

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIAS DEL FERROBORO EN LOS CILINDROS DE TEMPLE INDEFINIDO FABRICADOS POR DOBLE COLADA CENTRIFUGA, PARA LAS CAJAS ACABADORAS DE LOS TRENES LAMINADORES DE BANDAS EN CALIENTE<sup>1</sup>

J.F. Álvarez<sup>2</sup>  
J. Asensio<sup>3</sup>  
J. L. González<sup>4</sup>  
J. Llano<sup>4</sup>  
M. Alvaré<sup>4</sup>  
J. García<sup>4</sup>

## Resumen

En este trabajo se pretende presentar los resultados de una investigación cuyo principal objetivo fue identificar los parámetros metalúrgicos de fabricación que tienen un efecto significativo sobre la microestructura en fundiciones Nihard atruchadas inoculadas con FeB, que son empleadas en las capas periféricas de trabajo en cilindros de laminación dúplex, fabricados por el método de doble colada mediante colada centrífuga vertical y utilizados en las cajas acabadoras de los trenes de bandas en caliente. Estos cilindros, a su vez, presentan un núcleo de fundición gris con grafito esferoidal en una matriz ferrito-perlítica. Este tipo de cilindros son conocidos como Cilindros de Temple Indefinido (Alloy Indefinite Chill, AIC). El método de trabajo seguido ha sido la aplicación de un diseño de experimentos (DOE) saturado, con 7 Factores, 8 Experimentos, y Resolución III. La inoculación con FeB permite la nucleación heterogénea para la precipitación del grafito, favoreciendo su precipitación en pequeños tamaños y morfologías compactas. Del análisis estadístico se concluye que un aumento en las adiciones de FeB favorece la solidificación metaestable del material, aumentando las proporciones relativas de carburos cuasi-cementíticos, ((Fe,X)<sub>3</sub>C) y de Ledeburita, disminuyendo la fracción en volumen de grafito y su número de cuentas por unidad de área. A su vez, se ha comprobado que Temperaturas Líquidas elevadas favorecen la precipitación del grafito en morfologías compactas.

**Palabras clave:** Diseño de experimentos; Temple indefinido; Doble colada; Centrífuga; Grafito; Ledeburita.

## ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO FERROBORO NOS COLINDROS FABRICADOS COM TEMPERA INDEFINIDA DE DUPLA FILTRAGEM MEDIANTE AO PROCESSO DE CENTRIFUGA, PARA AS CADEIRAS DOS LAMINADORES A QUENTE

### Resumo

Neste trabalho vamos apresentar os resultados de um acompanhamento cujo objetivo principal é identificar os parâmetros de produção que tem efeito significativo na microestrutura em fundição de MIHARD com adição de FeB, que são empregados nas camadas periféricas nos cilindros duplos de trabalho de laminação, fabricado pelo método de filtragem dupla mediante ao processo de centrífuga vertical, utilizado em cadeiras de laminação de tiras a quente. Estes cilindros, apresentam um núcleo cinza com grafita esferoidal em ferritperlítica principal. Este tipo de cilindro é conhecido como Cilindros de Tempera indefinida (Liga Fria indefinida. AIC). O método de que foi iniciada com experiência e aplicada em desenho (CORÇA), insirência, com 7 variáveis, 8 experiência e decisão. Adição com EeB permite a nucleação heterogênea para precipitação da grafita, e favorecendo sua precipitação em tamanhos pequenos e morfologias compactas. Na análise estatística se conclui um aumento de FeB favorecendo a meta estável de solidificação do material, aumentando as proporções relativas de quase-cementíticos de carbonetos, (Fe,X)<sub>3</sub>C) e de leburita, diminuindo a fração em volume de grafita e seu número de calculo para unidade de área. Em troca, He/SHE foi provado que temperatura alta favorece a precipitação de grafita em morfologias compactas.

