos visibles
V-5	-	X	Superficie rugosa
V-6	-	X	Desprendimiento lamina superficial

Tabla VI: Resultados de ensayos de doblado seleccionando la deformación máxima en la raíz del cordón de soldadura. grietas y poros superficiales

el mecanizado, si este resulta viable, de esta zona del cordón o bien el recalado mecánico tal y como se propone desde la literatura [5]. Con ello se disminuiría la existencia de poros que se comportarían como defectos iniciales para la propagación de grietas por fatiga, disminuyendo la vida de servicio del depósito.

zadas del ensayo, la deformación unitaria, ϵ , provocada en las fibras exteriores e interiores de la sección del material, respectivamente a tracción y a compresión pueden ser eva-

$$\epsilon = \frac{t/2}{R} = \frac{2,5}{12,5 + 2,5} = 0,16 \quad (3)$$

Nº Pieza	Tipos de defectos		
	Fractura	Grietas sin fractura	Observaciones
C-1	-	-	No tiene defectos visibles
C-2	-	-	No tiene defectos visibles
C-3	-	-	No tiene defectos visibles
C-4	-	-	Superficie rugosa
C-5	-	-	Superficie rugosa
C-6	-	X	Numerosas grietas en toda la superficie
C-7	-	-	No tiene defectos visibles
C-8	X	-	Grieta profunda y numerosas grietas pequeñas
I-1	-	-	Falta de penetración
I-2	-	X	Grieta profunda en el borde
I-3	-	-	Poros en la cara interna
I-4	-	-	No tiene defectos visibles
V-1	-	-	Poros en la cara interna
V-2	-	X	Grietas y poros en la cara interna
V-4	-	-	No tiene defectos visibles
V-5	-	-	Poros superficiales
V-6	-	X	Grietas y poros superficiales

Tabla VII: Resultados de ensayos de doblado seleccionando la deformación máxima en la cabeza del cordón de soldadura

Los resultados correspondientes a la microestructura de las diversas zonas, así como las expectativas de comportamiento, son corroborados por los resultados de tenacidad obtenidos, Fig. (5).

3.5. ENSAYOS DE DOBLADO

En la Tabla VI se establecen los resultados obtenidos de los ensayos de doblado de la cara de raíz, esto es sometiendo a las fibras de la raíz a tracción por ser esta zona la parte externa del ensayo. En la Tabla VII se recopilan los resultados correspondientes a la cara del cordón. Conforme a las condiciones normali-

luadas conforme a la Ec. (3), considerando que el radio de curvatura R, es suficientemente grande respecto del espesor del material, t, pudiendo aplicar la aproximación indicada en dicha expresión [21].

La deformación realizada en el ensayo es adecuada para establecer la conformabilidad de la unión conforme a los estándares esperables en este tipo de aplicaciones [2].

Las uniones C6, V1 y I2 sufren rotura en los ensayos efectuados por la cara de raíz; la unión C8 presenta rotura por la cara del cordón. No

obstante, los ensayos que rompen en la cara de raíz presentan mal comportamiento también en la cara del cordón. En general, el comportamiento es peor en la raíz que en la parte superior del cordón de soldadura. Según estos resultados, el cordón de soldadura tiene un comportamiento aceptable desde el punto de vista de la conformabilidad de la unión. El comportamiento de la raíz debería mejorarse y obtener un comportamiento más homogéneo con respecto al resto del cordón.

4. CONCLUSIONES

El argón proporciona una mejor protección en la soldadura, cuestión que puede justificarse en base a la mayor densidad del argón frente al helio. El empleo de helio no aporta ninguna ventaja en el proceso ya que el arco resulta excesivamente energético con velocidades de soldadura habituales en este tipo de proceso. Es suficiente pequeños caudales de gas para proteger la soldadura. Caudales superiores a 16 l/min no conducen a mejorar significativamente la defectología obtenida. En este sentido, sería deseable un caudal de gas de protección mayor para la protección de raíz, similar al empleado en la deposición del cordón, aspecto éste que no suele tenerse en cuenta habitualmente ya que se considera secundaria la protección de la raíz del cordón.

Desde un punto de vista mecánico, la zona afectada térmicamente, que es muy estrecha, no representa ninguna influencia notable en el comportamiento mecánico de la unión. La intensidad de corriente, dentro de los límites de aplicación razonables, no presenta una influencia importante en los resultados que se obtienen.

La velocidad de soldadura resulta un parámetro que permite ajustar la estructura metalográfica obtenida en el cordón de soldadura. Velocidades superiores a 65cm/min, conducen a estructuras menos segregadas con una distribución de compuestos precipitados muy uniforme y predeciblemente de comportamiento mejor desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión de la unión, lo que resulta especialmente interesante en la fabricación industrial de depósitos y cisternas ya que este parámetro es muy fácil de controlar industrialmente. Los beneficios potenciales de la homogeneidad de las uniones soldadas podrían ser especialmente importantes en su comportamiento a fatiga, lo que será objeto de futuros trabajos de investigación.

