

Soldabilidad de las fundiciones de grafito esferoidal^(*)

Jesús Cembrero* y Manuel Pascual*

Resumen

En el presente artículo se analiza la soldabilidad de una fundición de grafito esferoidal (FGE) de composición determinada, efectuando soldaduras por arco manual con electrodos revestidos y oxiacetilénica, en probetas de esta fundición con dimensiones de 300 × 90 × 10 mm y ángulo de achaflanado de 60°. Se analiza también la influencia en la soldabilidad de la composición de los distintos electrodos utilizados, así como la influencia de las temperaturas de precalentamiento. Finalmente, se hace un análisis microestructural de las uniones: en el material a unir próximo a la soldadura, en la interfase metal-soldadura, y en el propio cordón de soldadura. Se correlacionan las características resistentes de la unión con la microestructura.

Palabras clave

Soldabilidad. Precalentamiento. Fundición de grafito esferoidal.

Weldability of spheroidal graphite cast iron**Abstract**

The weldability of a spheroidal graphite cast iron of a established chemical composition is analysed. Metal Arc Welding (MAW) and Oxyacetylene Welding (OAW) have been used on casting samples of 300 × 900 × 10 mm, with a groove angle of 60°. It is also analysed the influence on the weldability of the chemical composition of the different electrodes used, as well as the influence of the pre-heating temperature. Finally, microstructure analysis are performed on the joints: on the heat-affected-zone (the piece near the weld); the piece-weld interface; and the fusion-zone (the weld). Mechanical characteristics of the joint and its microstructure are correlated.

Keywords

Weldability. Pre-heating. Spheroidal graphite cast iron.

1. INTRODUCCIÓN

De las aleaciones de hierro, las fundiciones se caracterizan por contener carbono en mayor cantidad que los aceros (2-4,5 %), además de silicio, magnesio, fósforo y otros elementos. Se obtienen por colada, no se someten a procesos de deformación plástica ni en frío ni en caliente. En general, no son dúctiles ni maleables y no pueden forjarse ni laminarse.

Las bajas características mecánicas de las fundiciones son debidas a la presencia de láminas de grafito, que aparecen en el proceso de solidificación y originan discontinuidades en la matriz.

La presencia de pequeñas cantidades de magnesio favorece la formación de grafito esferoidal y, consecuentemente, la mejora de las características mecánicas de estas aleaciones.

En los procesos de conformado por soldadura, las características mecánicas de éstas están condicionadas por el material de aporte, así como por la

velocidad de enfriamiento y el posterior tratamiento térmico a que deben ser sometidas estas uniones.

2. MATERIAL UTILIZADO, COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS**2.1. Fundición de grafito esferoidal perlítica**

En esta fundición, el grafito adopta la forma de esferolitas, debido a la presencia de pequeñas cantidades de magnesio^[1], que es retenido por el hierro y repartido uniformemente por la matriz. Las características mecánicas de ésta se reflejan en la tabla I.

Su composición química, expresada en tanto por ciento en peso, es la siguiente:

C = 3,83 Mn = 0,15 S = 0,012 Ni = 0,01 Cu = 0,026
Si = 2,62 P = 0,027 Cr = 0,04 Mo < 0,01 Mg = 0,037

(*) Trabajo recibido el día 18 de enero de 1999 y aceptado en su forma final el 19 de octubre de 1999.

(*) Dpto. de Ingeniería Mecánica y de Materiales. ETS de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia (España)

Tabla I. Características mecánicas de la FGE*Table I. Mechanical characteristics of ECI*

Características mecánicas	Fundición de grafito laminar	Fundición de grafito esferoidal	
		De colada	Recocida
Resistencia (kg/mm ²)	30	47	40
Límite elástico (kg/mm ²)	-	33	27
Alargamiento (%)	0,5	6	13
Módulo de elasticidad (kg/mm ²)	12.300	16.500	13.500
Dureza Brinell	200-230	225-240	160-190
Resiliencia Charpy (sección 10 mm ²)	6,6	38	25
Límite de fatiga sin entallar (Kg/mm ²)	12,6	28	1,2

3. TIPOS DE SOLDADURA EMPLEADA

- Soldadura por arco manual con electrodo revestido^[2].
- Soldadura oxiacetilénica y soldadura MIG-MAG.

La de electrodo revestido es la más utilizada en los procesos de soldadura de fundición de grafito esferoidal debido a que, sometido el material a un calentamiento previo de 250-300 °C, la distorsión que experimenta éste es muy baja.

Las soldaduras oxiacetilénicas y MIG-MAG, se han realizado para comparar los resultados con la anterior.

4. TRATAMIENTOS TÉRMICOS APLICADOS A LA FGE

Una vez realizada la soldadura, debido al rápido enfriamiento que ésta experimenta, se temple, lo que le confiere una gran dureza y fragilidad que imposibilitaría una adecuada utilización del material a la vez que impide el mecanizado de las probetas^[3]. Por este motivo, y con la finalidad de recuperar la estructura se han realizado una serie de revenidos a distintas temperaturas. En la tabla II se indican los tratamientos y las características mecánicas resultantes después de la aplicación de los mismos.

Tabla II. Tratamientos térmicos aplicados*Table II. Application of heat treatments*

Tipo	Tratamiento	R (kg/mm ²)	LE (kg/mm ²)	ϵ (%)	HB	Resiliencia en probetas de 10 mm ²
FGE colada		47	34	6	205	38
Normalizado	2 h. a 850 °C.	49	36	4	213	35
	Enfriado en aire					
Temple en agua y revenido	2 h a 850 °C	63	57	3	419	7
	2 h. a 350 °C					
	2 h a 850 °C	87	83	5	325	10
	2 h. a 500 °C					
2 h a 850 °C	58	53	7	279	13	
2 h a 600 °C						
Temple a la llama	Temple superficial				663	
Recocido	2-4 h 850 °C 6-12 h 700 °C	39	28	13	174	25

5. PROBETAS

Las probetas se han mecanizado a partir de bloques de $300 \times 95 \times 12$ mm, obtenidos por moldeo. Mediante fresado, se han llevado a las dimensiones definitivas ($300 \times 90 \times 10$ mm). Posteriormente, también mediante un proceso de fresado, se ha preparado el borde de unión para la soldadura formando ángulo de achaflanado de 60° [4] entre las dos partes a unir, de esta forma se consigue una unión completa en todo el espesor.

