

Propiedades mecánicas de la fundición gris producida por empresas del Táchira, Venezuela

(Mechanical properties of gray iron produced by casting industry in Táchira, Venezuela)

Peña, Milexa¹; Fuentes, José¹; Gallardo, José²; Zapatero, José³

¹ Laboratorio de Materiales, Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal, Venezuela

² Grupo de Metalurgia e Ingeniería de los Materiales, Universidad de Sevilla, Sevilla, España

³ Ingeniería Civil, de Materiales y de Fabricación, Universidad de Málaga, Málaga, España

Correos Electrónicos: empena@unet.edu.ve; jfuentes@unet.edu.ve; josemar@us.es; jzapatero@uma.es

RESUMEN

En este trabajo se reporta la composición química, la dureza y la resistencia a la tracción de la fundición gris producida por empresas ubicadas en el estado Táchira. Asimismo, se presentan los valores de estos parámetros de fundiciones obtenidas por fabricantes colombianos radicados en Cúcuta. El material de partida para la investigación consistió de placas moldeadas por colado del fundido en moldes de arena verde conforme a los métodos particulares de las empresas. Posteriormente, las placas fueron seccionadas y desbastadas para obtener las probetas requeridas en los ensayos de laboratorio. Se determinó una relación proporcional entre la resistencia a la tracción y la dureza, mediante un ajuste lineal. La exactitud del modelo lineal mejora cuando se consideran por separado las fundiciones según su naturaleza metalúrgica, es decir, las inoculadas, no-inoculadas y las inoculadas no-atruchadas.

Palabras Clave: Fundición gris, composición química, dureza, resistencia a la tracción.

ABSTRACT

This paper presents the chemical composition, hardness and tensile strength of gray cast iron produced by the industries located in the Táchira State, Venezuela. It also presents the values of these parameters of smelting obtained by Colombian manufacturers, located in Cúcuta. The starting material for the research consisted of gray iron plates produced by green sand casting. Subsequently, the plates were machined and grinded to obtain the required samples in the mechanical testing. A proportional relationship between the tensile strength and hardness was calculated using a linear fit. The linear fit accuracy improves when the cast iron is considered separately according to its metallurgy nature, that is to say, inoculated iron, no- inoculated iron and no-mottled inoculated iron.

Key Words: Gray cast iron, chemical composition, hardness, tensile strength.

INTRODUCCIÓN

La dureza y la resistencia a la tracción son las propiedades que, normalmente, más se especifican para las fundiciones grises (COVENIN, 1977) y, se relacionan directamente con otras propiedades útiles como la resistencia al desgaste y maquinabilidad. Las propiedades mecánicas de las fundiciones son el resultado combinado de la composición química, técnicas de fundición, y, del efecto de las velocidades de solidificación y enfriamiento subsiguiente en el estado sólido (Walton, 1971). La velocidad a la que solidifica la fundición gris, F-G, tiene una influencia directa sobre el tamaño y distribución del grafito en su microestructura. Por otro parte, la velocidad de enfriamiento tras solidificación tiene un efecto similar a un tratamiento térmico y, por tanto, determina el tipo de estructura matriz de la fundición. Así, las propiedades mecánicas de la F-G pueden relacionarse directamente con su microestructura. Conforme a lo anterior, las propiedades pueden variar en una misma pieza de geometría compleja moldeada por fundición, si sus diversas secciones tienen grandes diferencias en el espesor o forma y, por tanto, con apreciable variación en la velocidad de enfriamiento (Walton, 1971). A causa de esto, piezas grandes y pequeñas obtenidas de una misma colada del metal fundido pueden presentar diferentes propiedades mecánicas.

Para minimizar la variación en las velocidades de solidificación y enfriamiento del sólido debido a diferencias en el espesor y forma, en esta investigación se trabajó con placas de F-G fabricadas en las empresas, a partir de un mismo modelo, por el método de fundición en moldes de arena verde. Esto no introduce el efecto de forma y espesor dado que se trata de placas de dimensiones idénticas. Por lo que antecede, las propiedades mecánicas de las fundiciones investigadas dependen básicamente de la composición química y de las técnicas particulares de fundición. Como se sabe, la composición química, en particular, el contenido de carbono y silicio, afecta en gran medida las propiedades mecánicas (Apraiz, 1998). Asimismo, los métodos y técnicas propios de producción de las empresas como composición del molde, temperatura de colado, inoculación y otras influyen en las propiedades obtenidas.

MÉTODO

Fabricación de los materiales de partida

La investigación se inició con la fabricación de placas de fundición gris en empresas productoras de este

material radicadas en el estado Táchira y en Cúcuta-Colombia. En este estudio, en particular, participaron un total de once (11) empresas, de las que siete (7) están ubicadas en el estado Táchira, identificadas por las siglas FAH, FDZ, FTJ, IMT, FMX, FCL y FPM, y cuatro (4) en Cúcuta, identificadas por FHZ, FDA, FBD y FMZ. En un trabajo anterior (Peña *et al.*, 2010) se localizaron la mayor parte de las empresas que operan en el Táchira y se conoció las materias primas que emplean y su procedencia, sus tecnologías y métodos de producción, sus productos y mercados, su estrato industrial y nivel de instrucción de su personal, equipos de laboratorio y ensayos que emplean para el control de calidad.

En diez de las empresas la fundición gris se obtuvo por fusión de la carga de materiales en hornos de cubilote, mientras que, en la empresa FAH fue a través de un horno eléctrico de inducción. En el primer caso, los materiales se adicionaron, continuamente, en capas alternas de coque, chatarra de fundición gris y piedra caliza (fundente); en el segundo caso, la carga intermitente consistió de chatarra de F-G y acero, grafito pulverulento y ferrosilicio granulado basto. La empresa FDZ, del grupo de hornos de cubilote, también emplea ferrosilicio en la carga de materiales. Las empresas FAH, FDZ, FTJ, IMT y FPM inoculan la fundición gris. El método consiste en adicionar el inoculante de granulometría fina a la corriente de metal líquido cuando este se vierte desde el horno al crisol de colada. Aunque dichas empresas emplean diversas marcas comerciales de inoculantes, ellos presentan un contenido alto de silicio, no menor al 70%Si. En cuanto al material de los moldes, las empresas del grupo de hornos de cubilote utilizan una mezcla de arena sílice, bentonita y agua, mientras que, la empresa que emplea horno eléctrico, FAH, utiliza una mezcla de arena sílice, silicato de sodio y CO₂. El método de fabricación del molde es manual en todas las empresas. La producción de las placas se obtuvo a partir de un modelo de madera de dimensiones 130 x 300 x 25 mm. Posteriormente, las placas fueron seccionadas, mecanizadas y desbastadas para obtener dos tipos de probetas: una en forma de paralelepípedos para los ensayos de dureza y la otra en forma cilíndrica de sección transversal variable para los ensayos de tracción.

