



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

*Efecto del Ti en la morfología del Cg en una fundición  
vermicular*

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA:**

**ANTONIO DE JESÚS RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX**

**2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: M. en M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco**

**VOCAL:**                 **Profesor: Dr. José Alejandro García Hinojosa**

**SECRETARIO:**       **Profesor: M. en M. Arturo Alejandro Sánchez Santiago**

**1er. SUPLENTE:**      **Profesor: Dr. Adrián Manuel Amaro Villeda**

**2° SUPLENTE:**       **Profesor: M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo**

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIO DE FUNDICIÓN, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA, FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO D, CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM.**

## **ASESOR DEL TEMA:**

**M. EN M. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO** \_\_\_\_\_

## **SUPERVISOR TÉCNICO (Si lo hay):**

**M. EN I. AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO** \_\_\_\_\_

## **SUSTENTANTE (S):**

**ANTONIO DE JESÚS RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ** \_\_\_\_\_

# CONTENIDO

Introducción .....	1
Resumen .....	1
Justificación .....	1
Hipótesis .....	5
Objetivos .....	5
Capítulo 1. Marco teórico .....	7
1.1 Tipos de hierros colados .....	7
1.1.1 Fundición gris .....	7
1.1.2 Fundición dúctil (nodular) .....	8
1.1.3 Fundición vermicular .....	9
1.2 Tratamientos al metal líquido .....	15
1.2.1 Inoculación .....	15
1.2.2 Nodularización .....	16
1.2.3 Método Sándwich .....	17
1.3 Carbono equivalente (C.E.) .....	18
1.4 Elementos de aleación .....	19
1.4.1 Carbono .....	19
1.4.2 Silicio .....	19
1.4.3 Azufre .....	19
1.4.4 Manganeso .....	20
1.4.5 Fósforo .....	20
1.4.6 Magnesio .....	21
1.4.7 Efecto del titanio .....	22
1.5 Dureza .....	23

1.5.1 Prueba de dureza Brinell.....	23
1.5.2 Prueba de dureza Vickers .....	24
1.6 Antecedentes.....	25
1.6.1 Tipo de carbono grafito .....	25
1.6.2 Nodularidad .....	27
1.6.3 Tamaño de nódulo .....	34
1.6.4 Conteo de nódulos .....	35
1.6.5 Titanio.....	37
Capítulo 2. Desarrollo experimental .....	39
2.1 Metodología.....	39
2.2 Procedimiento experimental .....	39
2.3 Técnica de fusión .....	42
2.4 Preparación metalográfica .....	43
2.5 Pruebas de dureza.....	46
2.6 Equipo .....	46
Capítulo 3. Resultados.....	49
Capítulo 4. Análisis de resultados .....	56
4.1 Colada 1 .....	56
4.2 Colada 2 .....	57
4.3 Colada 3 .....	58
4.4 Colada 4 .....	58
Capítulo 5. Conclusiones.....	61
Referencias.....	62
Anexos.....	64
Anexo 1 Cálculos de Balance de carga y ajuste de carga .....	64

Anexo 2 Composiciones de chatarras y materiales	
de ajuste de carga .....	72
Chatarras.....	72
Materiales de ajuste de carga utilizados .....	72

## INTRODUCCIÓN

### RESUMEN

La fundición vermicular o de grafito compacto (Compacted Graphite Iron por sus siglas en ingles CGI) es un material de reciente aplicación ingenieril. Se elabora de manera similar (técnicas y procesos) a un hierro nodular, pero con diferentes niveles de Mg residual que comprende un rango aproximadamente de 0.007% a 0.013%. En la práctica el rango es más pequeño que 0.006% de Mg residual debido a que el Mg activo decae con una rapidez de 0.001% cada 5 minutos. Esta rapidez obliga a usar cantidades mayores de FeSiMg para lograr el Mg residual adecuado. Lo anterior conduce a la incertidumbre de lograr la formación de grafito esferoidal en lugar del grafito compacto.

Actualmente la producción de CGI se facilita por la adición de Ti en niveles **de 0.10% a 0.15%**. La adición de Ti "envenena" el crecimiento de grafito permitiendo así la producción de hierro con grafito compacto a altos contenidos de Mg residual. Las altas cantidades de Mg aseguran que no crecerán las hojuelas de grafito y el Ti suprimirá el crecimiento de grafito esferoidal.

