

ESTANDARIZACIÓN DE LA CALIDAD EN FUNDICIÓN DE GRANDES PIEZAS EÓLICAS MEDIANTE LA SIMULACIÓN AVANZADA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN



QUALITY STANDARDISATION FOR CASTING WIND POWERED TURBINE PARTS USING ADVANCED PROCESS SIMULATION

Recibido: 07/04/08

Aceptado: 21/04/08



Antton Meléndez Arranz
Ingeniero Industrial Metalúrgico
Inasmet - Tecnalía



Eva Anglada Izaguirre
Ingeniera Técnica Mecánica
Inasmet - Tecnalía

RESUMEN

El presente artículo surge a partir de un trabajo sobre simulación avanzada del proceso de fundición. Por su actualidad, dentro de la fundición se ha elegido un tipo muy singular de piezas como son las grandes piezas de fundición nodular ferrítica de alta tenacidad y alta resistencia a la fatiga fabricadas para aerogeneradores (Norma EN GJS 400 18LT).

Esta parte del trabajo ha sido extraída del proyecto *Haizelan*, realizado conjuntamente con la *Asociación de Fundidores del País Vasco y Navarra*, junto con las empresas **TS Fundiciones** (Zestoa-Guipúzcoa) y **Fundiciones Urbina** (Urbina-Álava), proveedo-

res de los datos del proceso de fundición y **Gamesa Eólica** (Huarte-Navarra), propietario de la geometría y de la pieza.

En él, se pone de manifiesto que ahora sí es posible que las herramientas informáticas sean capaces de predecir no solo el proceso de moldeado y conformado líquido, sino también procesos muy especiales y complejos como el de la expansión grafitica. A partir de ahí se puede también predecir con suficiente aproximación estructuras de la matriz metálica y consecuentemente las propiedades mecánicas que estas estructuras confieren a las piezas.

Se ha utilizado una herramienta

basada en el *Método de Elementos Finitos* para toda la fase de simulación, así como los laboratorios de **Inasmet-Tecnalía** para el estudio metalográfico y los ensayos mecánicos comparativos.

Palabras clave: Simulación avanzada, hierro dúctil, hierro fundido, expansión grafitica, fundición de piezas eólicas.

ABSTRACT

This paper arose from a work on advanced simulation on casting wind powered turbine parts made from high tenacity ductile iron.

La fundición de hierro, más conocida como hierro fundido, tiene la particularidad de ser uno de los pocos metales cuya solidificación experimenta no solo contracción continua desde el estado líquido hasta que ésta se completa, sino que existe también una expansión intermedia en el instante en el que el metal corta la línea de liquidus en el diagrama Hierro-Carbono para generar la precipitación del grafito eutéctico

The technical target was extracted from the Haizelan Project, carried out with Basque Country Foundrymen's Association (Spanish Foundrymen's Federation), two foundries, TS Fundiciones (Zestoa-Guipúzcoa) and Fundiciones Urbina (Urbina-Álava) as process suppliers and Gamesa Eólica (Huarte-Navarra) as part and geometry supplier.

The study shows it is now possible to obtain highly accurate predictions in pouring and solidification using microstructure calculations simultaneously, and from then on good predictions about final microstructures and subsequent mechanical properties of castings.

All related tasks in simulation were performed using FEM (Finite Elements Method). Referred to metallographic studies and tests, which were done at Inasmet-Tecnalia laboratories.

Key words: *Advanced simulation, Ductile Iron, Cast iron making, Graphitic expansion, Wind power castings.*

1.- BREVES CONCEPTOS METALÚRGICOS EXPLICATIVOS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO

A continuación se explican brevemente unos conceptos metalúrgicos básicos que nos ayudarán a entender los razonamientos técnicos posteriores.

1.1.- LA EXPANSIÓN GRAFÍTICA

La fundición de hierro, más conocida como hierro fundido, tiene la particularidad de ser uno de los pocos metales cuya solidificación experimenta no solo contracción continua desde el estado líquido hasta que ésta se completa, sino que existe también una expansión intermedia en el instante en el que el metal corta la línea de liquidus en el diagrama Hierro-Carbono para generar la precipitación del grafito eutéctico. En ese momento la única matriz metálica en estado líquido pasa de una densidad de $6,9 \text{ Kg/dm}^3$ a dos materiales, la matriz restante cuya densidad es similar y una parte del carbono de la aleación que es capaz de precipitar en forma de grafito cuya densidad es de aproximadamente $2,2 \text{ Kg/dm}^3$. Obviamente, el balance volumétrico experimenta un aumento, el debido a la expansión grafitica.

Este fenómeno, debidamente controlado determina la existencia o no de los defectos de contracción líquida, más conocidos como rechupes. No ha sido posible simular la realidad de este fenómeno salvo por ajustes matemáticos a partir de conocimiento empírico. Hoy en día el simulador utilizado en este proyecto es capaz de calcularlo con precisión, mediante el cálculo no solo térmico sino metalúrgico y calculados uno a partir de otro, creando una realidad virtual 'calculable' como ocurre en la realidad física. Esto permite estudiar simultáneamente la sanidad de la pieza y sus características mecánicas.

1.2.- FUNDICIÓN ESFEROIDAL (NODULAR) O DÚCTIL

Es un tipo de fundición de hierro que mediante un tratamiento con Magnesio del metal en estado líquido se consigue que las láminas de grafito que precipitan de forma natural en la solidificación, lo hagan en formas más o menos regulares de esferoides o nódulos, de ahí su nombre.

Posee una mayor tenacidad, dado que el grafito en forma de nódulos aumenta su resistencia mecánica final para un mismo contenido en carbono (equivalente) y una misma estructura de la matriz metálica, proporcionando alargamientos muy interesantes, que combinarían características propias de los aceros con las ventajas de la fundición de hierro (menor densidad, precio, etc).