Análisis químico

La determinación cuantitativa de los elementos presentes en la composición química de los materiales investigados se hizo mediante un espectrómetro de arco y chispa marca SPECTRO, modelo SPECTROMAXxf, del Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional Experimental del Táchira. La composición química de cada fundición se determinó a partir de una

muestra del fundido al momento de verterlo en los moldes. La muestra se recogió en una coquilla cilíndrica, figura 1(a), a fin de producir una solidificación rápida para evitar la formación de carbono libre.

La muestra solidificada, figura 1(b), se desbastó ligeramente en una de sus caras paralelas con papel abrasivo de carburo de silicio ASTM N° 10. Seguidamente, la muestra fue posicionada en la zona de trabajo del espectrómetro, se realizó la descarga eléctrica y se obtuvo la medida en tanto por ciento en peso de cada elemento químico. Se realizaron otras dos descargas en otras zonas distintas de la muestra. La composición química reportada fue, por tanto, el valor promedio de tres análisis químicos.

Dado que el carbono y el silicio influyen en la naturaleza de la fundición, en este trabajo se calculó por su utilidad el carbono equivalente, CE, según la ecuación 1, el cual combina los valores de C, Si y P elemental. El carbono equivalente tiene especial importancia, ya que, su valor está muy relacionado con las propiedades físicas y mecánicas de la fundición gris (Craig *et al.*, 1988), y, afecta las propiedades de colabilidad del hierro (Pero-Sanz, 1994). Las fundiciones cuyo CE es menor a 3.6 tienden a presentar problemas de contracción y, en consecuencia, para producir piezas con solidez estructural, se amerita el diseño de sistemas de alimentación apropiados (Brown, 1994). A partir de la composición química obtenida, se calculó el carbono

equivalente, CE, de acuerdo con la siguiente ecuación (Craig *et al.*, 1988):

$$CE = \%C + \left(\frac{\%Si + \%P}{3}\right) \quad (1)$$

Ensayo de dureza

El ensayo de dureza Brinell se realizó siguiendo las directrices contenidas en las normas “Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials” (ASTM E 10, 2000) y “Standard Test Method for Indentation Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers” (ASTM E 110, 1982). El ensayo de dureza Brinell es el estándar para fundiciones (Avner, 1988). Este material contiene microconstituyentes con grandes diferencias en su dureza, pero, la indentación Brinell es suficientemente grande y puede incluir un área representativa del metal. La importancia del ensayo de dureza radica en que es un método simple y rápido, cuyos resultados pueden correlacionarse con otras propiedades mecánicas del metal; por ejemplo, la dureza es un indicador relativamente bueno de la maquinabilidad. El ensayo se llevó a cabo a la temperatura local sobre probetas del tipo paralelepípedo. Un esquema de la probeta y detalles dimensionales se observa en la figura 2; en ella, se indica la superficie elegida para el ensayo, que corresponde al plano del espesor de la placa.

La dureza se determinó mediante un durómetro

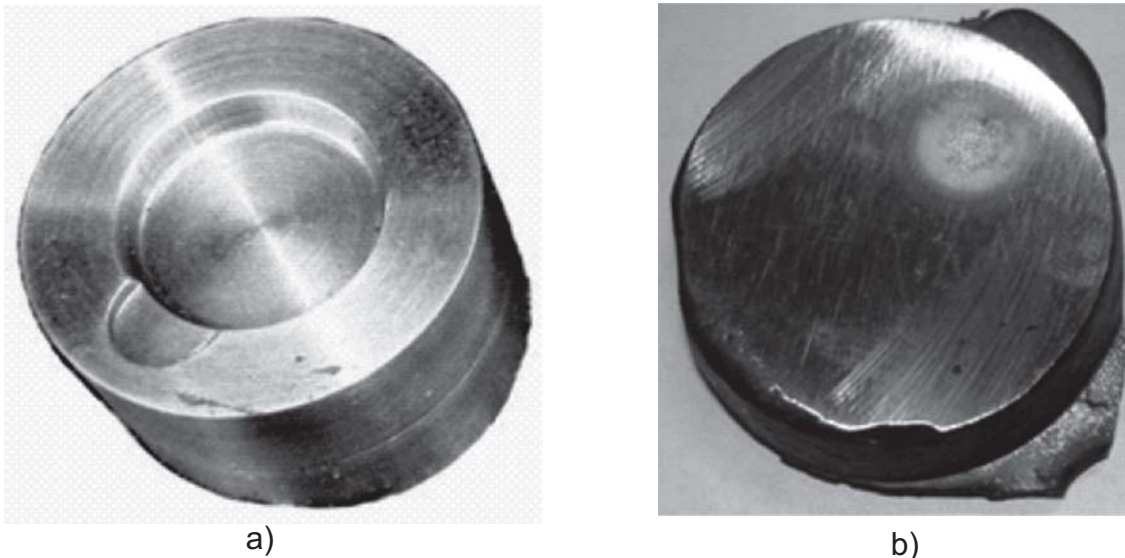


Figura 1. (a) Coquilla de fundición gris; (b) Muestra cilíndrica de F-G de 40 mm de diámetro.

