

LA CIENCIA DETRÁS DE KASANDRA®

Nuevo sistema de control de producción "just in time" para la detección de defectos metalúrgicos del tipo de micro-porosidades y definición del tipo de grafito, conteo de nódulos y estructura final del componente.

R. Suárez¹⁻², J.M. Gutiérrez¹, G. Zarrabeitia¹, A. Areitioaurtena¹, I. Conde¹, A. G. Gorordo¹

(1) Fundación Azterlan.

(2) Veigalan Estudio 2010 S.L.

Palabras clave. Microrrechupe, fracción sólida, eutéctico, punto caliente, volumen aislado

Introducción.

La presencia de problemas metalúrgicos tales como microrrechupes, carburos u otros defectos en las piezas fundidas, reducen dramáticamente las propiedades mecánicas de los componentes fabricados y es uno de los mayores problemas a los que debe enfrentarse la industria de fundición. La aparición de estos defectos origina pérdidas de productividad que suponen millones de euros/año, en términos de sobre consumo de energía, materias primas, mano de obra, controles secundarios etc.

Aunque en los últimos cincuenta años la industria de fundición ha avanzado en conocimiento y desarrollo tecnológico más que en los doscientos años precedentes, algunos problemas no han sido resueltos de forma definitiva. El desarrollo de potentes ordenadores ha permitido el empleo de sistemas de cálculo y simulación de solidificación que van mucho más allá del simple uso de las ecuaciones de Chorinov. El empleo de métodos de cálculo basándose en elementos o diferencias finitas permite seguir el desarrollo de la solidificación paso a paso durante todo el proceso y reducir en gran manera los problemas de rechazo relacionados con la contracción líquida (rechupe y microrrechupe).

No obstante, la resolución del problema se complica, en el caso de las fundiciones de hierro, debido a la singularidad de la presencia de dos eutécticos (estable-grafítico y metaestable-carbúrico). Lo que da origen durante el paso del estado líquido-sólido a la presencia de diferentes modelos de solidificación que no son tenidos en cuenta por los softwares de simulación estándar, que contemplan durante el cálculo solamente un modelo de curva de entalpía del metal. Esta es una de las causas raíz por el que componentes fundidos en los que previamente su sistema de llenado y mazarotado han sido estudiados mediante softwares

comerciales de simulación, muestren durante la fabricación porcentajes de rechazo variables y aleatorios debido generalmente a la presencia de defectos de contracción o microrrechupes. Hecho este que en muchos casos provoca un control especial de toda la fabricación por medio de técnicas no destructivas de U.S o Rayos X con la consiguiente pérdida de productividad y aumento de los costos de fabricación.

En el presente trabajo se muestra la importancia del control, durante el proceso de fabricación, de la calidad metalúrgica y de la influencia que ésta ejerce directamente sobre el componente fundido. Si se une la medida de la calidad con el cálculo térmico de la solidificación se está en posesión de una herramienta poderosísima, capaz de medir la influencia que los cambios metalúrgicos ejercen en la aparición de defectos, de tal manera que bien pueda actuarse directamente sobre el proceso durante la fabricación y evitarlos o conocer de antemano que es lo que va a suceder.

El reducido tiempo de cálculo que necesita esta técnica, permite el seguimiento casi molde a molde de la fabricación prediciendo con anterioridad los problemas metalúrgicos que pueden presentarse en términos de presencia de microrrechupes o carburos.

Fundamentos.

Los metales y aleaciones en general muestran un cambio importante de densidad entre el estado líquido y sólido. Esto se traduce en una variación de volumen que debe ser alimentado si se quieren evitar cavidades de contracción conocidas como rechupe primario o rechupe debido a la contracción líquida.

Al comenzar la solidificación pequeños granos sólidos se forman en el interior del líquido sin tener contacto unos

con otros, la densidad aumenta y el comportamiento del líquido comienza a ser pastoso (parecido al de un slurry).

