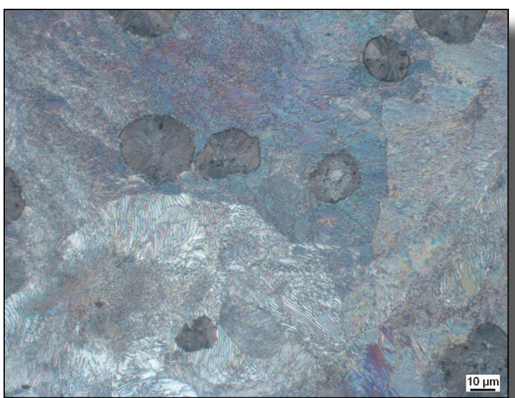
Cigüeñales de fundición esferoidal con propiedades mecánicas mejoradas en estado bruto de colada



Adrián Monzón-Gracia* Ingeniero Técnico Industrial
Jon Sertucha-Pérez** Doctor en Ciencias Químicas
Joan Serrallach-Perarnau* Ingeniero Técnico Metalúrgico
Ramón Suárez-Creo ** Ingeniero Industrial

* INFUN, S. A. Camí Can Ubach 25 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona). Tfno: +34 936 560511

** IK4-AZTERLAN. Área de Ingeniería, I+D y Procesos Metalúrgicos. Aliendalde Auzunea, 6 - 48200 Durango (Bizkaia). Tfno: +34 946 215470

Recibido: 28/12/2012 • Aceptado: 10/06/2013
DOI: http://dx.doi.org/10.6036/5686

AS-CAST DUCTILE IRON CRANKSHAFTS WITH IMPROVED MECHANICAL PROPERTIES

ABSTRACT

• Current understanding about the influence of several alloying elements on mechanical properties of steels and cast irons and more precisely on ductile cast irons is still incomplete. On the other hand, an increasing demand to develop innovative and cheap cast iron alloys with improved mechanical properties and potential application on high performance components is also observed. Crankshafts used to manufacture high-power engines for big vehicles are a proper example of this demand. The present work is devoted to study the effect of several chemical alloying elements on the structural and mechanical properties of fully pearlitic ductile cast irons. An optimized combination of C, Si, Cu, Mn Mo and Cr contents has leaded to develop a new methodology for preparing as-cast ductile irons with more homogeneous matrices, tensile strength values even higher than 1000 MPa and elongation values higher than 4%.
• Keywords: pearlitic nodular cast iron, mechanical properties, alloying elements.

RESUMEN

El conocimiento actual sobre la influencia que tienen algunos elementos de aleación como metodología para mejorar las propiedades mecánicas de aceros, fundiciones y, en concreto, de las fundiciones esferoidales sigue siendo limitado. Sin embargo, existe una creciente demanda para desarrollar materiales de fundición innovadores que puedan ser utilizadas como una alternativa más económica a los materiales utilizados en la actualidad para aplicaciones con altos requerimientos mecánicos.

Un ejemplo representativo de este problema son los cigüeñales utilizados en la fabricación de motores de elevada potencia destinados a vehículos de alta gama y/o gran tamaño. El presente trabajo aborda el estudio del efecto que tienen determinados elementos químicos (utilizados de forma habitual o no) sobre las características estructurales y las propiedades mecánicas de fundiciones esferoidales de matriz totalmente perlítica. La combinación optimizada de los contenidos de C, Si, Cu, Mn, Mo y Cr ha permitido fabricar determinados materiales con estructuras más homogéneas, resistencias a la rotura superiores a 1000 MPa en algunos casos y alargamientos superiores al 4% en estado bruto de colada.

Palabras clave: fundición nodular perlítica, propiedades mecánicas, elementos de aleación.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a los elevados requerimientos mecánicos, los fabricantes de motores de alta potencia se han decantado tradicionalmente por los cigüeñales fabricados con acero forjado. Sin embargo, la fabricación de estas piezas es comparativamente compleja y costosa, aspectos que repercuten finalmente en el precio final del componente. La fundición esferoidal cuenta con numerosas ventajas tecnológicas, entre ellas la

mayor facilidad en su fabricación, que la hacen competitiva. Por tanto, la principal limitación existente para ampliar la aplicabilidad de este tipo de material metálico es el desarrollo y mejora de sus propiedades físicas. Esta labor se puede afrontar optimizando tanto las condiciones de fabricación de estos materiales como la adición de determinados elementos de aleación [2 a 10].