1.3.- DIRECCIONAMIENTO DE LA SOLIDIFICACIÓN

Con ello nos enfrentamos al eterno dilema de las piezas fundidas. Es el problema con el que los fundidores luchan desde que la fundición existe. Se resume en evitar las bolsas de caldo aisladas en las piezas durante la solidificación y está relacionado con los cambios bruscos de sección en las diferentes partes de cualquier pieza, siendo esta parte del diseño la que más quebraderos de cabeza produce en los fundidores, sobre todo, porque los diseñadores de piezas habitualmente no tienen en cuenta este problema del fundidor y no entran con él en ingeniería concurrente. Este fenómeno se convierte en un proble-

ma cuando dos zonas masivas de una pieza se comunican, están unidas, a través de una tercera de menor sección y consecuentemente de menor tiempo de enfriamiento.

chamente ligado al tiempo de solidificación, directamente proporcional él y es característico de cada metal o aleación, por lo que en esencia el concepto es extrapolable a cualquier

Este fenómeno, debidamente controlado determina la existencia o no de los defectos de contracción líquida, más conocidos como rechupes

Sin entrar en las variaciones propias de la calidad metalúrgica o de las diferentes composiciones químicas de las aleaciones, para una aleación dada, de una calidad dada, debido a esto que estamos diciendo, si el balance final de contracción comentado en el epígrafe anterior es positivo, las secciones más gruesas, las más tardías en enfriar, pueden contraer rodeadas de zonas con tiempos de enfriamiento menores ya solidificadas. En este momento la diferencia de densidades entre estado líquido y sólido hace que en el baricentro térmico del volumen o volúmenes de pieza aislados, se puedan formar huecos de un volumen equivalente a esa diferencia de densidades. Son los conocidos rechupes. Existe todo un elenco de técnicas de alimentación (mazarotaje) para la compensación de esos rechupes, siempre condicionadas por la mayor o menor complejidad de las geometrías de las piezas. Es lo que más prontamente fueron capaces de calcular este tipo de herramientas.

1.4.- MÓDULO TÉRMICO

Es un valor creado para entender la complejidad de la solidificación de las piezas y para el correcto diseño de los moldes y modelos que aseguraran piezas sanas, Es un valor estre-

chamente ligado al tiempo de solidificación, directamente proporcional él y es característico de cada metal o aleación, por lo que en esencia el concepto es extrapolable a cualquier caso, aunque no el valor numérico. Se trata de una constante del material que multiplica al tiempo de solidificación. Por último, se llama *módulo térmico significativo* de una pieza, a aquél que define el modelo de solidificación de ésta.

El direccionamiento de la solidificación hace que las secciones más gruesas sean capaces de alimentar a las más delgadas (de mayor a menor módulo térmico), de manera que la solidificación se direcciona y la pieza va auto-alimentándose. Para ello se usan modificadores del tiempo de solidificación, del módulo térmico en definitiva, y cuando la geometría de la pieza impide esa secuencia, los enfriadores (para secciones gruesas) o los elementos exotérmicos (*padding*s, en secciones delgadas) pueden 'acomodar' esta dificultad y conseguirlo por completo o en parte.

Si unimos estos fenómenos está comprobado que bien utilizado el concepto de solidificación direccionada o secuencia de módulos térmicos apropiada, la sanidad de la pieza estará garantizada. Además, volviendo al concepto del balance contracción/expansión, se ha comprobado que para piezas (siempre nos estamos refiriendo a fundición de hierro) a partir de un determinado módulo térmico sig-

nificativo, con moldes de suficiente elasticidad y rigidez mecánica, si se actúa cuando toda la periferia de la pieza está solidificada, en el momento en que aparece la expansión, ésta es 'almacenada' como una sobre-presión en el molde, que podría llegar a liberarse después y así compensar la posterior contracción líquida final, siendo nulo el hueco del baricentro térmico, o rechupe teórico, y saliendo la pieza sana. Esta fina técnica es aplicable a este tipo de piezas por el módulo significativo que en general tienen y el tipo de molde de liga química extra-resistente que utilizan. La herramienta que se ha utilizado, *ProCAST*, actualmente ya no solo predice las diferencias de densidades o potenciales rechupes sino que los corrige y ajusta con esta potente herramienta de calcular a partir de la predicción de la estructura metalúrgica.

2.- OBJETIVO DEL TRABAJO

El principal objetivo es:

Contribuir a optimizar la fase de diseño y puesta a punto de las grandes piezas de aerogeneradores.

Como se puede suponer, el gasto de desperdiciar piezas de esa calidad y tamaño en las pruebas es considerable. Esto pensamos que se conseguiría alcanzando a su vez los siguientes objetivos técnicos:

1. Buscar y evaluar una herramienta eficaz y fiable de simulación numérica.
2. Contrastarla con la realidad mediante ensayos a piezas, tanto mecánicos como de microestructura.

3.- BENEFICIOS

En perfecta consonancia con el objetivo primordial del proyecto, se ha buscado en todo momento la concurrencia de intereses y se ha procurado orientarlo tanto al fundidor o proveedor del material como al cliente final, el fabricante de los aerogeneradores, por lo tanto, los previsibles beneficios se han focalizado en ambos. Así, para la fundición serían:

- Eliminación/reducción de pruebas de puesta a punto en planta.
- Reducción de los RRCs (*Recovering and Rejecting Causes*), es decir, del rechazo efectivo.
- Mayor adaptación a las necesidades del cliente (ingeniería concurrente).

Para el cliente final:

- Mayor seguridad en el diseño basado en un material más ajustado a las especificaciones con visibilidad previa sobre posibles problemas causados por la dicotomía geometría-solidificación direccionada (microestructuras indeseables, rechupes, etc.).
- Establecer unas bases más sólidas para una posterior reingeniería a partir del conocimiento anterior.

4.- ANTECEDENTES

Hoy en día existen numerosos programas de simulación del proceso básico de la fundición, es decir, llenado y solidificación. Hace tiempo también que incorporaron otras prestaciones como predicción de la microestructura, cálculo de tensiones y deformaciones, crecimiento de grano o, incluso, cálculo inverso para la caracterización virtual de materiales, campo muy desasistido a día de hoy.