Conforme avanza la solidificación llega un momento en el que se forma una red sólida lo suficientemente tupida como para formar un entramado rígido. A partir de ese momento la alimentación desde las mazarotas es prácticamente imposible.

Con el fin de modelizar esta última afirmación se han realizado ensayos de temple en curso de solidificación en fundiciones esferoidales y grises pudiéndose conocer con precisión la evolución de la solidificación y su modelo.

En las fundiciones de hierro la geometría de la pieza juega un papel fundamental determinando la forma y velocidad de las isoterma, así como la amplitud de la zona pastosa pudiéndose calcular para cada módulo de la pieza, el grado de subenfriamiento eutéctico, la evolución de la fracción sólida, la cantidad de grafito formado y el grado de viscosidad del líquido residual.

El proceso de solidificación comienza con variación de la densidad del metal líquido por efecto del descenso de la temperatura del mismo. La contracción líquida viene definida por la relación de densidades entre el sólido y el líquido, pudiendo definirse el factor de contracción

$$\text{como } \beta = \left[(\rho_s - \rho_l) \frac{1}{\rho_s} \right] \times (1 - f_{cri}) \quad \text{Ecuación (1)}$$

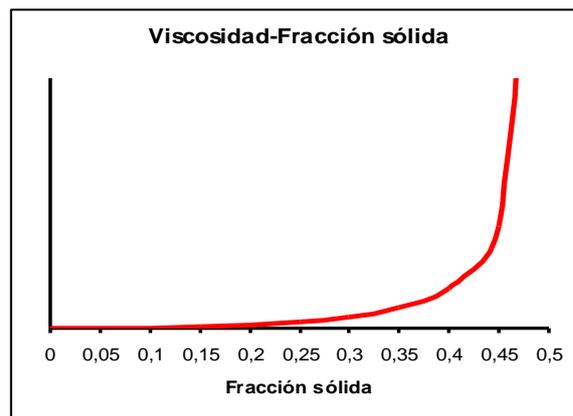
Siendo β el factor de contracción, ρ_s la densidad del sólido, ρ_l la densidad del líquido y f_{cri} la fracción sólida crítica o fracción de máxima alimentación

Al final del llenado el gradiente térmico existente entre las diferentes zonas de la pieza fundida induce velocidades de enfriamiento distintas, velocidades que se ven incrementadas o disminuidas en función de las diferentes masividades encontradas en la propia pieza fundida. Esto da lugar a que se creen bolsas líquidas o semipastosas que pueden llegar a estar aisladas unas de otras.

Conforme avanza la solidificación aumenta la proporción de sólido formado hasta que se alcanza lo que se ha dado en llamar fracción sólida crítica o coherencia dendrítica. En este caso diferentes áreas de la pieza pueden quedar aisladas unas de otras y éstas a su vez de la o las mazarotas de alimentación. Quedan simplemente sometidas a la capacidad del metal para formar grafito, que deben compensar la contracción de las zonas aisladas y evitar de esta manera la formación de microrrechupes. Como consecuencia de lo anterior la monitorización de la variación de la calidad metalúrgica, entendida como la capacidad de formación de grafito, durante la fabricación se revela como fundamental.

La figura nº1 que se muestra a continuación trata de ilustrar sobre las dificultades de alimentación en la zona pastosa y cómo evoluciona ésta en función de la fracción sólida. La imagen superior izquierda representa la curva de enfriamiento del metal y la superior derecha la formación de sólido (áreas oscuras) con respecto al líquido (zonas más claras). En la parte inferior se ilustra la dificultad que tiene un líquido al pasar por un lecho poroso.

Fig. nº1 Evolución de la fracción sólida en función de la curva de solidificación



Para que un componente fundido no presente problemas de macro porosidad o rechupe primario es necesario cumplir tres condiciones.

- a) Una condición térmica conocida como módulo de solidificación y que representa la cantidad de energía que almacena la mazarota, siendo ésta superior a de la pieza que se quiere alimentar.

