

## **CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA FUNDICIÓN ESFEROIDAL CON ALTOS CONTENIDOS DE MOLIBDENO**

### **MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES CHARACTERIZATION OF SPHERICAL CAST IRON WITH HIGH CONTENTS MOLYBDENUM**

**Israel Corona-Tenorio<sup>1</sup>, Claudia A. Vargas<sup>1</sup>, Federico Chávez-Alcala<sup>1</sup> y Adan Ramírez-Lopez<sup>1,2</sup>**

(1) Instituto Politécnico Nacional (SEPI-ESIQIE-IPN), U.P. Zacatenco, Lab. De Análisis Met., Edif. "Z" y Edif. "6" P.B., CP 07300 México

(2) Univ. Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Coordinación de Posgrado en Ciencias e Ingeniería, Dpto. de Materiales, Av. San Pablo #180, col. Reynosa, Del. Azcapotzalco, CP 2200 México, D.F. – México  
(e-mail: adaramil@yahoo.com.mx)

*Recibido: 17/06/2010 - Evaluado: 06/07/2010 - Aceptado: 23/08/2010*

#### **RESUMEN**

En este trabajo se estudia la influencia de los altos contenidos de molibdeno en dos aleaciones base (una con contenido alto de silicio y bajo en carbono, serie A; y la segunda con alto contenido de carbono y bajo silicio, serie B) sobre la microestructura y el comportamiento mecánico en piezas coladas en fundición esferoidal en espesores normales. Se enfatiza la composición química y características micro-estructurales tales como tamaño, distribución de nódulos, la relación de las fases formadas y propiedades mecánicas en el material obtenido. Se comprobó la influencia del contenido de molibdeno sobre la formación de nódulos en ambas series, así como de su morfología que es la característica deseada.

#### **ABSTRACT**

In this work it is determined the behavior and influence of the molybdenum related to other alloy elements (the first, high silicon and low carbon contents, A series; and the second high carbon and low silicon contents, B series), on the microstructure and mechanical behavior to determine the efficiency of the Nodular Iron in casted pieces. It is emphasized the chemical composition on the micro structural characteristics, such as size, nodules distribution, relationship of formed phases and mechanical properties in the material obtained. The influence of the molybdenum on the nodules formation was verified for both series and its morphology.

Palabras clave: fundición esferoidal, molibdeno, propiedades micro-estructurales y mecánicas

Keywords: spherical cast iron, molybdenum, mechanical and micro-structural properties

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de fundiciones con grafito esferoidal es en la actualidad es un importante tema de estudio en el campo de la metalurgia de los hierros. La constante demanda para componentes, especialmente aquellos destinados a la industria automotriz, persigue la finalidad de tener mayor resistencia, reducir en lo más mínimo el maquinado, después del desmoldeo y evitar tratamientos posteriores, con la finalidad de reducir costos en la fabricación de piezas coladas.

Recientemente se ha comenzado a prestar especial atención al desarrollo de tecnologías adecuadas para el desarrollo de piezas de fundición con grafito esferoidal para componentes que están expuestos a cargas cíclicas y temperaturas elevadas, así como para desarrollar piezas de espesores delgados con la finalidad de reemplazar aleaciones no ferrosas livianas que tienen costos de producción más elevados (Javaid et al., 1999).

Hay dos motivos por los cuales los componentes colados son más grandes y pesados de lo necesario de acuerdo a los requerimientos de uso. Por un lado las piezas coladas necesitan un mínimo de espesor para mantener la integridad estructural, y por otro las tecnologías de moldeo son a menudo inadecuadas para producir piezas coladas de buena calidad (Cuttino et al., 1999).

Las piezas de fundición con grafito esferoidal pueden ser producidas fácilmente empleando técnicas convencionales, sin embargo la producción de piezas de pequeño espesor genera problemas metalúrgicos, tales como formación de carburos y microporosidad, que afectan adversamente las propiedades mecánicas, la maquinabilidad, y también crean inconvenientes en el moldeo (Javaid et al., 1999).

El uso de las fundiciones con grafito esferoidal en la fabricación de piezas coladas, ha crecido debido a las ventajas que muestra, pudiéndose mencionar entre ellas: la resistencia a la fatiga, la alta resistencia mecánica, etc., de hecho ha llegado a desplazar notablemente a los hierros grises, fundiciones blancas e incluso algunas piezas que se fabricaban en acero.