### JUSTIFICACIÓN

El grafito vermicular o grafito compacto no es ninguna novedad para la industria de la fundición de hierro colado con grafito esferoidal. Se encuentra ocasionalmente debido a un tratamiento al metal líquido y, por tanto, con un contenido de azufre relativamente alto. [1]

Aunque se considera rechazable desde el punto de vista metalúrgico, la fundición con grafito vermicular presenta algunas características deseables. Con una resistencia relativamente alta y cierto grado de ductilidad, es sin lugar a duda superior a la fundición gris en lo que se refiere a dichas características. Al mismo tiempo, su capacidad de

amortiguamiento, conductividad calorífica, maquinabilidad y otras propiedades no son muy inferiores. [1]

Los esfuerzos por producir fundiciones de grafito vermicular han sido muchos, en parte porque no se ha logrado de un modo regular (por ejemplo, a través del tratamiento con magnesio) y en parte porque la forma del grafito depende mucho de la velocidad de enfriamiento y solidificación. [1]

Los autores de una investigación conjunta británico-estadounidense afirman haber desarrollado un proceso para la producción regular de fundición vermicular. Según dichos autores, la gama de contenidos de magnesio dentro de la cual se forma el grafito vermicular está dentro de los límites prácticos de control. [1]

Las condiciones para su producción según tales autores son las siguientes:

- a) Un contenido relativamente bajo de P (para beneficiarse plenamente de las propiedades deseables).
- b) Un contenido de S en el hierro base de 0.03%  $\pm$ 0.015%.
- c) Tratamiento con 1.0 a 1.35% de una aleación patentada (nombre comercial: Foote CG) cuya composición nominal se muestra en la tabla 1, así como una comparación del efecto entre una aleación MgFeSi y la aleación Foote CG figura 1.

*Tabla 1. Composición química de la aleación Foote CG*

	% Mg	% Ti	% Ce	% Ca	% Al	% Si	% Fe
Foote CG	4.0-5.0	8.5-10.5	0.25-0.35	4.0-5.5	1.0-1.5	48-52	Resto

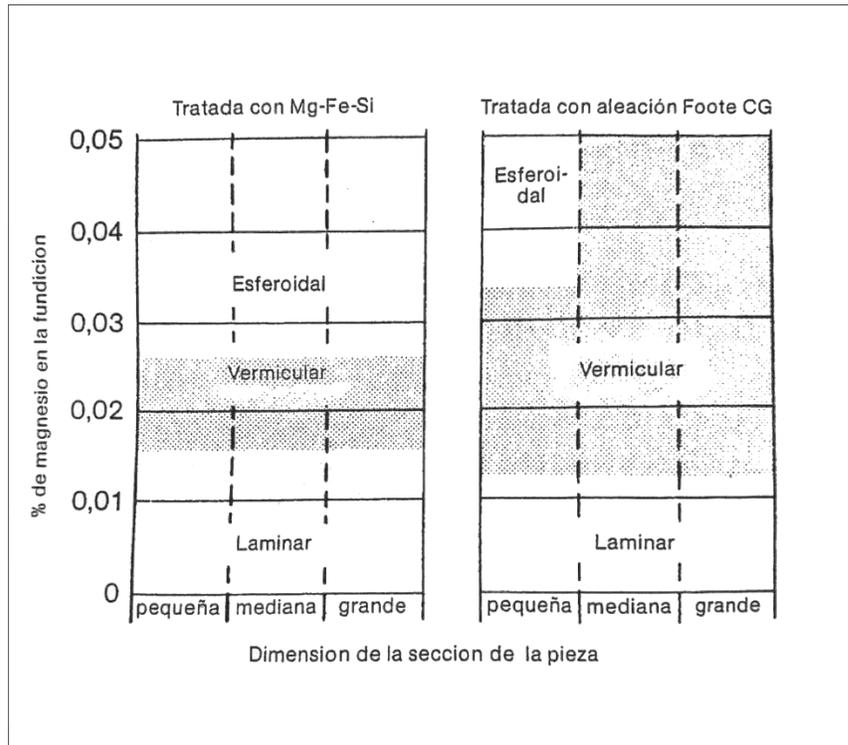


Figura 1. Comparación entre las aleaciones MgFeSi y <<CG>> (Mg-Ti-Ce-Ca) con relación a las variaciones permisibles en el contenido de Mg de una fundición con grafito vermicular. [1]

Considerando lo anterior, se tomó una referencia con respecto a la aleación Foote CG en la cual el Si y el Ca sirven como generadores de centros de nucleación, el Mg ayuda para la formación del esferoide, y el Ti para la deformación del grafito, así poder obtener un vermículo.