**Palavras-chave:** Liga fria indefinida; Centrífuga vertical; Plano e experiencias; Cilindros duplos; Grafito; Dureza.

<sup>1</sup> Contribucion técnica a 44º Seminário de Laminación – Procesos y Productos Laminados Y Revstidos, 16 al 19 de Octubre de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial, Universidad de Oviedo. Edificio Departamental Este. Campus de Viesques. Gijón, Asturias, España (SPAIN). Phone: +34 985181949, Fax: +34 985 104242, E-mail: [alvarezflorentino@uniovi.es](mailto:alvarezflorentino@uniovi.es)

<sup>3</sup> Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad de Oviedo, E-mail: [jasensio@etsimo.uniovi.es](mailto:jasensio@etsimo.uniovi.es)

<sup>4</sup> Fundación Nodular, S.A., c/ La Fundación 4, 33420 Lugones, Asturias, España (SPAIN). Phone: +34 985269189, Fax: +34 985263274, E-mail: [jgonzalez@nodular.com](mailto:jgonzalez@nodular.com)

## INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de este trabajo ha sido identificar los factores metalúrgicos de fabricación que tienen un efecto significativo sobre la fase grafito y el constituyente metaestable en fundiciones Nihard atruchadas inoculadas con FeB, que son empleadas en las capas periféricas de trabajo en cilindros de laminación dúplex, fabricados por el método de doble colada mediante colada centrífuga vertical y utilizados en las cajas acabadoras de los trenes de bandas en caliente. Estos cilindros, a su vez, presentan un núcleo de fundición gris con grafito esferoidal en una matriz ferrito-perlítica. Este tipo de cilindros son conocidos como Cilindros de Temple Indefinido (Alloy Indefinite Chill, AIC).

El método de investigación seguido fue la aplicación de un diseño de experimentos saturado, con 7 Factores, 8 Experimentos, y Resolución III. La investigación fue desarrollada a escala industrial, donde cada experimento equivale a un cilindro de laminación, por lo que resultaron analizados un total de 8 cilindros de laminación.

Los cilindros de laminación analizados son utilizados principalmente las últimas cajas acabadoras de los trenes de laminación de bandas en caliente. Se fabrican por el método de doble colada, mediante colada centrífuga vertical. Inicialmente se cuela la capa periférica, para posteriormente colar el núcleo es dos etapas: En una primera se cuela una capa intermedia, que asegura la óptima unión con la capa periférica, para en una segunda etapa colar el resto del núcleo.

La capa periférica es una fundición blanca hipoeutéctica, consistente en austenita primaria que es parcialmente transformada en martensita durante la solidificación, embebida en un constituyente matriz ledeburítica formado por austenita eutéctica y carburos cementíticos aleados,  $M_3C$ . La presencia de grafito eutéctico disperso es el resultado de la solidificación del líquido eutéctico residual.

Durante el proceso de colada el caldo es inoculado en la cuchara con FeSi, FeMn, SiCaMn, y en algunos casos con FeB. En este sentido debe destacarse que al FeB se le asigna un papel de nucleación heterogénea sobre el grafito, favoreciendo un desarrollo posterior con morfología compacta o estructura "caterpillar". El grafito realiza funciones de lubricación seca, reduciendo la fricción entre el cilindro de laminación y la banda de acero a laminar, y minimiza el potencial de fusión entre el cilindro y la banda, inherente a las condiciones de presión y temperatura en servicio.

Los factores metalúrgicos estudiados han sido la cantidad y tipo de inoculantes adicionados (SiCaMn, FeSi tipo-A, FeSi tipo-B, FeB), tipo de máquina centrífugadora, porcentaje en peso de Si y Ni, y Temperatura Líquidos.

La ejecución de esta investigación se ha desarrollado a escala industrial en la empresa Fundición Nodular S.A, donde se fundieron los 8 cilindros de laminación analizados, y la dirección de la investigación, supervisión, y análisis fue llevado a cabo por los autores de este artículo.

El interés de este estudio radica en evaluar el papel del FeB en la solidificación y microestructura del material, junto a disponer de la capacidad que permita controlar la fracción en volumen de grafito, su número de cuentas por unidad de área, su morfología, y la fracción en volumen de carburos  $((Fe,X)_3C)$  y Ledeburita presentes en el material, según los requerimientos específicos del tren de bandas en caliente.

El rango composicional usado habitualmente para la obtención de la capa periférica deseada se muestra en la Tabla 1. En la Tabla 2 se muestra el análisis químico y la cantidad adicionada en cuchara al baño de los inoculantes empleados según la especificación de trabajo.