El sector automotriz principalmente ha aprovechado este material para la fabricación de muchos componentes como múltiples de escape, cigüeñales, árboles de levas, anillos de pistón, etc., aprovechando sus características físicas y microestructurales, debido a que estos elementos están sometidos a grandes cargas cíclicas, dinámicas, temperaturas, al desgaste y a la fatiga de contacto, siendo esta última la causante de serios daños al provocar la formación de grietas y finalmente la falla del componente (Javaid et al. 1999).

Ante estas circunstancias se ha tenido la necesidad de perfeccionar este material con la adición de elementos aleantes como molibdeno, cromo, vanadio, etc., para tener productos más resistentes y observar la influencia sobre las propiedades mecánicas y microestructurales, así como la morfología del grafito y la presencia de defectos metalúrgicos.

El molibdeno ha sido utilizado ampliamente para mejorar las propiedades de los hierros nodulares, sin embargo, en la literatura solo se refiere un contenido máximo de hasta 1.0% como deseado, debido a que su presencia afecta a la formación de los nódulos de grafito; ya que este elemento tiende a ser un anti-grafitizante y un débil estabilizador de carburos dentro de las fundiciones (Archer et al., 1990; Ductile Iron Society, 1998).

En esta investigación se estudio la influencia del molibdeno como elemento aleante en altos contenidos en una fundición de grafito esferoidal para uso en piezas coladas, observando el comportamiento en sus propiedades mecánicas y micro-estructurales, enfocado en la influencia sobre el tamaño, forma y distribución de los grafitos, fases presentes y del elemento Molibdeno. Las adiciones del elemento aleante se añadieron desde 0.2% hasta 2.5% en dos series (A) y (B) a fin de establecer claramente su cantidad y los límites para su empleo en cada caso.

## METODOLOGIA

Se diseñó la carga metálica a fundir, a partir de una mezcla de chatarra de acero bajo carbono con arrabio en un porcentaje (60-40) y ajustando la composición química deseada con grafito de electrodo y ferroaleaciones. La fusión de la carga metálica se realizó en un horno de inducción de una capacidad de 10 Kg. Posteriormente a la fusión de la carga se realizaron los tratamientos de inoculación y esferoidización, el primero en el vaciado del horno a la olla con FeSi y el segundo dentro de la olla de tratamiento con la adición de FeSiMg utilizando el método sándwich (Crews y Carlson, 1974).

La temperatura de colada fue de 1480°C. El control de las lecturas de temperatura se realizó por medio de un pirómetro digital, debido a que es un factor muy importante dentro de la fabricación del hierro nodular.

Se tomaron muestras para determinar la composición química y tener referencia de que los elementos se fijaron exitosamente en la aleación, siendo principalmente el carbono, silicio la base de la aleación y el aleante de nuestro interés el molibdeno. Además se colaron probetas estandarizadas para los ensayos físicos y microestructurales, en moldes de arena.

### Composición química

La Tabla 1 presenta las composiciones químicas de cada una de las pruebas que se desarrollaron en el presente trabajo, expresadas en dos Series A y B, que se identificaron como bajo carbono/alto silicio (serie A) y alto carbono/bajo silicio (serie B). Estas fueron aleadas con diferentes contenidos de Mo de 0.2 a 2.5%. Los análisis reportados fueron determinados en un equipo de espectrometría por emisión y para el caso del carbono y azufre se determinaron en un equipo LECO.

Tabla 1: Composiciones químicas de la fundiciones utilizadas. Serie A y B (% en peso).

<i>Muestra</i>	<i>%C</i>	<i>%Si</i>	<i>%Mn</i>	<i>%S</i>	<i>%P</i>	<i>%Mo</i>	<i>%Mg</i>
A0	2.91	4.08	0.51	0.035	0.033	0.00	0.019
A1	2.85	4.06	0.50	0.036	0.032	0.21	0.021
A2	2.87	4.01	0.55	0.032	0.033	0.52	0.016
A3	3.02	4.00	0.51	0.029	0.033	1.01	0.017
A4	2.91	4.00	0.50	0.025	0.031	1.55	0.018
A5	2.95	4.01	0.49	0.031	0.032	2.00	0.010
A6	2.90	4.00	0.50	0.033	0.030	2.51	0.014
B0	3.02	2.90	0.50	0.030	0.031	0.00	0.010
B1	3.05	2.96	0.54	0.028	0.035	0.20	0.022
B2	3.00	2.91	0.50	0.022	0.033	0.50	0.017
B3	3.12	2.84	0.51	0.033	0.032	1.08	0.009
B4	3.08	2.86	0.50	0.032	0.031	1.47	0.015
B5	3.09	2.90	0.50	0.033	0.033	1.96	0.018
B6	3.06	2.90	0.50	0.031	0.033	2.51	0.017