En la actualidad, se está fomentando intensamente el desarrollo de nuevos materiales dentro del campo de la fundición grafítica esferoidal y sus aplicaciones en el sector de la automoción. Aunque este tipo de fundición de hierro ofrece la posibilidad de fabricar piezas con un amplio intervalo de propiedades mecánicas, atendiendo al tipo de estructura matricial obtenida, en determinados casos dichas propiedades comienzan a ser insuficientes teniendo en cuenta las crecientes exigencias de este sector. Un ejemplo de ello son los cigüeñales utilizados en la fabricación de motores de alta potencia (vehículos de alta gama y/o pesados). Por un lado, es necesario reducir la masa de los componentes empleados y, por otro, la optimización de los consumos de combustible [1] implica la utilización de materiales con mejores propiedades mecánicas. A todo ello se le añade la necesidad de fabricar piezas en estado bruto de colada y sin defectos internos (rechupes, inclusiones, etc.) con el fin de reducir los costes de fabricación. En la fabricación de cigüeñales para motores de baja o media potencia se emplea masivamente la fundición esferoidal con la matriz completamente perlítica. Sin embargo, este material no garantiza el cumplimiento de las exigencias de propiedades mecánicas (alta resistencia a la tracción y a la fatiga mecánica) en los cigüeñales destinados a vehículos de alta potencia (habitualmente no se garantizan cargas de rotura superiores a 800 MPa).

El presente trabajo forma parte de un proyecto en el que se han diseñado nuevos tipos de fundición esferoidal perlítica y se han caracterizado comparativamente sus propiedades. Estos materiales deben ofrecer características mecánicas mejoradas (cargas de rotura superiores a 850 MPa y alargamientos mayores de 4%), sin incrementos en los costes de fabricación con relación a los actuales, con el fin de ser utilizados como alternativa al acero forjado. Por otra parte, las condiciones de fabricación necesarias deben ser compatibles con las metodologías industriales de fabricación disponibles en la actualidad. Incluso, si fueran necesarias modificaciones, éstas deben suponer la mínima alteración sobre las condiciones ya existentes, con el fin de no perjudicar la competitividad de los nuevos materiales desarrollados.

2. METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE LAS ALEACIONES

Los metales preparados para fabricar piezas de fundición esferoidal con matriz perlítica contienen habitualmente Mn y Cu como elementos activos a la hora de fomentar la formación de la perlita como fase predominante del material a temperatura ambiente. Aunque los contenidos de estos dos elementos dependen del tamaño de la pieza y de la experiencia adquirida previamente por los fundidores en cada planta, el elemento más utilizado suele ser el Cu (0,50-1,00%), manteniendo el Mn en intervalos más reducidos (0,30-0,50%).

Con objeto de adquirir un mayor conocimiento sobre la influencia de estos y otros elementos activos en las propiedades mecánicas de este tipo de fundiciones esferoidales, se han fabricado un total de 85 aleaciones con diferentes composiciones químicas (Tabla 1). De estas 85 aleaciones, 21 se descartaron por tener un contenido de perlita inferior al 95% en la matriz. El diseño de estos materiales se ha estructurado de forma que fuera posible analizar ordenadamente tanto la influencia de los nuevos elementos aportados al metal como su posible efecto cooperativo con los elementos ya existentes y empleados de manera habitual para fabricar las fundiciones esferoidales perlíticas (Mn y Cu).

En todos los casos, el metal base se preparó en un horno de inducción de media frecuencia (250 Hz) y con capacidad máxima para 110 kg. Las cargas metálicas estaban constituidas por lingote de fundición, acero de baja aleación y retornos de matriz ferrítica con bajos contenidos de elementos de aleación. Los contenidos de C y Si se ajustaron adicionando grafito y FeSi75 al metal fundido. El resto de elementos de aleación (Mn, Cu, Mo, Ni, etc.) se adicionaron mediante los correspondientes productos comerciales disponibles en el mercado. La cantidad de estos materiales adicionada en las cargas depende de la composición química deseada en cada caso.

Una vez elaborado el metal base, se controló el contenido de S y, posteriormente, se trasvasó a una cuchara con capacidad para 50-60 kg en la que se adiciona un producto nodulizante (FeSiMg) de acuerdo con la metodología sándwich. La cantidad de FeSiMg adicionada es función del contenido de S en el metal base. La inoculación del metal se llevó a cabo adicionando un inoculante comercial en la cuchara de tratamiento, antes de realizar el vertido de metal fundido desde el horno de fusión. La cantidad de este producto inoculante fue el 0.20% de la masa total de metal tratado en la cuchara. Al finalizar el tratamiento de esferoidización del metal, éste

Valor	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	B	Ti
Mínimo	3,52	1,66	0,12	0,012	0,008	0,026	0,44	0	0,015
Máximo	3,76	2,71	1,06	0,045	0,021	0,060	1,72	0,0067	0,36
Valor	Sn	Cr	V	N	Zr	Ni	Mo	Nb	Sb
Mínimo	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0
Máximo	0,025	0,75	0,50	0,0086	0,005	1,18	0,98	0,46	0,008

Tabla 1: Intervalos de composición química para las aleaciones preparadas

se desescorió y, antes de efectuar la colada de los moldes, se extrajo una medalla de composición química. El proceso de colada se realizó en moldes fabricados con arena aglomerada químicamente, dando lugar así a probetas estándar tipo II descritas en la norma EN-1563.

