Influencia de las condiciones de moldeo y las características de los moldes sobre la formación de defectos de contracción en piezas de fundición esferoidal*

J. Sertucha**, R. Suárez**, J. Legazpi*** y P. Gacetabeitia***

Resumen

Tradicionalmente, la aparición de rechupes en las piezas fabricadas con fundiciones gráficas se ha relacionado con los procesos de solidificación del material metálico y la capacidad de alimentación entre las diferentes secciones que conforman las piezas. Los estudios más recientes indican que la formación de estos defectos también depende, en gran medida, de las características de los moldes de arena y especialmente de su comportamiento durante la etapa de solidificación-enfriamiento del metal contenido en su interior. En este trabajo se analiza la influencia que muestran los parámetros vinculados a los procesos de moldeo y las propias características de los moldes sobre los defectos de contracción presentes en piezas diseñadas para tal efecto. Por otra parte, se determinan cuáles son los parámetros más relevantes a la hora de controlar los procesos de fabricación y minimizar la presencia de rechupes en las piezas.

Palabras clave

Parámetros de moldeo. Fundición esferoidal. Arena en verde. Defectos de contracción. Rayos X.

Influence of moulding conditions and mould characteristics on the contraction defects appearance in ductile iron castings

Abstract

Shrinkage defects appearance in cast iron has traditionally been related to the solidification processes of the metal and the feeding ability among the different sections of castings. Recent studies have demonstrated that sand moulds properties and their thermal behaviour after pouring step have an important influence on these defects formation too. The influence of the moulding process parameters and the mould characteristics on the contraction defects is analysed in this work using test casting designed specifically for this purpose. Additionally the most important parameters are determined in order to control the manufacturing process and minimise the shrinkage appearance in the castings.

Keywords

Moulding parameters. Ductile iron. Green sand. Contraction defects. X ray.

1. INTRODUCCIÓN

La detección y eliminación de los defectos de contracción en las aleaciones metálicas es uno de los principales

campos de trabajo en la fabricación industrial de piezas de fundición. Se trata de discontinuidades originadas en el material, que afectan de manera crítica a sus características mecánicas^[1-3] y pueden originar fallos importan-

* Trabajo recibido el día 28 de julio de 2006 y aceptado en su forma final el día 9 de enero de 2007.

** Ingeniería y Procesos de Fundición, AZTERLAN. Aliendalde auzunea nº 6, E-48200 Durango (Bizkaia). E-mail: rsuarez@azterlan.es.

*** Betsaide, S.A.L. Apartado 13, E-48230 Elorrio (Bizkaia).

tes en la etapa de servicio. Por ello, el control de este tipo de defectos constituye una labor decisiva a la hora de garantizar la correcta funcionalidad de las piezas y aquellos sistemas de los que forman parte.

En este sentido, los requerimientos establecidos por los clientes de piezas de fundición toleran cada vez menos la presencia de rechupes y/o microrrechupes en el material^[4], especialmente en aquellas piezas consideradas de seguridad. Actualmente, se están realizando desarrollos tecnológicos importantes con el fin de lograr procesos de fabricación suficientemente robustos y garantizar la obtención de piezas exentas de discontinuidades.

Aunque el origen de este tipo de irregularidades está directamente relacionado con los fenómenos de contracción dimensional producidos en el metal durante su solidificación^[1, 5 y 7], existen determinados factores relacionados con los moldes de arena que influyen decisivamente en su aparición. Entre éstos, cabe destacar las deformaciones de las paredes del molde (por efecto del calor de la colada, debido a una deficiencia en la resistencia del molde o simplemente motivado por una compactación deficiente durante el proceso de moldeo), el calentamiento excesivo de la arena en determinadas zonas del molde (las diferentes velocidades de solidificación en la pieza originan distintos grados de calentamiento en el molde) y la presencia de cantidades importantes de gases (elevados contenidos de materiales carbonosos, resinas aglomerantes y/o aire atrapado)^[8-12].