### Ensayes mecánicos

Las propiedades mecánicas ensayadas en ambas series fueron: resistencia a la tensión (Rm) y dureza Brinell (HB), las pruebas de tensión se realizaron de acuerdo a las normas ASTM E8M-3 (1990) y ASTM E10-78 (1980), se determino conforme se incrementaban los contenidos de Molibdeno. Los resultados obtenidos son reportados en la Tabla 2.

Tabla 2: Resistencia Ténsil y Dureza obtenidas. Serie A y B.

Muestra	% Molibdeno (en peso)	Resistencia tensil en (psi)	Dureza Brinell	% de alargamiento
A0	0.0	90448.652	207	5.1
A1	0.2	95443.524	212	4.8
A2	0.5	97207.005	217	3.5
A3	1.0	98232.194	229	3.1
A4	1.5	102847.706	269	1.0
A5	2.0	103995.494	277	0.3
A6	2.5	104088.873	285	0.2
B0	0.0	108588.389	229	4.29
B1	0.2	109652.011	235	4.22
B2	0.5	111794.547	239	4.07
B3	1.0	114382.694	241	3.02
B4	1.5	117212.641	277	1.58
B5	2.0	122130.362	321	0.65
B6	2.5	132601.659	369	0.51

#### Pruebas de dureza

De las probetas, se realizaron las mediciones de dureza para cada uno de los especímenes de las dos series, la norma empleada fue la ASTM E 10-01 en escala brinell (HB), las muestras se rectificaron dejando superficies planas para el ensayo y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2. Posteriormente se obtuvo un promedio de los 7 puntos los cuales fueron graficados en función del %Mo, para lo cual el equipo utilizado fue un durómetro Brinell Akashi 4000 Kg.

#### Ensayos Metalográficos

*Microscopia Óptica:* Para la determinación de las fases presentes, distribución y morfología de nódulos: La observación de la microestructura se realizó en un microscopio metalográfico (Nikon-670243) y con un analizador de imágenes (Image Pro Plus, 1995), se tomaron fotografías a 100X con el objetivo de caracterizar el conteo nodular, tamaño, morfología y porcentaje de área de fases para las dos series y asegurar la repetibilidad de los resultados y con apoyo del método visual de comparación con cartas estándar. Primeramente se observa la microestructura de las muestras pulidas para evaluar el porcentaje de nodularidad, morfología y cantidad de nódulos/mm<sup>2</sup>; posteriormente se les realiza un ataque con nital al 3% durante (7) segundos para la revelación de las fases presentes y carburos.

#### Microscopia electrónica de barrido

Se realizaron microanálisis en cada una de las fases con el fin de saber como se distribuye el molibdeno conforme se aumenta el contenido en las aleaciones, este análisis se realizó por medio de un microscopio electrónico de barrido (JEOL-6300), con sistema de microanálisis NORAN.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Efecto del Molibdeno sobre las propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas en este tipo de fundiciones en condiciones normales se clasifican como excelentes, y pueden ser aun mejoradas con la adición de elementos aleantes como el molibdeno que es un magnífico

refinador de la perlita ya que disminuye el espacio inter-laminar provocando que la dureza de la fase aumente sustancialmente, así como la resistencia a la tensión (Fras et al., 1990), lo cual se refleja claramente en los resultados obtenidos.

Para los dos tipos de aleaciones que se manejaron series A y B el aumento en la resistencia es notable, de 90448.652 PSI de la muestra A0 sin molibdeno hasta 104088.873 PSI de la muestra A6 con un contenido de 2.5% de molibdeno, igualmente en la serie B se tiene una resistencia inicial 108588.389 PSI para la muestra B0 sin molibdeno y aumenta hasta 132601.659 PSI para la muestra B6; este aumento es gradual conforme se incrementa el porcentaje de Mo. El efecto del contenido de molibdeno en ambas series sobre la dureza es también considerable; en la serie A, para la muestra A0 tuvo una dureza de 207 BH hasta 285 BH para A6 y en la serie B la dureza se comportó similarmente pues B0 tuvo una dureza de 229 HB y alcanzó una dureza máxima de 369 HB para B6, este comportamiento se atribuye al efecto refinador de la perlita, además de que se contribuye también a endurecer la fase ferrítica (Source Book on ductile iron AFS, 1977).