Por otro lado, hasta ahora las predicciones devolvían someras predicciones de microestructura y los resultados no eran objeto de demasiado interés, sino meramente orientativos. La aproximación no era suficiente y no estaba basada en cálculos específicos. En este caso sí lo son y a lo largo del artículo se apreciarán los resultados.

Estos programas están a su vez basados en algoritmos numéricos que utilizan a su vez dos métodos diferentes y válidos en general, el método de *elementos finitos* (FEM) o el método de volúmenes finitos, también llamado de *diferencias finitas* (DFM).

Sin entrar a valorar la idoneidad de la geometría de los elementos que constituyen la malla, es decir, el cál-

culo puntual discretizado de una determinada pieza, es conocido por los especialistas que para el cálculo de esfuerzos mecánicos, a día de hoy solo los cálculos basados en FEM son capaces de realizarlo. El resto, en mayor o menor medida usan de forma intercalada algoritmos de cálculo FEM en algunas fases de un cálculo FDM. Porque lo conocemos muy bien dados los años de experiencia con él y por esta razón citada antes es por lo que el simulador utilizado es *ProCAST*, basado en FEM. Cuando en su última versión ofreció el nuevo cálculo de microestructura y su imbricación directa con el mapa de temperaturas obtenido del cálculo de flujo térmico convencional (llenado y solidificación) y con un apartado específico para la expansión grafitica, inmediatamente lo incorporamos a un proyecto en curso donde evaluar estas prestaciones encajaba a la perfección para otros menesteres.

La novedad de este trabajo reside exactamente ahí, en comprobar el grado de precisión de las predicciones contrastadas con piezas reales ensayadas y recogidas de las bases de datos de nuestros laboratorios. No se fundieron, por tanto, piezas específicas para el trabajo. La comparación se realizó con mayor exigencia aún, se trataba de contrastar los resultados de los cálculos del simulador con piezas de procedencia diversa, de producción industrial estandarizada y de igual calidad a la pieza simulada.

5.- PLAN DE TRABAJO

Recogida de datos de ensayos, filtrando todos aquellos que cumplan con la aproximación a las zonas estudiadas y cuyas probetas hayan sido extraídas de idéntica forma. Se seleccionaron con los criterios siguientes:

1. Piezas sanas desde el punto de vista de defectos de contracción líquida.

- Diferentes proveedores de fundición (incluso de diferentes países).
- Piezas similares y espeso-

res similares.

- Trépanos obtenidos de zonas masivas ($\approx 150 \div 200$ mm de espesor).
- Separación por microestructuras, material ferrítico y material ferrítico-perlítico para comparar con una zona de aparición mixta.

2. Simular el proceso en las condiciones indicadas por las fundiciones participantes en el trabajo, diferentes a las de los resultados del punto anterior, y asegurarse que la pieza sale sana en la simulación.

3. Obtención de microestructuras y características mecánicas simuladas.

4. Comparación entre ambas familias de datos.

Ha consistido en evaluar la capacidad de una herramienta de predicción de la calidad final, tanto metalúrgica como de las propiedades mecánicas básicas para su uso en un sector importante como el de las grandes piezas eólicas mediante la simulación avanzada del proceso de llenado y solidificación. Estas piezas se caracterizan por su gran tamaño y por estar fabricadas en fundición nodular ferrítica de alta tenacidad y alta resistencia a la fatiga, con la importante dificultad adicional que suponen estos grandes pesos y dimensiones de las mismas (5 a 30 t) y sus considerables espesores de pared (normalmente 50 a 350 mm).

La herramienta (simulador) utilizada en la evaluación ha sido *ProCAST*® (ESI Group) para ajustar sus cálculos a las características físicas del material EN GJS 400 18LT (Norma Europea aplicable que significa hierro nodular de 400 N/mm² de carga de rotura con un alargamiento del 18% en uso a baja temperatura) fundición acorde con los estrictos requerimientos mecánicos y de sanidad de la geometría existente. Poder prever el efecto de la geometría de la pieza en el enfriamiento o del efecto de los materiales auxiliares del molde como, por ejemplo, enfriadores de cara a la obtención de la microestructura final requerida, hace que el proveedor de fundición pueda retornar en ocasio-

nes un feed-back al cliente para adaptar la pieza más rápido y más ajustada al proceso y se incorpore con ventaja a un cierto grado de ingeniería concurrente, hasta ahora poco o nada desarrollada en esa dirección.

6.- EL CASO Y LA PIEZA

Como objeto de estudio se ha trabajado una pieza real, lo más representativa posible (figura 1), el bastidor que forma parte del conjunto del aerogenerador. Esta pieza en concreto pesa en la realidad 12 t.

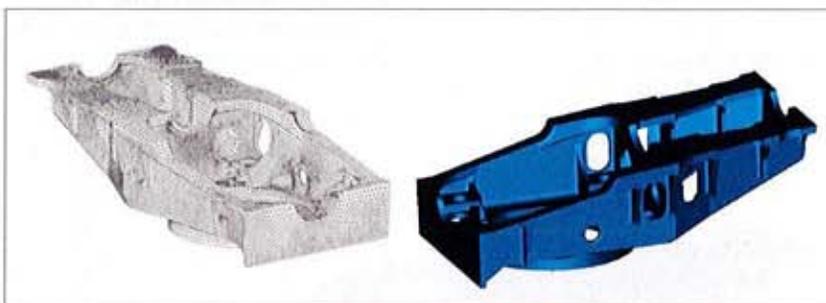


Figura 1.- Pieza utilizada para el estudio

El análisis químico es un análisis estándar con carbonos equivalente próximos al eutéctico. Sabiendo que las fundiciones, dependiendo de su proceso pueden fabricar piezas de idénticos resultados con análisis químicos diferentes, el que se muestra aquí es orientativo derivado del hecho de que la norma inicialmente aludida a la que se deben someter las piezas no especifica este extremo, sino solamente los ensayos mecánicos. Los datos son:

- **Análisis químico:** 3,5÷3,6%C; 2,0÷2,2%Si; <0,15%Mn; <0,03%P; <0,001%S y 0,03÷0,05%Mg
- **Temperatura de colada:** 1.360÷1.370°C
- **Tiempo de llenado:** 75÷80 s
- **Proceso de fusión:** Horno eléctrico de inducción
- **Proceso de moldeo:** En caja metálica, molde químico de arena de sílice de alta resistencia, aglomerada con resina fenol-furánica ácida.