En el caso de que los moldes de arena no estén compactados adecuadamente, su resistencia durante la colada del metal puede resultar insuficiente. En este caso, la presión metalostática es capaz de deformarlos de tal manera que sus paredes cedan y la pieza experimente un hinchamiento (efecto que también puede deberse a una expansión gráfica importante). De este modo, el volumen interior del molde aumenta tras la colada y los dispositivos de alimentación no tiene capacidad para cubrir el nuevo espacio disponible, dando lugar a discontinuidades internas llamadas falsos rechupes^[8].

Habitualmente, en la etapa de diseño de las placas modelo se tiene en cuenta el balance entre la expansión gráfica y la contracción volumétrica del metal líquido durante el proceso de solidificación. Sin embargo, se asume que los moldes son perfectamente rígidos y no se consideran las variaciones dimensionales provocadas fundamentalmente por las interacciones físico-químicas entre la arena y el fundido metálico^[8].

En este trabajo se aborda un estudio que pretende relacionar las propiedades físicas de los moldes fabricados en una línea de moldeo de alta presión, los fenómenos de interacción arena-metal y la formación de rechupes en piezas test, que han sido especialmente diseñadas para cuantificar la incidencia de este defecto. En la misma placa modelo se han incluido piezas test a diferentes alturas, para evaluar los efectos de la presión

metalostática y comparar el comportamiento de los defectos en diferentes condiciones de enfriamiento.

En las pruebas experimentales, se han utilizado materiales de fundición esferoidal para la fabricación de todas las piezas. La evaluación de los defectos de contracción originados en estas pruebas se realiza con ayuda de la técnica de fluoroscopia de rayos X y un software específico para determinar la superficie afectada por las irregularidades detectadas. Finalmente, a través de un método estadístico se han analizado las correlaciones entre parámetros con el fin establecer las conclusiones derivadas de este estudio.

2. EXPERIMENTAL

La metodología seguida a la hora de preparar las mezclas de arena es la utilizada en la fundición Betsaide, S.A.L., en su proceso habitual de fabricación. Se dispone de dos mezcladores intensivos Eirich con capacidad para 2.500 kg, aproximadamente 85 s de tiempo de ciclo de mezcla y velocidades de producción cercanas a 100 t/h. Los ensayos de control de las mezclas de arena preparadas se efectúan en un laboratorio cercano a los mezcladores, siguiendo las metodologías de análisis habituales en este tipo de ensayos. La toma de muestra se efectúa en las cintas que extraen la arena a partir de las tolvas situadas en la parte inferior de estos dispositivos de mezclado. El área de preparación de la arena se sitúa a unos 60 m de la tolva que alimenta la máquina de moldeo (Disamatic 230 B con una cámara de moldeo de 535 × 650 mm).

Antes de iniciar las pruebas experimentales se garantiza que la arena contenida en la tolva que alimenta a la máquina de moldeo es la preparada siguiendo los requerimientos establecidos en cada ensayo. Las condiciones de moldeo (tiempos y presiones de soplado de la arena en la cámara, presiones de prensado de ésta y espesores de mota) se modifican en la propia máquina de moldeo, justo, antes de fabricar los moldes donde se efectúan las pruebas.

El estudio de los defectos se lleva a cabo sobre dos piezas test situadas en la parte superior e inferior perteneciente a uno de los laterales de cada molde. Estas piezas han sido diseñadas específicamente para provocar la formación de rechupes y/o microrrechupes en su zona central o área de última solidificación (Fig. 1).

La figura 2 muestra la disposición de las piezas test en la placa modelo preparada para tal efecto. Con el fin de obtener dos modelos de alimentación diferentes partiendo de un llenado casi simultáneo de ambas piezas, en la superior, se utiliza un canal de llenado con mayor sección (364 mm²) que en la pieza inferior (91 mm²), aunque las dimensiones de la sección de entrada a pieza son iguales (20 × 2,5 mm). Estas piezas se fabrican con un metal tratado con magne-

Figura 1. Zona de última solidificación y con mayor riesgo de rechupes en las piezas test. Fracción líquida: (a) 15 s; (b) 85 s.

