

**I+D+i EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES****ACTIVIDADES INVESTIGADORAS Y TECNOLÓGICAS EN IK4-AZTERLAN**

*A. Bakedano, J. Nieves, J. Sertucha, G. Zarrabeitia*

Investigación y Desarrollo de Procesos Metalúrgicos, IK4-AZTERLAN, Aliendalde Auzunea 6, E-48200, Durango (Bizkaia), , jsertucha@azterlan.es

**Resumen:** IK4-Azterlan es un Centro Tecnológico con una amplia experiencia en tecnologías de fundición y solidificación del hierro fundido, acero y aleaciones de aluminio. Además de disponer de un completo equipamiento para caracterizar las propiedades físicas y estructurales, composición química, etc., en este Centro se investiga sobre nuevos materiales, sus propiedades mecánicas, constituyentes y se optimizan las distintas metodologías de fundición. De este modo, es posible llevar a cabo una transferencia continuada de investigación fundamental y aplicada mediante colaboraciones estrechas con empresas de fundición situadas en Europa, América, Asia y África, junto con Universidades y otros Centros europeos y americanos. Como miembro de la alianza de investigación denominada IK4, el Centro participa en actividades a largo plazo, estudiando y desarrollando modelos mejorados del proceso de solidificación en procesos de fundición, procedimientos de tratamiento del metal líquido y desarrollo de nuevas aleaciones con rendimientos optimizados, todo ello orientado hacia la fabricación de piezas metálicas de altas prestaciones y sin defectos. Otros campos de trabajo innovador para IK4-Azterlan son: el desarrollo de herramientas para la predicción “in situ” de la calidad del metal y la aplicación de Redes Artificiales Inteligentes en los procesos de fabricación de piezas metálicas, con el fin de identificar, predecir y solventar los problemas originados en estos procesos de fundición.

**Palabras clave:** materiales de fundición, investigación, proceso de fabricación, tecnología, herramientas de control.

## 1. INTRODUCCIÓN

IK4-Azterlan es un centro tecnológico privado con más de 30 años de especialización en el campo de la Metalurgia. Sus actividades investigadoras están orientadas principalmente hacia la transferencia de conocimiento fundamental y aplicado a empresas de fundición de todo el mundo. En 2012, este centro se convirtió en socio de la Alianza de Investigación IK4 con una plantilla de 1430 personas (20% Doctores) y, además, mantiene una estrecha cooperación con instituciones como la Universidad de Kempten de Ciencias Aplicadas (Alemania), la Universidad Estatal de Ohio (EEUU), CINVESTAV (México), el Instituto Politécnico Nacional de Toulouse CIRIMAT (Francia), la Universidad de Deusto (España), la Universidad de Mondragón (España), además de colaborar con otros Centros Tecnológicos.

La plantilla científica y técnica de IK4-Azterlan ha adaptado sus instalaciones para disponer de una planta de fundición laboratorio con un equipo humano altamente especializado para desarrollar nuevas tecnologías y materiales de fundición. Para ello, el Centro cuenta con instalaciones para la caracterización de materiales (análisis químicos de elevada fiabilidad, estudios metalográficos, caracterizaciones con ayuda de la microscopía electrónica de barrido SEM y FE-SEM), un amplio abanico de ensayos mecánicos estáticos y de fatiga, un potente laboratorio de ensayos no-destructivos, ultrasonidos, fluoroscopia de rayos-X, tomografía, laboratorio de preparación de muestras, etc.

y un departamento de simulación avanzada con capacidad rápida de prototipaje. En este último caso, el equipo humano encargado de los trabajos de simulación también dirige actividades en plantas de fundición con relación a la optimización de utillajes y diseño de sistemas de llenado, mazarotaje, minimización de defectos de contracción, inclusiones, etc.

## 2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las principales líneas de investigación en IK4-Azterlan son los procesos de solidificación y enfriamiento, caracterización de las propiedades estructurales y mecánicas de los materiales y el desarrollo de las tecnologías de producción de hierro fundido, acero y aleaciones de aluminio. Otro campo importante de investigación es el desarrollo de herramientas de predicción avanzada para una rápida evaluación de la calidad de las aleaciones fundidas y evitar, de este modo, la formación de defectos metalúrgicos en las piezas fundidas. Estas innovadoras herramientas están siendo desarrolladas continuamente y se utilizan en plantas de fundición reales con el fin de ajustar al máximo la eficacia de sus desarrollos y obtener una respuesta rápida frente a la variabilidad habitual de los procesos de producción. Dos ejemplos de esta actividad son el Sistema Thermolan® y un nuevo software que combina satisfactoriamente la utilización de las redes inteligentes con los datos e indicadores utilizados en la fabricación comercial de piezas de fundición. Actualmente, estas herramientas están siendo usadas

para resolver problemas reales en plantas de fundición de Europa.