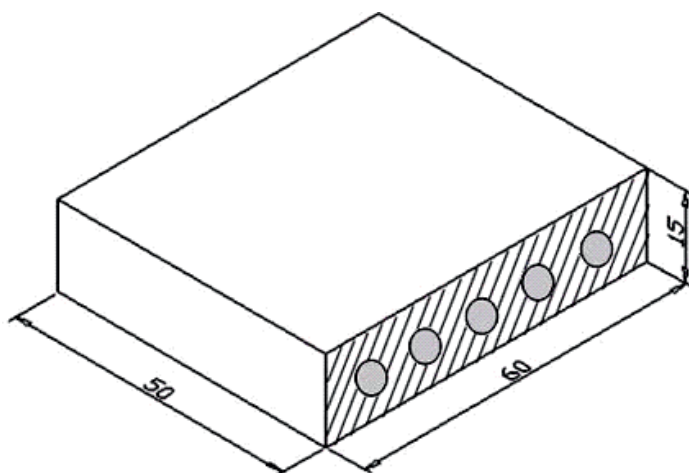


Figura 2. Esquema de la probeta para ensayos de dureza en el que se indica la superficie sobre la que se hicieron cinco indentaciones para las medidas de dureza.

portátil marca KING TESTER de la empresa ACEROS HERGAR, FAH, que utiliza como penetrador una bola de acero endurecido de 10 mm de diámetro y una carga de 3000 kg. La carga se aplicó perpendicular a la superficie de ensayo, previamente desbastada, durante 15 segundos. Seguidamente, se midió el diámetro de la huella dejada por el penetrador en dos direcciones perpendiculares entre sí, y, se obtuvo el valor promedio del diámetro. Para tal fin, se usó un microscopio portátil de baja magnificación que contiene una escala ocular de apreciación 0,1 mm. El valor de dureza Brinell, HB, asociado a la huella se calculó de la ecuación 2,

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi}{2} D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

donde P es la carga aplicada en kg; D es el diámetro de bola en mm y d es el promedio de las medidas perpendiculares del diámetro de la huella en mm.

Por cada probeta se practicaron cinco indentaciones, y se procuró respetar el espaciado mínimo entre huellas –la norma ASTM E 10 sugiere un espaciado de al menos 2,5 veces el diámetro de una indentación–. Asimismo, se respetó la distancia mínima de la huella a la periferia de la probeta. Por tanto, el valor de dureza reportado para cada material es el promedio de cinco valores de dureza HB.

Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó siguiendo las pautas establecidas en la norma “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials” (ASTM E 8, 2000). El ensayo de tracción se realizó a temperatura

ambiente sobre probetas cilíndricas estándar para fundiciones. Las propiedades a tracción son de gran importancia, ya que, normalmente, se utilizan para especificar las fundiciones. De hecho, los componentes estructurales de F-G que se destinan a diversas aplicaciones de ingeniería se clasifican, normalmente, sobre la base de la resistencia a la tracción del material, expresada en unidades del Sistema Inglés, psi, o en unidades del Sistema Internacional SI, MPa, (ASTM A 48, 2003). Las propiedades a tracción que se obtienen de probetas estándar de ensayo son: resistencia a la tracción $-\sigma_{TS}$, límite elástico convencional del 0.2% $-\sigma_{0.2\%}$, módulo de elasticidad, E, y ductilidad. De éstas, sólo σ_{TS} se determina en F-Gs: $\sigma_{0.2\%}$ no suele medirse ni especificarse; E no es una constante; y, la ductilidad no se mide ni se especifica debido a que la F-G es un material frágil.

Dado que el espesor de la placa de partida es de 25 mm se eligió la probeta N° 1 o A especificada en la norma ASTM E 8, como la más representativa de la fundición, cuya morfología y dimensiones se indican en la figura 3.

El ensayo de tracción se llevó a cabo en una máquina dinámica axial/torsional marca MTS, modelo 809 TEST SYSTEM, del Laboratorio de Ingeniería de la Universidad de Málaga, España. Sobre la longitud calibrada de la probeta cilíndrica –distancia entre marcas igual a 12,5 mm– se fijó un extensómetro marca MTS. Posteriormente, el conjunto probeta-extensómetro fue posicionado en la zona de ensayo, fijando los extremos de la probeta a las mordazas de la máquina.

El ensayo de tracción se realizó a una velocidad de deformación de 0,5 mm/min. Durante el ensayo el

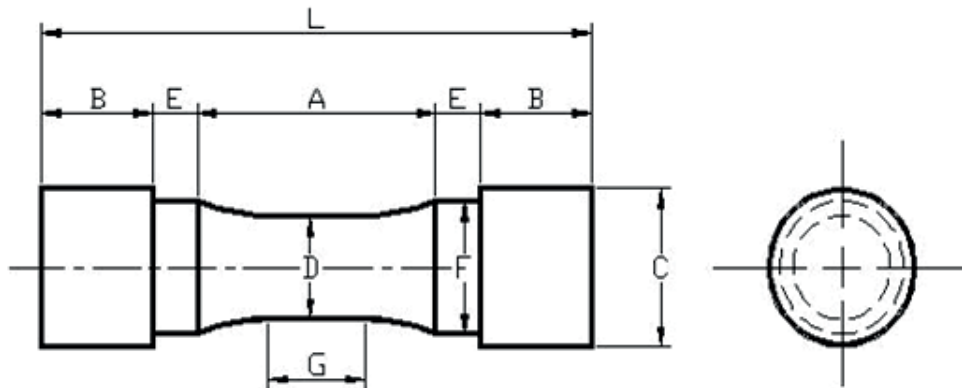


Figura 3. Esquema de la probeta para ensayos de tracción. Las dimensiones indicadas son: A = 32 mm; B = 25 mm; C = 20 mm; D = 12,5 mm; E = 6 mm; F = 16 mm; G = 12,5 mm; L = 95 mm y R = 25 mm.

sistema de adquisición de datos de la máquina registró valores de carga (P, kgf) y sus correspondientes valores de deformación (ϵ , mm/mm) desde el inicio hasta el final, donde tiene lugar la fractura de la probeta. Con estos datos se obtuvo la resistencia a la tracción, $TS\sigma$, al dividir la carga máxima a que fue sometida la probeta durante el ensayo entre el área transversal inicial, según la siguiente ecuación:

$$\sigma_{TS} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_o} \quad (3)$$

donde $TS\sigma$ es la resistencia a la tracción en MPa; $m\acute{a}xP$ es la carga máxima aplicada en N y oA es el área transversal inicial en mm^2 . Se ensayaron tres probetas por cada material, así, la resistencia a la tracción reportada por fundición fue el promedio de tres valores obtenidos según la ecuación (3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición química de la fundición gris

En la tabla 1 se indica la composición química de las diversas fundiciones producidas por las empresas investigadas. Los materiales son identificados por una combinación de tres letras, que representan las siglas del nombre del fabricante.