Por lo que el Ti facilita la obtención de un grafito compacto sin la necesidad de controlar variables, como lo son la velocidad de enfriamiento, la solidificación, la temperatura de colada y amplía el rango de obtención entre las diferentes dimensiones que se pueden encontrar en las piezas de colada.

Se han realizado experimentaciones en las cuales está relacionada una ferroaleación compuesta con Ti, esta es utilizada para facilitar la realización de una fundición vermicular.

En un rango de adición de Ti se observa la modificación de la estructura de carbono grafito, la formación esferoidal deja de presentarse y empieza a regir la formación vermicular conforme aumenta el contenido de Ti. Como se muestra en la tabla 2 y en la figura 2, el rango en los cuales se obtiene un hierro vermicular es de 0.07 a 0.133 % Ti.

A su vez el Mg en buena cantidad aumenta la densidad del vermículo y la facilidad para que el Ti actué como antigrafitizante y deforme al esferoide.

Tabla 2. Composiciones químicas de fusiones de CG con Ti. [2]

Heat no.	C, wt.%	Si, wt.%	Mn, wt.%	P, wt.%	S, wt.%	Cr, wt.%	Ni, wt.%	Cu, wt.%	V, wt.%	Al, wt.%	Ti, wt.%	Mg, wt.%
I	3.63	2.47	0.03	0.026	0.017	0.03	0.004	0.045	0.007	0.010	0.009	0.010
II	3.66	2.55	0.04	0.027	0.020	0.03	0.005	0.044	0.011	0.010	0.070	0.005
III	3.65	2.53	0.05	0.030	0.010	0.03	0.030	0.010	0.010	0.010	0.095	0.020
IV	3.60	2.55	0.05	0.023	0.018	0.04	0.040	0.060	0.010	0.021	0.133	0.021

