

Dependencia de las propiedades mecánicas y de la composición química en la fundición de grafito esferoidal*

R. Gonzaga-Cinco** y J. Fernández-Carrasquilla**

Resumen

Con este trabajo se pretende estudiar la composición química de cuatro escaleras de fundición dúctil para determinar la influencia de los diferentes elementos de aleación sobre la microestructura y las propiedades mecánicas. Las cuatro escaleras tienen las mismas dimensiones de 200 x 100 x 50 (mm). Para determinar cada una de las propiedades de las cuatro fundiciones, hemos considerado que las mismas han tenido diferente velocidad de enfriamiento, de lo que se deriva, que el tamaño de grano varía para cada uno de los casos. En este trabajo, se ha realizado un estudio de las diferentes microestructuras de las escaleras. Se ha considerado el análisis de la influencia del grosor sobre la dureza de cada probeta. No se ha empleado ningún tratamiento térmico. Se ha determinado la resistencia a la tracción y límite elástico. Se han realizado ensayos de Charpy y de mecánica de la fractura.

Palabras clave

Composición química. Microestructura. Resistencia. Sustitución de los tratamientos. Resistencia a la tracción. Límite elástico. Dureza Rockwell y Brinell.

Mechanical properties dependency on chemical composition of spheroidal graphite cast iron

Abstract

With this work, we try to study the chemical composition of four specimens in form of stair of ductile cast iron to determine the influence of the chemical composition of different alloying elements on microstructure and on mechanical properties. The dimensions of each specimens are 200 x 100 x 50 mm. Cooling rate has been considered to be different for each one of the four stairs when determining the mechanical properties, therefore, grain size varies in each case. In this analysis, the different microstructures of the stairs have been considered. Influence of the thickness on hardness of each specimen has been taken into account. Heat treatments are not used. Yield and tensile strength are determined. Charpy tests have been done. Rockwell and Brinell hardness are determined.

Key words

Chemical composition. Microstructure. Strength. Heat treatment replacement. Tensile strength. Yield strength. Charpy test. Rockwell and Brinell hardness.

1. INTRODUCCIÓN

Es importante tener en cuenta las mejoras en las propiedades mecánicas de las fundiciones dúctiles y el conjunto de los elementos de aleación de que depen-

den dichas propiedades mecánicas. Cada elemento de aleación confiere propiedades mecánicas diferentes a la fundición de grafito esferoidal, por ejemplo:

El contenido de CE comúnmente empleado oscila entre 3,5 y 3,9%. Por encima de este nivel y con

* Trabajo recibido el día 4 de mayo de 2005 y aceptado en su forma final el día 11 de octubre de 2005.

** Dpto. de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadía, s/n, 31006 Pamplona, Navarra, España.

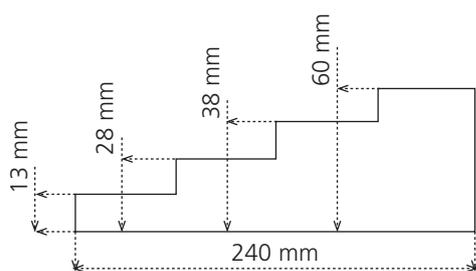


Figura 1. Fundición dúctil.

Figure 1. Ductile cast iron.

pequeña velocidad de enfriamiento puede provocar la flotación y degeneración de grafito.

El contenido de silicio, en este tipo de fundición, oscila entre 1,8 y 2,8%. Su bajo contenido influye en la formación de carburos. El silicio también influye en el incremento del número de nódulos, disminuyendo el tamaño eutéctico de celda. Su exceso influye sobre la temperatura de transición de impacto, disminuyendo las propiedades al impacto.

El azufre actúa como desulfurante de la fundición, combinándose con el magnesio para formar sulfato. Las fundiciones dúctiles de alta calidad contienen 0,02% S. Con 0,008-0,01% azufre se obtiene buena nodularidad y 0,018% magnesio residual. El bajo contenido de azufre tiene poca importancia en la esferoidización y número de nódulos.

El contenido de manganeso en las fundiciones oscila entre 0,50 y 0,70%, aumentando la dureza y resistencia de la ferrita y estabilizando y refinando la perlita. También, aumenta la resistencia a la tracción y el límite elástico.

La segregación de fósforo ocurre durante la solidificación. Aumenta la dureza y el coeficiente de resistencia a la tracción y de límite elástico. Estabiliza y refina la perlita.

El magnesio, a niveles de 0,02-0,08%, produce la esferoidización total de la fundición, dependiendo del contenido de azufre. El magnesio actúa como desoxidante y desulfurante, alterando la forma de grafito. Promueve la formación de carburo eutéctico.

En las fundiciones dúctiles, el contenido de aluminio tolerado es de 0,05%. Se emplea como desoxidante y se presenta como FeSi y MgFeSi. El aluminio promueve la formación de grafito vermicular. La formación de huecos se debe a la presencia de aluminio y es por eso que su uso es limitado.

El cobre promueve la formación de perlita y de grafito. Se emplea para desarrollar microestructuras perlíticas. Además, es fuerte formador de perlita, a 0,03% Cu. Estabiliza la austenita y en las fundiciones austeníticas sustituye al níquel.

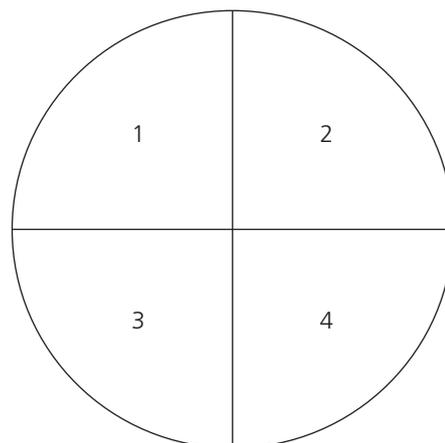


Figura 2. Muestra de estudio metalográfico.

Figure 2. Specimen for image analysis.

El cromo es formador de carburo y promueve perlita en las fundiciones dúctiles. En la fundición ferrítica se admite hasta 0,04% cromo y, en la fundición perlítica, se admite hasta 0,01% cromo, pero depende del número de nódulo y del tiempo de solidificación.

El contenido de níquel por debajo de 0,5-36% produce el endurecimiento de la solución sólida de la fase de la ferrita. La dureza Brinell de ferrita aumenta, aproximadamente, 15 HB unidades por cada 1% de níquel, aumentando el límite elástico, aproximadamente, 40 MPa por unidad de níquel añadido.

El molibdeno, en dependencia de la base química de la fundición y del tamaño de la misma, ligeramente, promueve ferrita o perlita. Para microestructura libre de perlita se emplea hasta 1% Mo y hasta 2% Mo, para el aumento de resistencia a alta temperatura, tensión de fractura y resistencia a la fatiga térmica.

Cuando el contenido de nitrógeno excede el límite de 0,008-0,009%, donde la segregación ha alcanzado la concentración de nitrógeno, cerca del centro termal, se puede predeterminar el estado de porosidad de la fundición.

2. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN SOBRE LA MICROESTRUCTURA DE LA MATRIZ Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ESCALERAS DE FUNDICIÓN DÚCTIL

La influencia de los elementos de aleación sobre las propiedades mecánicas y microestructura de la matriz ha sido de gran interés de estudio para muchos investigadores^[1], hasta convertirse en casi una tradición, debido a las características y propiedades de la misma fundición de grafito esferoidal.

Tabla I. Resultados del análisis químico de las escaleras de fundición dúctil.

Table I. Results of the chemical analysis of the stairs. Ductile cast iron.

Fundiciones	CE	C%	S%	Si%	Mn%	P%	Mg%	Al%	Cu%	Cr%	Ni%	Mo%	N%
1	3,6	2,73	0,023	2,64	0,28	0,021	0,05	0,034	0,057	0,042	0,043	0,001	0,0075
2	3,9	3,21	0,023	2,28	0,32	0,021	0,04	0,014	0,014	0,038	0,026	0,001	0,0102
3	4,1	3,30	0,009	2,50	0,47	0,019	0,067	0,017	0,046	0,044	0,047	0,001	0,0073
4	3,3	2,61	0,019	2,04	0,11	0,019	0,046	0,011	0,031	0,044	0,025	0,001	0,0075

En la figura 1, se muestra un prototipo de las fundiciones. Todas tenían la misma forma y dimensiones, como se ve en la figura.

La muestra extraída de cada peldaño se dividió en cuatro campos de medida, figura 2. Cada muestra tenía unas dimensiones de 10 x 10 x 5 (mm) para su mecanizado y llevar a cabo el proceso tanto de empastillado como de pulido.

Los conceptos de Hafiz, nos han llevado a reafirmar que la variación de un simple elemento de aleación no puede transferir todas las propiedades deseadas a la fundición. Se sabe que el cromo, como elemento de aleación, transfiere las propiedades de resistencia al desgaste y de dureza; pero éste elemento, por sí sólo, no puede aportar tales propiedades a la fundición, al menos que esté aleado con otros elementos que promuevan su propiedad^[2].

En lo que respecta al níquel como elemento de aleación en las fundiciones dúctiles, se agrega con un contenido del 0,5 al 36%. El níquel es soluble, en la fundición dúctil, a todos los niveles de energía pero, es prudente, antes de decidir en que proporción es necesario añadirlo, determinar la finalidad de la fundición^[3]. Si se quiere conseguir mejorar las propiedades de dureza, es recomendable que el contenido de níquel sea de 0,5 a 4%, evitando así la transformación de perlita y, si se trata de estabilizar la austenita, entonces, el contenido de níquel debe ser del 18 al 36%. El contenido de silicio debe ser muy pequeño para obtener alta resistencia de la ferrita. A temperatura baja el contenido de níquel oscila entre el 1 y 2%.

El manganeso, en las fundiciones de grafito esferoidal, se emplea en proporciones de 0,50-0,70%. La influencia del manganeso sobre la matriz es evidente, inclusive en proporciones muy pequeñas^[4]. El manganeso influye sobre la dureza y resistencia de la ferrita. Además, estabiliza y refina la perlita. El exceso de manganeso de 0,70%, dependerá del número de nódulo y de otros elementos de aleación presentes en la fundición y con ello la estructura de carburo puede ser anticipada^[5].

Con este breve desglose de algunos elementos de aleación sólo se quiere hacer patente la impor-

tancia de los mismos en la obtención de nuevas microestructuras y en sus propiedades mecánicas.

3. RESULTADOS. MICROESTRUCTURA DE LAS MATRICES

Para llevar a cabo el análisis químico fue necesario extraer una muestra de cada fundición. Las cuatro fundiciones fueron diseñadas en forma de escalera, teniendo en cuenta sus dimensiones (Figs. 1 y 2). Es de suponer, que la velocidad de enfriamiento ha sido diferente para cada uno de las fundiciones empleadas en dicha investigación.

Las micrografías a, b, c y d de la figura 3 han sido obtenidas como resultado del proceso del estudio metalográfico. En todas las micrografías de las cuatro fundiciones se observa que existe una homogeneidad en la matriz. En ella, se puede apreciar como influye el espesor de la pieza en el tamaño del grano.

En este trabajo, se aprecia que el cobre en combinación con el carbono promueve ferrita, pero ello depende de la adición del contenido de cada elemento. El silicio y el carbono promueven la formación de nódulos. A su vez, también se aprecia que el magnesio en combinación con el silicio, influye en la nodularidad. Se observa que, el cromo promueve la formación de perlita, pero su efecto depende del número de nódulo, lo que quiere decir que, la acción del cromo en la fundición de grafito esferoidal depende del contenido de estos dos últimos elementos que son el carbono y silicio (Tabla I).

Los elementos que influyen en la dureza, resistencia y corrosión (níquel, cobre, molibdeno y aluminio) deben ser tratados con mucho cuidado porque también pueden influir seriamente en la estructura de la matriz^[6].

De los resultados del análisis químico de las cuatro fundiciones se puede decir que, la adición de cada uno de los elementos de aleación ha sido estrictamente controlada para garantizar que cada una de las matrices de las fundiciones obtenga la microestructura (Fig. 4) y propiedades mecánicas deseadas.

