

# Predicción mediante la simulación de la microestructura en fundiciones ADI tras el tratamiento térmico

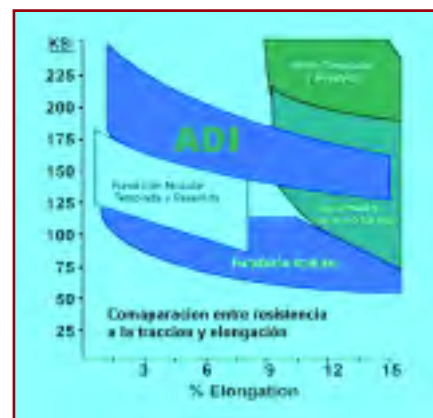
Por Igor Pérez Villalobos<sup>1</sup>, Uwe Getzlaff<sup>2</sup> y Ole Köser<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup> Análisis y Simulación S.L., <sup>2</sup> ACTech GmbH y <sup>3</sup> ESI Group)

## FUNDICIONES ADI

La búsqueda de materiales de bajo costo y buenas propiedades mecánicas ha permitido un gran desarrollo de las fundiciones nodulares austemperadas (ADI). El creciente uso de las fundiciones ADI es consecuencia directa de sus propiedades mecánicas, que son superiores a otros miembros de la familia de las fundiciones nodulares en lo que se refieren a maquinabilidad, resistencia a la tracción, resistencia al desgaste, tenacidad y ductilidad. Estas características, junto a los menores costos de producción en comparación con los aceros, simplificación del proceso de mecanizado de piezas y reciclabilidad, convierten a este material en una alternativa industrialmente válida y atractivamente económica para reemplazar, en algunas aplicaciones, a los aceros de baja aleación fundidos y forjados [1,2]. Estas propiedades pueden mejorar, aún más, con un buen control de su microestructura y el agregado de elementos de aleación.

Las notables propiedades de la fundición ADI son consecuencia de su estructura, que está compuesta de nódulos de grafito y una matriz que consiste en una mezcla de dos fases, placas de ferrita y austenita estabilizada con total ausencia de carburos. La estructura de la austenita es responsable de la excelente ductilidad y tenacidad de las fundiciones ADI, mientras que la fina dispersión de ambas fases, ferrita y austenita, permiten explicar la alta resistencia de la aleación [3]. Por otra parte, la adición de elementos de aleaciones tales como Cu, Mo y Ni, mejoran aún más las propiedades mecánicas del mate-

Imagen 1.  
Representación gráfica de las propiedades mecánicas de la fundición ADI en comparación con otras aleaciones.



rial, por cuanto su efecto combinado influye favorablemente sobre la templabilidad de la aleación [4, 5].

## EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE AUSTEMPERADO EN FUNDICIONES ADI

El proceso de austemperado consiste en dos etapas de tratamiento térmico: la primera etapa de austenización de la fundición esferoidal, que tiene por objetivo obtener una matriz austenítica y la segunda que consiste en un enfriamiento rápido hasta la temperatura de austemperado, en el rango de temperaturas de 250 °C – 450 °C, donde se mantiene el material el tiempo necesario para que ocurra la nucleación y crecimiento de las placas de ferrita a partir de austenita. La difusión de carbono desde las placas de ferrita aumenta el contenido de carbono en la matriz a valores entre 1,8% y 2,1%, produciendo una estabilización de la austenita a temperatura ambiente. Esta

estructura es conocida como ausferrita. Para tiempos mayores de tratamiento de austemperado se produce la descomposición de la austenita en ferrita y carburos, formándose bainita. La presencia de cantidades significativas de silicio en las fundiciones nodulares es responsable de suprimir la inmediata formación de carburos de hierro, en beneficio de producir el producto intermedio, ausferrita [6].