7.- LOS RESULTADOS

Una vez concluido el plan de trabajo previsto, los resultados se han obtenido utilizando las técnicas siguientes:

- Determinación física por microscopía óptica convencional de las microestructuras de piezas reales.
- Simulación y comparación posterior de la predicción de microestructura y propiedades en el simulador.

El cálculo numérico del simulador se ha efectuado partiendo de la pieza

croestructura activado (figuras 2 y 3). Se ha contrastado, tanto en la simulación como en la realidad, que es una pieza sana, ya que con el nuevo módulo de microestructura es posible simular la expansión gráfica, verdadero problema a la hora de ajustar los resultados de simulación de estas grandes piezas fabricadas en fundición nodular, de altos módulos térmicos y moldeadas en moldes de arena de resistencia media-alta, pero que convenientemente calculada permite una precisión sensiblemente más alta en la predicción de defectos de contracción. En la realidad la pieza es sana y se trataba de ver que el simulador llegaba al mismo resultado.

Como hemos dicho las probetas ensayadas se han extraído de piezas reales, similares a la pieza simulada y de la misma calidad de material, de manera que se pueda relacionar el resultado con piezas cualesquiera de fabricación estándar con una aproximación de resultados aceptable, como ocurre cuando se simula una producción seriada. Ninguna pieza es

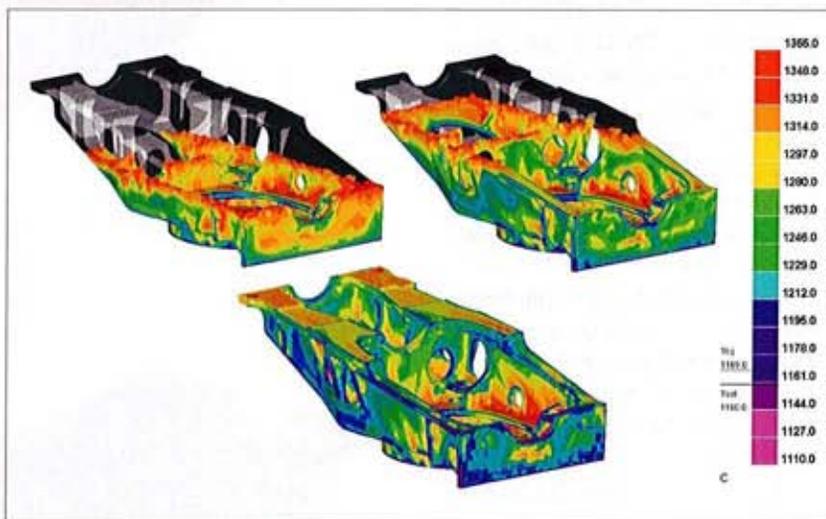


Figura 2.- Imágenes del proceso de llenado

realizada en condiciones estándar de fabricación, tal y como nos han proporcionado las fundiciones en cuanto a temperaturas, análisis químicos o tiempos de llenado. Se ha simulado inicialmente el llenado y la solidificación con el módulo de cálculo de mi-

igual pero todas son suficientemente similares entre sí y con respecto a la simulación. Estas son las reglas del juego.

El primer paso es calcular el proceso de llenado y el de posterior solidificación. Simultáneamente a ellos

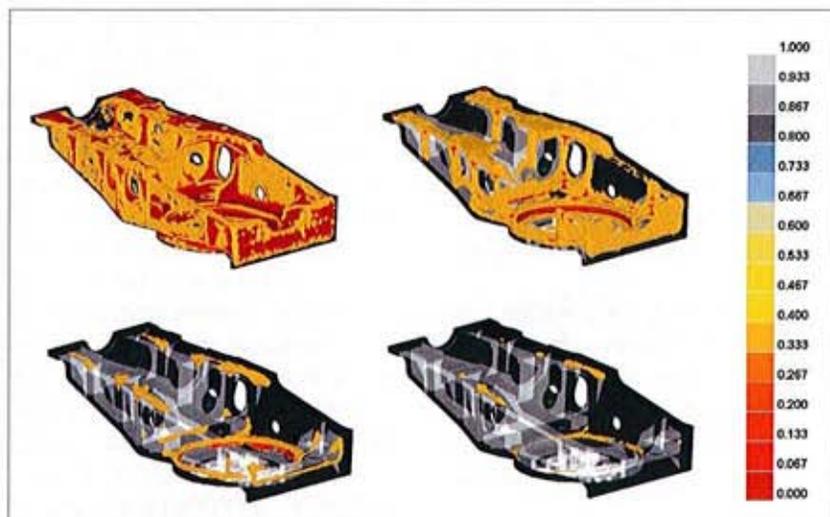


Figura 3.- Imágenes de la solidificación (Fracción sólida crítica)

se va calculando la microestructura y así, en el post-proceso del simulador, se obtendrán las características mecánicas previstas por el cálculo.

En la figura nº 2 se observa la llamada fracción sólida crítica, que es aquella en la que la pastosidad del caldo por estar formado por una mezcla de sólido y líquido no es capaz de mantener un flujo de movimiento y, por lo tanto, incapaz de fluir. A efectos prácticos, como si la parte que alcanza esa fracción ya hubiera solidificado. Con este parámetro convenientemente filtrado por el programa de cálculo se puede ver la evolución de las bolsas de caldo aisladas, generadoras del riesgo de posteriores defectos de contracción líquida.

El siguiente paso, tal como hemos planificado, es asegurar las características de tenacidad requeridas en las piezas por los clientes, es decir, tipo de estructura de la matriz metálica, distribución y tamaño de los grafitos, así como características mecánicas críticas como módulo elástico, alargamiento y carga de rotura.