**Tabla 1.** Rango composicional según especificaciones de fabricación.

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo
3.0–3.5	0.4–1.0	0.6–1.2	<0.050	<0.050	1.0–2.0	3.0–5.0	0.2-0.5

**Tabla 2.** Análisis químico de los inoculantes empleados y cantidad adicionada, según especificación de fabricación.

Inoculantes	Si	Ca	Al	Zr	Ti	C	S	P	Mn	B	Fe
FeSi-Tipo A	75.0	2.5	1.4	1.6	---	---	---	---	---	---	Resto
FeSi-Tipo B	75.4	0.5	1.0	---	0.031	0.2	0.001	0.012	---	---	Resto
FeMn	2.0	---	---	---	---	5.8	0.014	0.130	69.4	---	Resto
SiCaMn	58.3	16.4	1.1	---	0.030	0.6	0.030	0.030	14.8	---	7.4
FeB	0.4	---	---	---	---	0.3	---	---	---	17.9	Resto

## PARTE EXPERIMENTAL

Para alcanzar los objetivos señalados el método de investigación seguido fue un diseño de experimentos (DOE). El problema básico para la aplicación de un diseño de experimentos reside en decidir qué conjunto de pruebas permiten, con la menor cantidad de recursos, alcanzar el nivel de conocimiento deseado. En los procesos industriales es habitual que unos pocos factores sean responsables de la mayor parte de las variaciones de la respuesta, resultando el resto de factores responsables de variaciones de menor cuantía, indistinguibles del ruido experimental. Cuando esto ocurre los diseños factoriales fraccionales permiten estudiar de manera completa los efectos de las variables activas. El grado de fraccionamiento máximo se alcanza en los diseños de experimentos saturados. En esta investigación el método empleado fue un diseño de experimentos saturado con 7 factores, 8 experimentos, y resolución III.

A continuación, a modo de introducción, se explicitan algunos conceptos claves en los diseños de experimentos:

**Función respuesta.** Es el nombre genérico que damos a la característica estudiada.

**Factores.** Variables seleccionadas, que se considera que pueden afectar a la respuesta.

**Nivel.** Valores que toma un factor en un determinado experimento.

**Efecto de un factor.** Variación sobre la función respuesta como consecuencia de la variación de dicho factor. Se definen **los efectos principales** como aquellos efectos sobre la función respuesta derivados de cada factor por separado. Las interacciones entre 2 factores se definen como la variación entre el efecto medio de un factor con el otro factor en su nivel -1, y el efecto medio del mismo factor con el otro factor en el nivel +1. Análogamente se definirían las interacciones entre varios factores.

**Efecto significativo.** Aquellos efectos significativamente distintos de cero. Es decir, aquel efecto que sea distinto de cero, por causas ajenas a la variabilidad del sistema o el error experimental.

Cuando existen  $k$  factores a estudiar en un diseño de experimentos factorial completo el número de ensayos es  $2^k$ . Debe señalarse que los diseños fraccionales se simbolizan como  $2^{k-p}_N$ , donde 2 es el número de niveles,  $k$  el número de factores,  $p$  el grado de fraccionamiento, y  $N$  su resolución. La **resolución** de un diseño indica el nivel de confusiones que se presentan en la estimación de los efectos. En general, un diseño de experimentos de resolución  $N$  es aquel en el que ningún efecto de  $q$  factores está confundido con otro que contenga menos de  $R-q$  factores.

Los diseños saturados son aquellos diseños con grado de fraccionamiento máximo. Se trata de diseños de resolución III. Estos diseños resultan especialmente útiles en los estadios iniciales de una investigación, cuando lo que se desea es identificar las variables activas para posteriormente, utilizando una estrategia secuencial, estimar sus efectos y determinar las posibles interacciones entre ellas.

Al representar los datos provenientes de una distribución normal sobre un papel probabilístico normal, éstos aparecerán alienados. La recta pasa aproximadamente por el punto (0,50), indicando que la media de la distribución es cero. La pendiente de la recta indica el tamaño del error experimental. Una recta horizontal indicaría una mayor variabilidad.