### 2.1. Aleaciones de fundición de hierro y acero

En la actualidad, las fundiciones de hierro tienen una extensa aplicación en un elevado número de sectores industriales. La importancia tecnológica de este material se debe a la excelente combinación de sus propiedades mecánicas, su relativa facilidad de fabricación, una destacada colabilidad y su precio competitivo. Las principales aplicaciones de las piezas de hierro fundido abarcan sobradamente sectores como la automoción, la industria eólica, el transporte de energía y la construcción de una amplia variedad de maquinaria. Durante la producción de las piezas de fundición de hierro, hay un gran número de variables de proceso que afectan directamente a las características estructurales, la formación de defectos y, consecuentemente, tienen influencia en las propiedades mecánicas del material fabricado.

Las fundiciones de hierro se clasifican en función de la morfología de las partículas de grafito presentes en la matriz metálica (laminar, esferoidal, vermicular, etc.). Los defectos generados por la degeneración morfológica de estas partículas afectan a las propiedades del material y se originan como resultado de alteraciones en la composición química, la calidad del metal fabricado y la cinética de enfriamiento a la que está sometido en cada zona de la pieza. Las zonas masivas en grandes piezas fabricadas con fundición esferoidal (hasta 50 Tm) son, por ejemplo, propensas a la formación del llamado grafito "Chunky" [1-7], el cual origina importantes disminuciones en la ductilidad, tenacidad y resistencia a la fatiga del material.

En IK4-Azterlan, se han realizado varios estudios para determinar cuáles son los principales parámetros que afectan a la formación del grafito Chunky durante la solidificación de las piezas de fundición esferoidal usando técnicas de análisis térmico [1-3]. Para ello, se fabricaron distintas series de piezas-test cúbicas con aproximadamente 200 kg. Como resultado de estas investigaciones, se ha establecido que el grafito Chunky está promovido por:

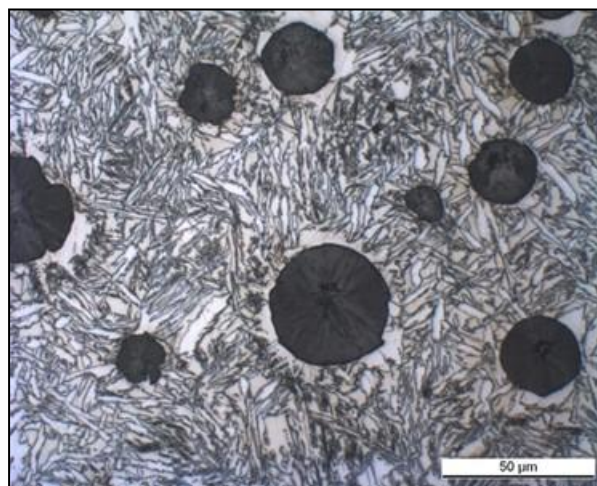
- Altos contenidos de Silicio en el metal de colada y una sobre post-inoculación [1].
- Elevados contenidos de Cerio, normalmente procedente de las ferroaleaciones tipo FeSiMg utilizadas para aportar Magnesio y/o de los inoculantes [4]
- Largos tiempos de solidificación [1], asociados a las dimensiones de la pieza.

En el campo de la investigación de nuevas fundiciones de hierro, IK4-Azterlan está trabajando en diferentes tipos de materiales. Tres ejemplos de ello son:

- El desarrollo de métodos optimizados de producción de piezas con una matriz completamente ausferrítica en bruto de colada (fundiciones esferoidales).

- Mejora de las propiedades mecánicas de las fundiciones laminares mediante la adición de elementos de aleación.
- El estudio de las propiedades estructurales y mecánicas de las fundiciones esferoidales con altos contenidos de Silicio. Aunque estos materiales son de reciente normalización, su aplicación en la industria de Fundición es aún incipiente debido al desconocimiento de sus implicaciones tecnológicas.