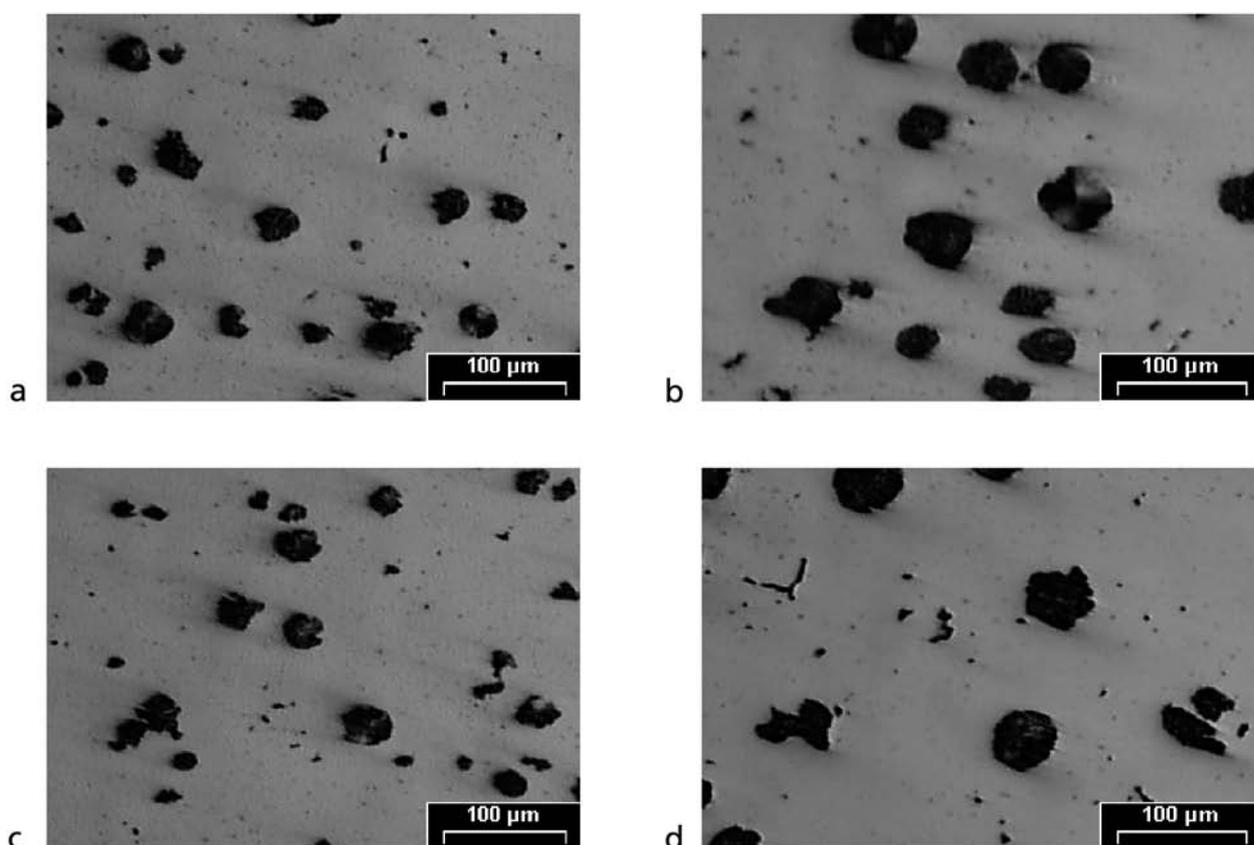


Figura 3. Muestras sin atacar de las fundiciones. 100X.

Figure 3. Specimens without etching of the casts. 100X.

Con la simple relación de los resultados obtenidos en cada fundición (Tabla I), se puede asegurar que la fundición 1 presenta una matriz completamente ferrítica. Ello se debe a la variación en la composición química de cada elemento de aleación.

La composición química de la fundición 2 difiere en el contenido de los elementos de aleación. En ella, se observa un incremento en la composición química de los elementos anteriormente mencionados, lo que tiene la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas y ver la posible variación de la microestructura de la matriz en dicha fundición.

Con base en las propiedades que confiere cada uno de los elementos de aleación, se puede anticipar que la microestructura de la matriz de la fundición 2 es ferrito-perlítica 60/40%. Para determinar el tipo de microestructura que presenta la matriz, es necesario atacar con nital al 2% la superficie de la matriz. Para la obtención de diferentes microestructuras, existen tratamientos térmicos especiales, a los cuales, tan sólo se hace referencia, porque parte de este trabajo es evitar estos tipos de tratamientos por el costo que ello representa.

Los resultados del análisis químico (Tabla I) correspondientes a la fundición 3 son diferentes. Con esta variación de la composición química, se persigue obtener una matriz completamente perlítica. Si se hace un recuento de las propiedades de los elementos de aleación y del contenido de cada elemento, se puede anticipar que la matriz es completamente perlítica y que es de esperarse variación en las propiedades mecánicas. Estas consideraciones se someterán a diversos análisis para comprobar lo afirmado.

La composición química se corresponde (Tabla I) con la fundición 4. Si se sigue la consideración teórica de balance de cada uno de los elementos de aleación estudiada por muchos investigadores, se puede afirmar que se está en presencia de una nueva matriz ferrito-perlítica 30/70% y, por supuesto, con nuevas y mejores propiedades mecánicas. Las matrices obtenidas de acuerdo a la variación en la composición química y contenido de cada elemento de aleación se comprueban, de forma habitual, a través de los ataques superficiales con nital y a través de diferentes métodos mecánicos conocidos.

Como ya se había dicho anteriormente que un

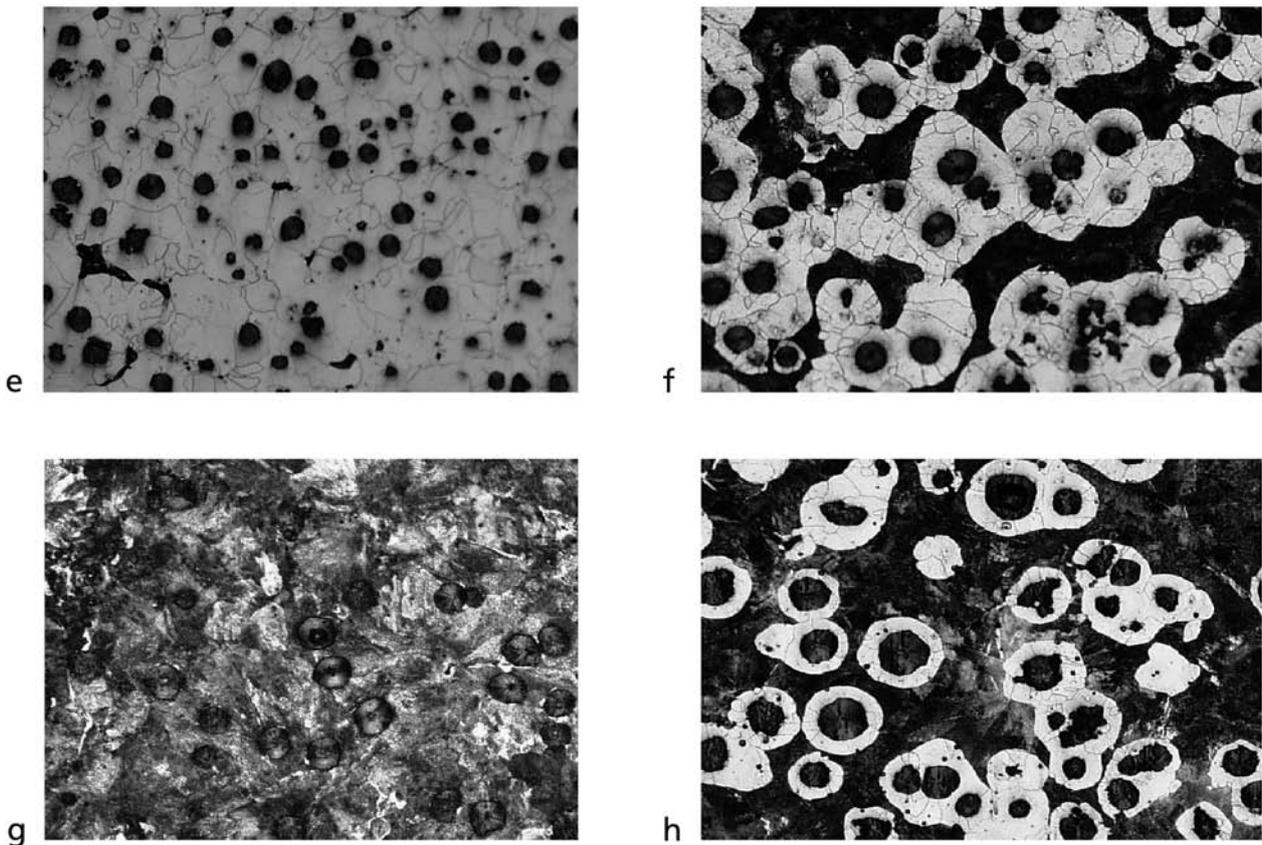


Figura 4. e) Atacada con nital al 2%. 100x. Matriz ferrítica, f) Atacada con nital al 2%. 100x. Matriz ferrito-perlítica 60/40%, g) Atacada con nital al 2%. 100x. Matriz perlítica, h) Atacada con nital al 2%. 100x. Matriz ferrito-perlítica 30/70%.