### PREDICCIÓN MICROESTRUCTURAL A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El tratamiento térmico puede ser un paso indispensable en la fabricación de productos metálicos. A través de una deliberada manipulación de la estructura química y metalúrgica de un componente, se pueden controlar selectivamente propiedades mecánicas como la dureza, resistencia estática y dinámica o la tenacidad. Sin embargo, a parte de los efectos deseados, el proceso de tratamiento térmico puede venir acompañado de efectos indeseados como por ejemplo distorsión del componente, endurecimiento elevado del material, baja resistencia, falta de tenacidad o profundidad de dureza inadecuada (que podría conllevar a fallo en fatiga). Por lo tanto el éxito o el fracaso del tratamiento térmico no sólo afectará a los costes de fabricación, sino que determinará la fiabilidad y la calidad del producto. Se debería por tanto, tener en cuenta el tratamiento térmico durante el desarrollo y el diseño del producto y debe controlarse en el proceso de fabricación.

Con respecto al diseño y fabricación basados en la simulación, se desea calcular con antelación los efectos del tratamiento térmico y optimizarlos variando el material, geometría de la pieza, etc...

Una vez que la forma de la pieza está diseñada, es muy importante asegurarse que el proceso de tratamiento térmico es correcto y que la ventana de proceso asegura la calidad, frente a la variación de parámetros de proceso.

Con las herramientas de simulación de tratamientos térmicos actuales se pueden llevar a cabo dichos cálculos para todos los procesos generales de tratamientos térmicos aplicables, teniendo en cuenta todos los efectos físicos significantes. De esta forma el diseñador de pieza y los responsables del tratamiento térmico pueden tener una deliberada influencia a la hora de minimizar costes de fabricación, así como de optimización, viabilidad y calidad del producto.

Cada vez son más las capacidades de los programas de simulación para predecir las transformaciones, microestructura y las propiedades mecánicas de una aleación durante y tras el tratamiento térmico. Este tipo de simulaciones aporta un añadido a la cadena de valores en el mundo de la virtualización del proceso de fabricación.

En este caso se trata de añadir un valor a las capacidades de simulación de la solución de Fundición del Grupo ESI (ProCAST y QuikCAST), que más allá de centrarse únicamente en el propio proceso de fundición, ofrece la posibilidad de predecir las transformaciones que sufrirá una aleación durante un tratamiento térmico, basándose principalmente en los diagramas CCT y TTT de la aleación.

A través de modelos matemáticos concretos, el programa ofrece la posibilidad de predecir la transformación que se dará en cada zona de la pieza mediante cálculos transitorios y acoplados.

### RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE UNA FUNDICIÓN ADI EN UNA PIEZA DE ENSAYO. Cortesía de ACTech.

El principal objetivo de este estudio realizado por la empresa ACTech (Alemania) en colaboración con ESI Group (Suiza), fue el de correlacionar los resultados obtenidos a través de la simulación del tratamiento térmico con los resultados en una pieza de ensayo real. Para ello se utilizó una geome-

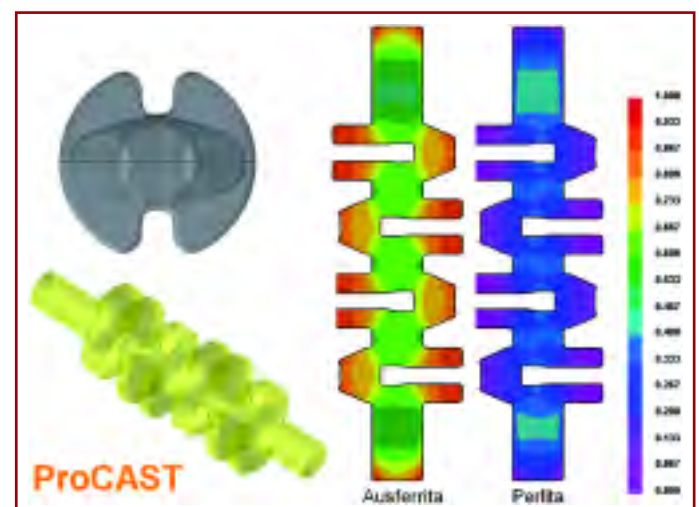


Imagen 2. Resultados de simulación de tratamiento de austemperado con ProCAST (ESI Group) de un cigüeñal. Cortesía de ACTech.

tría de secciones variables para forzar velocidades de enfriamiento diferentes con su lógica influencia en la microestructura final.