En el ámbito de las fundiciones esferoidales con matriz ausferrítica, se han desarrollado métodos de producción de estos materiales sin necesidad de aplicar tratamientos térmicos que encarecen el producto final. En este caso, se han fabricado materiales con propiedades mecánicas comparables a las encontradas en las fundiciones ADI (Austempered Ductile Irons) pero sin aplicar tratamiento térmico alguno [8-9]. De este modo, los nuevos materiales desarrollados son más económicos, se fabrican siguiendo una metodología simplificada y constituyen una alternativa mejorada a los materiales empleados actualmente. La combinación adecuada de elementos de aleación y el control efectivo del enfriamiento del material son las claves para tener éxito en este grupo de materiales ausferríticos (figura 1).

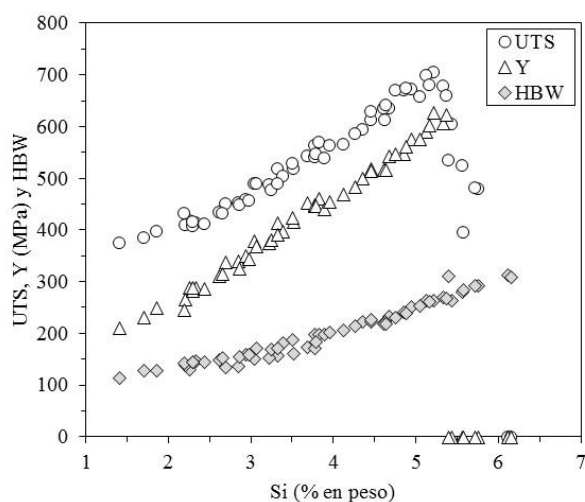


**Figura 1.** Morfologías grafiticas y matriz metálica en una fundición esferoidal ausferrítica.

Aunque se trata de materiales utilizados desde hace siglos, las fundiciones laminares siguen utilizándose en la actualidad debido, entre otros aspectos, a su conductividad térmica, la capacidad para amortiguar vibraciones y su bajo coste. Por tanto, la mejora de las propiedades mecánicas de este material tiene interés tecnológico y un gran potencial de aplicación en el mercado. IK4-Azterlan está desarrollando estos materiales mediante la adición de elementos químicos como el Titanio, Cromo y/o Molibdeno. En el caso del Titanio, este elemento de aleación modifica el tamaño y la distribución de las láminas grafiticas junto con el crecimiento de los cristales de austenita (Fe- $\gamma$ ). Estos cambios estructurales originan materiales más homogéneos y se obtienen mejoras en las propiedades de tracción sin afectar de forma importante a la maquinabilidad del material [10-12].

La inclusión de las fundiciones esferoidales con altos contenidos de Silicio en la última versión de la norma EN-1563 (2012) ha reafirmado el creciente interés en estos materiales por parte de los clientes de piezas de fundición. A pesar de ello, se trata de un grupo de aleaciones con importantes incertidumbres tecnológicas todavía, a pesar de sus interesantes propiedades mecánicas, aptitud en el mecanizado y resistencia a la corrosión. En IK4-Azterlan se investigan actualmente estos aspectos para ampliar el conocimiento existente sobre estos materiales [13-16]. El Silicio puede disolverse en cantidades considerables en la matriz ferrítica (Fe- $\alpha$ ), estabilizando termodinámicamente esta fase y aumentando su dureza.

Como consecuencia del endurecimiento provocado por el Silicio en las matrices ferríticas, se obtienen aumentos en las propiedades de tracción hasta alcanzar la fragilidad del material [15] (figura 2). Otra consecuencia significativa de utilizar altos contenidos de Silicio es la formación de degeneraciones gráficas [14], cuyo efecto en las propiedades mecánicas ha mostrado ser negativo [15]. El comportamiento de estas fundiciones en relación con la formación de rechupes en las piezas y su capacidad de alimentación durante la solidificación son aspectos que están siendo investigados actualmente.



**Figura 2.** Evolución de las propiedades de tracción en función del contenido de Silicio en el material [13]. Los términos UTS, Y y HBW son la carga de rotura y el límite elástico a tracción, y la dureza Brinell, respectivamente.