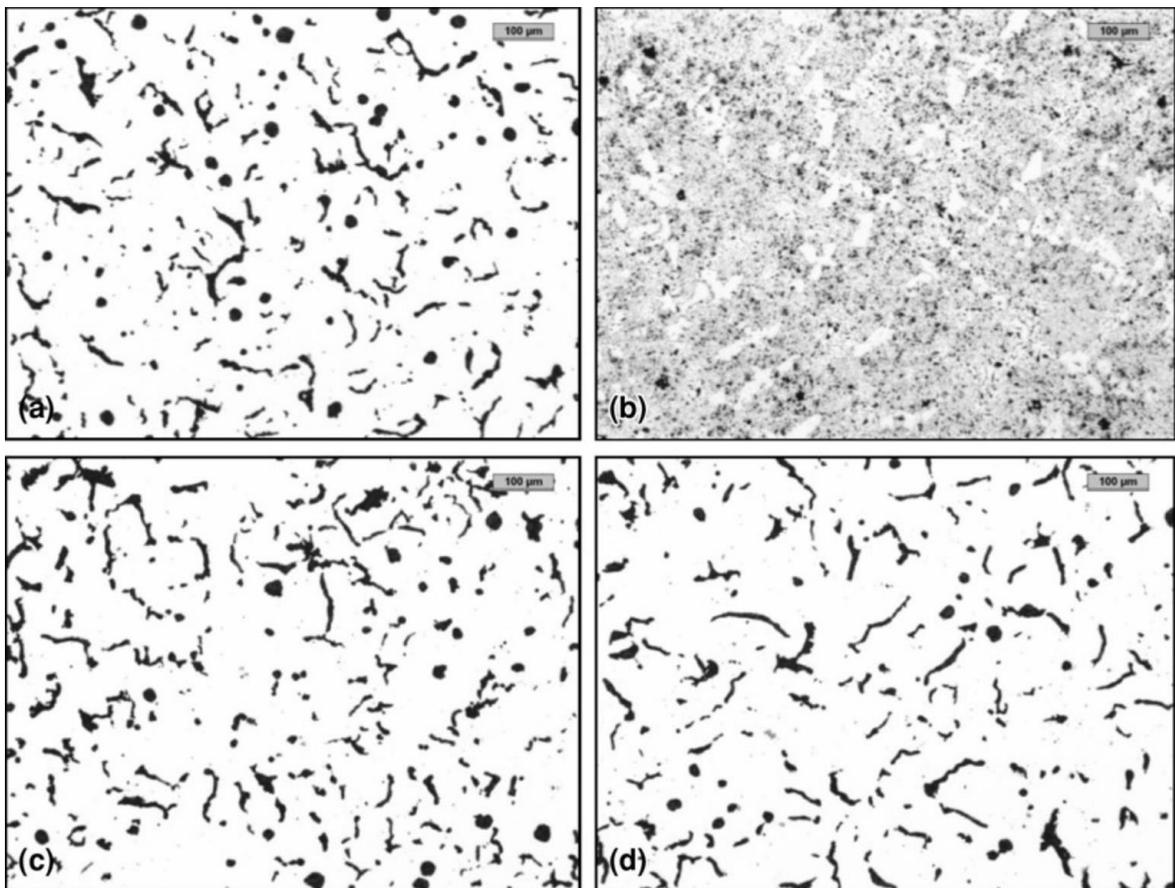


Figura 2. Microestructuras en piezas (placas de 13 mm): (a) Corrida no. I, (b) Corrida no. II, (c) Corrida no. III, (d) Corrida no. IV. 100X. Sin ataque. [2] microestructura grafito compacto.

## HIPÓTESIS

La adición de Ti a un hierro vermicular modificará el crecimiento del grafito permitiendo de esta forma la producción segura de hierro con grafito compacto (CGI) a altos niveles de Mg.

## OBJETIVO

Determinar el efecto del Ti y su contenido sobre la morfología del grafito compacto.

# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

El *hierro colado*, es una aleación de hierro que contiene de 2.1% a 4% de carbono, de 1% a 3% de silicio, 0.1% a 1.0% de manganeso, 0.01% a 0.25 de azufre y 0.01% a 1.0% de fósforo. Su composición lo hace muy apropiado como aleación para fundición. En realidad, el peso en toneladas de los artículos de hierro colado es varias veces el de todas las demás piezas de metales fundidos combinados (con excepción de los lingotes que se fabrican durante la producción de acero y que posteriormente son rodados en forma de barras, láminas y otras formas similares). [3] El peso total en toneladas del hierro colado ocupa el segundo lugar, pero sólo con respecto al acero entre todos los metales.

Entre los diversos tipos de hierro colado, el más importante es el gris. Otros tipos incluyen el hierro dúctil, la fundición blanca, fundición vermicular o de grafito compacto y fundición dúctil o nodular con carburos precipitados. [3]

### 1.1 TIPOS DE HIERROS COLADOS

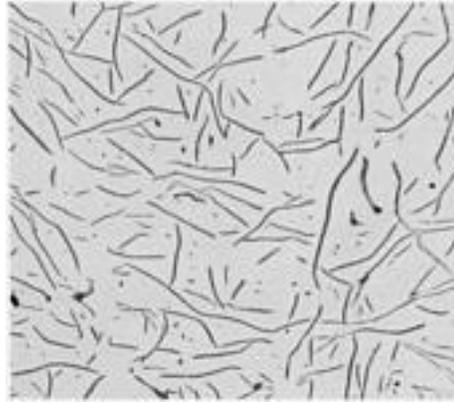
#### 1.1.1 Fundición gris

Esta fundición presenta al grafito precipitado en forma de hojuelas.

La fundición gris contiene muchos agrupamientos o celdas eutécticas de grafito en hojuelas interconectadas figura 3. El punto en el cual se conectan estas hojuelas es el núcleo original del grafito. La inoculación ayuda a producir celdas eutécticas más pequeñas mejorando así la resistencia. [4]



(a)



(b)

Figura 3. (a) Morfología 3D de las hojuelas de grafito y (b) microfotografía de hojuelas con grafito en fundido gris (100X). [4,5]

### 1.1.2 Fundición dúctil (nodular)

Contiene partículas en forma de esferoides de grafito, generadas durante la solidificación.