La tabla 1 refleja una composición que es típica de las fundiciones grises ordinarias (Craig *et al.*, 1988) y, por tanto, no pueden considerarse como fundiciones aleadas. En ella se observa que los elementos mayoritarios de la F-G son hierro, carbono y silicio. Esto justifica el por qué las fundiciones grises son normalmente denominadas aleaciones ternarias Fe-C-Si. El intervalo de carbono total es de 3,04 a 4,20%. La literatura especializada en

fundiciones (Stefanescu, 1990) informa que el intervalo normal de C presente en la composición de fundiciones grises es de 2,75 a 3,5%. Según esto el 36% de los materiales (IMT, FAH, FDZ y FTJ) presentan un contenido de carbono típico al situarse entre 3,04 a 3,5%. No obstante, el 64% de las fundiciones (FPM, FMX, FDA, FBD, FHZ, FMZ y FCL) reflejan un contenido de carbono alto ($> 3,5\%C$) y, por tanto, considerado atípico. Vale mencionar, que un contenido de carbono alto pudiera ser conveniente, ya que, baja la temperatura de fusión y, con ello, facilita el colado del material fundido en los moldes, previene eficazmente la contracción por solidificación y promueve la grafitización (Apraiz, 1998).

En cuanto al silicio, este se presenta en el intervalo de 1,25 a 2,64%, tabla 1. Algunos investigadores (Craig *et al.*, 1988) señalan como valores normales, aceptables y convenientes el intervalo de 1,8 a 2,4%Si. De acuerdo con esto, la mayor parte de las aleaciones (IMT, FDZ, FPM, FMX, FDA, FBD y FHZ) presentan un contenido bajo en Si, siendo de 1,25 a 1,73%. Por su parte, el 27 % de las aleaciones (FAH, FTJ y FMZ) contienen Si dentro del intervalo estándar, y sólo el material FCL presenta el mayor porcentaje de Si (2,64%). El silicio, como se sabe, es un elemento grafitizante, lo cual produce un efecto positivo en la fabricación de piezas de secciones de poco espesor, ya que, evita el blanqueo de la fundición (Morrall *et al.*, 1985). Las fundiciones grises cuyo contenido de Si es mayor a 1,6% tienden a grafitizar (Brown, 1994), pero, si el contenido de Si es bajo ($< 1,6\%$) se favorece la formación de carburos en la estructura del material (blanqueo de la fundición) con lo cual se dificulta el mecanizado. Los materiales IMT, FDZ y FPM presentan un contenido menor a 1,6%Si. El carbono equivalente de los materiales estudiados se halla aproximadamente en el

intervalo de 3,40 a 4,90 (Tabla 1). El 36% de los materiales (FAH, FDZ, FTJ e IMT) son fundiciones grises hipoeutécticas ($CE < 4,3$); el 46% (FCL, FHZ, FDA, FBD y FMZ) son fundiciones grises hipereutécticas ($CE > 4,3$); y, las fundiciones FMX y FPM presentan la composición eutéctica ($CE = 4,3$). Es conocido que la mayor parte de la fundición gris que se produce globalmente es fundición hipoeutéctica (Avner, 1988). Los elementos minoritarios presentes en la fundición gris son: fósforo, azufre y manganeso. El P y S provienen de la carga de materiales. El S tiende a formar sulfuro de hierro (FeS) en las fronteras de grano, lo cual produce un problema en la F-G durante su procesado en caliente, que se conoce como *fragilización en caliente*. El efecto nocivo del S es, por tanto, balanceado con Mn, para formar sulfuro de manganeso (MnS), el cual es menos dañino, ya que, éste se distribuye dentro de la estructura de granos (Morrall *et al.*, 1985). La relación óptima entre Mn y S para formar $\%M_n = 1.7\%S$ una

estructura libre de FeS es: $\%M_n = 1.7\%S + 0.15$ (Stefanescu, 1990). Por su parte, el P en combinación con el Fe forma un constituyente eutéctico de bajo punto de fusión, que se denomina esteadita (probablemente cuando P es mayor a 0.08%), el cual es muy duro. El P en alguna medida incrementa la fluidez del material (BCIRA, 1977). También, pequeñas cantidades de Cr y Cu forman parte de la composición química de las fundiciones.

Dureza Brinell, HB

En la tabla 2 se recogen los valores de dureza Brinell de las fundiciones estudiadas. En la última columna se indica el valor promedio de cinco medidas de dureza realizadas a cada material, como se indicó anteriormente, y están organizados en orden creciente.

Como se observa en la tabla 2, en cada material existe cierto grado de dispersión de la dureza respecto del valor medio, siendo menor a cinco unidades HB en el 55% de las fundiciones y entre 6 y 10 unidades HB en el resto de

Tabla 1. Composición química en porcentaje en peso

Material	% en peso del elemento								
	C	Si	Mn	Cr	Cu	P	S	Fe	CE
IMT	3.04	1.25	0.31	0.17	0.32	0.05	0.15	bal.	3.5
FAH	3.13	1.75	0.83	0.48	0.22	0.06	0.07	bal.	3.7
FDZ	3.42	1.38	0.61	0.20	0.43	0.02	0.15	bal.	3.9
FTJ	3.44	1.97	0.51	0.34	0.41	0.05	0.12	bal.	4.1
FMX	3.73	1.73	0.57	0.21	0.27	0.07	0.16	bal.	4.3
FPM	3.86	1.26	0.38	0.10	0.41	0.06	0.13	bal.	4.3
FDA	3.94	1.61	0.48	0.25	0.22	0.02	0.21	bal.	4.5
FBD	4.10	1.65	0.51	0.22	0.31	0.09	0.21	bal.	4.7
FCL	3.94	2.64	0.54	0.23	0.27	0.08	0.28	bal.	4.8
FHZ	4.20	1.69	0.44	0.18	0.33	0.04	0.20	bal.	4.8
FMZ	4.16	1.92	0.61	0.25	0.27	0.04	0.27	bal.	4.8

Tabla 2. Dureza Brinell de las fundiciones

Material	Dureza Brinell, HB					
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio
FCL	149	143	143	143	140	143 ± 3
FPM	163	159	156	149	146	154 ± 7
FTJ	156	156	179	165	163	163 ± 9
FMZ	170	170	179	167	165	170 ± 5
FMX	187	192	192	197	197	193 ± 4
FDZ	197	187	187	197	197	193 ± 5
FHZ	192	192	197	207	197	197 ± 6
IMT	192	192	192	212	207	199 ± 10
FDA	197	217	212	197	197	204 ± 10
FBD	207	207	207	217	207	209 ± 5
FAH	229	229	235	229	229	230 ± 3

materiales. El intervalo de valores de dureza de las F-Gs está comprendido entre 143 a 230 HB. Este es el intervalo usual de dureza que se reporta en la literatura (Walton, 1971), para diversas combinaciones de grafito y fases matrices: por ejemplo, 110 a 140 HB para F-Gs blandas, constituidas por ferrita + grafito; 140 a 200 HB para fundiciones grises ordinarias, constituidas por ferrita + perlita + grafito; 200 a 260 HB para F-Gs de alta resistencia, constituidas por perlita + grafito. El rango de dureza de las fundiciones estudiadas (143 - 230 HB) es apropiado desde el punto de vista de la maquinabilidad, ya que, las piezas cuya dureza es superior a 250 HB son prácticamente inmecanizables (Pero-Sanz, 1994).