En las fundiciones de acero (aceros moldeados) existe una gran demanda para reducir la cantidad de inclusiones (escorias y arena) y porosidades (rechupes y gas precipitado [17]) en las piezas fabricadas. En IK4-Azterlan se llevan a cabo estudios orientados a la medida y reducción de elementos críticos como el Fósforo, Azufre, Hidrógeno, Nitrógeno y Oxígeno, debido a su influencia en los defectos indicados y, por tanto, en las propiedades del acero moldeado (deformabilidad, resistencias al agrietamiento, a la tracción y fatiga, soldabilidad, comportamiento frente a la corrosión, desgaste, etc.). Como consecuencia de

estos estudios, se han desarrollado nuevas metodologías en la etapa de preparación del acero fundido en hornos de inducción de media frecuencia (procesos de desulfuración, desoxidación, desfosforización, etc.). Los resultados indican que un control adecuado de los elementos químicos indicados junto con la aplicación de métodos de fabricación mejorados optimiza el coste de producción de acuerdo con los requisitos de las piezas.

## 2.2. Aleaciones de fundición de aluminio

IK4-Azterlan investiga sobre aleaciones de Aluminio y realiza transferencias tecnológicas de manera transversal a todos los sistemas productivos, a través de dos líneas principales:

### 2.2.1. Metalurgia de las aleaciones de aluminio

IK4-Azterlan ha desarrollado varias aleaciones secundarias de aluminio, además de optimizar las propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio convencionales.

Las aleaciones AlSi7Mg y AlSi10FeMnMg secundarias se han desarrollado con las tecnologías GDC (gravity die casting) y VHPDC (vacuum high pressure die casting) respectivamente, cumpliendo en ambos casos con las exigencias mecánicas recogidas en la norma UNE 1706:2011 para sus aleaciones homólogas primarias de primera fusión. El ajuste de las micro-adiciones de Cromo, Manganeso y Berilio en el caso de la aleación AlSi7Mg ha permitido transformar y disminuir el impacto negativo de las fases que contienen Hierro en su composición. En estas investigaciones, IK4-Azterlan colaboró otros centros tecnológicos y universidades así como empresas del sector de la fundición inyectada.

Por otro lado, en determinadas empresas con procesos estándares de inyección o HPDC (high pressure die casting) se han mejorado las propiedades mecánicas de la aleación AlSi9Cu3(Fe), añadiendo y controlando micro-adiciones de varios elementos químicos, ajustando los intervalos de composición química y realizando un control térmico efectivo del componente desde su solidificación [18-19] hasta el tratamiento térmico. Las principales mejoras se han obtenido en el límite elástico (aumentando los valores convencionales de 170 a 294 MPa) y en la dureza (pasando de valores de 100 a 135 HBW). Los resultados obtenidos en la aleación AlSi9Cu3(Fe) se extendieron al caso de la AlSi10Mg(Fe), obteniendo incrementos del límite elástico de 144 a 270 MPa e incrementando los valores de durezas de 85 a 106 HBW.

En esta línea de trabajo, IK4-Azterlan está desarrollando equipos de control de la calidad metalúrgica de las aleaciones de aluminio-silicio hipoeutécticas, basados en el análisis térmico, los cuales evalúan el tamaño de grano, el grado de modificación del silicio eutéctico y estiman el contenido de Mg en el metal líquido.

### 2.2.2. Innovaciones tecnológicas en los utillajes

Se está trabajado sobre utillajes de GDC, LPDC (low pressure die casting) y HPDC (high pressure die casting) desde la fase de diseño del componente hasta la validación de su proceso productivo. Ejemplos de ello son componentes críticos del automóvil eléctrico, del sistema de frenado, componentes estructurales y powertrain (monoblocks porta-manguetas, brazos de suspensión, front covers, etc.) los cuales se han fabricado históricamente con otros materiales y tecnologías (estampación de chapa, por ejemplo) o bien requieren un cambio de aleación y proceso, debido a que se han incrementado significativamente sus requerimientos mecánicos.

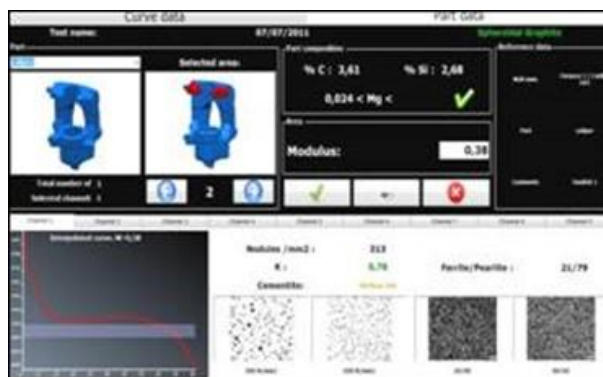
También se están realizando diferentes investigaciones y desarrollos en el campo de la gestión térmica de los moldes, tanto en GDC como en HPDC, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del componente fabricado y minimizar o eliminar los defectos de contracción. Se han implantado sistemas automáticos e inteligentes del control del gradiente térmico del utillaje, mejorando las propiedades del componente de forma significativa. Se han empleado materiales innovadores con diferentes conductividades térmicas, mejorando el rendimiento de la colada en un 30% y disminuyendo el rechazo productivo en un 2%. Por otra parte, se han diseñado e implantado componentes del molde con circuitos de refrigeración totalmente innovadores, reduciendo el tiempo de ciclo productivo en un 14% en HPDC y en un 11% en GDC.