Este módulo (M) está representado por la relación entre el volumen de la mazarota (V) y la superficie a través de la cual enfría (S). Por lo tanto, la representación del módulo de enfriamiento puede definirse como

$$M = V/S \quad \text{Ecuación (2)}$$

A su vez el módulo de enfriamiento está relacionado con el tiempo de solidificación en segundos y una constante que depende de las conductividades del metal y el molde, así como de la velocidad de transferencia por convección. De esta manera el tiempo de solidificación y su relación con el módulo puede escribirse de la siguiente manera.

$$t = k(M)^{1/n} \quad \text{Ecuación (3)}$$

- b) La segunda condición es volumétrica. La mazarota debe suministrar metal a la pieza durante todo el período de contracción líquida

y cumplir la condición descrita en la ecuación nº2. En el caso de las fundiciones gráficas es necesario considerar que se producen dos tipos de contracción volumétrica durante el período de solidificación de un componente fundido. El primero corresponde a la variación de volumen y aumento de la densidad del líquido desde la temperatura de llegada del metal a la pieza hasta la temperatura de comienzo del período eutéctico, temperatura ésta que depende de la calidad metalúrgica. El segundo período de contracción, menor en volumen que el anterior, se produce entre el inicio de la temperatura eutéctica y la temperatura final de solidificación. Durante este período aumenta de forma muy importante la viscosidad del líquido residual haciéndose casi imposible la alimentación desde la mazarota a partir de una cierta fracción crítica.

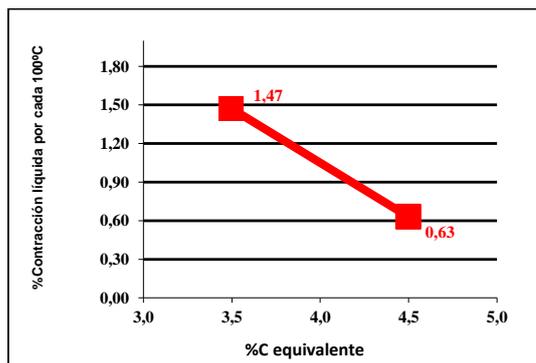
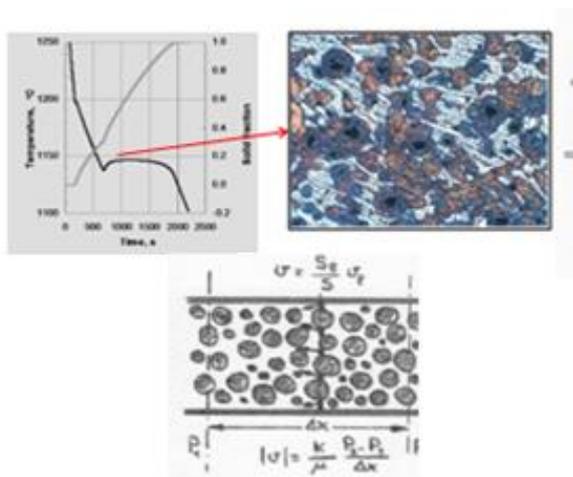


Fig. nº2 Evolución de la viscosidad con la fracción sólida.



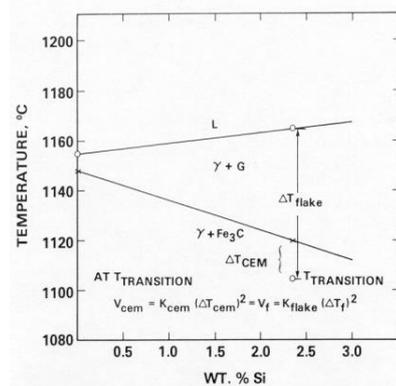
No obstante, la singularidad del proceso de solidificación de las fundiciones gráficas hace que la aparición de grafito durante el período eutéctico pueda compensar la contracción que se produce durante ese mismo período.