Figure 1. Last solidification and highest shrinkage risk area in test samples. Liquid fraction: (a) 15 s; (b) 85 s.

sio, siguiendo la metodología de tratamiento con hilo (diámetro 13 mm, ref. CED354020 CEDIFIL NCC 48B1, composición: % Si = 44,10; % Mg = 29,90; % Al = 0,15; %Tierras Raras = 1,80; % Fe = 24,05) e inoculado posteriormente a su entrada en los moldes (composición del inoculante: % Si = 74,80, % Al = 1,33; % Ca = 2,44; % Zr = 1,40 y % Fe = 20,03).

El diseño de los ensayos experimentales se realiza a través de una selección previa de los parámetros de proceso y sus niveles de trabajo (Tabla I), seguido de un estudio estadístico basado en el método Taguchi. La tabla II incluye la distribución de ensayos obtenida a partir de una matriz $L_{18}(2^1 \cdot 3^6)$, es decir, 18 ensayos constituidos con una variable de 2 niveles de ensayo y 6 variables de 3 niveles de ensayo. En ella, se consideran tres parámetros relacionados con las características de las mezclas de arena: contenido de materiales carbonosos (M. C.), bentonita y la compactabilidad. Los otros cuatro parámetros corresponden a las condiciones de fabricación de los moldes: el tiempo (t_{disparo}) y la presión (P_{disparo}) a la que se introduce la arena en la cámara de moldeo, la presión de compactado de ésta (P_{prensado}) y el espesor de las motas que, tras su apilamiento, configuran los moldes.

Todos los moldes fabricados en las condiciones de un determinado ensayo se cuelan con el mismo metal, el cual está contenido en unidades presurizadas con capacidad para 7t (ref. ABB-CTO5 y/o ABB-OCC50). Sobre este metal, se registran curvas de solidificación con el fin de determinar su tendencia a la contracción y evaluar los parámetros directamente relacionados con el poder de nucleación gráfica. Estas caracteriza-

Figura 2. Disposición de las piezas test y el sistema de llenado en la placa modelo.

Figure 2. Test samples and feeding system location at the pattern plate.

Tabla I. Parámetros y niveles de trabajo

Table I. Parameters and levels of work

Etapa	Parámetro	Niveles		
		A	B	C
Preparación de las mezclas	Bentonita (%)	8,5	9,0	9,8
	M. C. (%)	4,5	5,0	—
	Compactabilidad (%)	38	40	42
Proceso de moldeo	Tiempo de disparo (s)	+0,0	+0,6	+0,8
	P. disparo (bar)	1,5	1,8	2,0
	P. prensado (N/cm ²)	11,5	12,5	13,5
	Espesor de mota (mm)	240	250	300

ciones se llevan a cabo con ayuda del sistema de análisis térmico Thermolan[®][13]. Los ensayos térmicos se llevan a cabo, simultáneamente, con la colada de los moldes (temperaturas de colada 1.360-1.380°C). Adicionalmente, se efectúan controles de resistencia a la penetración sobre la arena compactada en las superficies laterales exteriores de los moldes, utilizando un resistómetro Disa PFP^[14].

Con el fin de diferenciar las piezas fabricadas siguiendo cada una de las condiciones especificadas en la tabla II, éstas, se marcan durante las operaciones de moldeo y se recogen al final de la línea de fabricación (tras el proceso de granallado). Finalmente, se seleccionan al azar 10 piezas por ensayo (5 pertenecientes a la parte superior del molde y 5 a la inferior) destinadas al análisis de los posibles defectos formados.