La respuesta experimental está sometida a una variación aleatoria. Esta variación seguirá una ley Normal, donde su desviación típica refleja el error experimental. Los efectos son combinaciones lineales de las respuestas, por lo que, aplicando el Teorema Central del Límite, siguen una ley Normal. Si todos los efectos fueran no significativos, éstos seguirán una ley  $N(0,\sigma)$ , por lo que aparecerán alineados sobre el papel probabilístico. Si algún efecto resultara significativo éste seguirá una ley  $N(\mu,\sigma)$ , por lo que los efectos significativos no aparecerán alineados con los no significativos. El criterio de decisión estadístico sobre la significación de un determinado efecto se basa en comparar el cociente obtenido entre la media,  $\mu$ , y su desviación típica,  $\sigma$ , con el valor crítico de la  $t$  de Student al 95%.

En la Tabla 3 se muestran los factores y niveles elegidos. El factor B representa la Temperatura Líquidus obtenida antes del proceso de inoculación. El factor D el tipo de máquina centrifugadora utilizada. La principal diferencia entre estas máquinas centrifugadoras radica en el uso de una “camisa aislante” situada alrededor de la coquilla en la máquina centrifugadora N° 2 promoviendo una velocidad de enfriamiento más lenta debido a una menor difusividad del calor. El Factor E representa la inoculación con 4 Kg/T de FeSi, siendo ésta con FeSi-B en el nivel -1, y FeSi-A en el nivel +1. Ambos inoculantes presentan un 75 % de Si, sin embargo el FeSi-A incluye 2.5 % Ca y 1.6 5 Zr.

La Tabla 4 (a) presenta la matriz del diseño de experimentos y la Tabla 4(b) muestra los generadores, efectos, y confusiones de la matriz de experimentos.

**Table 3.** Factores y niveles.

Factores		Niveles	
Código	Parámetro metalúrgico	-1	+1
A	% Ni	3.0	5.0
B	Temperatura Líquidus	1210-1230	1250-1270
C	% Si	0.6-0.8	1.0-1.2
D	Máquina centrifugadora	1	2
E	FeSi	5 Kg/T FeSi-B	5 kg/T FeSi-A
F	SiCaMn	0.5 Kg/T	1.0 Kg/T
G	FeB	4 kg/T	12 kg/T

**Table 4**  
**(a)**  $(2_{III}^{7-4})$  Matriz de experimentos.

No.	A	B	C	D	E	F	G
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

**(b)** Generadores y confusines

Generadores	Confusiones
	A+BD+CE+FG
	B+AD+CF+EG
D=AB	C+AE+BF+DG
E=AC	D+AB+EF+CG
F=BC	E+AC+DF+BG
G=ABC	F+BC+DE+AG
	G+AF+BE+CD

Las respuestas estudiadas sobre la capa periférica de estos materiales duplex son:

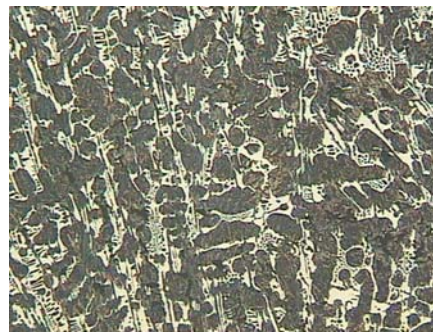
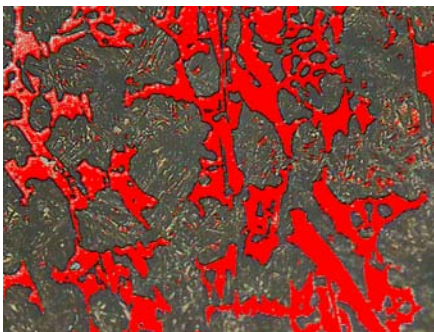
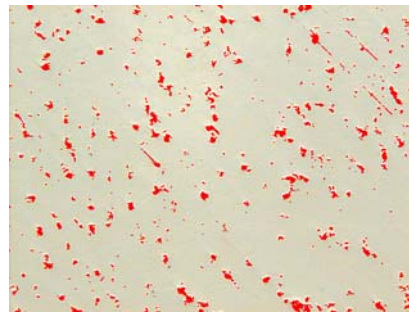
- La fracción en volumen de grafito precipitado (%Vv de grafito).
- El número de cuentas de grafito precipitado por  $\text{mm}^2$  ( $\#/\text{mm}^2$ ).
- La morfología del grafito precipitado mediante el cociente de Ferets ( $F_{\text{Máx}}/F_{\text{mín}}$ ).
- La fracción en volumen de Ledeburita (%Vv de Ledeburita).
- La frcción en volumen de carburos  $\text{M}_3\text{C}$ .