#### Efecto sobre la micro-estructura

Las microestructuras típicas en hierros nodulares comerciales (ASTM A-536, 1990) de acuerdo al grado pueden ser ferríticas, ferríticas-perlíticas o perlíticas con nodularidades que varían entre el 90 a 95 %, pero en el caso de hierros aleados tienden a tener comportamientos microestructurales distintos; como en las aleaciones de las serie A y B donde con cantidades pequeñas de Mo no afectan significativamente a la microestructura, sin embargo, con altos contenidos los cambios son considerables como se observa en las muestras de la serie B, que es una microestructura con bainita y austenita retenida.

#### Nodularidad en las series A y B

El análisis de la nodularidad se realizó en muestras pulidas y buscando conservar la integridad de los nódulos. La nodularidad de las aleaciones de la serie A, tuvo como mínimo un 80%, es decir, hay nódulos de grafito, en algunas muestras (figura 1) en donde la micro-estructura muestra que la distribución de los nódulos fue homogénea; sin embargo hay nódulos deformados comúnmente denominados vermiculares o cuasilaminares, este defecto se refleja más claramente en las muestras A6 (figura 2), que aun con contenidos altos de Molibdeno llegó a ser aceptable; esta baja nodularidad pudo deberse a la cantidad de cementita o carburos formados en la fase perlítica, de hasta un 20% lo que repercute en la morfología del grafito, al no contar con el suficiente carbono para crecer esferoidalmente. También se observa claramente que conforme se incrementa la cantidad de molibdeno la distribución de los nódulos se empobrece. Sin embargo, las primeras muestras A0 (figura 1) tiene una excelente nodularidad, con nódulos de grafito totalmente esféricos y una distribución de 100 nódulos/mm<sup>2</sup>. La muestra A3 (figura 3) se observa el principio del deterioro de los nódulos de grafito y donde comienza a disminuir los nódulos/mm<sup>2</sup>.

La nodularidad en la serie B fue mas estable teniendo 90 y 95% en las muestras B0 y B4 (figuras 4 y 5), con nódulos de grafito mas redondos y más grandes que en la serie A, esto es debido a que la cantidad de carbono en esta serie fue de 3.1%, también se tuvo una mejor distribución de nódulos en la matriz, sin embargo, en las muestras B5 y B6 (figuras 6-7) la nodularidad baja hasta un 80% y 85% respectivamente, aunque la distribución se mantiene, Pero hay nódulos deformes, seguramente por la cantidad de molibdeno de 2.0 y 2.5%; se sabe que este elemento es un anti-grafitizante y afecta directamente a la formación de los nódulos.

#### Fases obtenidas

El análisis de las fases presentes se realizó en muestras atacadas con nital. La serie A se nota que la muestra A0 (figura 8) presenta una micro-estructura ferrítica con una mínima cantidad de perlita y conforme se va incrementando la cantidad de molibdeno crece la fase perlítica dentro de la micro-estructura como en la muestra A6 (figura 9) aún utilizando la misma composición química excepto el molibdeno. Siendo que la

cantidad de silicio que se maneja en esta serie es muy alto y es promotor para la ferrita fue inevitable la formación de la fase perlítica. El molibdeno es un elemento promotor de perlita y carburos en altos contenidos e incrementa fuertemente la perlita como se muestra en la figura 9 de la muestra A6 teniendo contenidos por arriba del 50%. En cuanto a los carburos el contenido se va incrementando hasta un 20 % en la muestra A6, éstos siempre se encuentran depositados sobre la fase perlítica.



Fig. 1: A0 Micro-estructura pulida sin molibdeno, 100 X.

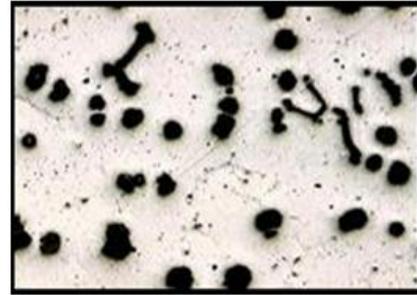


Fig. 2: A6 Micro-estructura pulida con 2.5 % de molibdeno, 100 X.