- c) Tercera condición. La contracción volumétrica está también influenciada por la composición química, de tal manera que variando el Carbono equivalente aumenta o disminuye, tal y como puede apreciarse en la figura nº3.

Fig. nº3 Variación de la contracción volumétrica en función del contenido en C equivalente

Dado que las aleaciones Fe-C-Si pueden solidificar para la misma composición química siguiendo dos modelos, el estable con precipitación de grafito y el metaestable con precipitación de cementita hace que la complejidad de la cinética de solidificación aumente de forma considerable. Adicionalmente la temperatura de formación de ambos eutécticos depende de la composición química aumentando o disminuyendo la distancia entre ellos en función del contenido en Si.

Fig. nº4 Temperaturas de formación del eutéctico estable y metaestable en función del contenido de silicio.



Control de la solidificación en tiempo real. El sistema KASANDRA®

En los últimos 30 años la puesta a punto de nuevos proyectos de piezas fundidas ha dado un salto de gigante, reduciendo de forma importantísima el número de pruebas necesarias para poner a punto la fabricación de una nueva referencia. Todo ello ha sido posible gracias a la incorporación de los simuladores de llenado y solidificación en las fundiciones.

A pesar de estos importantes avances quedan por resolver problemas importantes, ya que hasta el presente el cálculo numérico no contempla las

variaciones de calidad que pueden producirse a lo largo de la fabricación de una referencia. Prueba de ello es que el rechazo por problemas relacionados con la alimentación es muy variable, encontrándose diferencias entre producciones distintas.

Este problema da origen a un nuevo planteamiento industrial basado en la medida instantánea de la calidad metalúrgica, es decir en la capacidad del metal para generar el grafito necesario que contrarreste la contracción a lo largo de todo el periodo de solidificación de la pieza. Se transfieren los datos obtenidos a un software de solidificación que, en un tiempo extraordinariamente corto, da una predicción sobre la sanidad interna. Esto permite seguir con comodidad desde la línea de producción las incidencias que ocurren durante la fabricación y apartar aquellos lotes que por sus características sean dudosos, para a posteriori ejercer un control más exhaustivo sobre ellos.

Este nuevo concepto de cálculo da origen al software de simulación Kasandra®. Este software se basa en la captura de la geometría de la pieza en un formato 3D, realizando sobre éste un mallado. A partir del mallado y por medio de cálculo por volúmenes finitos es posible simular tanto el llenado como la solidificación del componente y obtener el tiempo de solidificación de cada elemento asignándole un módulo de solidificación. De esta forma es posible dibujar un mapa de las diferentes velocidades de enfriamiento que se producen en la pieza o en el molde entero.

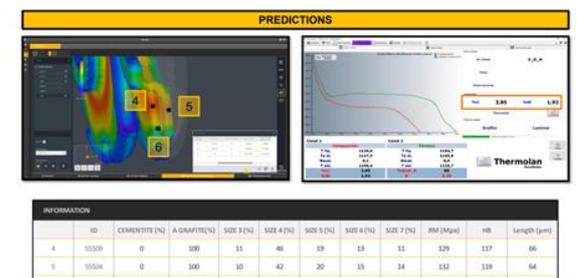
El sistema de cálculo permite conocer el camino crítico de alimentación, determinar las masas aisladas y, dentro de ellas, los centros térmicos (hot spots) que pueden dar origen a problemas de microporosidad.

Adaptándose al nuevo modelo de cálculo, el sistema permite la incorporación instantánea de la medida de la calidad metalúrgica realizada por medio del sistema Thermolan® u otros sistemas de Análisis Térmico, recalculando la misma en función de las diferentes velocidades de solidificación. El objetivo es obtener una predicción en pocos segundos sobre la sanidad interna del componente que está siendo fabricado.

Adicionalmente, es una herramienta básica en la estabilización del proceso productivo, ya que es capaz de visualizar las distintas variables que influyen en la generación de defectos y proporcionar la información necesaria para su control.