Para cada ensayo de la matriz de experimentos, se obtuvieron muestras para su inspección metalográfica, de dimensiones de 15 mm x 15 mm x 40 mm, que fueron divididas en 4 zonas de 10 mm de longitud, denominadas zona I, II, III, y IV en sentido desde su periferia hasta el interior de la capa, en contacto con el núcleo del material. Para cada zona se obtuvieron aleatoriamente 5 “campos” de medida, lo que hace un total de 20 “campos” de medida por muestra metalográfica.

La preparación de muestras para la inspección metalográfica de la fase grafito consistió en desbaste, mediante el empleo de papel metalográfico con abrasivo SiC del tipo 60-120-240-y 600, y posterior pulido con pasta de diamante de 6  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ . Para la inspección del constituyente metaestable se procedió al ataque de las muestras con reactivo Nital-2.

Se empleó un sistema de visión y almacenamiento digital de imágenes. Los resultados metalográficos se obtuvieron mediante el Analizador de Imagen IPP (version 4.5.0.29) y su módulo de Materiales “Materials Pro”. La fracción en volumen de Ledeburita se realizó mediante la técnica manual del conteo de puntos. Para el análisis del diseño y la obtención de los efectos significativos se ha empleado el programa informático “Statgraphics plus” (versión 5.1).

Se adjuntan a continuación ejemplos de las micrografías obtenidas :



## RESULTADOS

En la Figura 1 no se aprecia ningún efecto significativo sobre la fracción en volumen de grafito en el global de la capa. Ello resulta engañoso debido a la elevada variabilidad de los resultados obtenidos. Sin embargo, realizando un análisis más detallado para cada una de las zonas de la capa se concluye que resulta significativa la inoculación con FeB y la Temperatura Líquidus.

La Figura 2 muestra el efecto significativo de la inoculación con FeB sobre el número de cuentas de grafito precipitado. Ello supone que un aumento de la cantidad adicionada de FeB supone una disminución del número de cuentas de grafito por unidad de área.

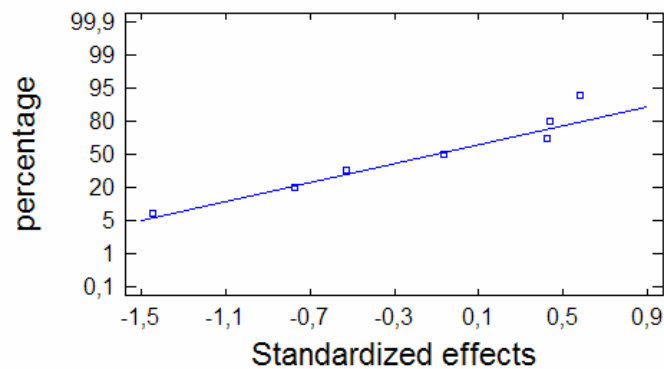
La Figura 3 muestra que sobre la capa Nihard atruchada, inoculada con FeB, de los AIC rolls un aumento de la fracción en volumen de grafito genera el aumento del número de cuentas por unidad de área.

La Figura 4 muestra que sobre la morfología del grafito resultan significativos los efectos de la Temperatura Líquidus y de la inoculación con SiCaMn, resultando que los niveles altos de ambos factores, favorecen morfologías compactas del grafito.

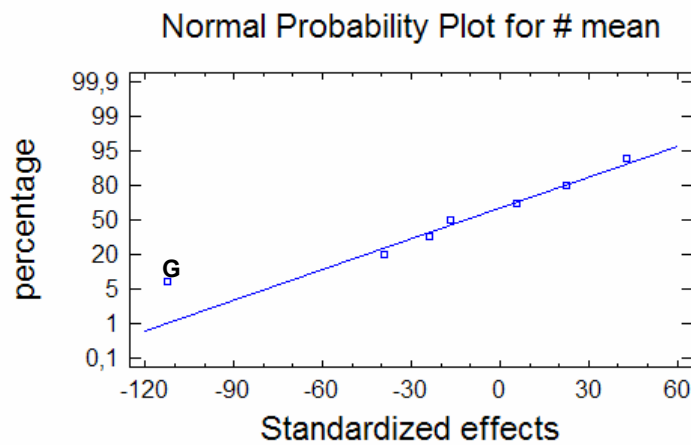
La Figura 5 muestra que sobre la capa Nihard atruchada, inoculada con FeB, carbonos equivalentes bajos favorecen morfologías compactas para el grafito precipitado.