La fundición denominada FCL presenta el menor valor de dureza, en torno a 143 HB, que puede relacionarse con su composición y microestructura. Este material presenta el mayor contenido de silicio (2,64%Si) y el mayor valor de CE (4,85). El Si como se explicó antes promueve la grafitización de la fundición y evita el blanqueo, lo cual ablanda al material. Por otra parte, valores altos de CE se asocian con fundiciones que contienen grafito basto y consecuentemente de baja dureza (Walton, 1971).

La microestructura de la fundición FCL, que se muestra en la figura 4, refleja claramente la relación entre

la dureza y los microconstituyentes. En este caso, la presencia de hojuelas de grafito basto tipo placa junto con la presencia esporádica de regiones de perlita gruesa justifican la baja dureza de este material. En el otro extremo, la fundición gris denominada FAH posee el valor más alto de dureza, a saber, 230 HB. Esta fundición, comparada con el resto de materiales, tiene el contenido más alto de cromo -0,48%Cr-. El cromo, se sabe, tiene gran tendencia a formar carburos, los cuales le imprimen gran dureza a la matriz (Morral *et al.*, 1985). Si la formación del carburo no tiene lugar, el Cr incrementa la resistencia y dureza de la matriz por disolución sólida (Stefanescu, 1990). Como traza, el Cr puede aparecer en un contenido no mayor a 0.2% (Craig *et al.*, 1988). Asimismo, el material FAH presenta uno de los valores más bajos de CE, siendo de 3,73 y su contenido de Si es mucho menor que el de FCL (1,75% frente a 2,64%). En la figura 5 se muestra la microestructura de la fundición FAH en la que se destaca la presencia dispersa de carburos del tipo $(FeCr)_nC$ (Stefanescu, 1990) que le imprimen gran dureza al material. Como se ha visto anteriormente, la dureza disminuye con el valor de CE, pero, existe una dispersión alta de los datos numéricos para el conjunto total de fundiciones, que no ameritó proponer algún tipo de relación matemática.

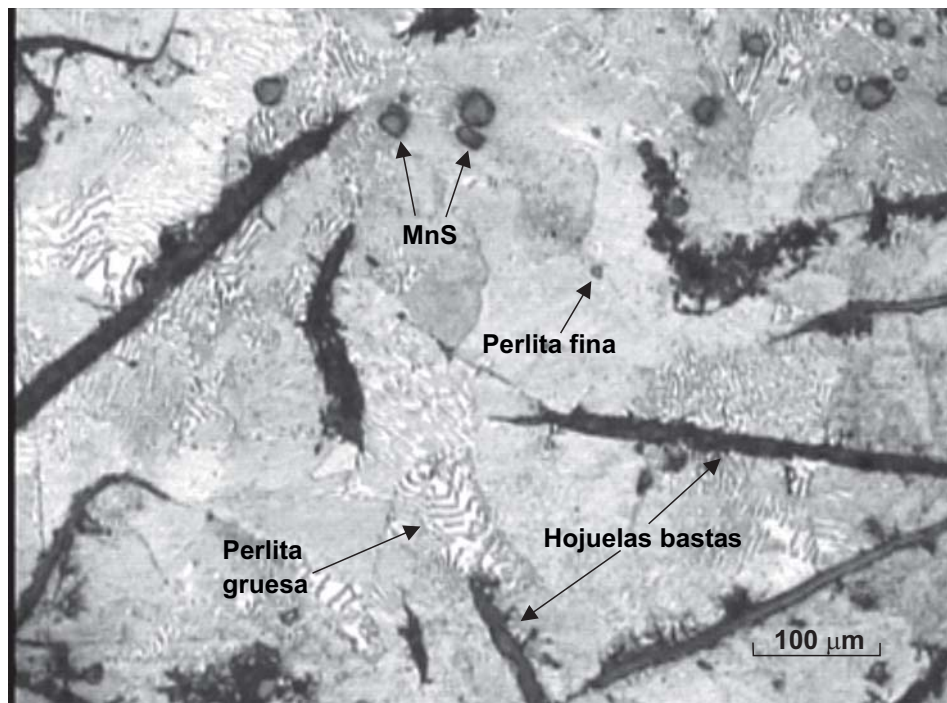


Figura 4. Microestructura de la fundición FCL en la que se observan hojuelas de grafito basto tipo placa, partículas de MnS y zonas esporádicas de perlita gruesa. La dureza es de 143 HB.

Resistencia a la tracción, $TS\sigma$

En la tabla 3, se presentan los valores de la resistencia a la tracción. Los valores de la última columna representan el valor promedio de tres medidas, obtenidas cada una en probetas a tracción individuales, y están organizados en orden creciente. Las celdas que contienen las letras VF indican que no fue posible obtener ningún valor, debido a fallos en el sistema de adquisición de datos de la máquina, durante la realización del ensayo.

En la tabla 3 se observa que la resistencia a la tracción de la fundición gris está comprendida entre 127 a 279 MPa. En general, estos valores están dentro del intervalo típico de resistencia mecánica que caracteriza a los diversos tipos de fundición gris (ASTM A 48, 2003). En la norma ASTM A 48 las F-Gs son clasificadas en once clases basadas en la resistencia en unidades del SI. Cada clase es designada por un número seguido de una letra,

donde el número indica la resistencia a la tracción mínima en MPa y la letra indica el tamaño de la probeta de ensayo que mejor representa el espesor de pared de la sección crítica de la pieza. Conforme a la especificación ASTM A 48 las fundiciones investigadas pueden clasificarse dentro de las seis primeras clases de F-G, desde las de baja resistencia (150 MPa) hasta las de mediana resistencia (275 MPa). Estas son: FTJ clasifica como fundición clase 150A, FMZ como fundición clase 175A, y, FDZ fundición clase 200A. En tanto, FHZ e IMT pertenecen a las fundiciones clase 225A, mientras que, FMX, FAH y FDA son fundiciones clase 250A. Sólo el material FBD, el más resistente, se clasifica como fundición clase 275A.