Tras alcanzar el enfriamiento de las cuñas a temperatura ambiente, éstas se cortaron y se mecanizaron con el fin de obtener probetas de tracción y dureza *Brinell*. Todas las probetas se obtuvieron a partir de la parte inferior de las cuñas con el fin de evitar la presencia de defectos en el material (microrrechupes y/o inclusiones) que puedan afectar a los resultados obtenidos a partir de los ensayos mecánicos realizados. Una vez ensayadas las probetas de tracción, éstas se emplearon para determinar las características estructurales de los materiales analizados. Por otro lado, las cuñas se cortaron transversalmente para realizar estudios de *Microscopía Electrónica de Barrido* (SEM) en sus diferentes secciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. PROPIEDADES ESTRUCTURALES

La validez de las fundiciones esferoidales preparadas en este trabajo está inicialmente sujeta al tipo de estructura matricial obtenido en estado bruto de colada. Cualquier material cuya estructura no contenga un mínimo de 95% de perlita en la matriz metálica ha sido descartado en la realización del presente estudio. Por otro lado, no se ha detectado la presencia de fases carbúricas en ninguno de los materiales preparados.

Al igual que en los aceros moldeados, la obtención de una distribución de grano lo más uniforme posible es un aspecto esencial a la hora de mejorar la homogeneidad de las fundiciones esferoidales fabricadas, repercutiendo también en sus propiedades. La forma más sencilla de controlar la distribución de grano es analizar la morfología, distribución y el número de nódulos grafíticos presentes en la matriz metálica. Para ello, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Composición química del metal colado en los moldes.
- Condiciones de enfriamiento del material durante su solidificación.
- Poder de nucleación grafítica del metal fundido.

Desde un punto de vista estructural, la presencia de perlita prácticamente como única fase estructural, aparte de los nódulos grafíticos, impide cualquier evaluación efectiva de los granos formados. Por tanto, el estudio estructural se ha basado en dos parámetros: el número de nódulos grafíticos (N) y la separación de las láminas de cementita que componen la perlita (DL). Como se ha dicho anteriormente, N depende de los tres aspectos indicados arriba. Sin embargo, el parámetro DL parece depender de la composición del metal (presencia o ausencia de elementos químicos promotores de la perlita) y de las condiciones de enfriamiento [11] (este último aspecto restringido a la zona donde se inicia y posteriormente transcurre la transición austenita-perlita).

Industrialmente, el control de la composición química del metal de colada es un parámetro exigible en cualquier proceso de fabricación que se considere apto para la producir cigüeñales de fundición. En el caso de las condiciones de enfriamiento, éstas vienen definidas por las diferentes secciones de las piezas y por el diseño de las placas modelo utilizadas para fabricar los moldes de arena. En general, la fabricación de aleaciones de fundición esferoidal con mayores valores del parámetro N origina la obtención de estructuras perlíticas más homogéneas a temperatura ambiente. En estos casos, los agregados de perlita son más pequeños, permaneciendo sus láminas orientadas al azar con respecto a los agregados vecinos. La Figura 1 muestra dos ejemplos de estructuras perlíticas fabricadas en este trabajo y con diferentes valores del parámetro N.

Los elementos químicos más activos a la hora de obtener estructuras completamente perlíticas han sido el Sb, Sn, Cu, Cr, Mo y, en menor medida, el Mn y el Ni. Tanto el Sb

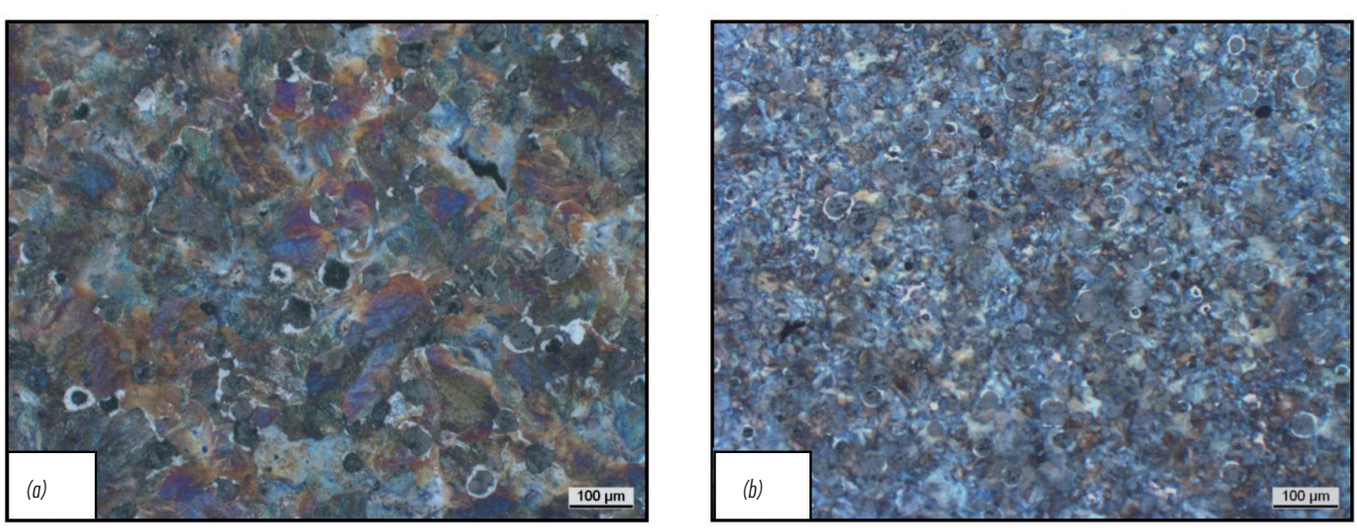


Fig. 1: Estructuras perlíticas obtenidas en fundiciones con: (a) N = 97 y (b) N = 357 nódulos/mm²