Las probetas para soldadura oxiacetilénica se mecanizaron con espesores de 5 mm y con ángulos de 30° .

6. ELECTRODOS

Los electrodos empleados en la realización de las soldaduras, se han seleccionado atendiendo a la consecución de las características óptimas de la unión. Su composición se indica en la tabla III.

Tabla III. Electrodos utilizados en la soldadura de FGE

Table III.- Electrodes used in the ECI welding

Electrodo	Composición	
	Elemento	(%)
Fe-Ni	Ni	58
	C	< 1
	Mn	< 1
	Si	< 2
	Fe	resto
Fe-Ni	Ni	94
	C	< 1
	Mn	< 1
	Si	< 2
	Fe	< 2
Electrodo base níquel. Para soldadura de FGE. Sin precalentamiento ^[5]	base Ni	
Electrodo de varilla para soldadura MIG-MAG	C	0,11
	Si	0,7
	Mn	1,5
	Cr	25
	Ni	20
	Mo	0,5
Electrodo convencional de rutilo	Fe	resto
	C	< 0,1
	Mn	0,6
	Si	0,4
	S	<0,025
Electrodo de FGE. Perlítica, para soldadura autógena	Fe	resto
	varilla de FGE	

7. MÉTODOS DE SOLDEO

La soldadura con electrodos revestidos se ha realizado con corriente alterna con transformador y la intensidad máxima aplicada ha sido de 140 A y con polaridad directa. El cordón de soldadura se ha realizado en varias pasadas, en plano horizontal con ejecución de izquierda a derecha y ángulo de inclinación del electrodo, aproximadamente de 70° .

No obstante, estas soldaduras son de difícil ejecución, como ocurre en todas las soldaduras de fundiciones, siendo los inconvenientes más frecuentes los de: falta de penetración, descomposición del recubrimiento de los electrodos, excesiva intensidad, dificultad en la eliminación del recubrimiento y falta de fluidez.

Como solución a estos inconvenientes se optó por cambiar el electrodo cuando se ha consumido, aproximadamente, un tercio del mismo, con el fin de evitar su deterioro por descomposición (se evita la formación de poros o defectos internos). Este electrodo una vez frío se vuelve a utilizar.

Debido al calentamiento del material, la intensidad requerida va siendo menor pero, si se reduce ésta en exceso, podrían producirse pegaduras. Un cambio de electrodo, mucho antes de que se consuma, dará tiempo al enfriamiento del material sin tener que reducir la intensidad. Además, se puede aumentar la velocidad de desplazamiento con el fin de evitar que se queme el material de aportación.

Las soldaduras realizadas con electrodos de 58 y 94 % Ni se efectuaron después de un precalentamiento superficial a 300-350 y 250-300 °C respectivamente, con el fin de eliminar tensiones, evitando de esta manera la formación de poros y grietas en el cordón, facilitando, además, la fluidez con una menor intensidad (130 A). Estos cordones se realizaron con varias pasadas.

La soldadura MIG-MAG, se efectuó en atmósfera desoxidante de argón. Previamente se efectuó un precalentamiento superficial a 250-350 °C con el fin de evitar la formación de poros y grietas. Además, este precalentamiento aumenta la fluidez y permite utilizar intensidades de 120 A.

La soldadura con electrodo de rutilo se efectuó después de un calentamiento previo, con el mismo rango de temperaturas de los casos anteriores y tendente a evitar la formación de poros y grietas. En este caso la fluidez del metal de aporte fue menor.

La soldadura con electrodo base níquel, se realiza sin calentamiento previo. Con este material de

aporte la fluidez es mayor y, debido al tipo de recubrimiento, los defectos son mínimos.

La soldadura oxiacetilénica se realizó posteriormente a un precalentamiento térmico superficial a 300 °C para eliminar tensiones. La fluidez del material y, consecuentemente, su soldabilidad se favorece con la utilización de bórax.

Finalmente, para eliminar tensiones y recuperar la estructura, a todas las soldaduras se les aplicó un tratamiento térmico durante 2 h a 900 °C, enfriando posteriormente en el horno cerrado.

8. RESULTADOS OBTENIDOS

Se determinó la dureza Brinell (*HB*), resistencia a la rotura (*R*) límite elástico (*LE*) y ángulo de doblado en las probetas soldadas. Para la determinación de estas características mecánicas se realizaron, en todos los ensayos, series de tres medidas y con éstas se determinó el valor medio.

La *HB* se realizó con carga de 187,5 kg y bola de 2,5 mm de diámetro. Las medidas se tomaron en la soldadura, en la interfase metal-soldadura y en el metal a unir (en total, nueve medidas), conforme a la norma UNE EN 10003-1.

La determinación de la resistencia y del límite elástico se realizó en una máquina universal de ensayos conforme a la norma UNE EN 876. El ángulo

de doblado se determinó, también en una máquina universal de ensayos, conforme a la norma UNE EN 910, hasta la ruptura de la probeta. En la tabla IV se reflejan los resultados obtenidos.

En las figuras 1 a 7 se representan las diferentes microestructuras de las distintas soldaduras. En la figura 8 se representan las zonas de observación metalográfica en los distintos tipos de fracturas. Las figuras 9 a 15 corresponden a las fracturas observadas mediante SEM, así como el análisis de las mismas obtenido mediante EDS.

9. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la soldadura de fundición de grafito esferoidal, realizada con electrodo del 58 % Ni y sin tratamiento térmico previo (Fig. 1), se observa una falta de difusión entre el metal aportado en la soldadura y el metal base. Esta falta de difusión entre las dos matrices da lugar a una línea de separación muy bien definida, que influye en la baja resistencia de la unión, incluso si se compara con el metal base^[7]

La fractura del material se produjo por la intercara cordón-metal base, con una fractura de tipo dúctil, con gran deformación de la matriz ferrítica que contiene esferolitas de grafito^[8]. Además, el análisis EDS indica que sí se ha realizado una difusión de níquel (Fig. 9).