### 2.3. Nuevas herramientas predictivas para controlar la calidad de las aleaciones metálicas

En el entorno económico de globalización actual, los clientes de piezas de fundición requieren cada vez más controles continuos y eficaces de todos los parámetros de fabricación con el fin de obtener componentes de altas prestaciones y sin defectos. La estrecha relación entre IK4-Azterlan y la industria de fundición se ha hecho eco de este aspecto y, como consecuencia, se están desarrollando y aplicando herramientas adaptadas a estos requerimientos que implican técnicas avanzadas de análisis térmico (figura 3) tanto para las fundiciones férricas como para las no férricas. Estas herramientas de nueva generación se integran en el sistema Thermolan® [20] y se utilizan actualmente en diversas plantas de fundición para evaluar la calidad del metal utilizado en cada momento y predecir su incidencia en las piezas que se están fabricando antes de proceder a la colada de los moldes. Estos desarrollos realizados directamente a pie de planta permiten también la necesaria adaptación de estas herramientas a las condiciones específicas de cada empresa.

Las técnicas de Análisis Térmico se han utilizado tradicionalmente en el sector de la fundición de hierro para determinar los contenidos de Carbono y Silicio. Sin embargo, IK4-Azterlan ha desarrollado sistemas para modernizar esta técnica y obtener así información valiosa sobre las transformaciones de fase que ocurren en la solidificación, evaluar la eficacia de los inoculantes, predecir la dureza del material y algunas de

sus propiedades físicas, dar información sobre la forma de las partículas de grafito formadas, predecir la capacidad de contracción del material fabricado, etc. En el caso de las fundiciones de aluminio, las curvas de enfriamiento obtenidas con las técnicas de análisis térmico se han empleado para desarrollar técnicas de análisis que permiten evaluar el grado de modificado, el afinado de grano y el espaciado de los brazos dendríticos (DAS). Es necesario indicar aquí que los resultados obtenidos con estas herramientas no pueden ser intercambiables entre las distintas plantas de fundición y, por tanto, es necesario un estudio específico para cada caso.



**Figura 3.** Ejemplo de utilización de las curvas de Análisis Térmico para estimar la microestructura y las propiedades mecánicas de las fundiciones de hierro.

Las nuevas herramientas creadas y desarrolladas en IK4-Azterlan son capaces de registrar curvas de enfriamiento (solidificación y transición sólida) en tiempo real para evaluar la calidad metalúrgica de las fundiciones de hierro y predecir parámetros como su tendencia a la formación de defectos de contracción (rechupes) [20], los contenidos de ferrita y perlita en la matriz metálica [21], el riesgo de formación de grafito Chunky en las secciones de mayor tamaño [6], los diferentes tipos de solidificación [22-23]. En el caso de las fundiciones de aluminio, estas herramientas pueden controlar la evolución de la fracción sólida y evaluar la eficacia de los tratamientos aplicados en las aleaciones aún en estado líquido para asegurar las propiedades mecánicas [18-19,24-25].

El Centro IK4-Azterlan cuenta con la segunda generación de su innovador software de simulación (Eidocalc) que permite predecir rápidamente la formación de rechupes en piezas de fundición de hierro con grafito esferoidal. Concretamente, este nuevo software considera las variaciones reales de calidad del metal de colada y tiene en cuenta las distintas variables del proceso de fabricación, además de las características geométricas de las piezas. La nueva generación del simulador que IK4-Azterlan ha desarrollado basa la gestión de toda esta gran cantidad de información mediante la utilización combinada de avanzados sistemas de aprendizaje automático junto con la aplicación automatizada del conocimiento experto con el que cuenta el personal del Centro. El objetivo principal de esta nueva herramienta de simulación es

determinar de forma rápida y sencilla para el usuario el riesgo existente de formación de rechupes en las piezas fabricadas cada momento de la producción, ofreciendo la posibilidad de hacer correcciones rápidas en los parámetros del proceso [26-27].