Figure 4. e) Etched specimen at 2% with nital. Shows a ferritic matrix. 100x, f) Etched specimen at 2% with nital. Shows a ferritic-pearlitic matrix with 60/40%. 100x, g) Etched specimen at 2% with nital. Shows a full pearlitic matrix. 100x, h) Etched specimen at 2% with nital. Shows a ferritic-pearlitic matrix with 30/70%.

elemento por sí mismo no puede transferir sus propiedades si no actúa en combinación con otro, de igual manera, la eficacia en la obtención de mejores propiedades mecánicas en la fundición depende del conjunto de adición de los mismos. La influencia de los elementos en el crecimiento y nodularidad del grafito se comprueba a través del análisis de imagen con ayuda de microscopios sofisticados, capaces de medir parámetros diversos del grano.

Existen tablas estandarizadas de fundición para la comprobación y rangos de matrices^[7], que vienen avaladas por Metalurgia de las Fundiciones de Hierro y ASTM, las cuales contienen exigencias internacionales para la producción de fundiciones de grafito esferoidal.

La micrografía (Fig. 4e) muestra una matriz completamente ferrítica como resultado del ataque hecho. La microfotografía pertenece a la fundición 1. y, como se había dicho anteriormente, el ataque con nital se lleva a cabo para determinar la estructura de la matriz.

Según recientes estudios^[8], para conseguir tal estructura, es necesario aplicar a la fundición el tratamiento térmico de recocido supercrítico que puede ser de 910 °C durante 2 h, con posterior enfriamiento en horno. En este trabajo se prescinde de dicho tratamiento para optimizar el tiempo, con el consiguiente ahorro económico. Tal tipo de matriz presenta una dureza de 90 HB, aunque dicha característica se ve afectada por los componentes de la aleación^[9], por lo que también se pueden obtener fundiciones que superan los 180 HB. También, se puede conseguir una resistencia de 280 N/mm, con alargamiento de 35-40%.

El resultado de la muestra después del ataque (Fig. 4f) pertenece a la fundición 2. En ella, se aprecia que la matriz es ferrito-perlítica.

La matriz presenta 60/40% de ferrita y de perlita. La consideración del porcentaje de contenido de ferrita y de perlita ha sido hecha a partir de las tablas de comparación de fundición dúctil sobre la clasificación normalizada de las fundiciones de hie-

Tabla II. Resultados de cargas y tensiones.*Table II. Results of loads and strengths.*

Fundiciones	$P_{\text{máx}}$ kN	P_Q kN	$K_Q = K_{1c}$ MPa · \sqrt{m}	σ_t MPa	σ_y MPa
FF-1	7,87	7,45	49,00	548,37	379,00
FFP-2	7,00	6,70	43,70	479,77	305,00
FP-3	5,90	5,90	38,47	804,61	416,00
FFP-4	7,90	7,52	49,04	710,27	372,00

FF-1: Fundición ferrítica, FFP-2: Fundición ferrito-perlítica, FP-3: Fundición perlítica, FFP-4: Fundición ferrito-perlítica.

ro con grafito esférico. Para la obtención de dicha matriz, comúnmente, la fundición se somete a un tratamiento térmico de normalizado a 850 °C durante 1 h, con posterior enfriamiento al aire^[10].

La finalidad de éste tratamiento es, principalmente, la obtención de perlita en la estructura, sin alterar la composición química. La aparición de perlita, es de suponer que se debe al contenido de cobre y a la propiedad mecánica que ella posee de aumentar la dureza de la matriz y mejorar las propiedades mecánicas de la misma. La velocidad con que enfría la pieza juega un papel preponderante en la aparición de la perlita. Dicho tratamiento térmico no ha sido necesario.

La muestra g, corresponde a la fundición 3, después del ataque con nital al 2%. En la muestra (Fig. 4g), después del ataque con nital, se observa claramente que la composición de la microestructura de la matriz es completamente perlítica. Para la obtención de esta matriz, habitualmente, se realiza un tratamiento térmico de normalizado a 850 °C durante 1 h. En el proceso de obtención de este tipo de matriz, puesto que es una fundición aleada con un porcentaje determinado de cobre, la velocidad de enfriamiento también juega un papel muy importante y, tan sólo, basta el enfriamiento al aire para obtener la perlitización total de la matriz. Es de suponer, que las propiedades mecánicas que presenta esta matriz son superiores a las dos primeras. Dicho tratamiento tampoco ha sido aplicado.

La matriz perteneciente a la fundición 4 es ferrito-perlítica (Fig. 4h). Según comparación con la tabla de especificaciones de matrices de fundiciones de grafito esférico, ésta matriz tiene 30/70% de ferrita y de perlita. Según otros estudios, para la obtención de esta matriz, también es necesario aplicar el tratamiento térmico de normalizado a 850 °C durante 1 h, con posterior enfriamiento al aire. La aparición importante de perlita en la matriz le confiere propiedades mecánicas superiores de dureza, resistencia y fragilidad. En todas las muestras sin atacar se observa la distribu-

ción de grafito y se aprecia que la matriz, en todas las fundiciones, es homogénea.

Como se ha planteado, de cara a la sustitución de los tratamientos térmicos, es evidente que con el balance adecuado de los elementos de aleación se pueden predecir las microestructuras de matrices, y las propiedades mecánicas de las fundiciones^[11].

Para reafirmar la teoría de mejoras de propiedades mecánicas y de la obtención de matrices iguales o mejores sin el uso de los tratamientos térmicos, es necesario realizar el ensayo de dureza correspondiente. En los siguientes apartados se estudiarán algunos resultados de durezas, tanto de Rockwell como Brinell.

4. ENSAYOS DE TENACIDAD A LA FRACTURA

Habitualmente, la obtención de resultados de dureza y microdureza se realiza utilizando máquinas de diferentes radios^[12]. Muchos investigadores coinciden en que las propiedades mecánicas de una fundición no sólo dependen de la velocidad de enfriamiento sino también de las dimensiones de la pieza y del tipo de tratamiento térmico. En éste caso, también dependerá de la composición química y del contenido de cada elemento de aleación. Tanto J. Fernández-Carrasquilla^[13] como F. Condet, enfatizan en la importancia de la influencia de dichos factores en la fundición de grafito esférico^[14].