Tabla IV. Características mecánicas de FGE. empleando distintos electrodos y métodos de soldeo

Table IV. Mechanical characteristics of ECI using different electrodes and weldability method

Soldadura	Tipo de electrodo	<i>R</i> (kg/mm ²)	<i>LE</i> (kg/mm ²)	Alargamiento (%)	Ángulo de doblado	HB en interfase	HB en soldadura	HB en material
Sin tratamiento térmico previo	58 % Ni	23,26	22,03	2	15°	229	188	201
Con tratamiento térmico previo a 300-350 °C	58 % Ni	32,5	28,5	4	50°	229	170	216
Con tratamiento térmico previo a 250-300 °C	94 % Ni	36,6	31,5	4	25°	209	170	203
MIG-MAG. Con tratamiento térmico previo a 250 °C Atmósfera de argón	varilla desnuda	38,5	34,5	5,5	25°	243	163	338
Con calentamiento previo a 200-300 °C	rutilo	36,8	34,5	3	7°	230	250	178
Sin calentamiento previo	base níquel	32,0	29,1	5	15°	230	188,5	170
Autógena (Oxiacetilénica). Con calentamiento previo a 300 °C	varilla de FGE	27,5	18,5	1	15°	165	230	170

Por el contrario, en el análisis de la microestructura de la soldadura de FGE con electrodo del 58 % Ni y con tratamiento térmico previo (Fig. 2), se observa difusión entre el metal base y el de aporte. El grafito, aparece en la unión en forma de esferulitas y vermículos de poco tamaño.

El calentamiento previo, por una parte, elimina residuos y humedades evitando inclusiones de gases, tales como N_2 y H_2 ; por otra, este calentamiento favorece la difusión en caliente de la matriz ferrítica con la aleación del electrodo, con lo que se optimizan las características de la unión entre los dos materiales.

Como se observa en las micrografías, el grafito se encuentra en forma de esferulitas en la matriz de níquel de la soldadura y va aumentando en la zona de unión con la fundición, no apreciándose ninguna línea de separación entre ellos. Por ello, esta unión es más resistente que la anterior, asemejan-

dose sus características mecánicas a las del material base.

No obstante, aunque la fractura se inició dentro del cordón de soldadura, ésta progresó por la intercara cordón-metal base, dando lugar a una fractura dúctil donde se aprecia también la existencia de níquel (Fig. 10).

En la soldadura de fundición de grafito esferoidal, realizada con electrodo del 94 % Ni y tratamiento térmico previo (Fig. 3), se observa una matriz de níquel con esferulitas de grafito muy pequeñas y uniformemente distribuidas, dándose en la interfase una matriz ferrítica-austenítica, en la que se observan maclas cristalinas en el mismo límite de la zona austenítica, que confieren gran fragilidad a la unión ferrita-austenita. Se observa también, en la interfase, una disminución de la cantidad de esferulitas y aumento de su tamaño. En el material base se conserva la estructura de grafito

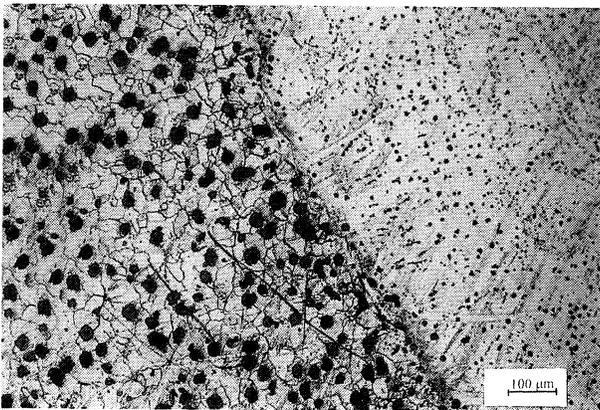


Figura 1. Micrografía de la soldadura de FGE por arco manual con electrodos revestidos de 58 % Ni, sin tratamiento térmico previo.

Figure 1. Manual coated arc welding (MAW) of ECI using 58% Ni electrode, without previous heat treatment.

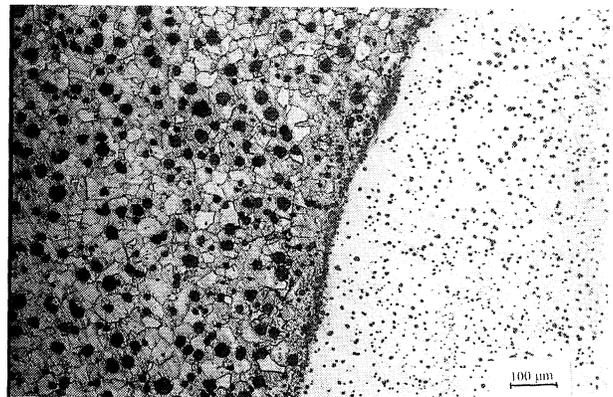


Figura 2. Micrografía de la soldadura de FGE por arco manual con electrodos revestidos de 58 % Ni, con tratamiento térmico previo.

Figure 2. Manual coated arc welding (MAW) of ECI using 58% Ni electrode, with previous heat treatment.

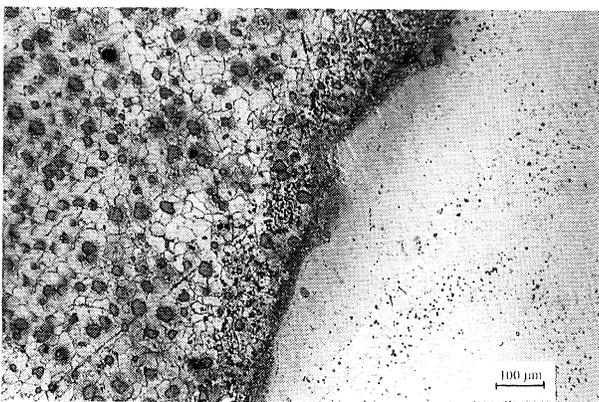


Figura 3. Micrografía de la soldadura de FGE por arco manual con electrodos revestidos de 94 % Ni, con tratamiento térmico previo.

Figure 3. Manual coated Arc welding (MAW) of ECI using 94% Ni electrode, with previous heat treatment.