El hierro fundido dúctil se produce tratando con magnesio un hierro líquido, con relativamente alto carbono equivalente; esto hace que durante la solidificación crezca grafito esferoidal. [4]

Para producir este metal se requiere:

- Nodularización. El magnesio, que se agrega en la etapa de nodularización elimina cualquier azufre y oxígeno que todavía quede en el metal líquido y deja un residuo de 0.03 %Mg, que causa el crecimiento del grafito esferoidal. El magnesio se agrega cerca de 1500°C. Desafortunadamente, este elemento se vaporiza a los 1150°C. Muchas aleaciones nodulizantes contienen magnesio diluido con ferrosilicio para reducir la violencia de la reacción y permitir recuperaciones más altas de Mg. [4]

- Inoculación. El magnesio por sí mismo favorece la formación de carburos de hierro, y hace que durante la solidificación se forme fundición blanca. En consecuencia, después de la nodularización se debe inocular el hierro con aleaciones FeSi inoculantes. El efecto de la inoculación también se atenúa con el tiempo. [4]

La figura 4 muestra tres tipos de hierros dúctiles.

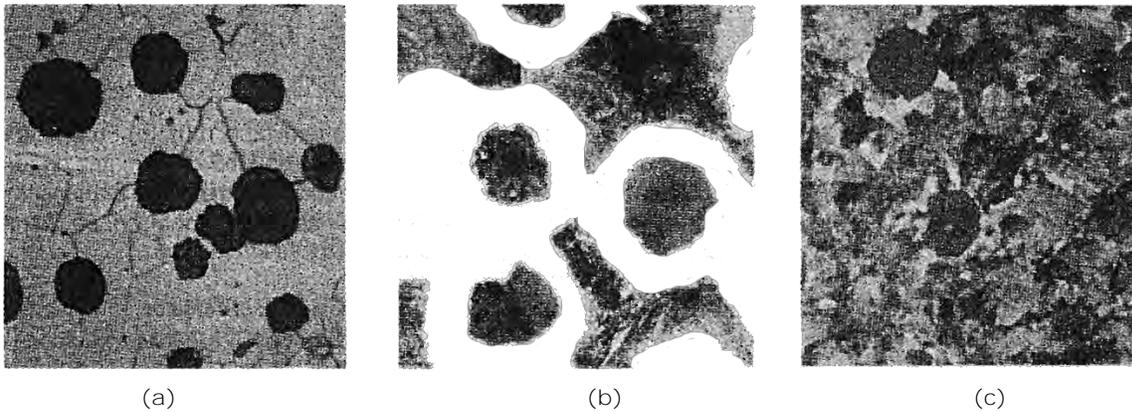


Figura 4. (a) Fundición dúctil recocida con una matriz de ferrita (250X). (b) Hierro dúctil fundido con una matriz de ferrita (blanca) y perlita (250X). (c) Hierro dúctil normalizado con una matriz de perlita (250X). [4]

### 1.1.3 Fundición vermicular

Tiene grafito redondeado, pero interconectado (en forma vermicular) formado durante la solidificación.

En esta fundición la forma del grafito es intermedia entre grafito en hojuelas y esferoidal, con numerosas barras redondeadas interconectadas al núcleo de la celda eutéctica figura 5[4]. Este grafito, que se conoce como grafito vermicular ó grafito compacto, también se forma cuando el Mg es poco en cantidad para formar un hierro dúctil.

El grafito compacto permite resistencias mecánicas y ductilidad que exceden a las de la fundición gris, permitiendo que el metal conserve una buena conductividad térmica y propiedades de absorción de la vibración.

El tratamiento para la fundición de grafito compacto es similar a la de la fundición dúctil, sin embargo, durante la nodularización sólo se percibe un residual de 0.015% Mg. [4,15] La figura 5 muestra la microestructura de un hierro vermicular.

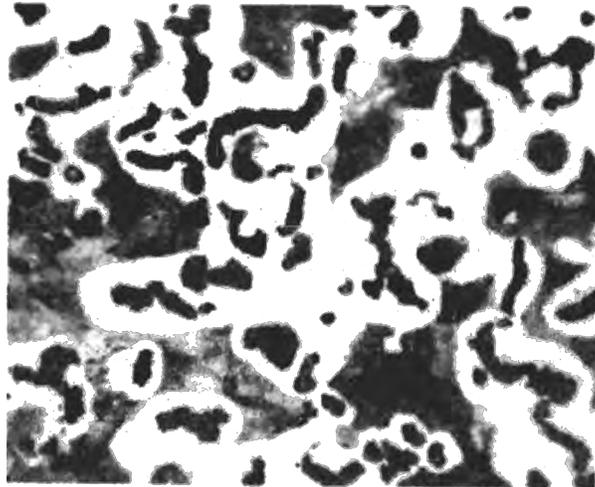


Figura 5. Estructura de la fundición de grafito compacto, con una matriz de ferrita (blanca) y de perlita (gris) y vermiculos de grafito (negro), (250X). [4]

Para observar de mejor manera la diferencia que existe en la morfología del carbono grafito en la figura 6 se muestran los tipos de grafito en 2D y en la figura 7 en 3D.