La simulación se realizó con el software de cálculo por elementos finitos ProCAST de ESI Group a través de un modelo basado en los diagramas tiempo-temperatura- transformación (TTT). El modelo está basado en la expresión de Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami (KJMA) para la cinética de transformación de fase gobernada por un proceso de nucleación y crecimiento. El modelo es aplicable a cualquier curva de enfriamiento utilizando un principio de aditividad [7].

Para la correlación de las curvas de enfriamiento reales con las obtenidas durante la simulación se tomaron medidas de temperatura en 6 puntos diferentes de la pieza obteniendo un buen ajuste entre ambas.

En la siguiente imagen se pueden observar los resultados de microestructura previstos mediante la simulación en los diferentes espesores de la pieza, así como las diferentes micrografías realizadas en los mismos puntos.

A partir de la buena correlación obtenida tras el análisis de los resultados reales en comparación con los calculados, se pudieron realizar previsiones de los resultados microestructurales a obtener tras el tratamiento de austemperado para piezas de producción (Ej: Cigüeñal, soporte de rueda...) con buena precisión.

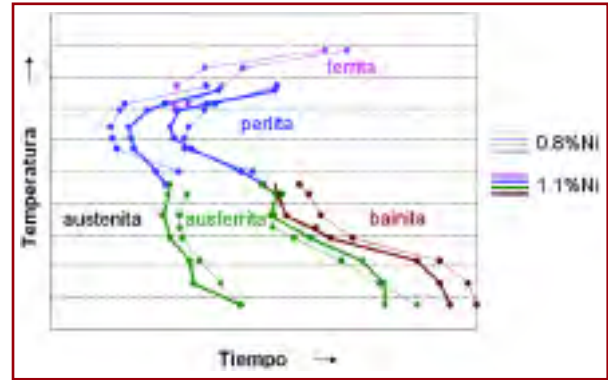


Diagrama 1. Diagrama TTT experimental para diferentes grados de ADI. (Cortesía de ACTech).

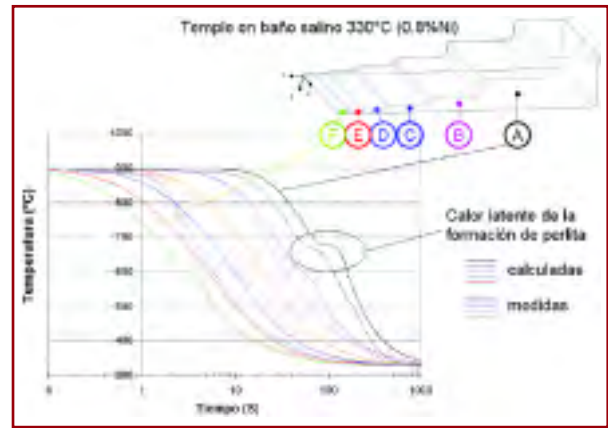


Imagen 3. Curvas de enfriamiento calculadas y medidas. (Cortesía de ACTech).