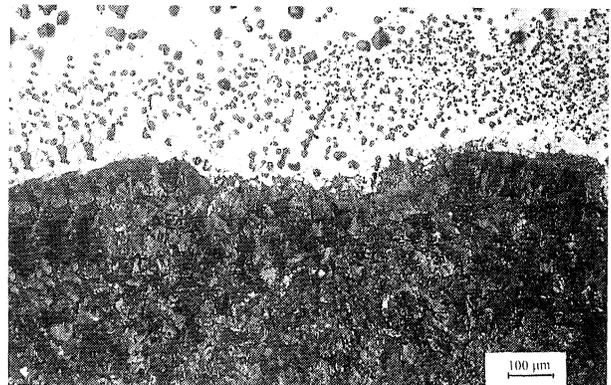


Figura 4. Micrografía de la soldadura de FGE, por arco bajo gas protector con electrodo consumible, según el procedimiento MIG – MAG, con tratamiento térmico previo.

Figure 4. Welding micrograph of ECI using electrode without flux according to MIG-MAG process, with previous heat treatment.

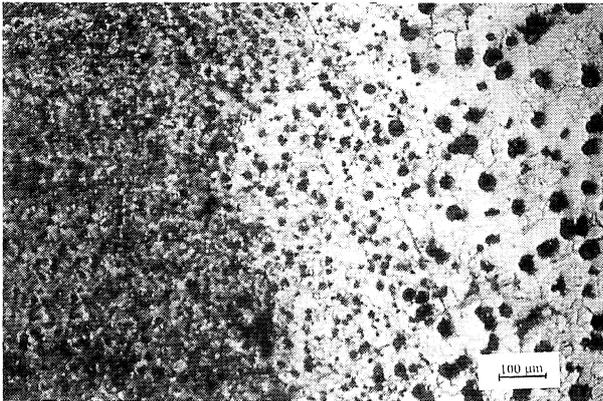


Figura 5. Micrografía de la soldadura de FGE por arco manual con electrodos revestidos de rutilo, con tratamiento térmico previo.

Figure 5. Welding micrograph of ECI using rutile Arc manual electrode, with previous heat treatment.

esferoidal, pero en la zona próxima a la interfase se aprecian formaciones de carburos de hierro en forma de precipitados pequeños. Se puede concluir que existe mayor dureza en la zona de la interfase y menor dureza en la zona correspondiente a la soldadura, así como rotura por la zona de la soldadura en la que aparecen esferolitas en matriz de níquel.

La fractura se produce en este caso en el cordón de soldadura, fractura dúctil con gran deformación de la matriz de níquel que contiene esferolitas de grafito. El análisis EDS indica que el níquel es el elemento determinante en esta fractura (Fig. 11).

En el análisis de la microestructura de la soldadura MIG-MAG de fundición de grafito esferoidal, realizada con varilla de FGE, con calentamiento previo y en atmósfera inerte de argón (Fig. 4), se aprecia una soldadura con estructura perlítica, en

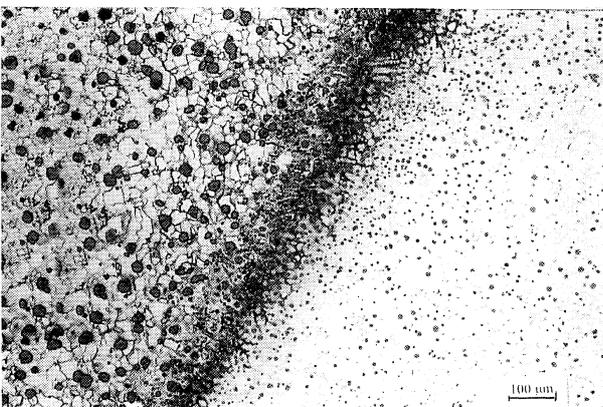


Figura 6. Micrografía de la soldadura de FGE por arco manual con electrodos base níquel, sin tratamiento térmico previo.

Figure 6. Welding micrograph of ECI using manual Arc Castolin 2-25 electrode, without previous heat treatment.

Rev. Metal. Madrid 35 (1999)

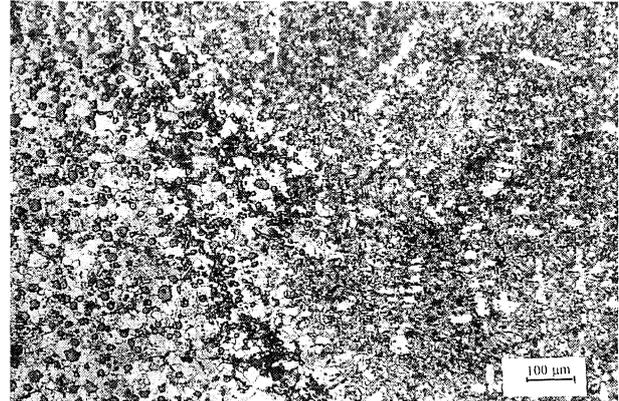


Figura 7. Micrografía de la soldadura de FGE con autógena (Oxiacetilénica) y varilla de FGS, con tratamiento térmico previo.

Figure 7. Autogenous (Oxyacetylene) welding micrograph of ECI using road electrode, with previous heat treatment.

gran medida debido a la composición del material de aporte. En la zona próxima a ésta, el material base mantiene la estructura de la FGE, con las esferolitas de igual tamaño que las de la estructura inicial y uniformemente repartidas, detectándose en la zona de la interfase una unión perfecta de matriz ferrita con matriz perlítica, dando una unión de matriz ferrítico-perlítica de mayor respuesta y resistencia que la de unión ferrítico-austenítica. Se observa también una zona de franja uniforme, con distribución de esferolitas de menor tamaño, que