Otra ventaja de este sistema es que permite, gracias al mayor conocimiento sobre los procesos de solidificación y sus riesgos, el diseño de sistemas de mayor rendimiento, con sistemas de alimentación de menor tamaño, que los programas clásicos de simulación indican que van a presentar en defecto.

Fig. nº5. Ventana del sistema Kasandra® mostrando zonas aisladas y la predicción de estructura.



Aplicaciones del sistema Kasandra®.

El sistema Kasandra® puede trabajar siguiendo dos formatos, uno en la oficina de ingeniería para el cálculo de simulaciones de nuevos proyectos o mejora de los antiguos, integrando la calidad almacenada en la base de datos del Thermolan® u otro sistema de Análisis térmico. De esta forma se puede visualizar entre otros los siguientes indicadores:

- Incremento del rendimiento de placa.
- Velocidades y temperaturas en el llenado.
- Gradientes de temperatura al final de este.
- Evolución de la solidificación, masas aisladas, centros térmicos, puntos calientes.
- Integrando la calidad metalúrgica se puede obtener la siguiente información.
 - Cálculo del riesgo de aparición de microporosidades.
 - Detección del número de nódulos en cada elemento, en el caso de fundición esferoidal.
 - Predicción de estructura, ratio ferrita/perlita, carburos.
 - HB.
 - Tipos de grafito formados, en fundición laminar, dependiendo del módulo de la zona de la pieza a estudio.

Fig. nº 6. Representación de las temperaturas durante el llenado.

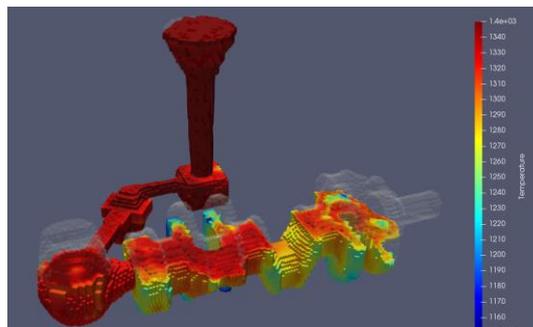


Fig. nº 7 Predicción del tamaño de los grafitos en un disco de freno.



El segundo elemento del sistema se integra directamente en la línea de producción, corrigiendo los resultados obtenidos de la simulación realizada en Ingeniería con los datos reales de Análisis Térmico, medidos en tiempo real.

El objetivo es conocer el riesgo para la sanidad interna y la estructura de las zonas críticas de la pieza en cada instante de la fabricación, permitiendo tomar medidas correctoras para anticiparse a los problemas y reducir el número de piezas defectuosas producidas.

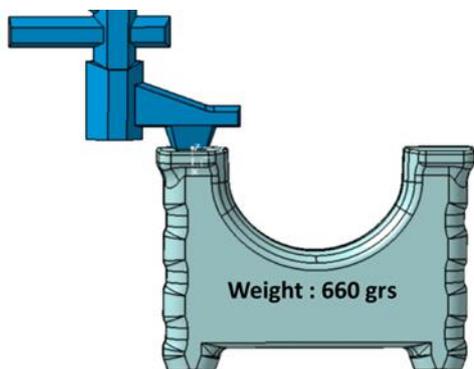
CASO DE ESTUDIO.

El caso que se presenta evalúa la importancia de la calidad metalúrgica en el desarrollo de microporosidades en una pieza de automoción.

Se trata de una tapeta de motor que generalmente se fabrica con 1 ó 2 mazarotas, según los casos, para evitar el microrrechupe que aparece después del mecanizado en la zona de las bridas de unión.

El objetivo del presente estudio verificar la influencia de la calidad metalúrgica sobre el microrrechupe y al mismo tiempo comprobar la fiabilidad del módulo metalúrgico de Kasandra® para su aplicación a la fabricación de piezas sin necesidad de utilizar mazarotas.