Una vez terminados los cálculos se procede a chequear la pieza con el simulador en todos los aspectos citados y contrastarlos con la realidad de las probetas físicas extraídas de piezas fabricadas y a las que hemos sometido a los requeridos ensayos en nuestros laboratorios. Los resultados de unos y otros se muestran a continuación.

8.- DISCUSIÓN

A la vista de los resultados, como se puede apreciar en las figuras, la cantidad y distribución de la ferrita y consecuentemente de la perlita son lógicas y se corresponden con lo que se obtiene en estas piezas, donde la práctica totalidad de la estructura es ferrítica (figuras 4 y 5) y solo en ciertas áreas muy localizadas se producen pequeñas concentraciones de perlita causadas por el tipo de solidificación, pues si nos fijamos en la figura 3, son las últimas bolsas de caldo en solidificar y donde normalmente se concentran debido a su más lento enfriamiento las micro-segregaciones de elementos traza que pueden alterar la

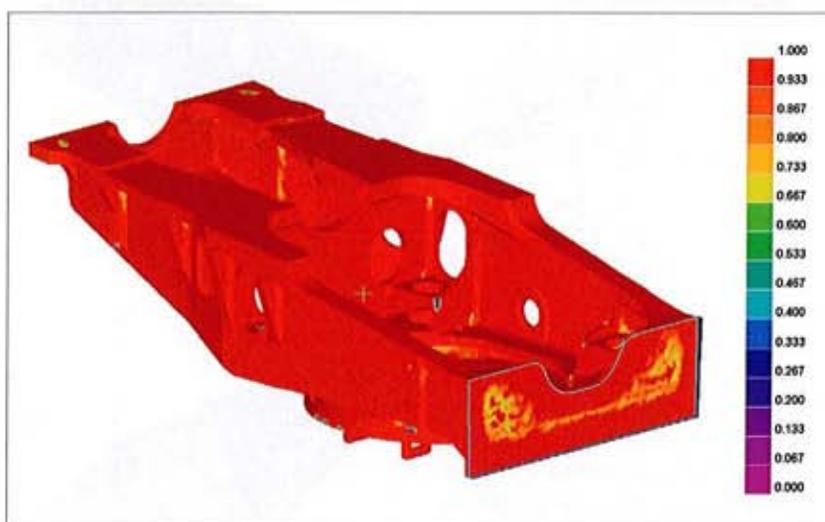


Figura 4.- Porcentaje de ferrita (en rojo 100% de ferrita) previsto en la simulación

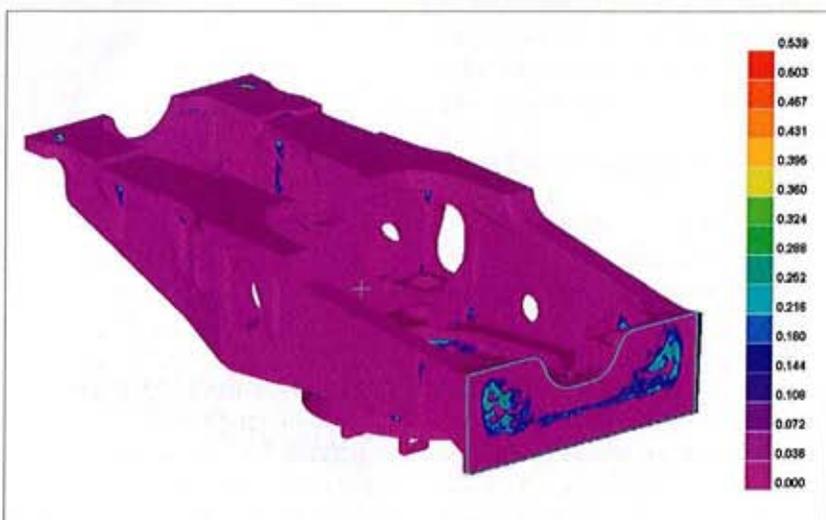


Figura 5.- Porcentaje de perlita (violeta es 0% de perlita) previsto en la simulación

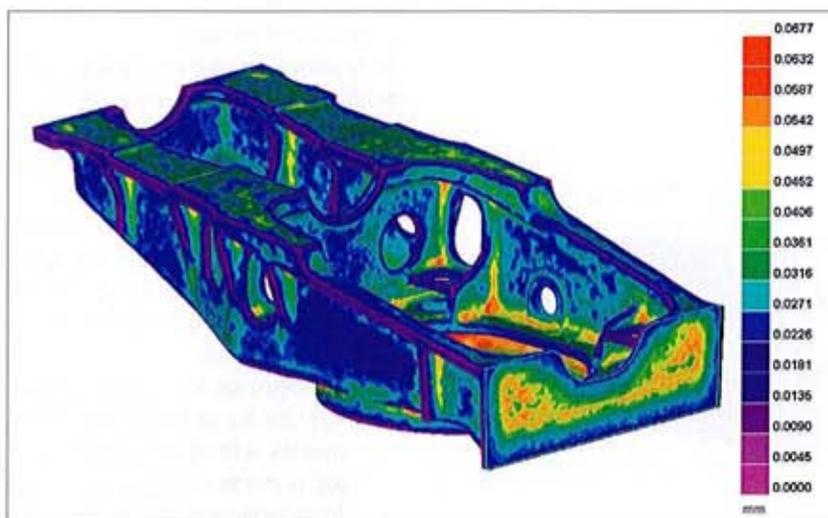


Figura 6.- Distribución del tamaño de los nódulos de grafito (mm de radio)