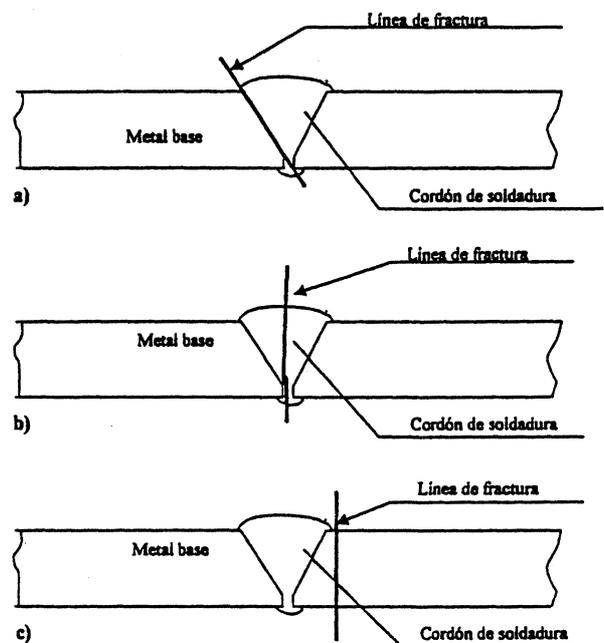


Figura 8. Zonas de observación metalográfica: a) En la intercara soldadura-metal base; b) En el cordón de soldadura; c) En el metal base

Figure 8. Metalography of observation zone a) Interface welding-base metal; b) In the court welding; c) In metal base.

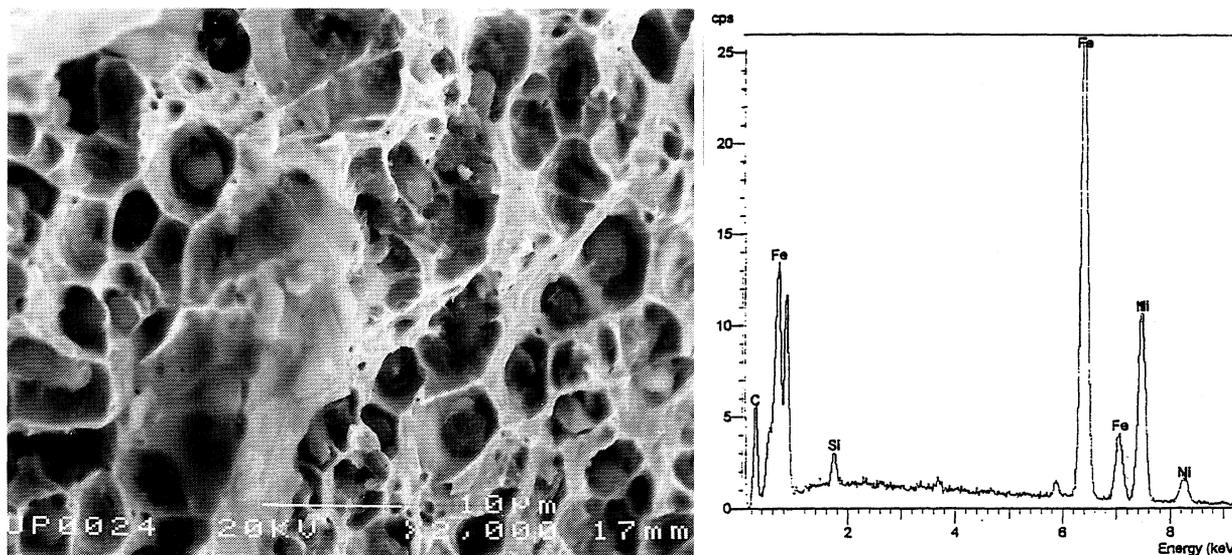


Figura 9. Fractografía y análisis EDS de la soldadura de FGE por arco manual con electrodos revestidos de 58 % Ni, sin tratamiento térmico previo.

Figure 9. Fractography and EDS analysis using coated Arc welding (MAW) of ECI using 58% Ni electrode, without previous heat treatment.

le confieren características resistentes mayores que las del metal base.

Aquí, la fractura se produjo por la intercara cordón-metal base y es de tipo dúctil, apreciándose la existencia de esferulitas de grafito de menor tamaño y la presencia de níquel. (Fig. 12).

En el análisis de la microestructura de la soldadura de fundición de grafito esferoidal, realizada con electrodo de rutilo y calentamiento previo (Fig. 5), se aprecian tres zonas bien definidas. La zona del material base, próxima a la soldadura, en la que se observan esferulitas en matriz de ferrita, pero con disminución del tamaño con relación a

las de éste y aumento de la cantidad y uniformidad, según la proximidad a la interfase metal-soldadura. En la zona de la interfase se muestra una difusión completa en la que aparece una gran cantidad de esferulitas en matriz perlítica, es decir, una estructura perlítica-globular con núcleos de ferrita. Por último, en la zona correspondiente a la soldadura y próxima al material, la estructura es de matriz perlítica con algunas esferulitas en forma globular.

Por tanto, la zona de mayor dureza será, en primer lugar, la de la soldadura, en segundo, la interfase metal-soldadura y en tercer lugar la zona del metal

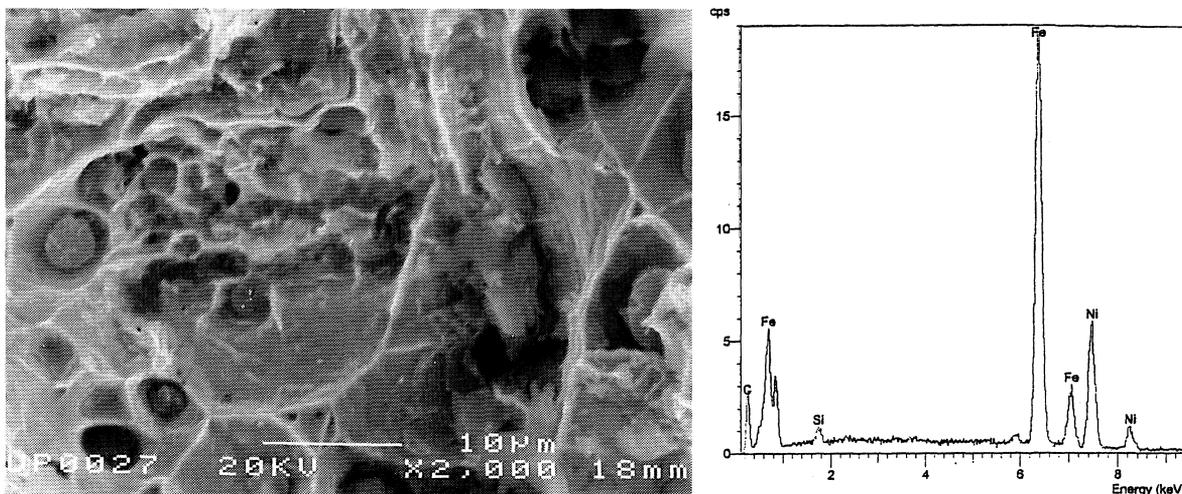


Figura 10. Fractografía y análisis EDS de la soldadura de FGE por arco manual con electrodos revestidos de 58 % Ni, con tratamiento térmico previo.