Seguidamente, puede apreciarse claramente la influencia del balance de los elementos de aleación en las propiedades mecánicas, de tenacidad a la fractura, energía absorbida y resiliencia.

La geometría seleccionada de las probetas fue la de flexión en tres puntos con una entalla. Las probetas empleadas en este ensayo fueron preagrietadas por fatiga.

En el ensayo de tenacidad a la fractura se puede apreciar el comportamiento de la curva carga-desplazamiento para la determinación de la tenacidad a

la fractura de la fundición 1, que presenta una microestructura completamente ferrítica. La gráfica muestra cierto grado de ductilidad de esta fundición respecto a las otras (Fig. 5).

La zona de deformación plástica que experimenta este material es más pronunciada que en los otros pero su deformación es pequeña en comparación a las dimensiones de dicha probeta. Por tanto, y según normas establecidas, en dicho ensayo la determinación del factor de tenacidad a la fractura (K_{IC}) es válido.

El análisis de deformación plástica que ocurre durante el ensayo, debido a la formación de grieta se puede determinar utilizando la expresión matemática también conocida como criterio de Irwin^[15]:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (1)$$

En la superficie de fractura o grieta siempre ocurre la deformación plástica y mientras más grande sea la zona de deformación plástica, aumenta el riesgo de equivocación en el cálculo de tenacidad a la fractura, tomando como criterio la fuerza ejercida. El radio, r , que se determina en la formula 1, es el radio medio de la zona de deformación plástica; es el límite elástico del material^[16].

También, se muestra el comportamiento de la curva carga-desplazamiento de una fundición que presenta una microestructura ferrito-perlítica 60/40%, que pertenece a la fundición 2 (Fig. 5). Se aprecia que la zona plástica es menor que la del ensayo anterior, lo que tiene que ver con la microestructura de la matriz. No obstante, también Wells hizo un análisis para determinar el crecimiento de la grieta, partiendo de consideraciones físicas, matemáticas y geométricas del material a ensayar^[17].

$$\delta_c = \frac{v_c}{1 + r \frac{a+z}{W-a}} \quad (2)$$

También, se aprecia la curva de carga-desplazamiento que pertenece a la fundición 3, tal como se ha analizado en los dos casos anteriores. La microestructura de la matriz que presenta esta fundición, según estudios realizados, es completamente perlítica. La dureza que caracteriza a esta matriz es mayor que las dos anteriores. La curva que se observa, muestra que la zona plástica es aún menor que la que se obtiene tanto en la fundición ferrítica como en la ferrito-perlítica 1 y 2, respectivamente.

El parámetro z , de la ecuación 2 es el grosor del

Tabla III. Resultado de la prueba al impacto Charpy.

Table III. Results of the Charpy impact test.

Fundiciones	Energía absorbida (Joule)	Resiliencia Kg-f/cm ²
FF-1	6,50	8,13
FFP-2	12,18	15,90
FP-3	2,87	3,60
FFP-4	3,76	4,70

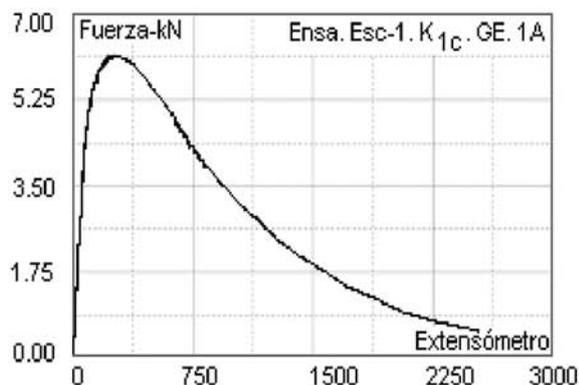
filo de la cuchilla; δ_c es el crecimiento de la crieta; v_c es el valor de estricción tomado; a , W son parámetros geométricos de la muestra, longitud de fisura tras la fractura y ancho de la muestra, respectivamente; r es el coeficiente de rotación que viene definido por $r \approx 1/3$; la determinación del K_{IC} en las tres gráficas es válido ya que cumple con las normas establecidas tanto por la British Standards (normas Inglesas) como por la norma de ASTM-399. Se puede decir que el comportamiento de la curva carga-desplazamiento está relacionado con el micromecanismo de fractura y la distancia entre los nódulos de grafito que se encuentran en la matriz.

La curva carga-desplazamiento que se ofrece, perteneciente a la fundición 4 (Fig. 5), presenta una microestructura de matriz ferrito-perlítica 30/70%. Esta matriz, por presentar mayor contenido de perlita que la matriz de la fundición 2 es de mayor dureza, pero es menor que la de la fundición 3. La zona de deformación plástica que se aprecia en las curvas de ensayo de tenacidad realizado a las fundiciones 1 y 2 es mayor que la deformación que se aprecia en el ensayo realizado a la fundición 4, respectivamente, pero, a su vez, ambas deformaciones son menores que la deformación que se aprecia en la fundición 3. Las características mecánicas que estas fundiciones presentan están relacionadas con el contenido de los elementos de aleación de las mismas.

Las gráficas de tenacidad a la fractura obtenidas de las cuatro escaleras son coherentes con las características de la matriz que cada una de ellas presenta.

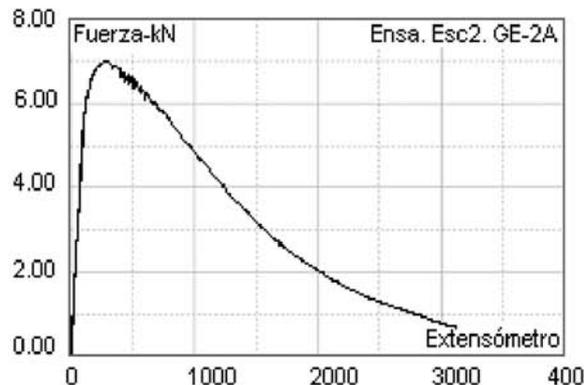
El estudio de análisis de imagen realizado en este trabajo de investigación confirma que la distancia entre nódulos, es directamente proporcional al crecimiento de grieta^[18].