como el Sn cuentan con un elevado poder perlitizante aunque también pueden originar malformaciones grafíticas (Sb) o carburos intercelulares (Sn) cuando su concentración en el metal supera los 70 ppm para el primer elemento y, aproximadamente, los 150 ppm para el Sn. En el caso del Cr y el Mo, ambos son elementos efectivos a la hora de promover la formación de perlita fina (menores valores del parámetro DL), pero originan carburos estables en las zonas de última solidificación (bordes de los agregados perlíticos). Los contenidos límite estimados en el presente estudio para evitar la aparición de estos carburos son: 0.55% de Cr y 0.75% de Mo (lógicamente en el caso de las secciones especificadas para las probetas estándar empleadas).

El Mn y, en menor medida, el Ni actúan también como perlitizantes. En contra de determinadas creencias extendidas entre algunos fundidores, el Mn no ha originado carburos intercelulares en concentraciones iguales o inferiores a 1,06% En el caso del Ni, los resultados obtenidos en el presente trabajo confirman la capacidad moderada de este elemento para promover la formación de perlita, anteriormente descrita en la bibliografía[12-13]. Ha existido cierto grado de controversia en relación al papel del Ni como promotor de ferrita o perlita, sin embargo todos los experimentos realizados en este trabajo lo identifican comparativamente como un débil perlitizador.

Por otra parte, el Si juega un papel esencial en el poder de nucleación grafítica del metal de colada, siendo un constituyente primario de los inoculantes adicionados antes de la colada de los moldes. En la Tabla 1 se muestra un intervalo amplio para este elemento. Se considera adecuado trabajar en un intervalo intermedio para el contenido de Si (2.30-2.50%) y promover la formación de perlita adicionando los elementos activos mencionados en el párrafo anterior.

En general, se ha encontrado una relación entre los parámetros N y DL, de forma que este último es más pequeño al aumentar la cantidad de nódulos. Este resultado permite afinar los agregados de perlita para una sección dada en la pieza a fabricar. En el caso de las cuñas estándar utilizadas en el presente estudio, la evolución del parámetro DL en función del número de nódulos grafíticos se muestra en la Figura 2. Para ello, se han analizado 3 zonas con distintas secciones en

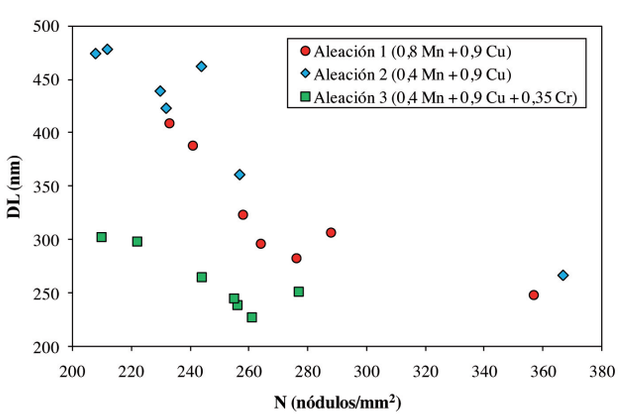


Fig. 2: Evolución de la distancia interlaminar (DL) en función del parámetro N

3 cuñas fabricadas con diferentes composiciones químicas y utilizando la técnica SEM.

En el caso de las dos fundiciones aleadas únicamente con Cu y Mn (Figura 2), la perlita obtenida es comparativamente más gruesa en la aleación 2 (menor contenido de Mn). Al comparar estos materiales con la aleación 3, la cual contiene Cr como elemento activo, se observa que esta última da lugar a los valores más bajos del parámetro DL. Sin embargo, un aumento en el número de esferoides grafíticos presentes en la matriz reduce la distancia entre las láminas que constituyen los agregados perlíticos en cualquiera de estas 3 fundiciones. El incremento en el poder de nucleación grafítica en una aleación fundida provoca la formación de más esferoides (mayor valor de N) y de manera más homogénea a lo largo de la solidificación del material. Dado que la austenita tiende a nuclear rodeando los esferoides, este aumento de N origina un mayor número de zonas de nucleación y posterior crecimiento de la austenita y se obtiene así una distribución más fina de los granos de esta fase. Posteriormente, cada pequeño grano sufre la transformación austenita-perlita, originando también una distribución fina de agregados perlíticos en los que el parámetro DL ha mostrado ser comparativamente menor. Como consecuencia de estos resultados, las plantas de fundición deben cuidar muy bien los siguientes aspectos de cara a optimizar las características estructurales de las fundiciones perlíticas:

- La composición química del metal de colada (especialmente el empleo de elementos promotores de la perlita).
- El poder de nucleación grafítica de las fundiciones fabricadas (calidad metalúrgica).
- La efectividad de los procesos de inoculación del metal líquido.