Las fundiciones FPM y FCL no aplican a ninguna clase, debido a su baja resistencia mecánica ($\sigma_{TS} < 150$ MPa). En estos últimos casos, la especificación por resistencia no tiene importancia, ya que, las fundiciones

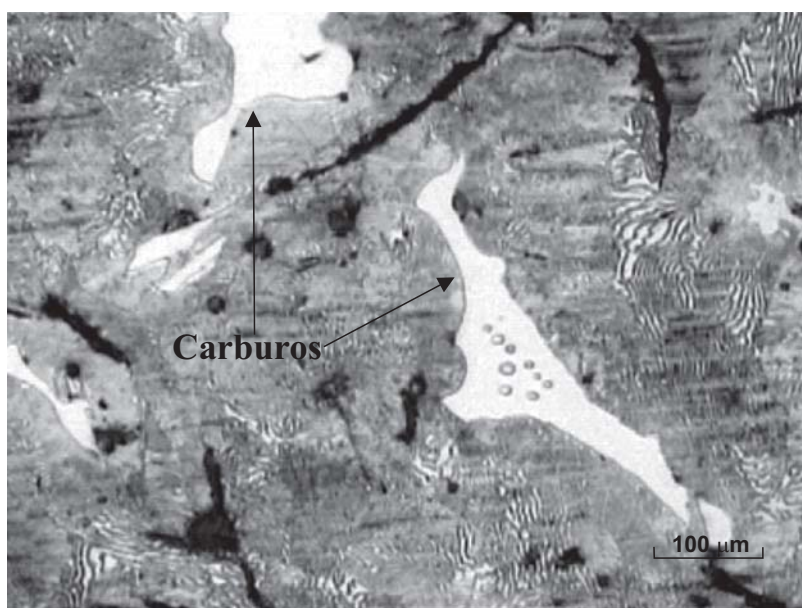


Figura 5. Microestructura de la fundición FAH en la que se observa la presencia de carburos de color gris claro. La dureza es de 230 HB.

Tabla 3. Resistencia a la tracción de las fundiciones.

Material	Resistencia a la tracción, MPa			
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio
FCL	VF	122	132	127 ± 7
FPM	154	151	139	148 ± 8
FTJ	178	161	180	173 ± 10
FMZ	184	184	183	184 ± 0
FDZ	226	VF	215	221 ± 7
FHZ	240	240	254	245 ± 9
IMT	248	243	249	247 ± 4
FMX	257	251	248	252 ± 5
FAH	260	249	258	256 ± 6
FDA	258	271	243	257 ± 14
FBD	295	262	279	279 ± 17

FPM y FCL se destinan a aplicaciones de bajas exigencias mecánicas, por ejemplo, quemadores para cocinas, fusibles mecánicos, ruedas para carretas, piezas artesanales y otras.

Ninguna de las fundiciones estudiadas se clasificó dentro del grupo de fundiciones de alta resistencia (clase 300A, clase 325A, clase 350A, clase 375A y clase 400A), las cuales, normalmente, son fundiciones grises aleadas. De todos los materiales, la fundición FCL presenta el menor valor de resistencia, siendo de 127 MPa y, también, el menor valor de dureza (142 HB, Tabla 3). El material FCL es una F-G hipereutéctica, no inoculada, que exhibe el mayor valor de CE (4,85). En el otro extremo, el material FBD, también una fundición hipereutéctica no inoculada, tiene el mayor valor de resistencia a la tracción, siendo de 279 MPa, y también la mayor dispersión de valores respecto al valor promedio (± 17 MPa). Este material tiene un valor alto de CE (4,68) y de acuerdo a la literatura (Craig *et al.*, 1988) debería tener una resistencia baja. En este caso, conviene considerar el efecto combinado de diversos factores. El contenido de Si es bajo (1,65%), lo cual tiende a blanquear la fundición; el contenido de carbono total es alto (4,1%); el Cr y Cu se presentan en una cantidad significativa 0,22 y 0,31%, respectivamente. El C, Cr y Cu tienden a incrementar la resistencia y dureza por efecto de endurecimiento por disolución sólida y además promueven una estructura matriz perlítica (Stefanescu, 1990). El efecto del Cr es pronunciado en el intervalo de 0.25 a 0.5%. A mayores niveles, su efecto no es tan dramático (Craig *et al.*, 1988). Adicionalmente, la no-inoculación determina un menor número de núcleos para la formación del grafito. También se observó un grado de dispersión alta entre TS_{σ} y CE, que dificultó establecer con precisión algún tipo de relación.

Relación entre la resistencia mecánica y la dureza

Por mucho tiempo se han usado en diversos ámbitos las tablas que relacionan dureza y resistencia a la tracción. Dichas tablas proporcionan datos para proyectos de ingeniería y en la industria para propósitos de control de calidad con un pequeño margen de error dependiendo del material. Sin embargo, cuando un componente estructural presenta defectos como grietas hay que acudir a la mecánica de fractura e incluir nuevos conceptos de valoración según el tipo de esfuerzo. En una fundición gris el grafito segregado en la matriz hace el papel de discontinuidades de tipo sólido; por consiguiente, para predecir el comportamiento real de la F-G frente a una sollicitación mecánica dada es necesario introducir dicho factor. Esto dificulta la posibilidad de relacionar las propiedades mecánicas y otras en este tipo

de aleación férrea. Los resultados que se presentan seguidamente apuntan a determinar algún tipo de relación matemática entre resistencia a la tracción y dureza con posibilidades de utilización en aplicaciones de ingeniería.

La figura 6 es un gráfico de tipo dispersión con marcadores que representa la relación que existe entre la resistencia a la tracción y la dureza del grupo total de fundiciones investigadas. Los valores de resistencia a la tracción son los promedios de la tabla 3 y se representan en el eje de las ordenadas, mientras que, los valores de dureza son los de la tabla 2 y se representan en el eje de las abscisas.