La evaluación de las superficies afectadas por los rechupes se lleva a cabo con ayuda del programa informático "ImageJ 1.36b" (desarrollado por el Instituto Nacional de Salud de EE.UU.), aplicado sobre las imágenes obtenidas a través de la fluoroscopia de rayos X. La estimación del volumen de los rechupes (V) se realiza midiendo las áreas de defecto (S_1 y S_2) en dos planos perpendiculares entre sí y aplicando, posteriormente, la expresión (1).

$$V \text{ (cm}^3\text{)} = \frac{S_1 \times \sqrt{S_2} + \sqrt{S_1} \times S_2}{2} \quad (1)$$

En el presente trabajo se analiza la relación existente entre las características de las mezclas de arena, las condiciones de moldeo, las propiedades de los moldes fabricados y la formación de defectos originados por la contracción del metal durante los procesos de solidificación. Para ello, se han diseñado una serie de ensayos siguiendo un método estadístico que permite

establecer dichas relaciones y se basa en las observaciones de los defectos formados en piezas específicas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla III muestra los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización térmica y química del metal utilizado en la fabricación de las piezas test. El parámetro $T_{e_{\min}}$ corresponde a la temperatura eutéctica mínima obtenida a partir de la curva de solidificación; esf/mm^2 representa la densidad de esferoides gráfiticos calculada analizando dicha curva con el sistema Thermolan[®] [13]; y el factor k es el coeficiente de tendencia a la contracción del metal fundido (calculado también a través del sistema Thermolan[®] [12]). Se incluyen, también, los valores de resistencia de los moldes utilizados en cada caso y los volúmenes medios de rechupe medidos en las piezas test superior e inferior utilizando la ecuación (1).

El análisis de las porosidades detectadas indica que la mayor incidencia del defecto aparece en las piezas situadas en la parte inferior de los moldes. Aunque este comportamiento es común a todos los ensayos realizados, la magnitud de los rechupes encontrados en las piezas superior e inferior varía de forma similar en función de cada prueba experimental. Los defectos de las piezas superiores muestran morfologías típicas de rechupes secundarios, es decir, microporosidades derivadas de la contracción en la parte final del proceso de solidificación (Fig. 3a). Por el contrario, en las piezas inferiores aparecen rechupes tanto primarios como secundarios (Fig. 3b). Este comportamiento se debe a las diferencias dimensionales en los canales de llenado, aspecto que da lugar a distintos grados de alimentación en las piezas test durante su solidificación.

Otra variante del defecto se observa en las dos superficies externas pertenecientes a la zona central de las

Tabla II. Distribución de ensayos obtenida según el método Taguchi*Table II. Tests designed by the Taguchi method*

Nº de ensayo	Bentonita (%)	M. C. (%)	Compact. (%)	t_{disparo} (s)	P_{disparo} (bar)	P_{prensado} (N/cm ²)	Espesor de mota (mm)
1	8,5	4,5	38	+0,0	1,5	11,5	240
2	8,5	4,5	40	+0,6	1,8	12,5	250
3	8,5	4,5	42	+0,8	2,0	13,5	300
4	9,0	4,5	40	+0,0	1,5	12,5	300
5	9,0	4,5	42	+0,6	1,8	13,5	240
6	9,0	4,5	38	+0,8	2,0	11,5	250
7	9,8	4,5	42	+0,0	1,8	11,5	300
8	9,8	4,5	38	+0,6	2,0	12,5	240
9	9,8	4,5	40	+0,8	1,5	13,5	250
10	8,5	5,0	40	+0,0	2,0	13,5	240
11	8,5	5,0	42	+0,6	1,5	11,5	250
12	8,5	5,0	38	+0,8	1,8	12,5	300
13	9,0	5,0	38	+0,0	1,8	13,5	250
14	9,0	5,0	40	+0,6	2,0	11,5	300
15	9,0	5,0	42	+0,8	1,5	12,5	240
16	9,8	5,0	42	+0,0	2,0	12,5	250
17	9,8	5,0	38	+0,6	1,5	13,5	300
18	9,8	5,0	40	+0,8	1,8	11,5	240