Figure 10. Fractography and EDS analysis using coated Arc welding (MAW) of ECI using 58% Ni electrode, with previous heat treatment.

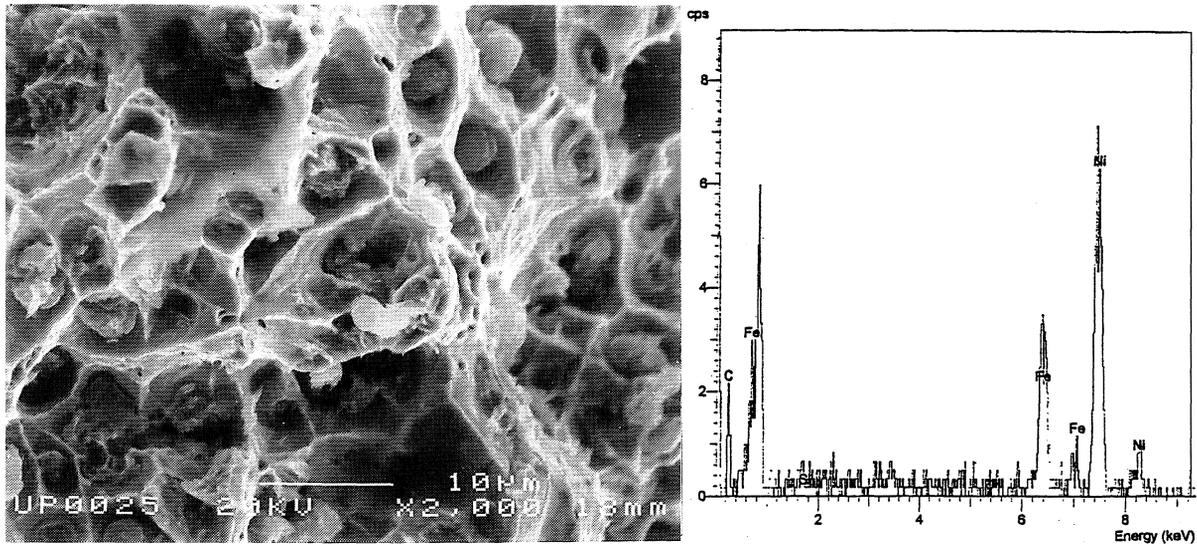


Figura 11. Fractografía y análisis EDS de la soldadura de FGE por arco manual con electrodos revestidos de 94 % Ni, con tratamiento térmico previo.

Figure 11. Fractography and EDS analysis using coated Arc welding (MAW) of ECI using 94% Ni electrode, with previous heat treatment.

base próxima a la soldadura. En este caso, la fractura se produce por la intercara soldadura-metal base con gran deformación de la matriz perlítica (Fig. 13).

En el análisis de la microestructura de la soldadura de fundición de grafito esferoidal, realizada con electrodo base níquel y sin calentamiento previo (Fig. 6), se aprecian, también, tres zonas bien definidas: la del material contiguo a la soldadura, en donde se observa el mantenimiento de la estructura inicial de grafito esferoidal en tamaño y distribución y su disminución en la zona de proximidad de la soldadura; la zona soldada, en la que se

obtiene una difusión completa; y finalmente, la zona de la interfase con precipitación de grafito en forma nodular.

En la zona de la soldadura aparece la matriz clásica de las aleaciones de alto contenido de níquel, manteniéndose el grafito en forma de esferulitas muy pequeñas y observándose, a mayores aumentos, la interfase de estructura perlítica muy fina.

Las roturas se han producido siempre en la zona del material base. Por esto, las características resistentes obtenidas nos indican una mayor resistencia en la interfase soldadura-material, una menor,

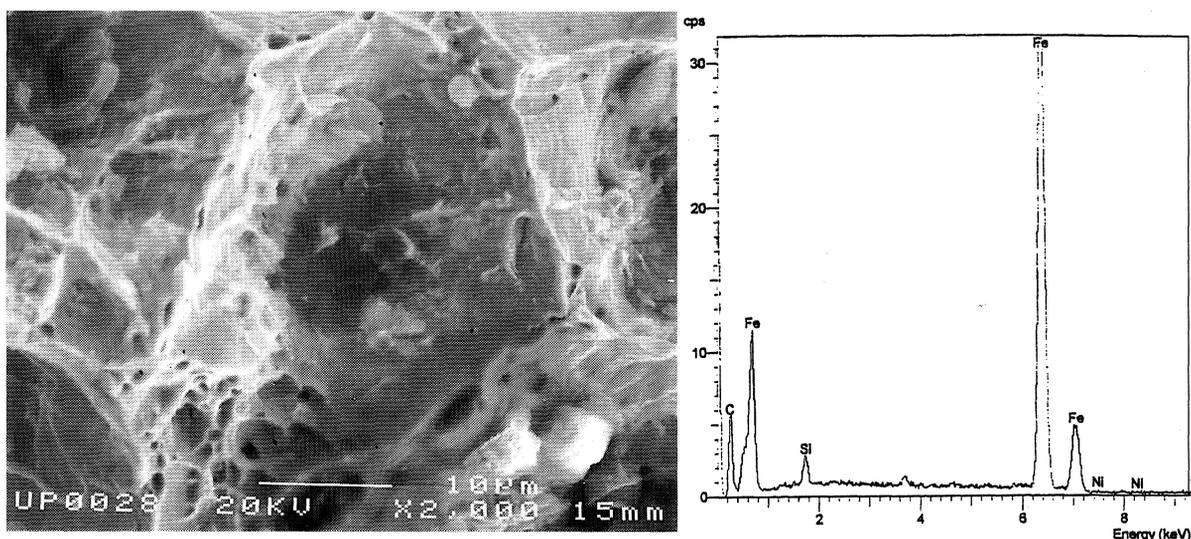


Figura 12. Fractografía y análisis EDS de la soldadura de FGE, por arco bajo gas protector con electrodo consumible según el procedimiento MIG-MAG, con tratamiento térmico previo.

