

## Soldabilidad de las fundiciones de grafito esferoidal (análisis mediante un diseño factorial a dos niveles)

J. CEMBRERO, M. PASCUAL, M. PERALES, J. MORENO

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia. 46022 Valencia

En el presente trabajo se analiza la soldabilidad de una fundición de grafito esferoidal (F.G.E.) de composición determinada, efectuando soldaduras por arco manual con electrodos revestidos, en probetas de esta fundición con dimensiones de 300 x 90 x 10 mm y ángulo de achaflanado de 60°. Se analiza la influencia en la soldabilidad de la composición de los distintos electrodos utilizados, base Ni (del 56 y 97,6 % respectivamente), la influencia de las temperaturas de precalentamiento (350 °C y 600 °C) y de la velocidad de enfriamiento (al aire y en el horno). La soldabilidad se evalúa mediante los ensayos de doblado y tracción.

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 y con el análisis fractográfico. Para investigar la influencia de los principales factores e interacciones que intervinieron en el proceso, se utiliza un diseño factorial a dos niveles (alto + y bajo -), lo que supone realizar 8 experiencias replicadas.

*Palabras clave:* Soldabilidad. Precalentamiento. Fundición Grafito Esferoidal. Diseño Factorial a dos Niveles

### Weldability of Spheroidal Graphite Cast Iron (Analyse by a two level factorial design)

Hereinafter it is analysed the weldability of a spheroidal graphite cast iron of a established chemical composition. Shielded metal-arc welding (SMAW) have been used on casting samples of 300 x 90 x 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, Ni (56 % and 97,6 % each one) as well as the influence of the pre-heating temperature ( 350 °C and 600 °C) and the coldest velocity (at the air and at the furnace). The weldability is evaluated by tests of to bends and traction. 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 and with fractography analysis are correlated.

In order to investigate the influence of the principal factors and interactions that take place in the process, a factorial design at two levels (high + and low -) was used, what meant to carry out 8 experiences

*Keywords:* Weldability. Pre-heating. Spheroidal Graphite Cast Iron. Factorial design at two levels.

## 1. INTRODUCCIÓN

De las aleaciones de hierro, las fundiciones se caracterizan por contener carbono (2-4,5 %) en mayor cantidad que los aceros, además de Si, Mg, P 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 Mg favorecen la formación de grafito esferoidal y consecuentemente la mejoría de las características mecánicas de estas aleaciones.

En los procesos de conformado por soldadura, las características mecánicas de éstas están condicionados 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

Fundición de grafito esferoidal perlítica, en ésta, el grafito adopta la forma de esferulitas, debido a la presencia de pequeñas cantidades de magnesio (1) que es retenido por el hierro y repartido uniforme-

mente por la matriz. Las características mecánicas de ésta se reflejan en la Tabla 1.

Su composición química, expresada en % en peso, es: C = 3,65; Si = 2,70; Mn = 0,20 y Ce = 4,60

TABLA 1.- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA F.G.E.

Características mecánicas	Fundición de grafito esferoidal		
	grafito laminar	De colada	Recocida
Resistencia (Kg/mm <sup>2</sup> )	30	47	40
Límite elástico (Kg/mm <sup>2</sup> )	-	33	27
Alargamiento (%)	0,5	6	13
Módulo de elasticidad (Kg/mm <sup>2</sup> )	12300	16500	13500
Dureza Brinell	200 - 230	225 - 240	160 - 190
Resiliencia Charpy (sección 100 mm <sup>2</sup> )	6,6	38	25
Límite de fatiga sin entallar (Kg/mm <sup>2</sup> )	12,6	28	21,2

## 3. SOLDADURA EMPLEADA

Soldadura por arco manual con electrodo consumible (2). 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 350 y 600 °C, la distorsión que experimenta éste es muy baja.