#### 2.4. Utilización de la Inteligencia Artificial y la Analítica de Datos en fundición para la optimización del proceso productivo

La industria de fundición moderna demanda índices de producción elevados, consumos mínimos y la producción de piezas “sin defectos”. De este modo, la observación de cualquier empresa moderna del sector confirma que los clientes y la competitividad del mercado incrementa la exigencia de los requerimientos que afectan a la fundición. Este hecho obliga al sector a modernizar las herramientas avanzadas para controlar y optimizar los procesos de fabricación. No obstante, la fabricación de piezas de fundición está influida por un gran número de variables de proceso, las cuales condicionan la presencia de defectos en dichas piezas.

Como respuesta a las demandas ya expuestas, IK4-Azterlan apuesta fuertemente por el desarrollo de las políticas de la Industria 4.0, en particular, se ha trabajado en la creación de una suite de diferentes herramientas que ayuden a fomentar la digitalización de las fundiciones, permitiendo que puedan comenzar a integrar las técnicas más avanzadas de análisis de datos. El Centro IK4-Azterlan se focaliza en mejorar el proceso de transformación de “datos” en “conocimiento” mediante la mejora de los siguientes aspectos de la información: (i) almacenamiento, (ii) comunicación, (iii) correlación, y (iv) visualización.

Una vez abordado el problema de la digitalización, IK4-Azterlan provee una plataforma integral para la gestión y control del proceso productivo llamada Sentinel. Esta plataforma trata de convertirse en el vigilante del proceso de fundición mediante la aplicación de innovadoras herramientas de análisis multi-variable que determinan las posibles desviaciones del proceso. Sentinel hace uso de más de 20 tipos de modelos probabilísticos, así como de sistemas expertos avanzados y complejas fórmulas matemáticas que son capaces de anticipar la situación en la que podría encontrarse la fundición en un instante de tiempo futuro. Cuando el proceso sufre alguna posible problemática, la utilización de sistemas de programación evolutiva, así como de operaciones de control basadas en sistemas de Inteligencia Artificial clásicos, tratan de solucionarlas; consiguiendo que finalmente el proceso de producción vuelva a mantenerse equilibrado y ajustado.

Para ser capaz de realizar este tipo de gestión, es condición *sine qua non* el desarrollo de un exhaustivo estudio sobre los parámetros que tienen potencial influencia en el proceso de fabricación, el cual debe determinar que los datos existentes conformen un conjunto de información con un número apropiado de evidencias fiables, siendo loable la generación de un modelo matemático que representa la realidad de una forma certera [28-29]. Así, IK4-Azterlan, introduce el

proceso de análisis de datos con su herramienta Salomon, la cual permite acercar este tipo de tareas a personas no tan familiarizadas con el mundo del *Data Analytics*.

Durante los años en los que IK4-Azterlan ha trabajado en este campo ha descubierto que el empleo de estos sistemas innovadores en las plantas de fundición los convierte en valiosas herramientas a la hora de cumplir los exigentes requerimientos del mercado actual. La intensa actividad que IK4-Azterlan realiza en este sentido ha permitido estabilizar los procesos de fabricación y mejorar el conocimiento sobre las relaciones causa-efecto en las plantas de producción.

### 3. COMENTARIOS FINALES

En el presente trabajo se resumen las actividades de investigación más importantes llevadas a cabo en el Centro IK4-Azterlan en el campo de las fundiciones de hierro, acero y aluminio. En cada caso, se ha realizado una descripción general de las actividades de investigación realizadas y los resultados obtenidos hasta el momento actual. El control de los parámetros de proceso que condicionan las propiedades físicas y estructurales de las aleaciones metálicas es el principal objetivo de IK4-Azterlan puesto que dichas variables afectan a la producción de las piezas de fundición y determinan su validez en los clientes.

La principal característica de la actividad llevada a cabo en IK4-Azterlan es la combinación directa de trabajos realizados en tres ámbitos diferentes: las plantas de fundición (estudio de procesos, obtención de datos y aplicación de los desarrollos y mejoras alcanzados), los laboratorios de investigación propios del Centro (experimentación básica) y el análisis y tratamiento de los datos para obtener resultados con aplicación directa o indirecta en los procesos de fabricación de piezas.