Figure 12. Fractography and EDS analysis of ECI welding using electrode without flux according to MIG-MAG process, with previous heat treatment.

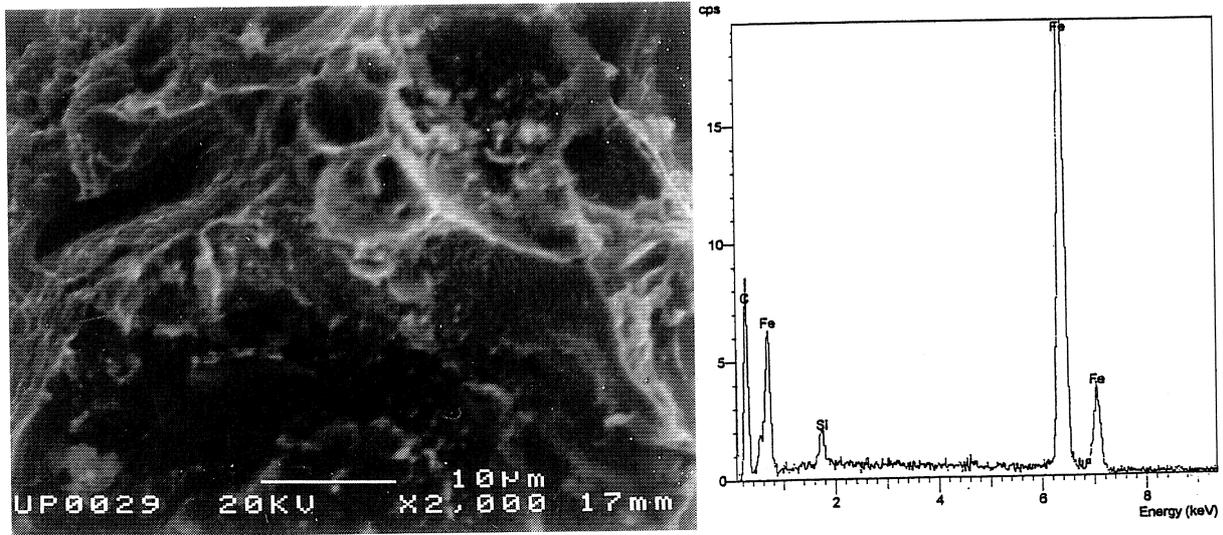


Figura 13. Fractografía y análisis EDS de la soldadura de FGE por arco manual con electrodos revestidos de rutilo, con tratamiento térmico previo.

Figure 13. Fractography and EDS analysis of ECI welding using electrode without according to rutile process, with previous heat treatment.

dentro del mismo material pero en la proximidad de la soldadura y, una intermedia, en la propia soldadura. La fractura se produce en el metal base, en la ZAC, con una fractura de tipo dúctil de gran deformación, donde se aprecian cavidades y esferolitas de grafito. El análisis EDS no muestra ningún pico significativo de níquel, debido al bajo contenido de este elemento en el metal base (Fig. 14).

En el análisis de la microestructura de la soldadura autógena (oxiacetilénica) de FGE, realizada con electrodo de varilla de FGS y calentamiento previo (Fig. 7), se observan tres zonas estructuralmente distintas: la zona de la soldadura, con estruc-

tura de matriz ferrítica y grafito nodular; la zona del metal a soldar, que presenta en las proximidades de la soldadura una estructura de grafito esferoidal, con esferolitas finas y uniformemente distribuidas en la matriz de perlita; y la interfase, que presenta una estructura de grafito grueso con matriz ferrítica igual que la matriz de la soldadura^[10]. La fractura de ésta presenta un aspecto claramente diferenciado de las anteriores al tratarse de un proceso de soldadura distinto, con menor aporte energético. Se produjo dentro del cordón de soldadura, lo que hace que sea también una fractura de tipo dúctil, aunque con menor deformación (Fig. 15).

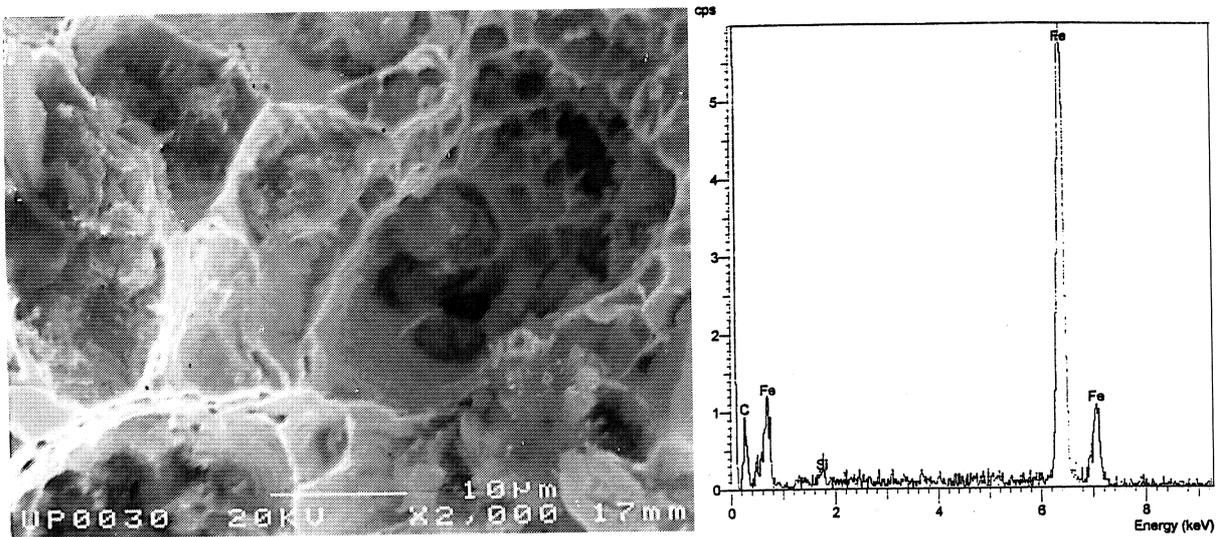


Figura 14. Fractografía y análisis EDS de la soldadura de FGE por arco manual con electrodos base níquel, sin tratamiento térmico previo.