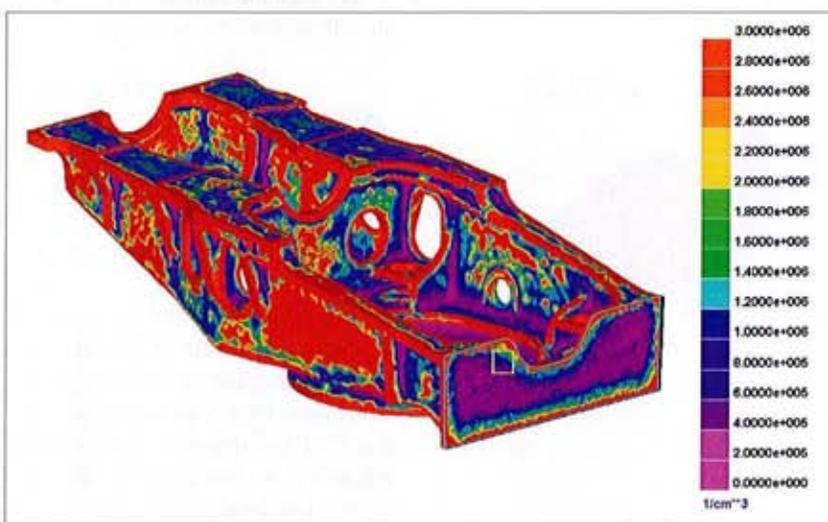


Figura 7.- Densidad de nódulos (N° nódulos/cm 3) y zona de transición (cuadro)

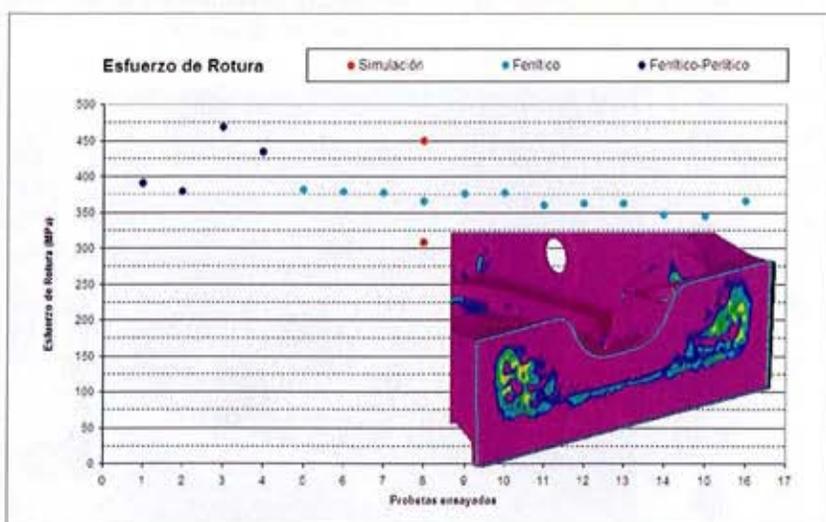


Figura 8.- Predicción de Esfuerzo de rotura vs. ensayos físicos

velocidad relativa de enfriamiento y dar lugar a esas pequeñas formaciones de perlita. Esto es algo habitual y es conocido como temple inverso.

En lo referente a la forma, tamaño y distribución del grafito, aspectos todos ellos que influyen en las prestaciones de estos materiales y que son controlados en la práctica, hemos de decir que el primer resultado que devolvió el simulador tal cual salió sin ajustar fue algo diferente a la realidad, pero entendemos que los valores por defecto usados son valores medios que se han recogido de los estándares comunes y diversos usados en el cálculo. El módulo actual de microestructura permite ajustar estos resultados y adaptarlos a la calidad obtenida en la realidad por la inoculación efectuada en planta. La inoculación consiste en una mejora de la calidad metalúrgica final desde el estado líquido, realizada inmediatamente antes del momento del llenado del molde, en la que mediante la adición de productos adecuados (aleaciones especiales que se adquieren para ello) se consigue algo muy parecido a lo que en otros metales consiguen los posteriores tratamientos térmicos de normalización.

En la herramienta esto también se consigue actuando sobre dos variables que ajustan la nucleación eutéctica, que es la capacidad de generar un mayor número de nódulos y de un determinado tamaño. Es otro potencial nuevo muy innovador y aún por estudiar a fondo por los usuarios avanzados, pero como se ve ya rinde buenas prestaciones. Una vez ajustados estos valores, los resultados fueron mucho mejores y son los que se presentan en las imágenes siguientes. El ajuste cambió los resultados en cuanto al grafito y también en cuanto a características mecánicas, si bien, en estas últimas la influencia resultó casi inapreciable. Por dar un sentido físico y práctico, el cambio efectuado sobre las variables equivaldría en este caso concreto a suponer que la inoculación fue de una calidad superior a la de los valores por defecto.