La Figura 6 muestra el efecto significativo de la inoculación con FeB sobre la fracción en volumen de carburos cuasi-cementíticos, por lo que un aumento de la cantidad adicionada de FeB supone un aumento en la fracción en volumen de estos carburos.

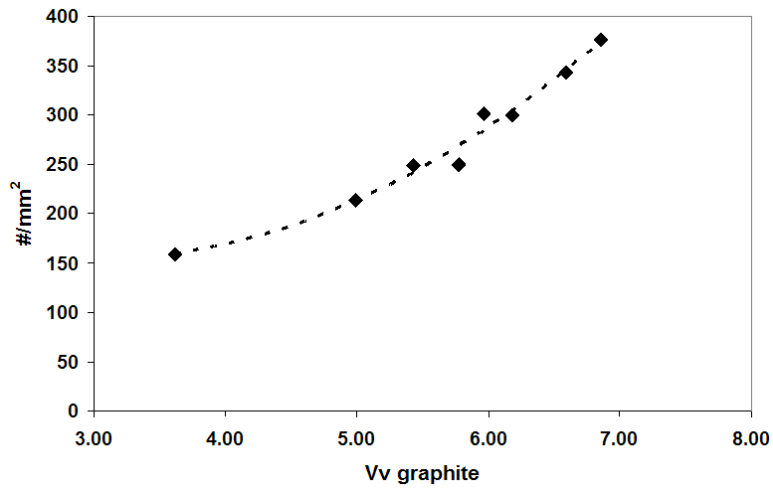
La Figura 7 muestra el efecto significativo de la inoculación con FeB, la inoculación con SiCaMn, y el %Si sobre la fracción en volumen de Ledeburita. Ello supone que un aumento en FeB, un aumento de SiCaMn, y una disminución en la proporción de Si, favorecen el aumento de la fracción de Ledeburita formada.



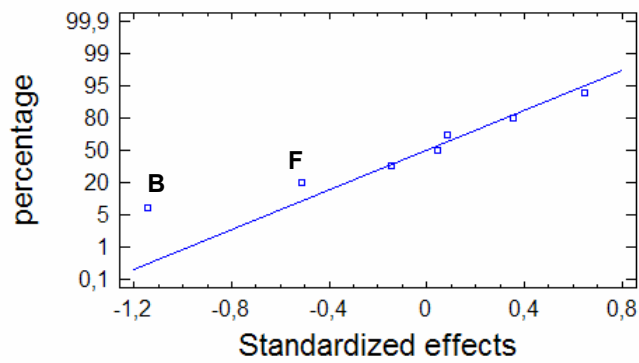
**Figura 1.** Representación de los efectos sobre la fracción en volumen de grafito en papel probabilístico no



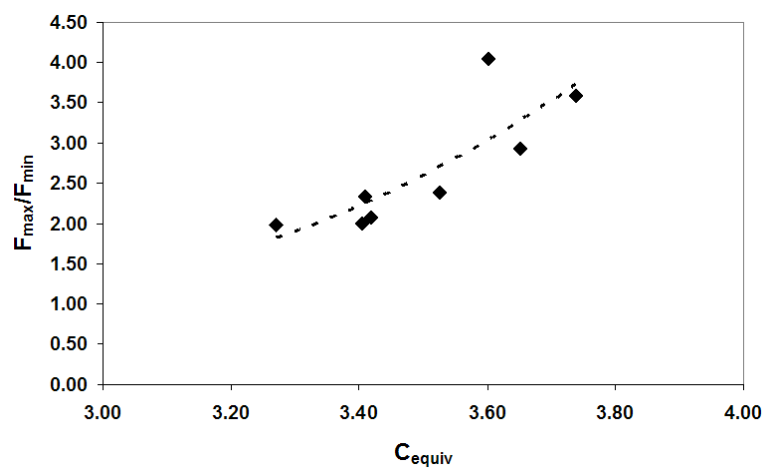
**Figura 2.** Representación de los efectos sobre  $\#/mm^2$  de grafito en papel probabilístico normal.