### 4. REFERENCIAS

- [1] Asenjo, I., Larrañaga, P., Sertucha, J., Suarez, R., Gómez, J. M., Ferrer, I., Lacaze, J., “Effect of Mould Inoculation on Formation of Chunky Graphite in Heavy Section Spheroidal Graphite Cast Iron Parts”, *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 20(9), pp. 319-324, 2007.
- [2] Asenjo, I., Lacaze, J., Larrañaga, P., Méndez, S., Sertucha, J., Suárez, R., “Microstructure Investigation of Small-Section Nodular Iron Castings with Chunky Graphite”, *Key Engineering Materials*, Vol. 457, pp. 52-57, 2011.
- [3] Lacaze, J., Armendariz, S., Larrañaga, P., Asenjo, I., Sertucha, J., Suárez, R., “Effect of Carbon Equivalent on Graphite Formation in Heavy-Section, Ductile Iron Parts”, *Materials Science Forum*, Vol. 636-637, pp. 523-530, 2010.
- [4] Larrañaga, P., Asenjo, I., Sertucha, J., Suarez, R., Ferrer I., and Lacaze, J., “Effect of Antimony and Cerium on the Formation of Chunky Graphite during

- Solidification of Heavy-Section Castings of Near-Eutectic Spheroidal Graphite Irons”, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 40A, pp. 654-661, 2009.
- [5] Méndez, S., López, D., Asenjo I., Larrañaga, P., Lacaze, J., “Improved Analytical Method for Chemical Analysis of Cast Irons Application to Casting with Chunky Graphite”, *ISIJ International*, Vol. 51(2), pp. 242-249, 2011.
- [6] Sertucha, J., Suárez, R., Asenjo, I., Larrañaga, P., Lacaze, J., Ferrer, I., Armendariz, S., “Thermal Analysis of the Formation of Chunky Graphite during Solidification of Heavy-section Spheroidal Graphite Irons Parts”, *ISIJ International*, Vol. 49, pp. 220-228, 2009.
- [7] Valle, N., Theuwissen, K., Sertucha, J., Lacaze, J., “Effect of Various Dopant Species on Primary Graphite Growth”, *IOP Conference. Series, Mater. Sci. Eng.*, Vol. 27, work number 012026, 2012.
- [8] Méndez, S., de la Torre, U., Suárez, R., Larrañaga, P., Stefanescu, D. M., “Processing Thickness Window for As-cast Ausferritic Castings”, *AFS Transactions*, Vol. 123, paper 15-010, 2015.
- [9] Méndez, S., de la Torre, U., González-Martínez, R., Suárez, R., “Advanced Properties of Ausferritic Ductile Iron obtained in As-cast Conditions”, *International Journal of Metalcasting*, Vol. 11(1), pp. 116-122, 2016.
- [10] Alonso, G., Larrañaga, P., Sertucha J., Suárez, R., Stefanescu, D. M., “Gray Cast Iron with High Austenite-to-Eutectic Ratio Part I- Calculation and Experimental Evaluation of the Fraction of Primary Austenite in Cast iron”, *AFS Transactions*, Vol. 120, paper 12-033, 2012.
- [11] Larrañaga, P., Sertucha J., Loizaga, A. Suárez, R., Stefanescu, D. M., “Gray Cast Iron with High Austenite-to-Eutectic Ratio Part II, Increasing the Austenite-to-Eutectic Ratio through Austenite Nucleation”, *AFS Transactions*, Vol. 120, paper 12-034, 2012.
- [12] Larrañaga, P., Sertucha J., Loizaga, A. Suárez, R., Stefanescu, D. M., “Gray Cast Iron with High Austenite-to-Eutectic Ratio Part III High Strength, Low Hardness, High Carbon Equivalent Gray Iron with Superfine Graphite”, *AFS Transactions*, Vol. 120, paper 12-035, 2012.
- [13] de la Torre, U., Loizaga, A., Lacaze, J., Sertucha, J., “As cast High Silicon Ductile Irons with Optimised Mechanical Properties and Remarkable Fatigue Properties”, *Materials Science and Technology*, Vol. 30, pp. 1425-1431, 2014.
- [14] González-Martínez, R., de la Torre, U., Lacaze, J., Sertucha, J., “Effects of High Silicon Contents on Graphite Morphology and Room Temperature Mechanical Properties of As-cast Ferritic Ductile Cast Irons. Part I – Microstructure”, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 712, pp. 794-802, 2018.
- [15] González-Martínez, R., de la Torre, U., Ebel, A., Lacaze, J., Sertucha, J., “Effects of High Silicon Contents on Graphite Morphology and Room Temperature Mechanical Properties of As-cast Ferritic Ductile Cast Irons. Part II – Mechanical properties”, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 712, pp. 803-811, 2018.
- [16] Arenas, M. A., Niklas, A., Conde, A., Méndez, S., Sertucha, J., Damborenea, J. J., “Comportamiento frente a la Corrosión de Fundiciones con Grafito Laminar y Esferoidal Parcialmente Modificadas con Silicio en NaCl 0,03 M”, *Revista de Metalurgia*, Vol. 50(4), artículo e032, 2014.
- [17] Loizaga, A., Sertucha, J., Suárez, R., “Defectos Metalúrgicos Generados por la Presencia de Gases en el Metal Fundido”, *Anales de Química*, Vol. 104(2), pp. 111-119, 2008.
- [18] Loizaga, A., Niklas, A., Fernández-Calvo, A. I., Lacaze, J., “Thermal Analysis Applied to Estimation of Solidification Kinetics of Al-Si aluminium Alloys”, *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 22(5), pp. 345-352, 2009.
- [19] Fernández-Calvo, A. I., Niklas, A., Lacaze, J., “Comparison of Thermal Analysis and Differential Thermal Analysis for Evaluating Solid Fraction Evolution during Solidification of Al-Si Alloys”, *Materials Science Forum*, Vol. 649, pp. 493-498, 2010.
- [20] Larrañaga, P., 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, pp. 547-561, 2008.
- [21] Sertucha, J., Suárez, R., Izaga, J., Hurtado, L. A., Legazpi, J., “Prediction of Solid State Structure based on the Eutectic and Eutectoid Transformation Parameters in Spheroidal Graphite Irons”, *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 19(6), pp. 315-322, 2006.
- [22] Larrañaga, P., Sertucha, J., Suárez, R., “Análisis del Proceso de Solidificación en Fundiciones Grafíticas Esferoidales”, *Revista de Metalurgia*, Vol. 42(4), pp. 244-255, 2006.
- [23] Larrañaga, P., Sertucha, J., “Estudio Térmico y Estructural del Proceso de Solidificación de Fundiciones de Hierro con Grafito Laminar”, *Revista de Metalurgia*, Vol. 46(4), pp. 370-380, 2010.
- [24] Bilbao, Y., Espinosa, M., Artola, G., Fernández-Calvo, A. I., Rodríguez, P. P., “Diseño de Molde para el Establecimiento de la Relación entre Resultados de Análisis Térmico y Microestructura del Aluminio A2357 en Moldeo por Microfusión”, *Revista de Metalurgia*, Vol. 46, pp. 71-77, 2010.