#### 4. TRATAMIENTOS TÉRMICOS APLICADOS A LA F.G.E.

La mitad de las probetas se sometieron a un precalentamiento de 350 °C y la otra mitad a 600 °C, antes de la soldadura. Además, de cada uno de los grupos, la mitad se enfriaron al aire y la otra mitad en el horno desde 800 °C una vez soldadas (Figuras 1 a 8).

#### 5. PROBETAS

Las probetas se han mecanizado a partir de bloques de 300 x 95 x 12 mm, obtenidos por moldeo. Mediante fresado se han llevado a las dimensiones definitivas (300 x 90 x 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° (2) entre las dos partes a unir, de esta forma se consigue una unión completa en todo el espesor.

#### 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 2.

TABLA 2. ELECTRODOS UTILIZADOS EN LA SOLDADURA DE F.G.E.

Electrodo	Composición	Electrodo	Composición
Fe - Ni	Ni = 56 %	Fe - Ni	Ni = 97,6 %
	C < 1 %		C < 1 %
	Mn < 1 %		Mn < 1 %
	Si < 2 %		Si < 2 %
	Fe resto		Fe < 2 %

#### 7. MÉTODO DE SOLDEO

La soldadura se ha realizado con corriente alterna con transformador, la intensidad máxima aplicada ha sido de 140 amperios. 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 aproximado de 70 °

#### 8.- DISEÑO DE LAS EXPERIENCIAS

##### • Diseño factorial a dos niveles

Para realizar este diseño factorial general, se ha seleccionado un número fijo de "niveles" (o "versiones") para cada una de un conjunto de variables (factores) y luego se ha experimentado con todas las combinaciones posibles (3).

En este trabajo, las variables o factores considerados (tres) y sus niveles (dos) se muestran en la Tabla 3

TABLA 3. VARIABLES Y NIVELES DE TRABAJO

Variable	Variable codificada	Nivel bajo (-)	Nivel (+)
Electro de aporte	A	56 % de Ni	97,6 % de Ni
Enfriamiento	B	Al aire	En horno (800 °C)
Temp. precalentamiento	C	350 °C	650 °C

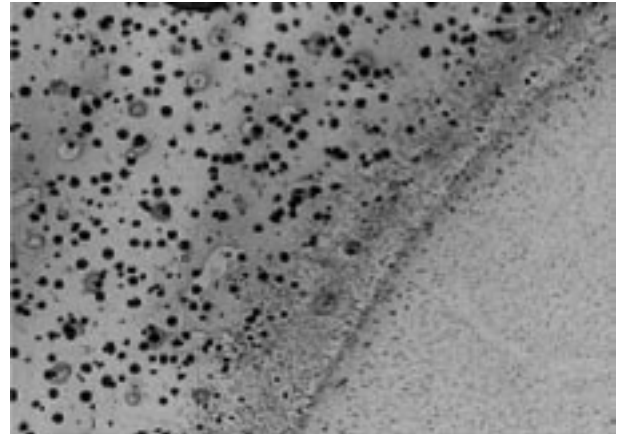


Figura 1. Muestra 7 (x200)

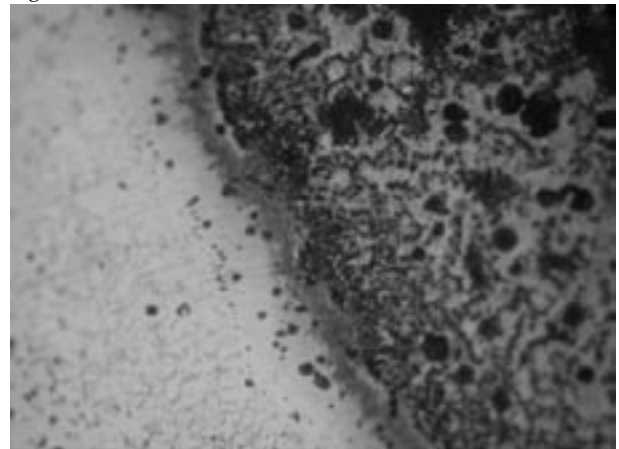


Figura 2. Muestra 5 (x200)