En la figura 11 se aprecia la diferencia entre la estructura ferrítica ma-

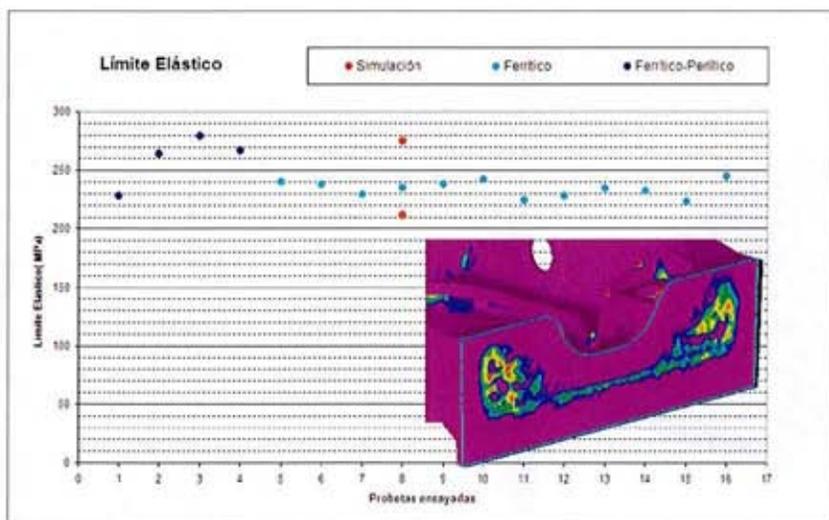


Figura 9.- Ídem de Límite elástico

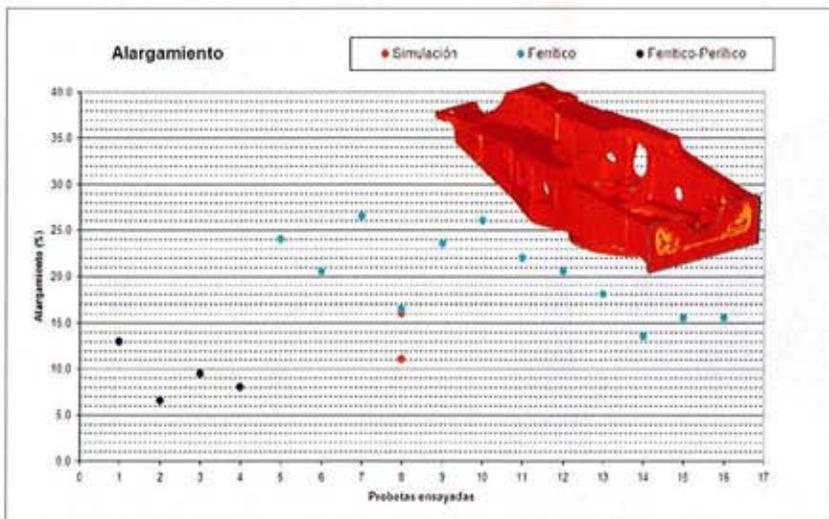


Figura 10.- Ídem de Alargamiento

yoritaria y la encontrada en esa zona de transición, que es parcialmente perlítica. En la imagen de la izquierda, cuadrante superior derecho, también se puede ver un pequeño indicio de la primera aparición de perlita.

Como decíamos, ambos materiales han sido ensayados en la realidad y comparados con las predicciones numéricas, de lo que se puede comentar lo siguiente:

- Diámetro de los nódulos (figura 12). Se ha utilizado una herramienta informática para medir los nódulos de las microestructuras realizadas tal como se presenta en la figura siguiente:

El resultado comparativo es el siguiente (diámetros en micras):

	Pieza	Simulador
Media	40,78	60,00
Max	74,61	80,00
Min	21,47	40,00

Los resultados son bastante aproximados.

• N^o nódulos. Hemos aprovechado la anterior medición real hecha a un trabajo de microscopía de una probeta ferrítica. Para calcularlo y debido a que ProCAST devuelve el dato en nódulos/cm³, se han contado los nódulos en la realidad y se ha supuesto un material isotrópico, regular en la distribución de éstos, la cual no coincide completamente con la realidad pero sí resulta suficientemente ajustada para la zona de estudio.