3.2. DUREZA DE LAS ALEACIONES Y PROPIEDADES MECÁNICAS

La dureza de las fundiciones esferoidales y sus propiedades mecánicas son consecuencia directa de sus características estructurales. De este modo, el conocimiento adquirido en el apartado anterior se puede relacionar con los resultados obtenidos a partir de los ensayos de tracción y dureza efectuados sobre los materiales fabricados. Aunque la estructura matricial está constituida casi exclusivamente por perlita en todos los casos, elementos como el Cu, Cr o Mo son capaces de reducir el parámetro DL, aumentando la carga de rotura (R), el límite elástico (L) y la dureza (D), además de reducir el alargamiento (A) del material. El Cu no origina carburos en todo el intervalo de concentraciones empleado. Sin embargo, tanto el Cr como el Mo en concentraciones elevadas sí forman fases carbúricas, dando lugar a disminuciones más importantes en los valores del parámetro A. La Figura 3 muestra la evolución de los parámetros R y A al aumentar el contenido de Mo hasta el 0,50% (límite para no originar carburos en la matriz metálica) en 27 materiales aleados con Mn (0,32-0,44%) y Cu (0,83-1,35%). La variabilidad mostrada en la figura 3 para una concentración dada de Mo se atribuye

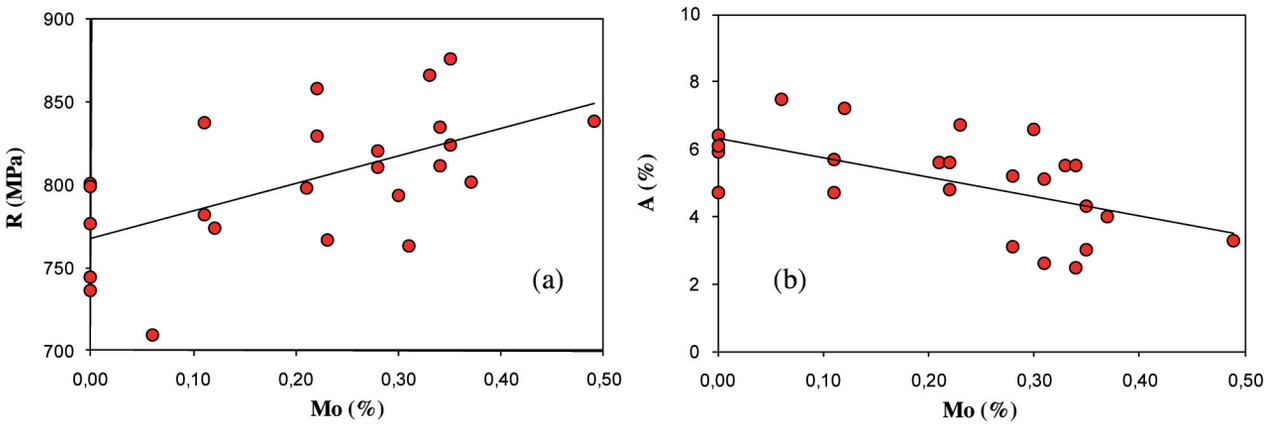


Fig. 3: Evolución de la carga de rotura (a) y del alargamiento (b) con el contenido de Mo

principalmente a las diferentes velocidades de enfriamiento de los materiales [14] y, en menor medida a las variaciones en los contenidos de Mn y Cu.

La adición al material de los elementos considerados como potentes perlitizadores (Sn y Sb) da lugar a efectos sobre las propiedades mecánicas similares a los descritos anteriormente para el Cu, Cr o Mo. En el caso del Sn y Sb, la diferencia radica en la menor concentración necesaria para lograr estos efectos. Al trabajar en la parte alta del intervalo de concentraciones (Tabla 1), el Sn reduce ligeramente los valores del alargamiento, sin efecto definido sobre R, L y D. Este comportamiento podría explicarse con la formación de algunas fases carbúricas en la matriz metálica, las cuales no son suficientes para afectar negativamente a los parámetros R, L y D. Los efectos perjudiciales debidos a la utilización de concentraciones más elevadas de Sn (0,07-0,11%) en fundiciones perlíticas han sido descrito anteriormente en la bibliografía [15].

En el caso del Sb, únicamente se observan efectos negativos cuando su concentración provoca malformaciones grafíticas de tipo Spiky o similares, que suponen la sustitución de nódulos bien conformados por figuras degeneradas o ramificadas.

El efecto de los elementos considerados como débiles perlitizadores (Mn y Ni) es el esperado. Un aumento de sus concentraciones incrementan gradualmente los valores de R, L y D, disminuyendo el alargamiento del material. En el caso del Ni, fue necesario alcanzar concentraciones superiores a 0,70% para detectar su efecto en las propiedades mecánicas. Como aspecto positivo de este elemento, su adición no parece perjudicar el alargamiento del material.