Tabla III. Resultados experimentales*Table III. Experimental results*

Nº de ensayo	$T_{\text{mín}}$ (°C)	Esf/mm ² calculado	k	C (%)	Si (%)	Resist. molde (N/cm ²)		Rechupe en pieza test (cm ³)		
						Superior	Inferior	Superior	Inferior	Total
1	1142,8	216	0,80	3,72	2,48	23	26	0,193	1,094	1,287
2	1151,4	282	0,80	3,71	2,48	26	27	0,525	1,171	1,696
3	1142,8	216	0,80	3,72	2,48	24	27	0,244	1,261	1,504
4	1145,3	217	0,79	3,76	2,31	21	25	0,708	1,603	2,310
5	1147,5	239	0,82	3,71	2,63	20	26	1,889	3,197	5,086
6	1151,4	282	0,80	3,71	2,48	25	28	0,469	1,584	2,053
7	1147,5	239	0,82	3,71	2,63	21	25	1,633	2,330	3,962
8	1153,0	273	0,80	3,81	2,22	26	27	0,190	1,171	1,361
9	1151,4	282	0,80	3,71	2,48	27	28	0,554	1,625	2,179
10	1145,3	217	0,79	3,76	2,31	21	28	0,926	1,616	2,543
11	1147,5	239	0,82	3,71	2,63	22	24	1,365	2,534	3,899
12	1145,3	217	0,79	3,76	2,31	22	26	0,679	1,812	2,491
13	1155,7	350	0,86	3,62	2,94	22	30	1,372	1,865	3,237
14	1155,7	350	0,86	3,62	2,94	23	26	1,489	2,324	3,813
15	1153,0	273	0,80	3,81	2,22	25	28	0,442	1,733	2,175
16	1147,5	239	0,82	3,71	2,63	22	25	1,212	2,389	3,601
17	1142,8	216	0,80	3,72	2,48	23	28	0,227	1,241	1,468
18	1153,0	273	0,80	3,81	2,22	25	27	0,360	1,575	1,934

piezas test (área de mayor riesgo para la formación de los defectos de contracción, Fig. 1). Se trata de “rechupes superficiales” que se manifiestan en forma de hundimientos detectados únicamente en las piezas situadas en las posiciones superiores (Fig. 3a). Este hecho, tam-

bién guarda relación directa con las diferentes capacidades de alimentación de los canales de llenado utilizados en cada caso.

A lo largo del proceso de solidificación de las piezas test superiores, se dispone de un canal capaz de

Figura 3. Morfología de los rechupes detectados por rayos X en las piezas test: (a) pieza superior; (b) pieza inferior.

Figure 3. Morphology of defects found in test samples through X-ray analysis: (a) upper test sample; (b) lower test sample.

compensar parcialmente las necesidades de contracción primaria en el metal. Aunque ello se traduce en la ausencia de rechupes primarios en el interior del material (Fig. 3), este canal no es capaz de completar dichas necesidades de alimentación y el metal acaba contrayendo superficialmente en la zona central. Por el contrario, en las piezas inferiores, la sección del canal de llenado es menor y la alimentación se interrumpe en las etapas más tempranas de la solidificación del metal. Como consecuencia de ello, inicialmente se originan rechupes primarios en el interior de las piezas y no se originan los hundimientos superficiales en las zonas de última solidificación.

En todos los casos, la resistencia a la penetración medida en la parte inferior de los moldes es más elevada y estable que la obtenida en las zonas superiores, aspecto que puede resultar habitual en los procesos de moldeo vertical. Por ello, a la hora de estudiar su influencia sobre los defectos en las piezas test, se consideran únicamente las resistencias medidas en la parte superior de los moldes puesto que se trata del parámetro más sensible a las variaciones en las condiciones de moldeo y/o las propiedades de las mezclas de arena.