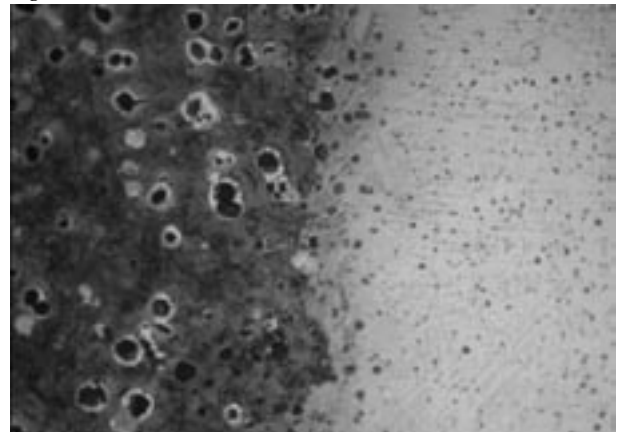


Figura 3. Muestra 2 (x200)

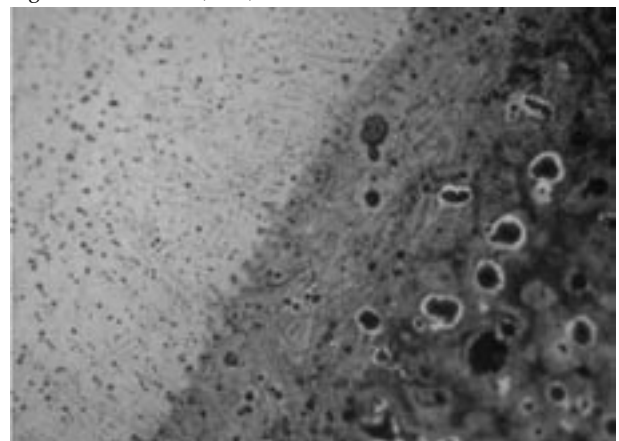


Figura 4. Muestra 1 (x200)

## 9.- RESULTADOS OBTENIDOS

Total de ensayos:  $2 \times 2 \times 2 = 8$ . Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4. MATRIZ DE RESULTADOS.

Orden de realización*	Exp. N°	A	B	C	Tracción (Kp/mm <sup>2</sup> )	Angulo de doblado (grados)
4°	1	-	-	-	34,6	12
3°	2	+	-	-	29,9	8
5°	3	-	+	-	54,9	6,9
8°	4	+	+	-	39,03	9,7
2°	5	-	-	+	37,9	22
6°	6	+	-	+	30,9	18
1°	7	-	+	+	52,28	19,9
7°	8	+	+	+	50,7	14,5

\*Los experimentos se realizaron de forma aleatoria

## 10.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Los valores de la variable respuesta se analizaron mediante el algoritmo de Yates para lo cual los experimentos se pusieron en orden estándar (Se utilizó el programa para computadoras STATGRAPHICS Plus. Versión 5.0)

Se entiende por efecto de un factor el cambio en la respuesta de ir del nivel (-) al (+) de ese factor

Existe interacción entre dos factores si el efecto de uno de ellos se modifica al cambiar los niveles considerados del otro factor.

Los efectos calculados a partir de la tabla de signos se muestran en las Tablas 5 y 6. Nótese que, por concisión, se denotan las interacciones como AB en lugar de A x B. En el caso de interacciones de 3 factores se ha comprobado que son poco significativas en este trabajo por lo que no se tienen en cuenta.