Holdsworth y Jolley^[19] hacen referencia respecto al grado de influencia que tiene la distancia entre nódulos sobre el límite elástico y las propiedades plástico lineales en la fundición ferrítica. En las tablas se puede apreciar el valor de K_{IC} obtenido en cada una de las fundiciones estudiadas. Además, se puede considerar que la diferencia entre los valores de tenacidad de fractura obtenidos, tiene que ver con la mejo-



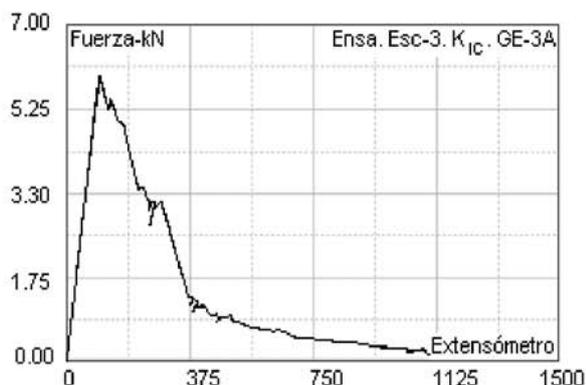
Curva carga-desplazamiento de ensayo de K_{IC} .
Fundición 1

Load-displacement behaviour in a K_{IC} test



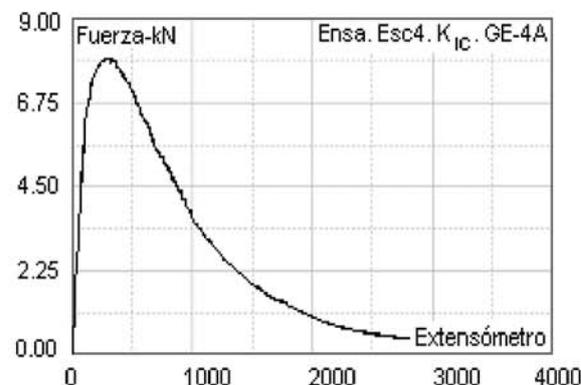
Curva carga-desplazamiento de ensayo de K_{IC} .
Fundición 2

Load-displacement behaviour in a K_{IC} test



Curva carga-desplazamiento de ensayo de K_{IC} .
Fundición 3

Load-displacement behaviour in a K_{IC} test



Curva carga-desplazamiento de ensayo de K_{IC} .
Fundición 4

Load-displacement behaviour in a K_{IC} test

Figura 5. Curva carga-desplazamiento del ensayo de K_{IC} .

Figure 5. Load-displacement behaviour in a K_{IC} test.

ra de la forma del grafito en las fundiciones y, por supuesto, con la composición química. Con el incremento de contenido de manganeso aumenta la tenacidad a la fractura pero, también aumenta la plasticidad de la matriz. Para la determinación del K_{IC} se ha estimado que $K_Q = K_{IC}$, puesto que se cumplen las condiciones exigidas por ASTM 399.

Anteriormente, se había hablado de la influencia de la distancia entre átomos de grafito y el crecimiento de grieta. En la antigua Unión Soviética se llevaron a cabo muchos experimentos para comprobar el comportamiento de grieta respecto a dicha distancia. Está claro que el material rompe cuando es sometido a tensión y trabajo a nivel atómico para romper los lazos que mantienen los átomos unidos.

La energía de superficie se puede calcular por la fórmula:

$$\gamma_s = \frac{1}{2} \int_0^\lambda \sigma_c \sin\left(\frac{x}{\lambda}\right) dx \quad (3)$$

Los ensayos de resistencia al impacto de Charpy, de los materiales estudiados, se han realizado con el fin de determinar la resiliencia del material y la energía absorbida durante el impacto.

Los resultados se ofrecen en la tabla II y, según estudios realizados por otros autores, puede decirse que en los mismos han influido los elementos de aleación, el tamaño y forma del grafito. Además, con el aumento de las tensiones se ha demostrado que aumenta la resonancia de los materiales estudiados y la velocidad de ultrasonido y se ha comprobado que la resistencia a la tracción y el límite

elástico están relacionados con la microestructura de la matriz.

Los resultados de tenacidad a la fractura y resistencia a la tracción que se ofrecen (tabla II), pertenecen a cuatro fundiciones con diferentes matrices: FF-1 (fundición ferrítica), FFP-2 (fundición ferrito-perlítica), FP-3 (fundición perlítica) y FFP-4 (fundición ferrito-perlítica).

Los resultados obtenidos en FP-3, pertenecen a una fundición con una microestructura de la matriz completamente perlítica. Los resultados de resistencia obtenidos de esta fundición son mayores que los obtenidos en FF-1. En la fundición de matriz perlítica sobresale el contenido de cobre que es superior al contenido que presenta el resto de fundiciones estudiadas en este trabajo.

El contenido de cobre es la razón de la obtención de dicha matriz y de la dureza de la misma. Además de otros elementos conocidos que influyen sobre el aumento de la resistencia y tenacidad a la fractura, cabe señalar que la forma de grafito ciertamente influye en el incremento de valor de tenacidad a la fractura K_{IC} .

Un método muy apropiado para predecir las propiedades mecánicas de la fundición de grafito esferoidal, es a través de la resonancia^[20].

$$\omega_0 = \frac{V}{\lambda} \quad (4)$$

siendo, la frecuencia de resonancia y la amplitud de onda. Este tipo de ensayo lo llevaron a cabo Kovacs y Cole aplicando una fuerza, repetidamente, al cuerpo a ensayar. Al alcanzar la frecuencia del sistema, la amplitud de vibración aumenta y el sistema indica la resonancia.

Los ensayos de resistencia al impacto Charpy se realizaron a temperatura ambiente para determinar la energía absorbida y la resiliencia del material y comportamiento del mismo.

La resiliencia se determina:

$$a_r = \frac{A}{F} \quad (5)$$

siendo, la energía consumida en la destrucción de la probeta y es la sección transversal de la misma tomando como referencia la zona de rotura.

Se ha estudiado que mientras mayor es el valor de resiliencia, más se resiste el material al impacto, haciéndose más dúctil. El valor de resiliencia es directamente proporcional a la temperatura. El valor de resiliencia depende de la temperatura a que se realiza el ensayo^[21].

En la tabla III, se ofrecen los valores de energía absorbida y de resiliencia obtenidos experimentalmente en este trabajo. Los ensayos de impacto Charpy sirven para medir la temperatura de transición de las fundiciones. Cuando la velocidad de la carga pasa de una aplicación en flexión lenta a impacto, se produce un cambio de más de 50 K en la temperatura de transición dúctil-frágil de la fundición dúctil^[22].

En los valores de energía absorbida obtenidos durante el ensayo de impacto Charpy realizado a diferentes fundiciones, se aprecia una diferencia importante (Tabla III) en los valores obtenidos. Es de suponer que el alto contenido de silicio en FP-1, con respecto de al resto, es la causa de que el valor de energía absorbida sea menor. Esto, también se atribuye al contenido de fósforo. Las propiedades de impacto en las fundiciones ferríticas son afectadas por la nodularidad y los números de nódulos presentes en la matriz.

Los resultados de impacto Charpy realizados a una fundición que presenta una microestructura de matriz completamente perlítica, representada por FP-3, se muestran en la tabla III.

Los valores de energía absorbida son coherentes con los valores de contenido de perlita. El incremento de contenido de perlita conlleva que los valores de energía al impacto disminuyan. Los valores de energía absorbida y de resiliencia obtenidos, (Tabla III), están designados por FFP-2 y FFP-4, presentando ambas fundiciones una microestructura de la matriz ferrito-perlítica. Los resultados están relacionados con la composición química que presenta cada una de ellas.

El valor de energía al impacto se puede atribuir al contenido de perlita presente en FFP-4; por tanto, en la fundición FFP-2, a pesar de tener una matriz semejante, el valor de resiliencia ofrecido es mayor (Tabla III), siendo esta fundición, por tanto, más dúctil y más resistente al impacto que FFP-4.