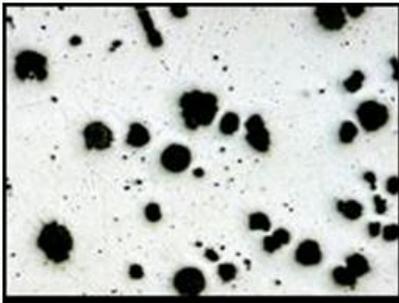


Fig. 3: A3 Micro-estructura pulida con 1.0 % molibdeno, 100 X.

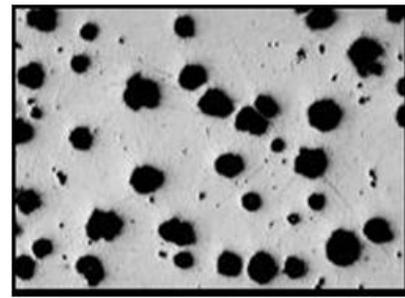


Fig. 4: B0 Micro-estructura pulida sin molibdeno, 100 X.

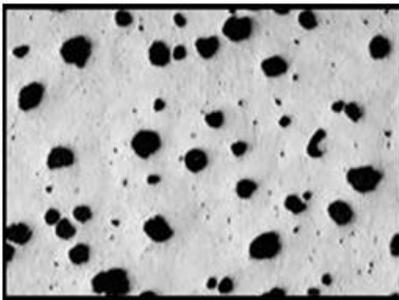


Fig. 5: B4 Micro-estructura pulida con 1.5 % molibdeno, 100 X.

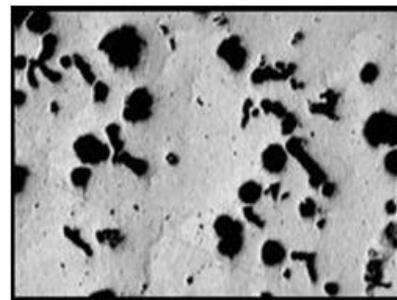


Fig. 6: B5 Micro-estructura pulida con 2.0% molibdeno, 100 X.

El caso de la serie B se trata de una fundición con grafito esferoidal ferrítico-perlítico con un 50% de perlita. En esta serie con el aumento del molibdeno se promueve la fase de perlita que se incrementa de un 50 a un 70% en la muestra B3 (figura 10). En la muestra B4 se obtiene un cambio radical de microestructura pues se aprecia que hay agujas de bainita y austenita retenida en la matriz de color blanco (figura 11), lo cual se debió a la cantidad de molibdeno que retarda la transformación de la austenita, aumentando la templabilidad (Avner, AVANCES EN CIENCIAS E INGENIERÍA (ISSN: 0718-8706)

1981), es decir, que el tiempo de enfriamiento que se estableció no fue el suficiente para poder transformar las fases de la perlita y ferrita comportándose como si se realizara un temple a las piezas coladas. Los carburos formados en esta serie se encontraron en la mayoría de las muestras, depositados en la perlita y se observan de color blanco en estas figuras.

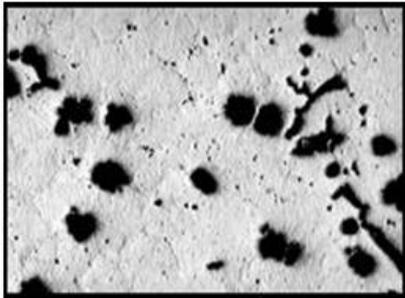


Fig. 7: B6 Micro-estructura pulida con 2.5% molibdeno, 100 X.

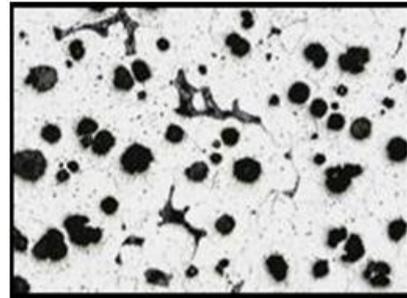


Fig. 8: A0 Micro-estructura sin molibdeno, atacada con nital al 3%, 100X.

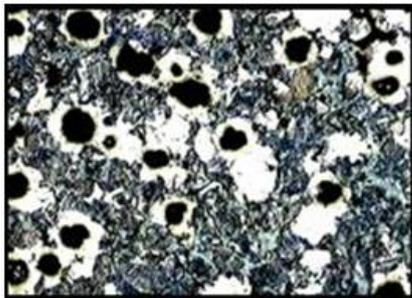


Fig. 9: A6 Micro-estructura con 2.5 % molibdeno, atacada con nital al 3%, 100X.