### • Variable Tracción

TABLA 5. EFECTOS ESTIMADOS PARA LA VARIABLE TRACCIÓN Kp / mm<sup>2</sup>

Efectos	Efectos estimados ± Desviación típica
Media	41,2762 +/- 2,07375
Factor A	-7,2875 +/- 4,1475
Factor B	15,9025 +/- 4,1475
Factor C	3,3375 +/- 4,1475
AB	-1,4375 +/- 4,1475
AC	2,9975 +/- 4,1475
BC	1,1875 +/- 4,1475

La interpretación de los datos del desarrollo del proceso sugiere que son significativos los efectos de los factores A y B. Así, el factor B influye en el sentido de aumentar la variable respuesta resistencia a tracción en 15,9025 unidades al pasar del nivel bajo (-) al nivel alto (+) en el proceso para todas las condiciones de los demás factores. De manera análoga, el factor A influye en el sentido de disminuir la variable respuesta resistencia a tracción en 7,2835 unidades al pasar del nivel bajo (-) al nivel alto (+) en el proceso para todas las condiciones de los demás factores.

Finalmente en este modelo se observa que el factor C y las interacciones de los factores consideras no son significativas

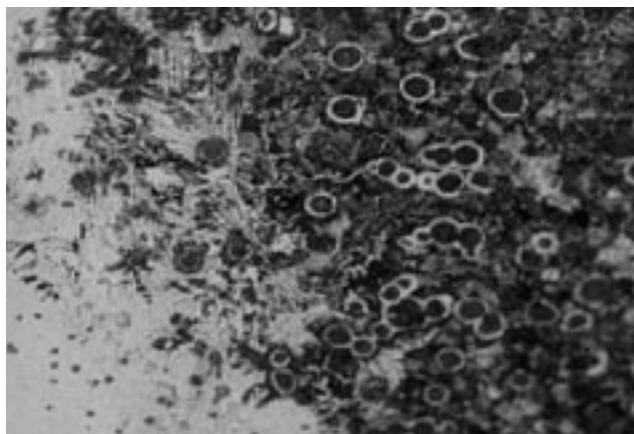


Figura 5. Muestra 3 (x200)

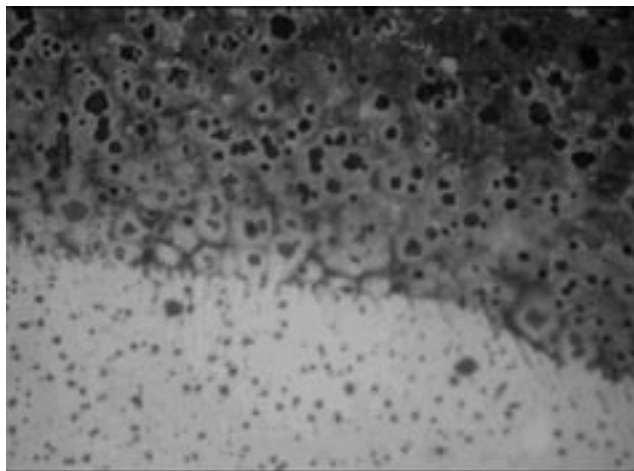


Figura 6. Muestra 6 (x200)

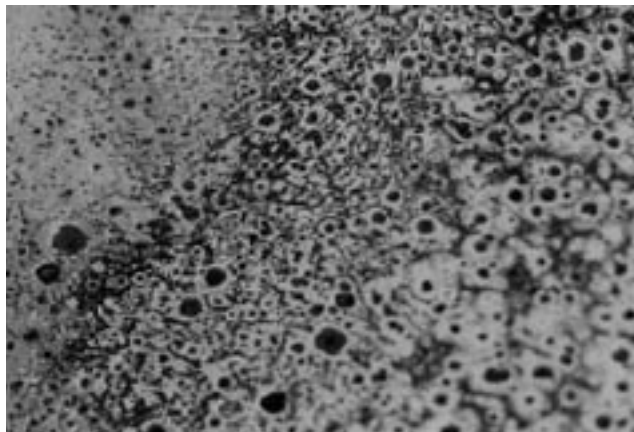


Figura 7. Muestra 8 (x200)