El balance adecuado de los elementos de aleación ha permitido obtener resultados que pueden ser comparados con los exigidos por ASTM y British Standards (Normas Inglesas).

En este trabajo sólo se muestran los resultados realizados a temperatura ambiente de 25 °C de las fundiciones estudiadas.

5. ENSAYOS DE DUREZAS ROCKWELL Y BRINELL

Los valores de dureza Rockwell y Brinell obtenidos (Tablas IV, V) están relacionados con la matriz y el contenido de los elementos de aleación.

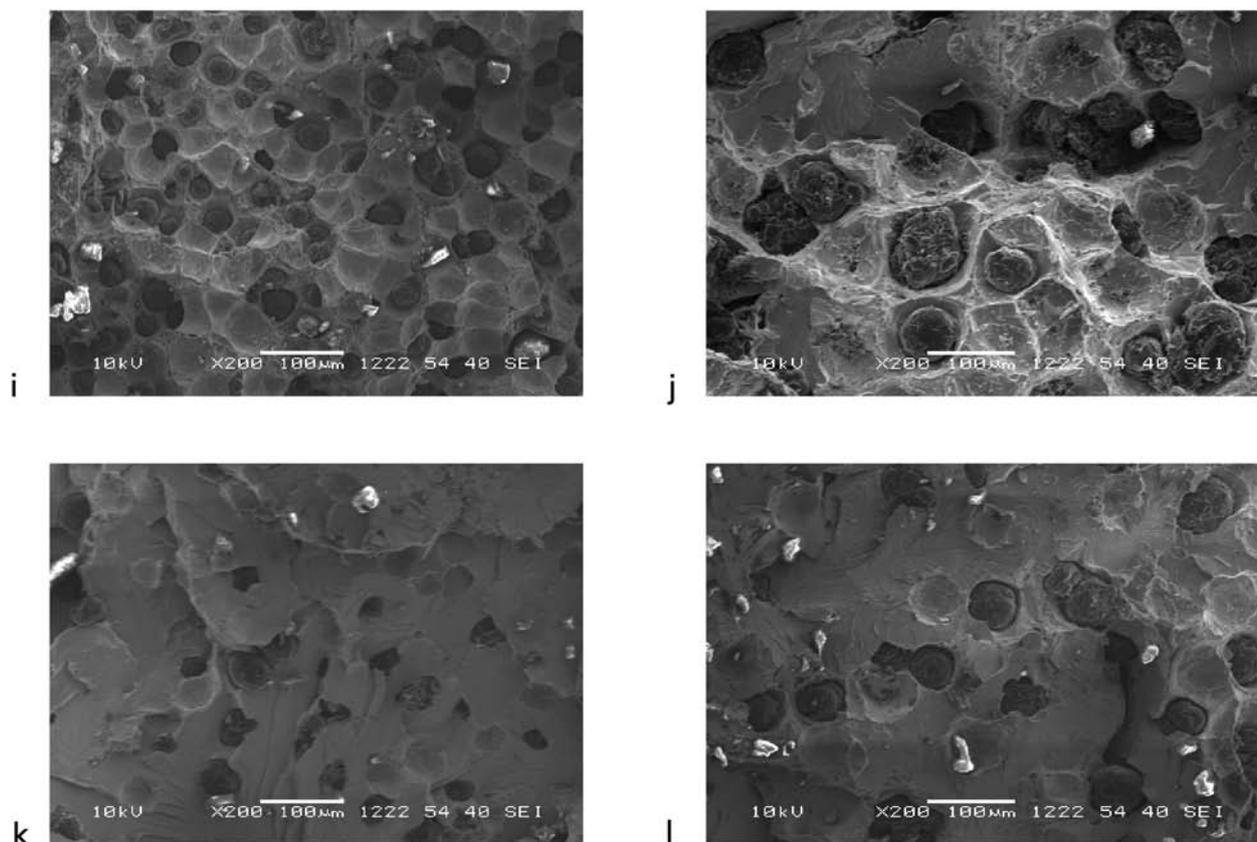


Figura 6. Mecanismo de fractura. i) Mecanismo de fractura de una matriz completamente ferrítica, j) Mecanismo de fractura de una matriz ferrito-perlítica con 60/40%, k) Mecanismo de fractura de una matriz completamente perlítica, l) Mecanismo de fractura de una matriz ferrito-perlítica 30/70%.

Figure 6. Fracture mechanism. i) Fracture mechanism of a full ferritic matrix, j) Fracture mechanism of a ferritic-pearlitic matrix with 60/40%, k) Fracture mechanism of a full pearlitic matrix, l) Fracture mechanism of a ferritic-pearlitic matrix with 30/70%.

Puede apreciarse, como era de esperar, que la fundición FP-3, de matriz completamente perlítica, tiene una dureza mayor debido principalmente al contenido de perlita. La fundición FF1 presenta una microestructura de la matriz completamente ferrítica. Es de suponer, que el bajo contenido de manganeso y de cobre ha influido en dichos valores de dureza. La fundición FFP-2 presenta una microestructura de la matriz ferrito-perlítica. Los resultados de dureza obtenidos en la fundición FFP-4 con microestructura idéntica a la fundición FFP-2 no son iguales y, es de suponer, que los valores de dureza obtenidos tienen que ver con el contenido de perlita de la matriz en dichas fundiciones.

Los resultados de dureza han sido comparados con los obtenidos cuando las fundiciones son sometidas a tratamientos térmicos. Para ello, se han utilizado las cartas de comparación de propiedades mecánicas de fundiciones de grafito esferoidal de acuerdo a ASTM.

Existen grupos de elementos de aleación con efectos positivos y negativos, pero es importante tener en cuenta que cualquiera de los elementos de aleación, por encima de la cantidad permitida, puede actuar como elemento con efecto negativo causando alteraciones microestructurales y de orden mecánico.

Según estudios realizados y, de acuerdo al contenido de silicio (Tabla I) de la fundición 4, ésta debiera tener una resistencia mayor que las demás fundiciones. Respecto a la fundición 2, se puede, por el contrario, anticipar con más facilidad, la presencia de poros, pues se aprecia que el contenido de nitrógeno supera el límite de solubilidad^[23 y 24].

6. MECANISMO DE FRACTURA

En las micrografías i, j, k y l pertenecientes a la figura 6, se puede apreciar el comportamiento de fractura que ha ocurrido en cada una de las fundiciones estudiadas en este trabajo.

Tabla IV. Resultados de los ensayos de dureza Rockwell de las fundiciones. Carga empleada 100 Kg, esfera 1/16".

Table IV. Results of the Rockwell Hardness tests of the casts. Applied load 100 Kg for a sphere of 1/16".

Fundiciones	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR Media	Re (Kg-mm ²)
FF-1	84,5	86,0	84,5	85,0	86,0	83,0	85,0	52,95
FFP-2	81,5	84,0	82,0	83,5	83,0	82,5	83,0	48,95
FP-3	94,5	100,0	100,0	99,0	95,0	100,0	98,0	82,10
FFP-4	92,0	93,5	95,0	95,0	96,0	93,5	94,0	72,47

Tabla V. Resultados de los ensayos de dureza Brinell de las fundiciones. Carga 1839 N, esfera de 2.5 mm.