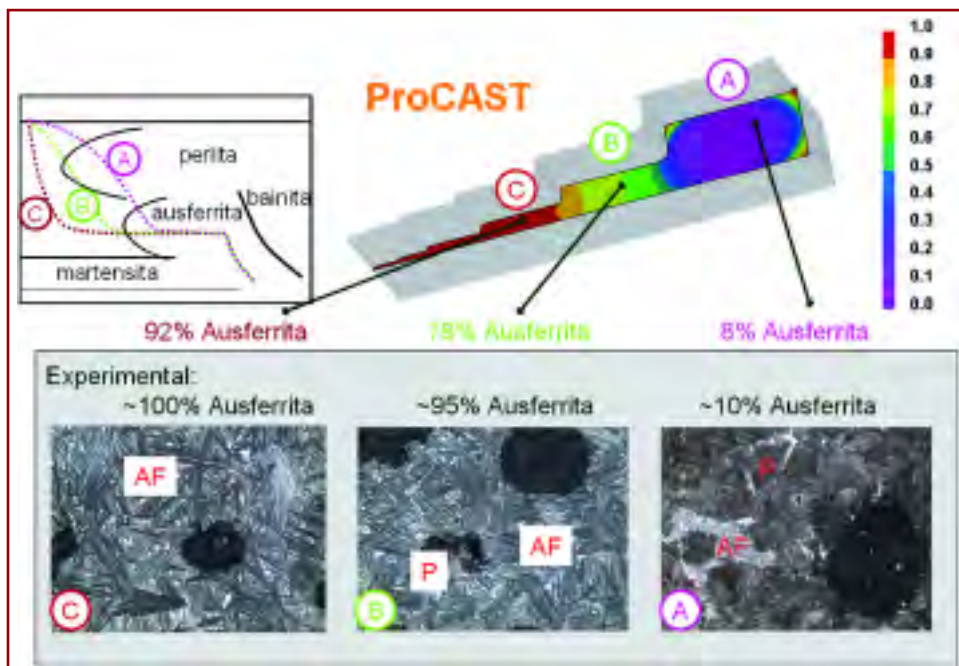


Imagen 4. Fracción de Ausferrita en diferentes espesores. Datos experimentales cortesía de ACTech.

## CONCLUSIÓN

Debido principalmente a las buenas propiedades mecánicas y la búsqueda de materiales de bajo costo, el uso de las fundiciones ADI está creciendo. Uno de los puntos clave de control para la buena calidad de las piezas fabricadas en ADI, a parte del propio proceso de fundición, radica en el Tratamiento de Austemperado.

En el caso de las fundiciones ADI donde el control del tratamiento de austemperado cobra una gran importancia, la simulación numérica puede ofrecer una gran ayuda para reducir costes de fabricación así como de optimización, viabilidad y calidad del producto. Gracias a los modelos matemáticos para la cinética de transformación como el que incluye el software ProCAST de ESI Group y basándose en los diagramas TTT/CCT de cada aleación en concreto, es posible prever la transformación microestructural (y del mismo modo de una forma más o menos directa las propiedades mecánicas) que se formará durante y tras un tratamiento térmico.

A día de hoy, la ingeniería Análisis y Simulación, responsable de la implantación de ProCAST y QuikCAST en España y Portugal, está liderando la implantación de este knowhow en la propia oficina técnica de la fundición, a través de formación específica en tecnología y soporte personal en los aplicativos.

## REFERENCIAS

- [1] Mondaca O. J, Spicacci R. H, Sikora J. A, Machinability of austempered ductile iron, AFS Transactions, 10, 1998, pp. 39 - 45.
- [2] J. L. Garin and R. L. M. Z. Metallkd, 91, 2000, pp. 842.
- [3] P. P. Rao, S. K. Putatunda, Metallurgical and Materials Transactions A, 28A, 1997, pp 1457-1470.
- [4] Sim B. T, Elliot R. Influence of alloying additions on austempering kinetics of compacted graphite cast iron, Materials Science and Technology, 14, 1998, pp. 89- 96.
- [5] Yu S. K. Et al, The efect of molybdenum, copper and nickel on the microstructure, hardness and hardenability, AFS Transactions, 97, 1986, pp. 557.
- [6] Jagadeesha A, Venugopalan D., Microestructural Development and Austempering Kinetics of Ductile Iron During Thermomechanical Processing, Metallurgical and Materials Transactions A, 31 A, 2000, pp. 2575-2585.
- [7] Manual ProCAST 2010.
- [8] O. Köser, Fertigungssimulation – Absicherung der Serieigenschaften schon bei der Entwicklung, ADI-Informationstag, 26. November 2009, Leipzig.

# ferroforma '11

## La Ferroforma que quieren todos

# todos

Ferroforma es tu Feria.  
El punto de encuentro más importante del año.  
Por eso te ofrecemos nuevas herramientas a tu servicio.

**Una financiación al 0 %, importantes descuentos y muchas más ventajas para que vender te resulte más fácil que nunca.**  
Lo que todos queremos

[www.laferroformaquequierentodos.eu](http://www.laferroformaquequierentodos.eu)



'11  
BILBAO

23 > 26 MARZO

**B!  
E!  
C!** BILBAO  
EXHIBITION  
CENTRE