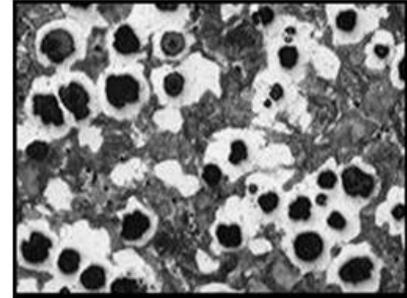


Fig. 10: B3 Micro-estructura con 1.0% molibdeno, atacada con nital al 3%, 100X.

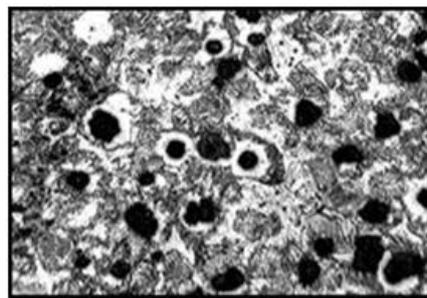


Fig. 11: B4 Micro-estructura con 1.5% molibdeno, atacada con nital al 3%, 100 X

#### Caracterización por MEB y Microanálisis

Los microanálisis obtenidos de las fase ferrítica de cada una de las series son muy similares, esta compuesta casi en su totalidad de hierro y silicio llegando a disolver algunas cantidades de carbono. En algunas de las muestras aparecen algunos pequeños picos de manganeso pero no se llega a cuantificar, en el caso del

molibdeno, aun con altos porcentajes no se llega a cuantificar totalmente, es decir, que en esta fase es mínimo el molibdeno que se disuelve como se llega a observar en la figura 12.

La perlita es una de las fases típicas de los hierros y de acuerdo a los espectros de microanálisis obtenidos esta contiene Fe, Si, Mn, Mo y C, como se sabe esta fase esta formada de laminillas intercaladas de ferrita y cementita ( $Fe_3C$ ), lo más probable es que Mo, Mn y C provengan de las laminillas de cementita, debido a que esta tiene la facilidad de disolver estos elementos, así como el Si se disuelve en la ferrita, endureciéndola. (Figura 13).

Los carburos que se encuentran en las muestras tanto de la serie A como de la serie B son los que han absorbido la mayor cantidad de molibdeno. En un trabajo publicado (<http://www.monografias.com/trabajos15/hierros-aleados/hierros-aleados.shtml>) se señala que aparte de elevar la resistencia, en el diagrama Fe-C-Mo en su variante metaestable, presentan fases de cementita aleada en la cual disuelve Molibdeno formando carburos como  $MoC$  y  $Mo_2C$ . En general este elemento disminuye la solubilidad del carbono en la fase alfa. La mayoría de los carburos encontrados en las muestras contienen arriba del 1.5% de molibdeno, siendo éstas las que presentan las mayores resistencias y durezas (Figura 14).

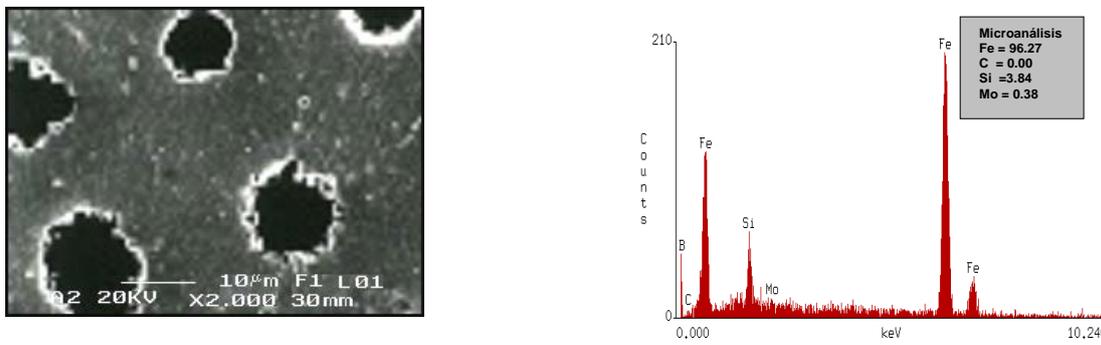


Fig. 12: A2 Microanálisis, Fase Ferrita con 0.5% molibdeno, 2000 X.