5. AGRADECIMENTOS

Los autores del presente trabajo quieren agradecer a la empresa PARCISA SLU, su colaboración en la realización de las soldaduras bajo las condiciones experimentadas en las instalaciones que dicha empresa posee en Villarrobledo (Albacete). También se agradece su colaboración en la realización de los ensayos de inspección radiográfica de las uniones soldadas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Menzemer C, Lam PC, Srivatsan TS, Wittel C F. "An investigation of fusion zone microstructures of welded aluminum alloy joints". *Mater. Letters* 41 (1999) 192–197. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-577X\(99\)00129-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-577X(99)00129-9)
- [2] Pillet G, Gilledelement J, Dif J, Henon C, Ribes H. "Al-Mg alloy products suitable for welded construction". Patent US 7 211 161 B2, May, 1 (2007).
- [3] Hoffman J, Schmidt MP. "AlMgMn alloy product for welded construction with improved corrosion resistance". Patent US 5,908,518, June, 1 (1999).
- [4] Hoffman J, Raynaud G, Schmidt MP, Ribes H. "AlMg aluminium alloys for welded constructions having improved mechanical characteristics". Patent 6,056,836, May, 2 (2000).
- [5] Feng F, Christy W H. "Welded aluminium sheets and process therefore". Patent US 2007/0045260 A1, Marcc, 1 (2007).
- [6] Pee, M, Stewer A, Preuss M, Whithers P J. "Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds". *Acta Mat.*, 51 (2003) 4791–4801. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00319-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00319-7)
- [7] Calcraft RC, Wahab MA, Viano DM, Schumann GO, Phillips RH, Ahmed NU. "The development of the welding procedures and fatigue of butt-welded structures of aluminium-AA5383". *J. Mater. Process. Tech.* 92–93 (1999) 60–65. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00156-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00156-9)
- [8] ASM International, *Metals Handbook Vol. 6, Welding, brazing and soldering*, ASM International USA, 1993.
- [9] Miguel V, Martínez A, Manjabacas MC, Coello J, Calatayud, A. "Electrical evaluation of welding machines based on the arc properties. application to SMAW, GMAW and GTAW processes" *AIP Conference Proceedings*, 1.181, USA., 2009, pp. 170–179.
- [10] Martínez-Conesa EJ, Estrems M, Miguel V. "A mathematical approach based on finite differences method for analyzing the temperature field in arc welding of stainless steel thin sheets". *Rev. Metal. España*, 46 (6), (2010) 511–519.
- [11] Rao ZH, Hu J, Liao SM, Tsai HL. "Modeling of the transport phenomena in GMAW using argon-helium mixtures. Part I – The arc". *Int. J. Heat and Mass Trans.* 53 (2010) 5707–5721. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.08.009>
- [12] Pillet G, Gilledelement J, Dif J, Henon C, Ribes H. "Al-Mg alloy products suitable for welded construction". Patent US 2004/0003872 A1, Jan. 8 (2004).
- [13] Miguel V, Martínez-Conesa EJ, Segura F, Abellán E. "Optimización del proceso de soldadura GMAW de uniones a tope de la aleación de aluminio 6063 basada en la metodología de superficie de respuesta y en la geometría del cordón de soldadura". *Rev. Metal.* (in press).
- [14] UNE EN ISO 9015-2, "Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Ensayo de dureza. Parte 2: Ensayo de microdureza en uniones soldadas", 2011.
- [15] UNE EN ISO 4136, "Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Ensayo de tracción transversal", 2011.
- [16] UNE EN 1435, "Examen no destructivo de uniones soldadas. Examen radiográfico de uniones soldadas", 1998.
- [17] UNE EN 1435/1M, "Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo radiográfico de uniones soldadas", 2002.
- [18] UNE EN 5173, "Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Ensayo de doblado", 2011.
- [19] AWS, "Welding Handbook Vol. 4, Metals and their weldability", Ed AWS, 7th ed.; USA, 1984.
- [20] Martínez A, Miguel V, Coello J, Navarro A, Calatayud A, Manjabacas MC. "Analysis of the influence of the multipass welding, welding preheat and welding post heat treatments on the behaviour of GMAW joints of Hardox 400 microalloyed steel". *Rev. Metal.* 47 (1), (2011) 61–75. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalmadrid.1007>
- [21] Marciniak Z, Duncan J L, Hu SJ, "Mechanics of Sheet Metal Forming". Ed. Butterworth-Heinemann, 2nd ed; UK, 2002.