Los datos de resistencia y dureza del gráfico contienen las barras de error para las desviaciones estándar que se especifican en la tabla 3 y en la tabla 2, respectivamente. Como puede observarse, el conjunto de datos se ajusta, en gran medida, a una línea recta de tendencia creciente, que sugiere que existe una relación directamente proporcional entre la resistencia y la dureza. La figura 6, también muestra que el grado de dispersión de los datos numéricos es bajo. Para esta línea de tendencia el coeficiente de correlación múltiple, R^2 , dado por el programa EXCEL, es de 0,88 lo cual señala que el ajuste es bueno.

Cuando se consideran por separado las fundiciones del conjunto de total desde un punto de vista metalúrgico, es decir, las fundiciones inoculadas, las fundiciones no inoculadas y las fundiciones inoculadas no atruchadas, se presentan casos interesantes, los cuales se desglosan a continuación:

En la figura 7 se representan los valores de resistencia a la tracción frente a la dureza Brinell sólo de las fundiciones no inoculadas. Como se observa en la figura, existe una menor dispersión en los datos con relación al caso anterior, con lo cual se obtiene un mejor ajuste a una línea recta, cuyo modelo matemático es $\sigma_{TS} = 2,3HB - 202(MPa)$. En este caso, el valor de R^2 es de 0,99 que es mucho mejor a cuando se consideran todos los materiales sin distinción metalúrgica ($R^2 = 0,88$).

Por su parte, en la figura 8 se representan los valores de σ_{TS} vs. HB sólo de las fundiciones grises que fueron inoculadas durante el vertido del fundido en los moldes. En este nuevo caso, se obtiene un mejor ajuste de la línea de tendencia de los datos. El coeficiente de correlación múltiple es de 0,90 que supera al del conjunto total de F-Gs ($R^2 = 0,88$). También, se observa que la dispersión de los datos es mayor en las fundiciones inoculadas -F-G, I- con respecto a las no inoculadas -F-G, NI- ($R^2_{FG,I} < R^2_{FG,NI}$).

Cuando del grupo anterior -F-G, I- se excluyen las

fundiciones atruchadas se obtiene una notable mejora de la línea de tendencia. Esto se pone de manifiesto en la figura 9, la cual sugiere que la tendencia es más precisa y confiable debido al alto valor del coeficiente de correlación múltiple ($R^2 = 0.98$). La resistencia y la dureza están relacionados por la siguiente ecuación: $\sigma_{TS} = 2HB - 165(MPa)$. Las fundiciones atruchadas son aquellas que contienen carburos dentro de la típica estructura compuesta de láminas de grafito embebidas en matriz perlítica. Los datos de la estructura metalográfica de las fundiciones estudiadas serán presentados en otro trabajo.

La relación resistencia-dureza también ha sido estudiada en otras investigaciones. Aquí se citan dos trabajos pioneros. Meyer (1970), realizó ensayos a partir de muestras obtenidas de piezas producidas bajo un mismo esquema de fabricación y diseño. Los datos de resistencia y dureza que él obtiene presentan un alto grado de dispersión, con lo cual se dificulta e imposibilita establecer algún tipo de tendencia. Por su parte, López

(1978) informa de una relación σ_{TS} vs. HB similar a la obtenida en este trabajo, aunque con un grado de dispersión mayor. López realizó numerosos ensayos sobre probetas obtenidas a partir de piezas de F-G producidas por moldeo y fundición o de apéndices de las mismas, englobando variados espesores y diversas condiciones de enfriamiento.

Una relación directa entre resistencia y dureza es muy útil debido a que el ensayo de dureza es mucho más sencillo y, a menudo, no destructivo. Lo que antecede sugiere la posibilidad de usar efectivamente la dureza para estimar la resistencia a la tracción de un componente de F-G de 25 mm de espesor a partir de un modelo matemático $\{\sigma_{TS} = f(HB)\}$ en su caso, de una representación gráfica (σ_{TS} vs. HB). En este trabajo, dichos modelos se obtuvieron a partir de medidas experimentales realizadas en grupos separados de fundiciones grises, según su naturaleza metalúrgica, es decir, fundiciones no inoculadas, inoculadas e inoculadas no atruchadas, producidas por la industria tachireense.

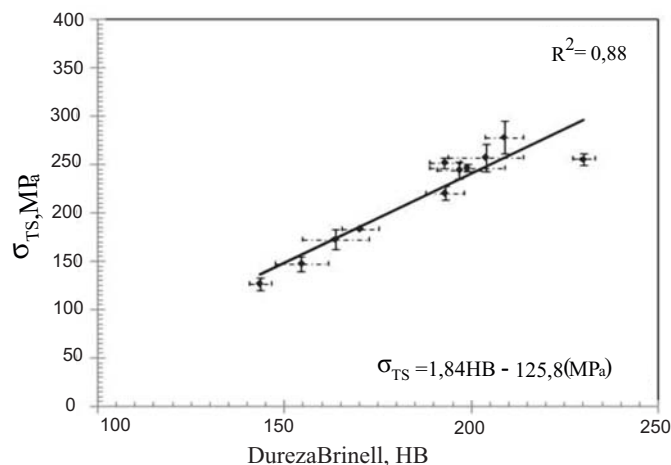


Figura 6. Resistencia a la tracción frente a la dureza para el grupo total de F-Gs.

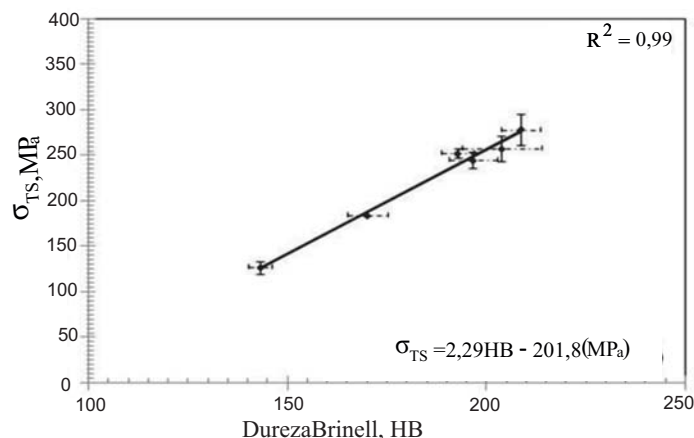


Figura 7. Resistencia a la tracción frente a la dureza en fundiciones no inoculadas.