El poder de nucleación del metal preparado para fabricar los materiales también tiene un efecto importante en las propiedades mecánicas. La inoculación efectiva del metal de colada origina mayores valores del parámetro N y, de acuerdo con los resultados mostrados en las Figuras 1 y 2, este hecho afina la distribución de los agregados perlíticos y reduce el parámetro DL. Como consecuencia de ello, para una composición química dada, cabría esperar que los mayores valores de N originaran incrementos en la dureza, la carga de rotura y el límite elástico del material perlítico.

Sin embargo, el efecto obtenido no es el esperado y la evolución de estas tres propiedades con el parámetro N podría interpretarse incluso como ligeramente descendente (Figura 4a). Este resultado puede ser consecuencia de dos efectos contrapuestos: por un lado, el afinamiento de los agregados perlíticos y, por otro, la distribución más uniforme de grafito en la matriz metálica. En el caso del alargamiento, se observa que un mayor número de esferoides grafíticos tiene un ligero efecto positivo sobre la ductilidad de las aleaciones

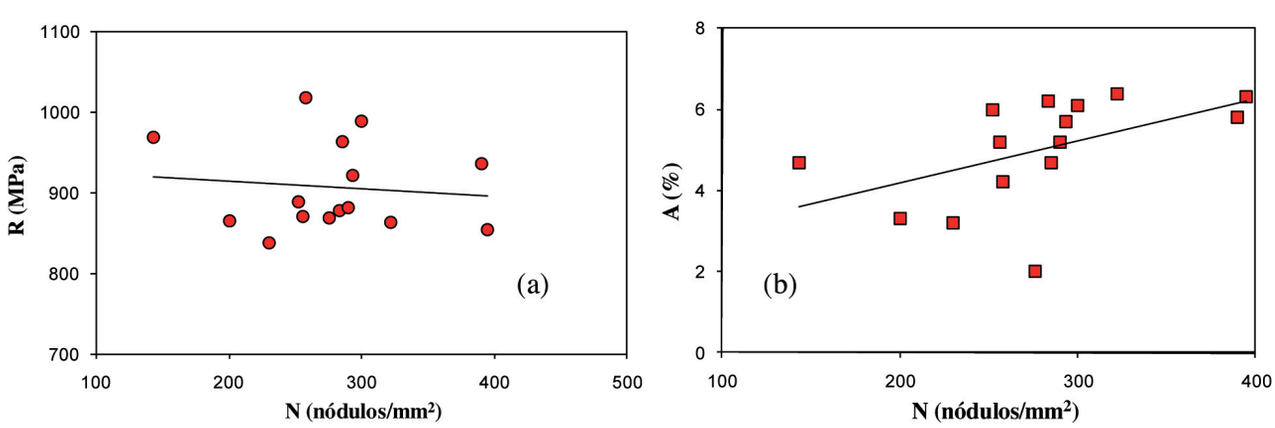


Fig. 4: Efecto del parámetro N sobre la dureza (a) y el alargamiento (b) de materiales perlíticos

perlíticas. La Figura 4b muestra esta evolución en el caso de 15 materiales perlíticos aleados con Mn (0,35-0,40%) y Cu (0,82-1,20%).

Por tanto, el incremento en los valores de los parámetros D, R y L en los materiales optimizados se ha logrado a través de un afinando extra de la perlita, mediante la adición de aquellos elementos químicos que han demostrado ser más activos en este sentido: Cr y Mo (Figura 3a), además del Cu y Mn. La desventaja del Cr es su mayor capacidad para reducir el alargamiento.

Otros elementos como el Sn o el Ni apenas originan mejoras en las propiedades mecánicas, mientras que las adiciones de Nb o Ti han resultado ser perjudiciales. El efecto positivo en las propiedades mecánicas de determinados aceros, observado tras adicionar Nb, no se observa en las fundiciones esferoidales perlíticas fabricadas. En el caso del Ti, concentraciones de este elemento inferiores a 0,20% disminuyen el alargamiento. Por encima de este valor, el Ti degenera la forma esferoidal de los grafitos, obteniéndose importantes reducciones de R y L.

En la Figura 5, se representan los parámetros R y A para todas las fundiciones perlíticas fabricadas en este trabajo (círculos rojos). Con fines comparativos, en esta figura también se incluyen determinadas aleaciones de aluminio y los valores mínimos de ambos parámetros, especificados en diferentes normas, para las fundiciones esferoidales.

Algunos de los materiales perlíticos con propiedades mecánicas optimizadas en estado bruto de colada tienen cargas de rotura que superan los 900 MPa (L>650 MPa) y alargamientos superiores al 4-5%. En determinados casos, se ha logrado superar los 1000 MPa para este parámetro (L>750 MPa) sin bajar de 2,5% de alargamiento en ningún caso.