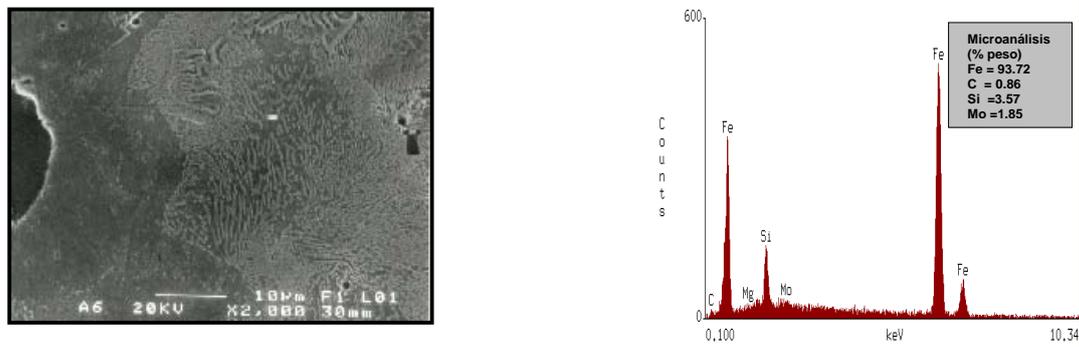


Fig. 13. A6 Microanálisis de fase perlítica con 2.5 % molibdeno, 2000 X.

Entre lo más relevante encontrado en este estudio son precipitados oscuros que se encontraron dispersos en toda la matriz tanto en la fase ferrítica como perlítica que de acuerdo a los microanálisis son ricos en Mo, posiblemente los productos formados sean  $FeMo_2$  o  $Fe_2Mo$  (Kubaschewski, 1982), y a que el primero se forma a una temperatura por abajo de  $950^\circ$  y el segundo a  $1370^\circ$ . Estos tienen una forma semiesférica y posiblemente adquirieron esta morfología debido al efecto del Mg que se adiciona en el tratamiento de nodularización. Estos precipitados se encuentran básicamente en las muestras que contienen arriba del 0.5% de Mo, para ambas series (Figura 15).

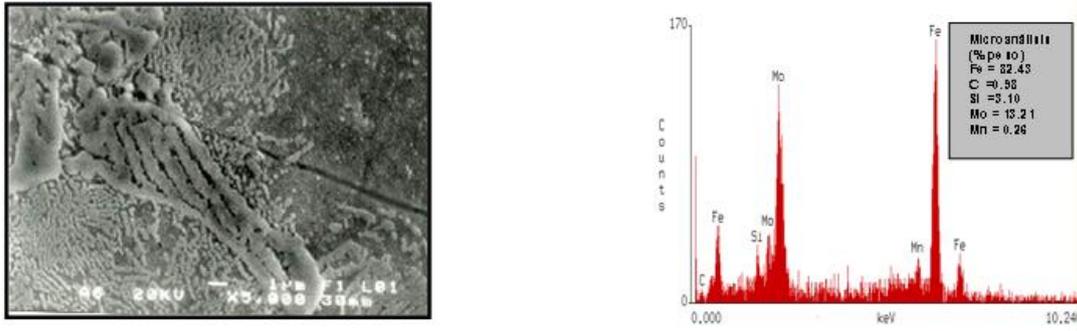


Fig.14: A6 Microanálisis de fase carburos con 2.5 % molibdeno, 5000 X.

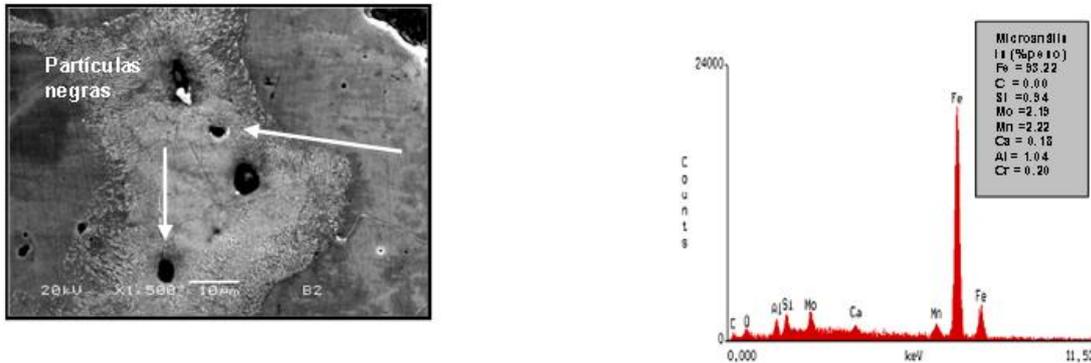


Fig. 15: B2 Microanálisis de partículas negras con 0.5 % molibdeno, 1500 X.