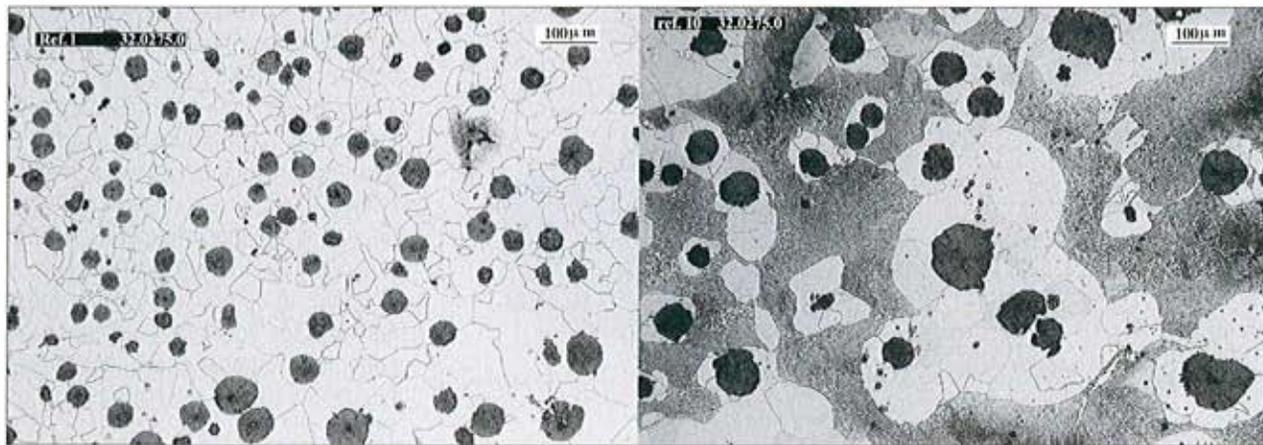


Figura 11.- Diferencia de microestructuras de ambas zonas comentadas

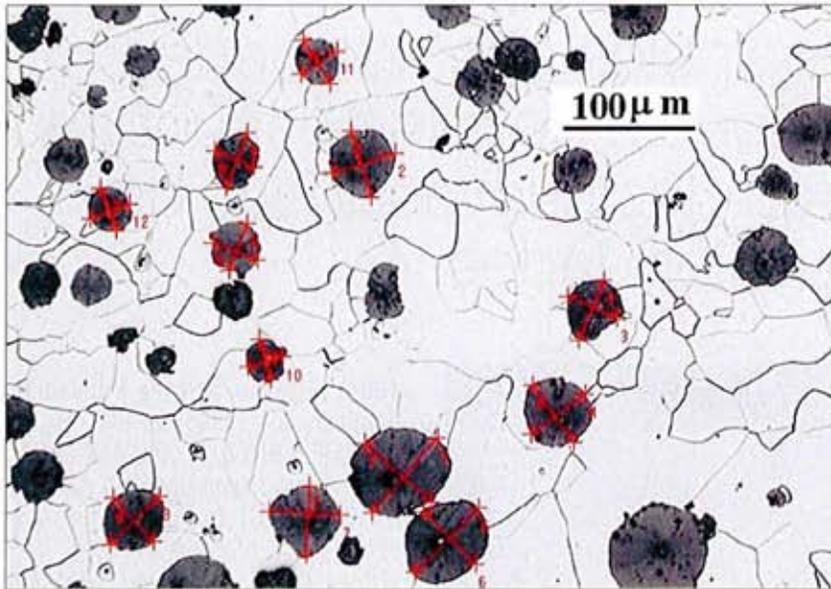


Figura 12.- Medición de nódulos

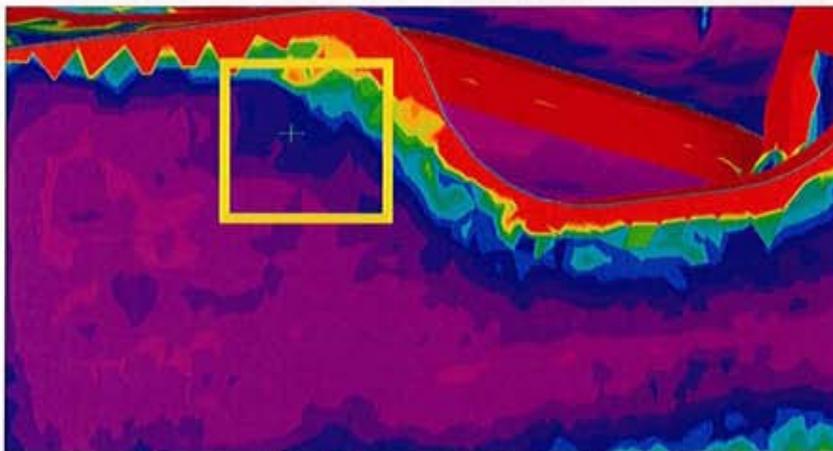


Figura 13.- Detalle aumentado de la zona estudiada

La zona elegida para estudiar (figura 13), como se ha comentado antes, es una zona singular donde coexisten estructuras diferentes. Con todo ello el valor de nódulos/cm³ así calculado es de unos 3,06 E6 que según la escala del simulador se correspondería con las áreas de color rojo. Entendemos que dadas las necesarias aproximaciones de cálculo el valor es también bastante aceptable.

- **Carga de rotura** o carga límite (figura 8). Los valores reales tienen una cierta variación pero están dentro de los límites (puntos en rojo) que predice el simulador.
- **Límite elástico** (figura 9). Se puede decir lo mismo que en el caso anterior.
- **Alargamiento** (figura 10). Aquí el resultado es más disperso, pero la media de valores obtenida entre la media a su vez del material ferrítico y la del ferrítico-perlítico, está comprendida también entre los dos valores calculados.

9.- CONCLUSIONES

El simulador utilizado se ha mostrado como una excelente herramienta para la predicción de la microestructura y de las características mecánicas básicas de los materiales de fundición, especialmente en este difícil caso de las grandes piezas de nodular ferrítico utilizadas en una industria de alta exigencia y muy de ac-

El simulador utilizado se ha mostrado como una excelente herramienta para la predicción de la microestructura y de las características mecánicas básicas de los materiales de fundición

Los nuevos cálculos que se pueden realizar con el módulo de microestructura activado abren dos nuevas líneas de posibilidades



tualidad como es la fabricación de los aerogeneradores.

Los nuevos cálculos que se pueden realizar con el módulo de microestructura activado abren dos nuevas líneas de posibilidades al permitir:

1. Ajustar el nivel de **sanidad interna** con la mejora del cálculo de la expansión gráfica
2. Ajustar y adaptar a cada caso la **calidad metalúrgica** desde el punto de vista de la inoculación mediante la modificación de las variables de nucleación eutéctica.

Todo ello, convenientemente desarrollado y ajustado por el usuario significará una mayor aproximación de los resultados a la realidad de su proceso productivo, permitiéndole especular posteriormente con diferentes soluciones técnicas de sus fabricados y establecer propuestas razonadas y ventajosas a los clientes del sector eólico y, por supuesto, por extensión a sectores que consuman piezas similares donde esta tecnología sea aplicable.

10.- BIBLIOGRAFÍA

- BONOLLO, F. and ODORIZZI S. *Numerical Simulation of Foundry Processes*. Engin Soft Trading, Dipart. Di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali, Inasmet, Magma, School of Engineering - Joenkeoping University, Associazione Italiana di metallurgia (Partners of the coprofound Project). Padova: Servizi Grafici Editoriali, 2001. ISBN: 88-86281-63-3.
- BECKERMANN, C. *Modelling of casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI*. Piwonka, T.S.; Voller, V.; Katgerman, L. TMS, Warrendale, PA (1993), pp 181-192.
- QUESTED, P.N.; DINSDALE, A.T.; ROBINSON, J.A.J.; MILLS, K.C.; HUND, J.D. *The Prediction of the Thermophysical Properties and the Solidification Path of Commercial Alloys*. CMMT(A), vol. 275 (2000)
- MINKOFF, I. *The Physical Metallurgy of Cast Iron*. Wiley, John & Son (1983).
- DEN, X.; ZHU, P.; LIU, Q. *The Physical Metallurgy of Cast Iron, Stockholm*. Sweden (29-31 Aug.

1984), Elsevier Science Publishing Company, Inc. (1985) pp 141-150.

- MELENDEZ, A. and ANGLADA, E. *Successful applications in castings using ProCAST Inverse Module*. En: *Proceedings of EuroPAM 2006. 16th European Conference and Exhibition on Digital Simulation for Virtual Engineering*, (Toulouse 10-12 October 2006).

Inasmet-Tecnalia. Unidad de negocio de Fundición

Inasmet es un centro de investigación radicado en Donostia-San Sebastián (País Vasco, España) integrado en la Corporación Tecnalia (formada por 7 centros de investigación) donde constituye una unidad específica de negocio para el sector de fundición para el que viene trabajando desde hace más de 45 años. Tiene alianzas estratégicas con el CTIF francés (Centro Técnico de Fundición) y con el CQRDA canadiense (Centro para el I+D en Aluminio). Los autores del artículo se encuentran encuadrados dentro del Departamento de Tecnologías de Fundición Férrica y especializados en Procesos Avanzados.

Agradecimientos y colaboraciones

Este trabajo ha contado con el auspicio de la Asociación de Fundidores del País Vasco y Navarra (AFV-FEAF) y la colaboración de las empresas TS FUNDICIONES y FUNDICIONES URBINA, promotores y participantes del proyecto de investigación que sustenta el trabajo, y asimismo del fabricante, GAMESA EÓLICA, como propietario de la geometría. Sin su importante apoyo no hubiera sido posible.. ■