Por otra parte, la fabricación de cigüeñales con 9,6 y 15,3 kg en una planta de fundición utilizando estos materiales optimizados ha originado valores de R superiores a los 910 MPa y 5-7% de alargamiento en probetas obtenidas directamente a partir de piezas en estado bruto de colada. Además de controlar de manera efectiva la composición química de la aleación, también se ha optimizado el poder de nucleación del metal de colada empleado para fabricar estos cigüeñales.

4. CONCLUSIONES

El estudio y caracterización de nuevos materiales en el campo de la fundición esferoidal es un importante campo de desarrollo con aplicación directa en la fabricación industrial de piezas con altas prestaciones. Este trabajo se centra en el desarrollo de fundiciones perlíticas con propiedades mecánicas mejoradas en estado bruto de colada, destinadas a la fabricación de cigüeñales diseñados para motores de alta potencia. Estas aleaciones pueden ser utilizadas como una alternativa más económica a los materiales requeridos en la actualidad (aceros forjados).

La adición de elementos de aleación específicos constituye una metodología de mejora de propiedades mecánicas en los aceros. Sin embargo, el efecto de estas adiciones en las propiedades observadas para las fundiciones grafíticas esferoidales no es similar, a pesar de las similitudes químicas entre ambos materiales. Por otro lado, se han tenido en cuenta otros factores estructurales como el número de esferoides (N), la distribución de los agregados perlíticos y la distancia interlaminar de la perlita formada (DL). El efecto de estos factores se describe a continuación:

- Partiendo de estructuras matriciales completamente perlíticas, el parámetro N afina los agregados perlíticos y, para una composición química dada, reduce la distancia entre las láminas de perlita. A pesar de ello, los parámetros R, L y D apenas sufren variación debida a cambios en el número de esferoides grafíticos.
- Los elementos perlitizantes más potentes utilizados en este trabajo son: Sb, Sn, Cu, Mo y Cr. Todos ellos

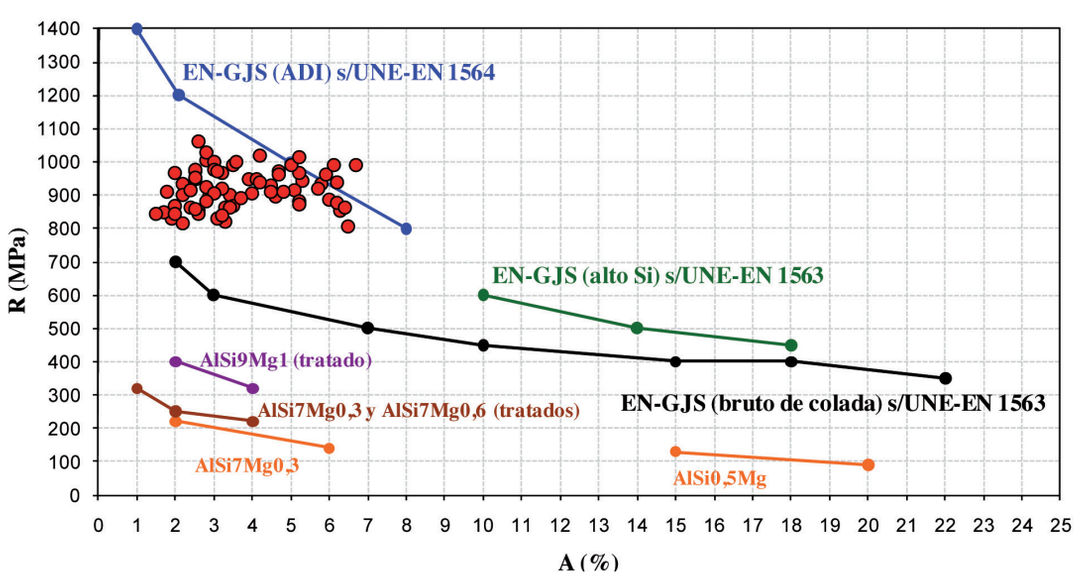


Fig. 5: Comparativa de A y R para las fundiciones perlíticas fabricadas y otras aleaciones comerciales

han originado aumentos en los parámetros R, L y D, acompañados de reducciones en el alargamiento de los materiales. Al aumentar sus contenidos en las aleaciones fabricadas, se obtienen disminuciones en las propiedades mecánicas debidas a la formación de fases carbúricas (Sn, Mo y Cr) o degeneraciones grafíticas (Sb). Únicamente el Cu no ha mostrado este efecto, disminuyendo su efecto positivo sobre R, L y D según aumenta su concentración.

- Los elementos perlitizantes más débiles son el Mn y, en mayor medida, el Ni. A pesar de su bajo poder perlitizante, la aportación de Ni como elemento de aleación no ha reducido el alargamiento del material. El Mn cuenta con la ventaja de ser más barato y está presente en la gran mayoría de las chatarras de acero utilizadas como materia prima en las fundiciones de hierro. De este modo, su utilización es generalizada en las plantas de fundición.
- Otros elementos considerados en el presente trabajo tienen efectos indefinidos sobre las propiedades mecánicas. El Nb es un ejemplo de ello. A pesar de su efecto positivo en los aceros, la adición de Nb a las fundiciones perlíticas resulta complicada (elemento con elevado punto de fusión) y no se han detectado mejoras en las propiedades mecánicas.
- Las diferentes secciones presentes en las piezas fabricadas (distintas velocidades de enfriamiento) también tienen un efecto sobre las propiedades mecánicas obtenidas.