Fig. nº 8. Pieza objeto del estudio



Las pruebas se realizan en tres fundiciones europeas que trabajan habitualmente para la industria del automóvil.

La simulación inicial del llenado y solidificación sirve para definir las posibles zonas aisladas y puntos calientes que puedan producirse.

Una vez realizada la simulación se realizan los tests en Planta integrando en el software los registros de la curva de enfriamiento y prediciendo el grado de sanidad interna que posteriormente se verifica por tomografía.

Fig. nº9. Gradiente térmico al final del llenado

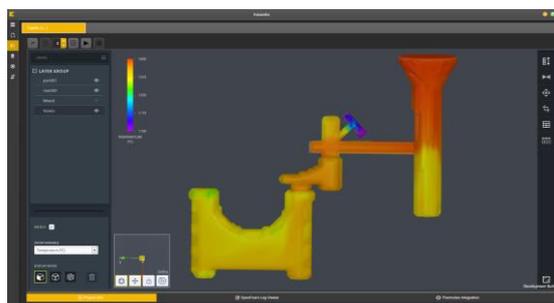
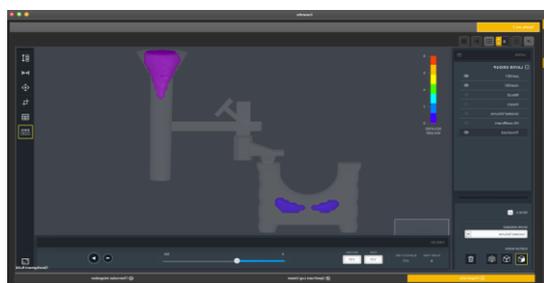


Fig. nº10 Representación de zonas aisladas y puntos calientes en el interior de las mismas.



Se han seguido en cada una de las fundiciones los parámetros de fabricación que tienen definidos para este tipo de piezas o para piezas de similares características.

Las composiciones del metal se han situado en el rango alto del Carbono (3.16-3.93%) y en el rango bajo del Silicio (2.03-2.26%). El tratamiento con FeSiMg ha

seguido los estándares de cada fundición, pero se ha trabajado con un nivel controlado de Mg en la pieza (inferior a 0.035%).

A la vez que se fabricaban las piezas se registraba su curva de enfriamiento mediante el sistema de Análisis Térmico Thermolan®.

El resultado de las piezas fabricadas en cada situación es muy diferente. Lográndose en el caso de la Fundición A piezas sin defecto mientras que los otros dos lotes de piezas, Fundiciones B y C, presentan defectos internos de diferente tamaño.

Mediante una observación "superficial" de las curvas de enfriamiento no se detectan diferencias tan significativas que permitan explicar esta variación de los resultados.

Sin embargo, al aplicar los algoritmos de cálculo integrados tanto en el sistema Thermolan® como en Kasandra® se pueden detectar estas diferencias. Estos parámetros caracterizan la capacidad de precipitación de grafito en las diferentes etapas de la solidificación, son los que Kasandra® aplica para corregir los resultados de la simulación inicial.

Se obtiene un nivel de riesgo para la sanidad de la pieza diferente para cada calidad metalúrgica y que está en consonancia con las verificaciones realizadas sobre las piezas fabricadas mediante la técnica de tomografía computerizada.

Fig. nº 11 Curva de enfriamiento de la Fundición A y resultado de la pieza fabricada

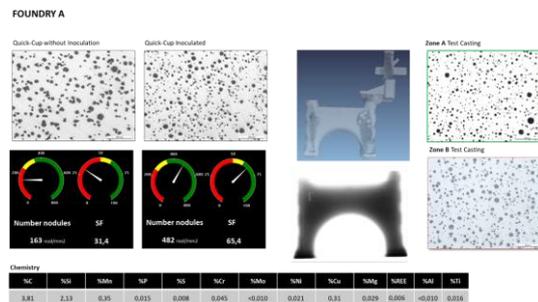
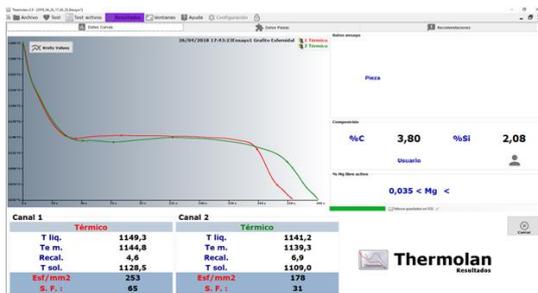