Cuando se estudia la relación entre los volúmenes totales de defecto (rechupes primarios y microrrechupes) en las dos piezas test y la resistencia a la penetración de la arena en la zona superior de los moldes se obtiene la evolución mostrada en la figura 4. En este caso, son los moldes menos rígidos los que dan lugar a los mayores volúmenes de defecto en las piezas.

Por el contrario, cuando se alcanzan elevados grados de compactación en las mezclas de arena utilizadas en el moldeo se minimizan los efectos de dilatación del molde por efecto de la presión del metal líquido contenido en su interior. En estas condiciones, se obtienen los menores niveles de rechupe en las piezas test analizadas en este estudio. La tendencia experimental mostrada en la figura 4 indica que es necesario trabajar con resistencias a la penetración superiores a 22-23 N/cm² en la parte superior de los moldes, con el fin de obtener la menor incidencia de los defectos de contracción en las piezas test. En estos casos, el volumen ocupado por el defecto representa el 1,0-1,5 % del volumen total de la pieza.

Los ensayos térmicos realizados muestran que las características del metal utilizado en cada prueba experimental son comparables y su tendencia a la contracción similar (valores del factor k incluidos en el intervalo 0,79-0,82). Este hecho, junto con la utilización de temperaturas de colada similares en todos los ensayos, minimiza la influencia metalúrgica en la formación de los rechupes en las piezas test analizadas.

El tratamiento de los datos incluidos en la tabla III, a través del método estadístico Taguchi, da lugar a las tendencias mostradas en la figura 5. En ella, se observa que los menores volúmenes de rechupe en las piezas test se obtienen cuando las mezclas de arena utilizadas en las operaciones de moldeo poseen bajas compactabilidades y/o humedades. Este comportamiento se explica en base a la mayor resistencia y/o dureza de los

Figura 4. Evolución del volumen total de rechupe en función de la resistencia medida en la parte superior de los moldes.

Figure 4. Total shrinkage evolution vs. mould hardness measured in the upper zone.

moldes cuando la arena compactada contiene menores cantidades de agua (los granos se sitúan en posiciones más cercanas, obteniéndose empaquetamientos más densos y difíciles de deformar).

En relación a las condiciones de moldeo en máquina, la utilización de elevados tiempos de soplado de la arena en la cámara de moldeo, valores reducidos de la presión con la que se efectúa este soplado y presiones de prensado altas, proporcionan los mejores resultados. Estas tres condiciones favorecen la obtención de procesos de llenado más homogéneos en toda la cámara y, posteriormente, una compactación elevada y uniforme en todo el molde. Todos estos aspectos aumentan la rigidez de los empaquetamientos obtenidos y minimizan la posibilidad de deformaciones locales producidas por el efecto de la colada.

Otro aspecto a tener en cuenta es el espesor de los semimoldes tras el compactado de la arena en la cámara de moldeo. Se observa un aumento en el volumen medio del defecto cuando se trabaja con los espesores más reducidos (< 250 mm). Este hecho es consecuencia de insuficiencias en la resistencia de los empaquetamientos, debidas a la imposibilidad de llevar a cabo una compactación eficaz de la arena cuando se trabaja con espesores de mota muy reducidos. Las medidas de dureza realizadas sobre estos sistemas de reducido espesor demuestran las deficiencias mencionadas.

La tendencia observada en todos estos parámetros a la hora de obtener los menores niveles de defecto en las piezas test se relaciona experimentalmente con la fabricación de moldes más homogéneos y rígidos^[5].

Estos resultados confirman el comportamiento mostrado en la figura 5, es decir, las características de las mezclas de arena y las condiciones de moldeo que originan moldes más resistentes dan lugar a menores defectos de contracción en las piezas.

4. CONCLUSIONES

Los ensayos experimentales efectuados en el presente estudio muestran la dependencia de los defectos de contracción presentes en piezas críticas con algunas de las características pertenecientes a las mezclas de arena en verde y, especialmente, con las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso de fabricación de los moldes.