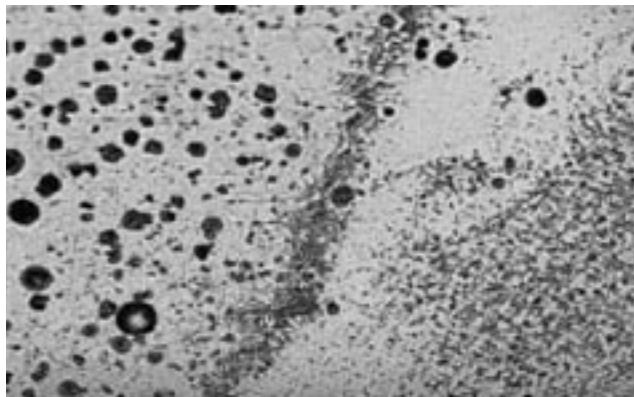


Figura 8. Muestra 4 (x200)

• **Variable Ángulo de doblado**

TABLA 6. EFECTOS ESTIMADOS PARA LA VARIABLE ÁNGULO DE DOBLADO

Efectos	Efectos estimados ± Desviación típica
Media	13,875 +/- 1,025
Factor A	- 2,65 +/- 2,05
Factor B	-2,25 +/- 2,05
Factor C	9,45 +/- 2,05
AB	1,35 +/- 2,05
AC	-2,05 +/- 2,05
BC	-0,55 +/- 2,05

La interpretación de los datos del desarrollo del proceso sugiere que es significativo el efecto del factor C, en el sentido de aumentar 9,45 unidades el valor del ángulo de doblado al pasar del nivel bajo (-) al nivel alto (+) en el proceso para todas las condiciones de los demás factores.

## 11.- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La soldadura con electrodo de aporte del 97,6 % de Ni influyen en la disminución de resistencia de la unión, debido a que el elevado aporte de Ni impide la difusión de Fe desde el electrodo a la unión. Este efecto (factor A) se pone de manifiesto en el valor de la variable tracción (pierde -7,28 unidades), en el caso del ángulo de doblado la disminución es menor (-2,65 unidades).

No obstante, las soldaduras enfriadas en horno (Figs. 5, 8, 1 y 7) tienen buen comportamiento a tracción, (factor B = 15,90 unidades) observándose que dentro de éstas, son las soldadas con electrodo de 56 % de Ni las que tienen mejor comportamiento. Esto es debido a que el electrodo aporta, en este caso, un 40% de Fe. Además, el grafito aparece en la unión en forma de esferulitas y vermículos de poco tamaño<sup>(4)</sup>

En cuanto al ángulo de doblado, se observa que este es mayor en aquellas soldaduras que fueron precalentadas a 600 °C (factor C = 9,45

para la variable ángulo de doblado). El efecto de los otros factores (A = electrodo de aporte y B = enfriamiento) no es significativo (valores ligeramente superiores a 2,05)

Esto se interpreta en el sentido de que el precalentamiento (a 600 °C) previo al proceso de soldadura favorece la formación de esferulitas en la interfase entre el cordón de soldadura y el metal base

## 12. CONCLUSIONES

- La resistencia a tracción de las uniones soldadas es mayor con electrodos de aporte de 56 % de Ni.
- El enfriamiento en horno de las uniones soldadas aumenta la resistencia a la tracción de la unión.
- El ángulo de doblado aumenta si se realiza antes de la soldadura un precalentamiento de 650.

## AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad Politécnica de Valencia por la ayuda prestada para el desarrollo del presente trabajo, a través del programa de Incentivo a la Investigación para grupos Emergentes (clave específica del proyecto 20010010).

## BIBLIOGRAFÍA

1. Apraiz Barreiro, José: "Fundiciones". Editorial Dossat, S.A. Madrid, 1981: 144-145.
2. Nonast, R.: "Soldeo Eléctrico. Manual al Arco Metálico". Ed. Gráficas Summa. Madrid, 1973: 40
3. G.E.P. Box, W.G. Hunter, J.S. Hunter. "Estadística para investigadores: Introducción al diseño de experimentos, Análisis de datos y construcción de modelos". Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España, 1999, pp 317-362.
4. J.Cembrero y M. Pascual. Revista de Metalurgia. Madrid 35 (1999) 392-401

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03