- [25] Niklas, A., Abaunza, U., Fernández-Calvo, A. I., Lacaze, J., Suárez, R., “Thermal Analysis as a Microstructure Prediction Tool for A356 Aluminium Parts Solidified under Various Cooling Conditions”, 69<sup>th</sup> World Foundry Congress, Hangzhou, China, pp. 16-20, 2010.
- [26] Suárez, R., Gutiérrez, J. M., Bakedano, A., Larrañaga, P., Natxiondo, A., Zarrabeitia, G., Sertucha, J., “Un Innovador Sistema de Predicción de Defectos Metalúrgicos en Piezas de Fundición, en Tiempo Real de Fabricación”, Fundipress, Vol. noviembre, pp. 32-37, 2015.
- [27] Suárez, R., Gutiérrez, J. M., Alonso, G., Sertucha, J., “A new rapid simulation system to control the formation of microshrinkages in ductile iron castings considering the melt quality and processing variables”, 70<sup>th</sup> World Foundry Congress, Monterrey, México, proceedings, 2012.
- [28] Santos, I., Nieves, J., Bringas, P., Zabala, A., Sertucha, J., “Supervised Learning Classification for Dross Prediction in Ductile Iron Casting Production”, 8<sup>th</sup> IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications ICIEA, Melbourne, Australia, pp. 1749-1754, 2013.
- [29] Gutiérrez, J. M., Natxiondo, A., Nieves, J., Zabala, A., Sertucha, J., “Statistical Study to Evaluate the Effect of Processing Variables on Shrinkage Incidence During Solidification of Nodular Cast Irons”, Metallurgical & Materials Transactions A, Vol. 48A(4), pp. 1827-1840, 2017.