Table V. Results of the Brinell Hardness tests of the casts. Load applied 1839 N for a sphere of 2.5 mm.

Fundiciones	HB	HB	HB	HB	HB	HB Media	Re (Kg-mm ²)
FF-1	169,0	163,0	166,0	172,0	173,0	169,0	55,95
FFP-2	162,5	157,5	156,5	157,0	158,0	158,0	48,95
FP-3	254,0	254,5	253,5	250,5	254,5	253,0	82,10
FFP-4	231,0	225,0	229,0	232,0	221,0	227,0	72,47

Las fractografías de la figura 6, fueron obtenidas por microscopia electrónica de barrido (SEM). En ellas, se puede apreciar que el mecanismo de fractura es frágil.

Este tipo de fractura ocurre en metales de alta resistencia o de baja ductilidad e, incluso, puede ocurrir a bajas temperaturas en secciones gruesas con altas proporciones de deformación a causa de un impacto.

La fractura frágil puede identificarse, fácilmente, observando las características de la superficie. Se puede apreciar que la superficie de fractura es plana, por lo que vale asegurar que la fractura ha sido por clivaje en todas las muestras ensayadas, sobre todo, en las fractografías k y l, respectivamente. Las fractografías i y j presentan fractura fibrosa y un crecimiento de grieta estable, respectivamente. Esta es característica general de las fundiciones con bajo contenido de perlita.

7. CONCLUSIONES

Con el balance adecuado de los elementos de aleación, se determina la microestructura y propiedades mecánicas de las fundiciones.

En este trabajo, no se ha empleado ninguno de los tratamientos térmicos recomendados para la obtención de microestructuras; esto, demuestra que se puede prescindir de ellos. Los resultados obtenidos confirman todo lo dicho anteriormente.

La dureza de la fundición 2 con respecto a la fundición 4, es menor, aunque la velocidad de enfriamiento es la misma. Su dureza está determinada, principalmente, por el contenido de carbono, silicio y cobre. La fundición 4 presenta una estructura conocida como "ojo de buey".

La dureza de las fundiciones, en general, está directamente relacionada con la composición química. La disminución de dureza en la fundición 2 se debe a la cantidad de cobre, a pesar de la presencia de perlita.

La diferencia de fractura frágil está dada por el contenido de perlita en la matriz. A niveles de perlita por encima del 50% predomina, según estudio, la fractura por clivaje.

La estimación profunda del estudio de las cuatro fundiciones en forma de escalera, de fundición dúctil (grafito esferoidal), da prueba de la influencia de la mínima variación en la composición química sobre la microestructura, así como la influencia de la velocidad de enfriamiento en la misma.

Según este trabajo, la forma de grafito también influye en el incremento de valor de tenacidad a la fractura, K_{IC} , además de otros elementos conocidos que influyen sobre el aumento de la resistencia y tenacidad a la fractura.

El estudio de análisis de imagen realizado en esta investigación confirma que la distancia entre los nódulos, l , es directamente proporcional al crecimiento de grieta y también se ha comprobado que el valor de resiliencia es directamente proporcional a la temperatura, pues en este trabajo se ha aprecia-

do que el valor de resiliencia depende de la temperatura a la que se realiza el ensayo, de la forma y profundidad de la entalla, de las dimensiones de la probeta y de la velocidad de choque.

REFERENCIAS

- [1] J. M. BORRAJO, Y R. A. MARTINEZ, R. E. BOERI Y J. A. SIKORA, *ISIJ Int.* 42 (2002) 257-263.
- [2] C. J. E. DE LA TORRE, *Técnica Metal.* 271 (1985), 18-40.
- [3] J. R. GURIDI, P. CARNICER, L. COBOS Y J. ARANZABAL, *An. Ing. Mecánica* 11 (1997) 51-58.
- [4] A. ALMANSOUR, K. MATSUGI, T. HATAYAMA Y O. YANAGISAWA, *Mater. Trans. JIM.* 36 (1995) 1.487-1.495.
- [5] W. L. BRADLEY Y M. N. SRINIVASAN, *Int. Mater. Rev.* 35 (1990) 129-139.
- [6] M. HAFIZ, *J. Mater. Sci.* 36 (2001) 1.293-1.300.
- [7] W. WILLIAM. JR. SCOTT, *ASM. Cast Irons*, Edit. J. R. Davis, Davis & Associates. Edición 1. USA, 1996, pp. 55-204.
- [8] J. IZAGA Y P. INTXAUSTI. *Metalurgia de las Fundiciones de Hierro*, Edit. Edelvives. Edición 1, Bilbao, España, 1997, 85-142.
- [9] S. HARADA Y. KUROSHIMA Y Y. FUKUSHIMA, *Environ. Effects* 306 (1995) 247-252.
- [10] M. PERZYK, A. W. KOCHANSKY, *J. Mater. Process. Technol.* 109 (2001) 305-307.
- [11] V. GERVAL Y J. LACAZE. *ISIJ Int.* 40 (2000) 386-392.
- [12] S. CALCATERRA, ET AL. *J. Mater. Process. Technol.* 104 (2000) 74-80.
- [13] J. F. CARRASQUILLA Y R. RÍOS, *Rev. Metal. Madrid.* 35 (1999) 279-291.
- [14] M. HECHT Y F. CONDET, 212 (2002) 14-28.
- [15-16] Y. A. KRASOVSKY Y B. B. KALAIDA, *Tenacidad de Fractura de las Fundiciones de Grafito Esferoidal*. Edit. Naukova-Dumka. Edición 1. Kiev, URSS, 1989, pp. 6-98.
- [17-18] I. MINKOV, *Metalurgia Física de la Fundición*. Edit. Wiley and Sons, NY, 1983, pp. 248-297.
- [19] J. P. MONCHOUX, A. REYNAUD, C. VERDU Y R. FOUGÉRES, *Fonderie* 191 (2000) 23-27.
- [20] M. HAFIZ, *Mater. Res.* 92 (2001) 1.258-1.261.
- [21] P. A. STIOPIN, *Resistencia de Materiales*. Edit. URSS, Edición 1. Moscow, URSS, 1988 pp. 312-314.
- [22] J. F. WALLACE. *Trans. AFS.* 83 (1975), 363-378
- [23] D. CRAIG, R. NEUMAN, W. L. POWELL, R. C. LOPER. D. M. STEFANESCU. B. V. KOVAC, R. B. GUNDLACH. H. KIND. H. HERDENSON, A. ALARGASAMY, N. WUKOVICH Y T. ZEH, *Ductile Iron Handbook*, Edit. American Foundrymen's Society. Edición,1. USA, 1999, pp. 87-109.
- [24] J. A. PEROZ-SANZ, *Materiales para Ingeniería. Fundiciones Ferreas*, Edit. Dossat. Madrid, 1994, pp. 85-100.