Fig. nº 12 Curva de enfriamiento de la Fundición B y resultado de la pieza fabricada

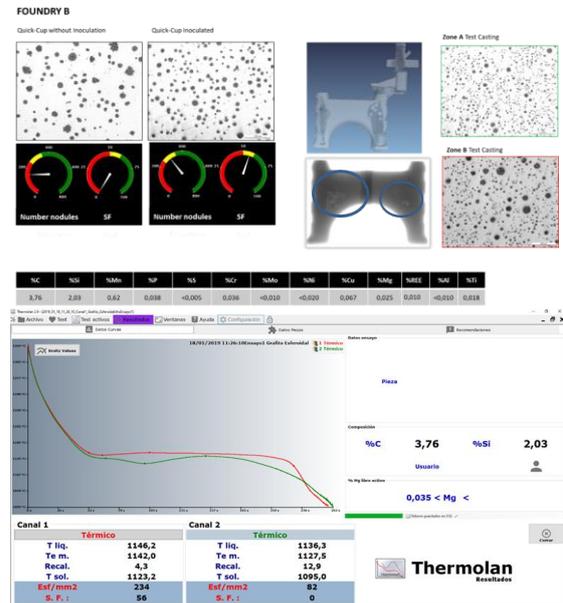
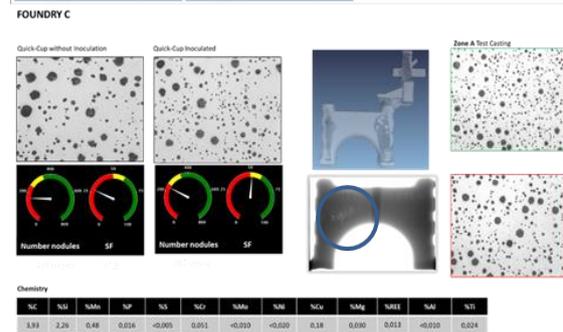
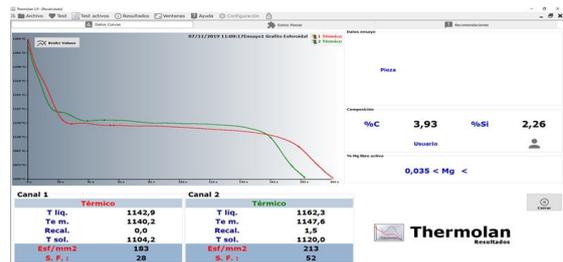


Fig. nº 13 Curva de enfriamiento de la Fundición C y resultado de la pieza fabricada



CONCLUSIONES.

La simulación del proceso de fundición permite el ahorro de costes de fabricación y el tiempo de puesta a punto de una pieza.

Sin embargo, no es capaz de recoger la variabilidad del proceso de fundición, por ello se plantea cambiar el concepto de simulación. Se pasa de un planteamiento estático, una única simulación sirve para las diferentes

fabricaciones de una pieza, a un planteamiento dinámico, se parte de una simulación pero sus resultados se corrigen en función de la situación real de la planta en cada instante.

En las pruebas realizadas en diferentes fundiciones se ha podido establecer que para un mismo diseño la calidad metalúrgica determina la sanidad de la pieza. Gracias a la determinación de los parámetros clave que definen esta calidad metalúrgica es posible medirla mediante técnicas de Análisis Térmico.