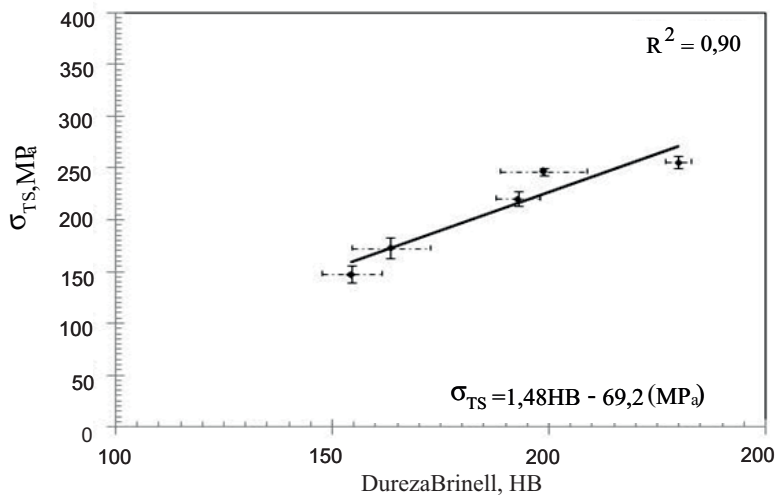


Figura 8. Resistencia a la tracción frente a la dureza en fundiciones inoculadas

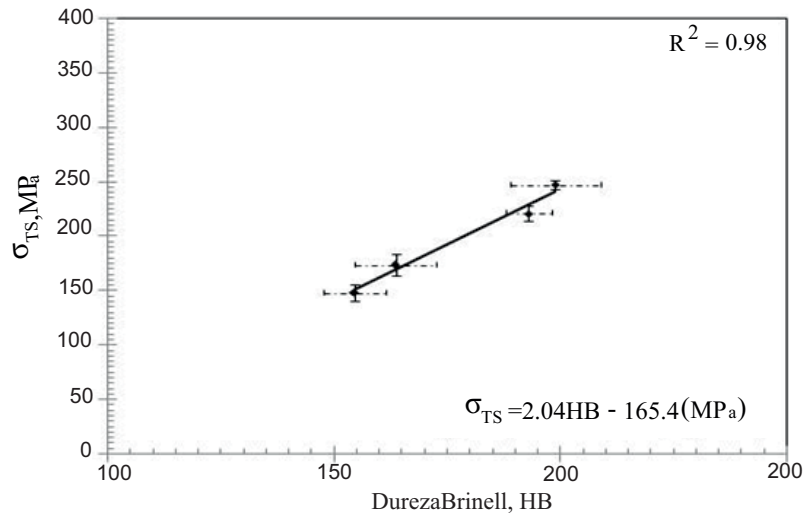


Figura 9. Resistencia a la tracción frente a la dureza en fundiciones inoculadas no atruchadas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ratifica para las fundiciones grises la proporcionalidad que existe entre resistencia a la tracción y dureza Brinell. Dicha relación se ajusta a una línea de tendencia de tipo lineal. Pero, la relación matemática alcanza un mayor grado de exactitud, al mejorar el coeficiente de correlación múltiple R^2 , cuando se consideran por separado las fundiciones, a saber: fundiciones inoculadas, fundiciones no inoculadas y fundiciones inoculadas no atruchadas. Este criterio de delimitar la fundición, según su naturaleza metalúrgica, sugiere la posibilidad real y práctica de usar la relación gráfica σ_{TS} vs. HB, o en su caso, el modelo matemático $\{\sigma_{TS} = f(HB)\}$ para predecir con confianza el comportamiento en servicio de componentes

estructurales de fundiciones grises de 25 mm de espesor producidas por la industria tachirense.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer a las empresas productoras de fundición gris ubicadas en el estado Táchira y Cúcuta-Colombia por su valiosa colaboración en el desarrollo de esta investigación. Especial mención a las empresas FUNDICIONES ACEROS HERGAR, INDUVENPA DÍAZ y AUTOS TOROVEGA, que aportaron importantísimos recursos al proyecto LOCTI PRO118, y, al Vice Rectorado Académico y Decanato de Investigación de la UNET por la ayuda económica para la preparación y presentación de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APRAIZ, J. Fundiciones, Sexta edición, Madrid, CIE Inversiones Editoriales-DOSSAT 2000. S.L. pp. 1-70. 1998.
- ASTM A 48/A 48M. Standard specification for gray iron castings. Pennsylvania, USA. 2003.
- ASTM E 10. Standard test method for Brinell hardness of metallic materials. Pennsylvania. USA. 2000.
- ASTM E 110. Standard test method for indentation hardness of metallic materials by portable hardness testers. Pennsylvania, USA. 1982.
- ASTM E 8M. Standard test methods for tension testing of metallic materials. Pennsylvania. USA. 2000.
- AVNER, S. Introducción a la metalurgia física, Segunda edición, México, D. F., McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A. pp. 430-443. 1988.
- BCIRA. The importance of controlling low phosphorus contents in gray iron. Broadsheet. 162. 1977.
- BROWN, J. Foseco Foundryman's Handbook, Tenth edition, Birmingham, Butterworth-Heinemann. pp. 184-192. 1994.
- COVENIN 1246. Fundición gris. Características de las piezas fundidas. Caracas. Venezuela. 1977.
- CRAIG, D; HORNUNG, M. and McCLUHAN T. Gray iron, Metals handbook, 9th edition, ASM International, Metals Park, Ohio. USA. 15: 629-646.1988.
- LÓPEZ, L. Aplicación de los ultrasonidos a la determinación de las características mecánicas de la fundición gris. Revista de Metalurgia. 14(3): 165-174. 1978.
- MEYER, H. Inspection of grey iron castings by ultrasonic attenuation. Non-destructive testing, 3(2): 99-104. 1970.
- MORRAL, F; JIMENO, E. y MOLERA, P. Metalurgia general, Barcelona, Editorial Reverté, S. A. pp. 1191-1197. 1985.
- PEÑA, M; FUENTES, J. y GALLARDO, J. Aspectos técnicos en las empresas productoras de piezas de fundición gris del estado Táchira. Revista Científica UNET. 21(2): 80-84. 2010.
- PERO-SANZ, J. Materiales para ingeniería: fundiciones férreas, Madrid, Editorial Dossat, S. A. pp. 3-69. 1994.
- STEFANESCU, D. Classification and basic metallurgy of cast iron, Metals handbook, tenth edition, ASM International, vol. 1, Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. Ohio, USA. pp. 3-9. 1990.
- WALTON, CH. Gray and ductile iron castings handbook, First edition, Cleveland, Gray And Ductile Iron Founders' Society Inc. pp. 192-226. 1971.