Aquellas condiciones de fabricación que dan origen a los moldes más rígidos o con mayores resistencias a la penetración en sus superficies dan lugar a los menores volúmenes de defecto en las piezas contenidas en su interior. Este comportamiento se explica en base a los fenómenos de dilatación de la arena compactada por efecto de la presión metalostática del metal líquido. Los moldes mejor compactados son más estables y menos deformables por efecto de la colada. De este modo, se minimiza el riesgo de deformaciones en las piezas, que puedan potenciar aún más la formación de porosidades debidas a la contracción del metal durante el proceso de solidificación.

La utilización de mezclas de arena con compactabilidades relativamente bajas (38-40 %), condiciones de moldeo en máquina que favorecen la correcta distribución de la arena durante el llenado de la cámara y la

Figura 5. Tendencia de los parámetros de moldeo y las características de la arena en la minimización de rechupes.

Figure 5. Moulding parameters and sand characteristics tendency in the shrinkage minimisation.

aplicación posterior de presiones de prensado elevadas (compactado final de la arena) generan los moldes más estables y uniformes.

El control efectivo de las durezas o resistencias a la penetración de los moldes fabricados puede ser utilizado como una herramienta útil para evaluar la tendencia a la formación de defectos de contracción en las piezas, atendiendo exclusivamente a los factores relacionados con las mezclas de arena y los procesos de moldeo.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración prestada por el personal de Betsaide, S.A.L. a la hora de realizar los ensayos experimentales en planta. Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto PROFIT 2005 con referencia CIT 020600-2005-1.

REFERENCIAS

- [1] T. S. PIWONKA, S. KUYUCAK, K. G. DAVIS, *AFS Trans.* 113 (2002) 1-15.
- [2] R. GONZAGA-CINCO, J. FERNÁNDEZ-CARRASQUILLA, *Rev. Metal. Madrid* 42 (2006) 91-102.
- [3] A. SUÁREZ-SANABRIA, J. FERNÁNDEZ-CARRASQUILLA, *Rev. Metal. Madrid* 42 (2006) 18-31.
- [4] J. W. WOOLLEY, D. M. STEFANESCU, *AFS Trans.* 094 (2005) 1-7.
- [5] R. RUXANDA, L. BELTRÁN-SÁNCHEZ, J. MASSONE Y D. M. STEFANESCU, *AFS Trans.* 066 (2001) 1-12.
- [6] T. KANNO, I. KANG, Y. FUKUDA, T. MIZUKI Y S. KIGUCHI, *AFS Trans.* 084 (2006) 1-10.
- [7] P. LARRAÑAGA, J. SERTUCHA, R. SUÁREZ, *Rev. Metal Madrid* 42 (2006) 244-255.
- [8] J. SERTUCHA, R. SUÁREZ, *Arenas de Moldeo en Verde*, Ed. Azterlan, Durango, España, 2005, pp. 231 y 260-263.
- [9] H. KAMBAYASHI, Y. KUROKAWA, H. MIYAKE, *AFS Trans.* 016 (2005) 1-19.
- [10] B. P. WINTER, T. R. OSTROM, D. J. HARTMAN, P. K. TROJAN, R. D. PEHLKE, *AFS Trans.* 69 (1984) 551-560.
- [11] T. SAKAGUCHI, T. KANNO, I. KANG, S. KIGUCHI, *Proc. 66th World Foundry Congress*, vol. 1, pp. 963-974, Istanbul, Turkey, 2004.
- [12] I. FERNÁNDEZ-PARIENTE, F. J. BELZUNCE-VARELA, *Rev. Metal. Madrid* 42 (2006) 279-286.
- [13] R. SUÁREZ, *Calidad metalúrgica del hierro. Análisis térmico*, Proc. 1st Symp., Azterlan and the Foundry Sector, Bilbao, España, 2002.
- [14] DISA INDUSTRIE AG catalogue, Test instruments for moulding and core sands, Schaffhausen, Switzerland, 2003.