El sistema Kasandra® integra los resultados de calidad metalúrgica en sus predicciones tanto de sanidad como de estructura de cada zona de la pieza, permitiendo conocer en tiempo real los riesgos de fabricación y, por tanto, reducir el número de piezas no válidas fabricadas.

REFERENCIAS.

1. Lim, C. H., Cho, S. H., Lee, Y. C., Choi, J. K., "Basic Construction of Intelligent Expert System for Riser Design using Database System and Optimisation Tools", International Journal of Cast Metal Research, vol. 18, pp 195-201 (2005).
2. Stefanescu, D. M., "Computer Simulation of Shrinkage Related Defects in Metal Castings – a Review", International Journal of Cast Metal Research, vol. 18, pp 129-143 (2005) and references therein.
3. Hardin, R. A., Shen, X., Gu, J., Beckermann, C., "Use of Niyama Criterion to Predict ASTM X-Ray Levels and to Develop Improved Feeding Rules for Steelcasting", AFS Transactions, vol 96, pp 413-422 (1988).
4. Downes, N. T. R., Kannan, S., "Improving Productivity in Ductile Iron Castings – Some Ideas to Improve Casting Yield", AFS Transactions, vol 111, paper 03-081 (2003).
5. Gutiérrez, J. M., Loizaga, A., Sertucha, J., Suárez, R. "A Computer-Aided System for Melt Quality and Shrinkage Propensity Evaluation Based on the Solidification Process of Ductile Iron", AFS Transactions, vol 116, paper 08-008 (2008).
6. Kanno, T., Kang, I., Fukuda, Y. Mizuki, T., "Effect of Pouring Temperature and Composition on Shrinkage Cavity in Spheroidal Graphite Cast Iron", AFS Transactions, vol 114, paper 06-084 (2006).
7. Sabau, A. S., "Prediction of alloy shrinkage factors for the investment casting process", AFS Transactions, vol 114, paper 06-084 (2006).
8. Fredriksson, H., Stjernedahl, J., Tinoco, J., "On the solidification of nodular cast iron and its relation to the expansion and contraction", Materials Science and Engineering A, vol A413-414, pp 363-372 (2005).
9. Woolley, J. W., Stefanescu, D. M., "Microshrinkage Propensity in thin wall ductile iron castings", AFS Transactions, vol 113, paper 05-094 (2005).
10. Li, Z., Li, Y., "Evaluation of melt quality and graphite degeneration prediction in heavy section ductile iron", Metallurgical and Materials Transactions A, vol 36A, pp 2455-2460 (2005).
11. Frost, J. M., Stefanescu, D. M., "Melt quality assessment of SG iron through computer-aided cooling curve analysis", AFS Transactions, vol 112, pp 189-199 (2005).
12. Stefanescu, D. M., Qiu, H. Q., Chen, C. H., "Effects of selected metal mold variables on dispersed shrinkage in SG cast iron", AFS Transactions, vol 103, pp 189-197 (1995).
13. Sabau, A. S., "Numerical simulation of the investment casting process", AFS Transactions, vol 113, paper 05-160 (2005).
14. Hardin, R. A., Shen, X., Gu, J., Beckermann, C., "Use of Niyama Criterion to Predict ASTM X-Ray Levels and to Develop Improved Feeding Rules for Steelcasting", AFS Transactions, vol 107, pp 413-422 (1999).
15. Ohnaka, I., Sato, A., Sugiyama, A., Kinoshita, F., "Mechanism and estimation of porosity defects in ductile cast iron", International Journal of Cast Metals.
16. Jin-hai Liu, Jian-shuai Yan, Xue-bo Zhao, Hai-tao Xue, Gui-xia Zhan and Peng-hui Yang. "Precipitation and evolution of nodular graphite during solidification process of ductile iron.
17. Chisamera M., Riposan I., Stan S., et al. "Shirnkage evaluation in ductile iron as influenced by mould media and inoculant type". International Journal of Cast Metals Research (2011).