La combinación optimizada de los contenidos de C, Si, Cu, Mn, Mo y Cr ha permitido fabricar fundiciones esferoidales de matriz totalmente perlítica, con propiedades mecánicas y estructurales destacables en estado bruto de colada. En una etapa posterior, se han fabricado dos tipos de cigüeñales en una planta de fundición con resultados satisfactorios respecto a los parámetros R, L y D (R>910 MPa) e incluso con alargamientos más elevados que en las cuñas estándar fabricadas en condiciones de laboratorio (4-7%). En este caso, se trata de probetas obtenidas directamente sobre los cigüeñales (condición menos ventajosa desde el punto de vista de los requerimientos mecánicos) lo que refuerza aún más la representatividad de los resultados obtenidos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren mostrar su gran agradecimiento a Joaquín Mérida, ex-Director Técnico del Grupo INFUN, por su inestimable colaboración en la realización de todo el trabajo experimental y su posterior interpretación. Sus conocimientos y su gran valor personal ha sido parte esencial para tener éxito en los objetivos planteados. Este trabajo se ofrece en su memoria.

Se agradece igualmente al Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) el apoyo financiero recibido (ref. IDI 20071064).

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/ [28-dic-2012]
[2] Kovacs BV. Pearlite stabilization in cast irons, AFS Trans., 1980, Vol. 89, p. 79-96.
[3] Pan EN, Lou MS, Loper CR. Effects of copper, tin, and manganese on the eutectoid transformation of graphitic cast irons, AFS Trans., 1987, Vol. 95, p. 819-840
[4] Sertucha J, Suarez R, Izaga J, et al. Prediction of solid state structure based on eutectic and eutectoid transformation parameters in spheroidal graphite irons, Int. J. Cast Met. Res., 2006, Vol. 16, p. 315-322. http://dx.doi.org/10.1179/136404606X167114
[5] Levin T, Rosenthal PC, Loper CR, et al. Tin and copper in ductile iron, AFS Trans., 1971, Vol. 79, p. 493-514.
[6] Kanno T, Kikuchi T, Kang I, et al. Effect of alloying elements on the eutectic temperatures in cast iron, AFS Trans., 2005, paper 05-203.
[7] Cho GS, Choe KH, Lee KV, et al. Effects of alloying elements on the microstructures and mechanical properties of heavy section ductile cast iron, J. Mater. Sci. Tech., 2007, Vol. 23, p. 97-101.
[8] Hsu GH, Chen ML, Hu CJ. Microstructure and mechanical properties of 4% cobalt and nickel alloyed ductile irons, Mater. Sci. Eng. A, 2007, Vol. A444, p. 339-346. http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.027
[9] Riposan I, Chisamera M, Stan S. Factors influencing microstructure and mechanical properties of as-cast and heat treated 400-18 grade ductile cast iron, Int. J. Cast Met. Res., 2007, Vol. 20, p. 64-67. http://dx.doi.org/10.1179/136404607X239717
[10] Nobuki T, Hatate M, Shiota M. Mechanical characteristics of spheroidal graphite cast irons containing Ni and Mn with mixed ferrite and bainitic ferrite microstructure, Int. J. Cast Met. Res., 2008, Vol. 21, p. 31-38. http://dx.doi.org/10.1179/136404608X361620
[11] Sertucha J, Larrañaga P, Lacaze J, et al. Experimental investigation on the effect of copper upon eutectoid transformation of as-cast and austenitized spheroidal graphite cast iron, Int. J. Metalcast., 2010, Vol. Winter 10, p. 51-58.
[12] Sertucha J, Lacaze J, Serrallach J, et al. Effect of alloying on mechanical properties of as cast ferritic nodular cast irons, Mat. Sci. Technol., 2012, Vol. 28, p. 184-191. http://dx.doi.org/10.1179/1743284711Y.0000000014
[13] Lacaze J, Larrañaga P, Asenjo I, et al. Influence of 1 wt-% addition of Ni on structural and mechanical properties of ferritic ductile irons, Mat. Sci. Technol., 2012, Vol. 28, p. 603-608. http://dx.doi.org/10.1179/1743284711Y.0000000100
[14] Serrallach J, Lacaze J, Sertucha J, et al. Effect of selected alloying elements on mechanical properties of pearlitic nodular cast irons, Key Eng. Mat., 2011, Vol. 457, p. 361-366. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.457.361
[15] Lacaze J, Sertucha J, Larrañaga P, et al. Combined effects of copper and tin at intermediate level of manganese on the structure and properties of as-cast spheroidal graphite cast iron, World Foundry Congress, 2012, paper 02-25-16-02.