**Figura 3.** Correlación entre la fracción en volumen de grafito y su número de cuentas por unidad de área

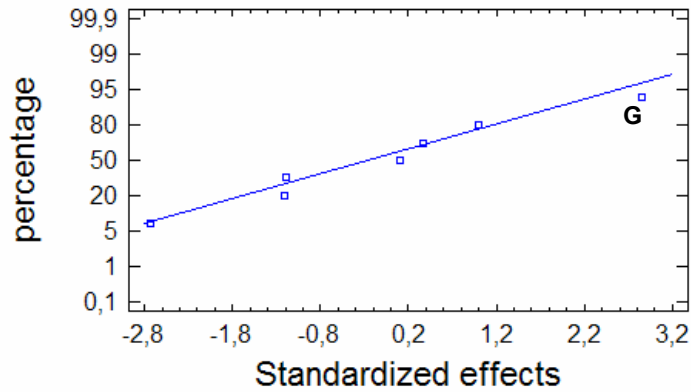


**Figura 4.** Representación de los efectos sobre Feret max/Feret mín de grafito en papel probabilístico normal.

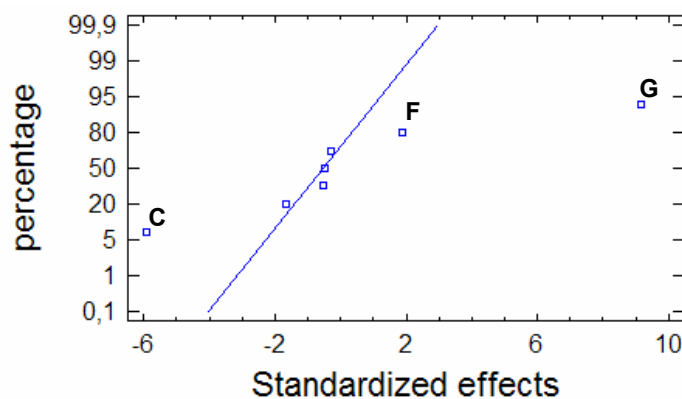


**Figura 5.** Correlación entre el Carbono equivalente y la morfología del grafito.





**Figura 6.** Representación de los efectos sobre la fracción en volumen de carburos  $M_3C$  en papel probabilístico normal.



**Figura 7.** Representación de los efectos sobre la fracción en volumen de Ledeburita en papel probabilístico normal.

## CONCLUSIONES

- El método de Diseño de Experimentos (DOE), ha probado ser una herramienta realmente eficaz a la hora de identificar las variables activas, y los factores con una influencia relevante en los resultados.
- Un aumento de la cantidad de FeB adicionada como inoculante promueve la solidificación metaestable del material, aumentando las fracciones en volumen de Ledeburita y carburos  $((Fe,X)_3C)$ , reduciendo la fracción en volumen de grafito precipitado y el número de cuentas por unidad de área del mismo. A su vez, un aumento de los tenores de FeB no implica la precipitación del grafito con morfologías compactas.
- Temperaturas Líquidus elevadas, favorecen la precipitación del grafito con morfología compacta.
- El análisis estadístico confirma el papel del Si como elemento grafitizante, favoreciendo la solidificación estable, ya que para los niveles bajos estudiados aumenta las fracciones en volumen de Ledeburita.
- Un aumento en los contenidos de Ni, no influye significativamente sobre el desarrollo de una solidificación estable o metaestable en el material.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1 J. A. Pero-Sanz, Fundiciones Férrreas, Dossat S.A., 1ª ed., Madrid (España), 1994.
- 2 J. A. Pero-Sanz, Ciencia e Ingeniería de Materiales: Estructura, transformaciones, propiedades y selección, Dossat S.A., 5ª ed., Madrid (España), 2006.
- 3 G.F. Vander Voort, Metallography: Principles and Practice, McGraw-Hill Inc., New York, USA, 1984.
- 4 Prat-Bartés, X. Tort-Martorell Llabrés, P. Grima-Cintas y L. Pozueta-Fernández, Métodos Estadísticos, UPC, 1ª ed., Barcelona, España, 1997.
- 5 G.E.P. Box, W.G. Hunter y J.S. Hunter, Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building, John Wiley and Sons Inc., USA, 1978.
- 6 C. Chatfield, Statistics for Technology – A Course in Applied Statistics, Chapman and Hall, Bristol, England (UK), 1991.