**CONCLUSIONES**

La adición de molibdeno en aleaciones de hierro nodular permite aumentar las propiedades mecánicas como la dureza teniendo presente que con altos contenidos, se llega a afectar a la distribución y la morfología de los nódulos de grafito, provocando la formación de nódulos de grafito deformes cuasi-laminares comúnmente denominados vermiculares. Asimismo, promueve la fase perlítica en cantidades mayores del 1% Mo y arriba de este porcentaje se llega a formar bainita y austenita como es el caso de la serie B. En cantidades arriba de 1.5% de Mo, la presencia de carburos depositados sobre la fase perlítica son visibles, estos van aumentando y engrosando conforme los contenidos de molibdeno son mayores. Estos llegan a disolver una importante cantidad de molibdeno.

La fase ferrítica disuelve una cantidad mínima de molibdeno de acuerdo al microanálisis realizado, la fase perlítica tiende a disolver un poco mas de molibdeno debido a las laminillas de cementita de la que esta compuesta; mientras que la mayor parte del molibdeno pasan a formar precipitados, partículas negras que se observaron en MEB y son las que contienen grandes porcentajes de molibdeno junto con hierro.

La serie A son aleaciones que pueden ser utilizadas para la fabricación de piezas principalmente automotrices aun con contenidos 2.5% Mo por las buenas propiedades que reflejaron, hasta contenidos de 1.5% para piezas que sufren cargas cíclicas y arriba de este contenido para piezas que son sometidas a altas temperaturas, por la cantidad de carburos que contienen.

Las aleaciones de la serie B pueden tener una aplicación en piezas de maquinaria pesada con contenidos hasta de 1.0% por tener microestructura ferrítica-perlíticas, con contenidos arriba del 1.0% su aplicación puede ser útil donde es necesaria la resistencia a la abrasión, debido a las matrices y principalmente a la distribución de carburos que presentan.

Se comprobó que la metodología para obtener la aleación era adecuada ya que se observó la formación y la morfología de los nódulos que era la característica de interés buscada.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo desean manifestar su agradecimiento a sus instituciones de formación y participantes Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) al Instituto Politécnico Nacional (IPN-ESIQIE) y a la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-AZC).

## REFERENCIAS

Archer, R.S.; Briggs, J.Z.; Loeb, C.M. (1948); "Molybdenum Steel Iron Alloys", Climax Molybdenum Co, New York, U.S.A., 391p.

ASTM E8M (1990); "Standard Test Method of Tension Testing of Metallic Materials", Annual Book of ASTM, USA.

ASTM E10 –78 (1980); "Standard Specification for Brinell Hardness of Metallic Materials", Annual Book of ASTM, USA, pp. 226-231.

ASTM A-536 (1990); "Standard Specification for Ductile Iron Casting" Annual Book of ASTM, USA, pp 297-301.

Avner, S.H. (1981); "Introducción a la metalurgia Física" ed. Mc Graw Hill 2da. Edición, pp. 453.

Cuttino, J.F., Andrews, J.; Piwonka, T. (1999); *Developments In Thin Wall Iron Casting Technology*, AFS Transaction Cast Iron: 107, 363- 371.

Crews, D.L.; Carlson, R. (1974); "Ductile iron Molten Metal Processing", A publication of the American Foundrymen's Society., pp 31.

Ductile Iron Society (1998); "*Ductile iron Data for Design Engineers*" "Physical Properties" Internet. [www.ductile.org/didata/default.htm](http://www.ductile.org/didata/default.htm), Published by: Rio Tinto Iron & Titanium, Inc.; Quebec, Canada, H3A 1G1

Fras, E., Serrano, J.L.; Bustos A. (1990); "Fundiciones de Hierro", Ed. ILAFA, pp 287.

Image-Pro Plus (1995); Version 3.0 for Windows Reference Guide, Media Cybernetics, Silver Spring.

Javaid, A.; Thomson, J.; Sahoo, M.; Davis, K. (1999); *Factors Affecting the formation of Carbides in Thin Wall Ductile Iron Casting*, AFS Transaction Cast Iron: 107, 441-455.

Kubaschewski, O. (1982); "Iron-Binary Phase Diagrams", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1982, Pp 64.

Source Book on ductile iron AFS (1977); "Influence of some residual elements and their neutralization in magnesium-treated nodular cast iron", Metals Park. Ohio, pp 72-73.