Figure 14 Fractography and EDS analysis of ECI welding using manual arc nickel base electrode, without previous heat treatment.

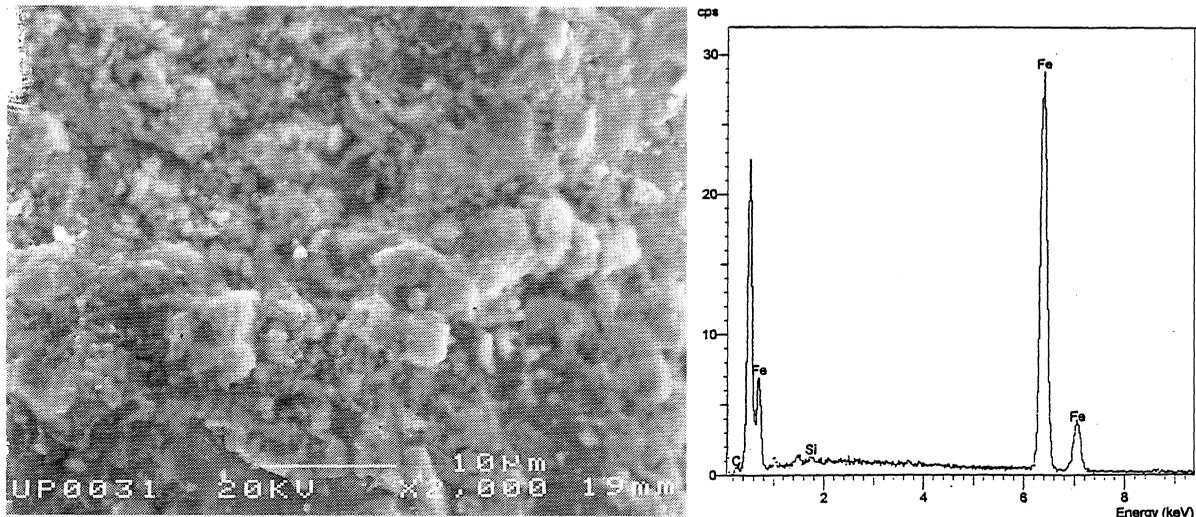


Figura 15. Fractografía y análisis EDS de la soldadura de FGE con autógena (oxiacetilénica), varilla de FGS, con tratamiento térmico previo.

Figure 15. Fractography and EDS analysis Autogenous (oxyacetylene) of ECI welding using rod electrode, with previous heat treatment.

10. CONCLUSIONES

- La soldadura por arco manual realizada con electrodo de 58 % Ni y sin tratamiento térmico previo, presenta una mala soldabilidad, con dificultad en la fusión y formación de poros. Su resistencia a la tracción es baja y el ángulo de doblado, muy pequeño.
- La soldadura por arco manual realizada con electrodo de 58 % Ni y con tratamiento térmico previo, presenta una aceptable soldabilidad, pero con falta de fluidez en el baño de fusión. La resistencia mejora notablemente y el ángulo de doblado alcanza un alto valor.
- La soldadura por arco manual realizada con electrodo de 94 % Ni y con tratamiento térmico previo, presenta una aceptable soldabilidad, pero con falta de fluidez. Se obtiene una alta resistencia a la tracción con ángulos de doblado intermedios y rotura por el material de aportación.
- La soldadura realizada con el método MIG-MAG, precalentamiento y electrodo de varilla desnuda, presenta una buena soldabilidad, aunque también presenta falta de fluidez. La resistencia y ductilidad de la unión son análogas al caso anterior, pero con incremento en la dureza.
- La soldadura por arco manual realizada con electrodo de rutilo y tratamiento térmico previo, presenta una mala soldabilidad con formación de poros, lo que pone de manifiesto una baja ductilidad.
- La soldadura por arco manual realizada con electrodo base níquel y sin tratamiento térmico

previo, presenta una buena soldabilidad, con valores aceptables de resistencia mecánica y ductilidad, así como rotura por la ZAC.

- La soldadura autógena (oxiacetilénica) realizada con electrodo de varilla de FGE, presenta dificultad operativa para su realización, por la falta de fluidez del baño, así como bajos valores en la resistencia obtenida.
- Excepto en la soldadura manual con electrodo 94 % Ni y con tratamiento térmico previo, y en la soldadura oxiacetilénica, donde la rotura se produce por el material de aportación, en los restantes casos, la rotura se produce en diferentes zonas de la ZAC.

REFERENCIAS

- [1] J. APRAIZ, *Fundiciones*. Editorial Dossat, S.A. Madrid, España, 1981 pp. 144-145.
- [2] P. BOUVARD, *Rev. Colada* 10 (1977) 204-213.
- [3] N. Fatahalla, S. Bahi y O. Hussein, *J. Mater. Sci.* 31 (1996) 5765-5772.
- [4] R. NONAST, *Soldeo Eléctrico Manual al Arco Metálico*. Ed. Gráficas Summa, Madrid, España, 1973, p. 40.
- [5] *Eutectic Castolin. Manual de Utilización*, Ed. Castolin España, S.A. Madrid, España, 1993, pp. 64.
- [6] K. WILKEN y H. KLEISTNER, *Rev. Soldadura* 21 (1991) 148-149.
- [7] FERNÁNDEZ y M. LÓPEZ, *Rev. Soldadura* 16 (1986) 23-26.
- [8] STEGLICH y W. BROCKS, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 21 (1998) 1179-1180.
- [9] H. BAYATI y R. ELLIOTT, *Mater. Sci. Technol.* 15 (1999) 265-277.
- [10] D. SEFERIAN, *Las soldaduras, Técnica y Control*. Editorial Urmo. Bilbao, España, 1965, pp. 295-299.