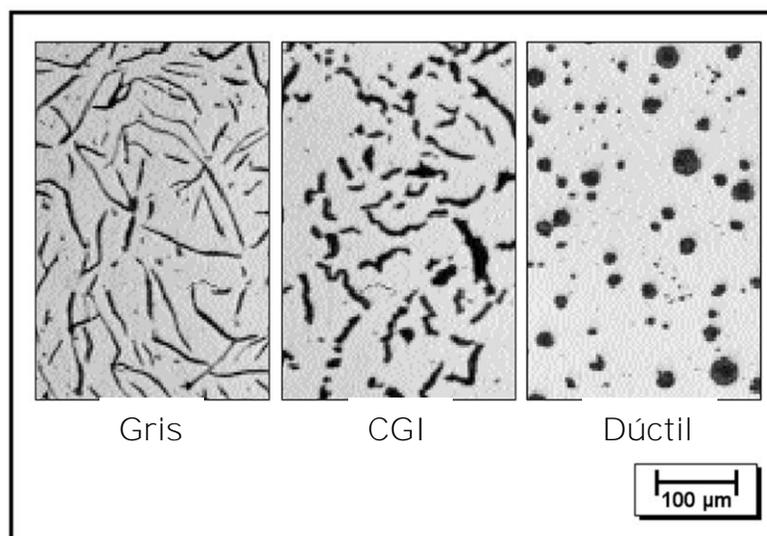


Figura 6. Comparación del tipo de grafito que poseen un hierro gris, un hierro vermicular y un hierro dúctil. [6]

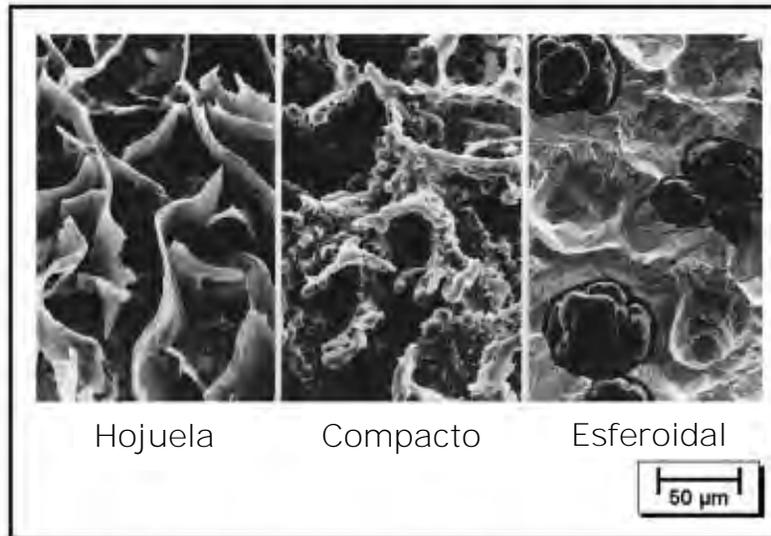


Figura 7. Comparación del tipo de grafito observado con microscopio electrónico de barrido, (hojuela, compacto, esferoidal). [6]

La tabla 3 muestra las composiciones de diferentes tipos de hierros colados, las durezas y el tipo de grafito, así como la matriz que poseen.

Los rangos de composición química del hierro gris y del hierro dúctil se muestran en la tabla 4.

Algunas propiedades mecánicas que poseen diversos tipos de hierros colados se muestran comparativamente en la tabla 5.

Los usos de los hierros presentados anteriormente se encuentran de manera comparativa en la tabla 6.

Tabla 3. Microestructura y composición química. [6]

Nombre del material	Tipo de Grafito (%)		Perlita (%)	BHN	Composición química (%)													
	Hojuela	CGI			Esferoide	C	Si	Mg	Cu	Sn	Mn	S	Cr					
Gris	100	0	0	193	3.18	2.18	--	0.19	0.006	0.74	0.086	0.14						
Hojuela + CGI	40-60	40-60	<5	>90	207	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
CGI	0	>95	<5	70-80	220	3.73	2.25	0.011	0.47	0.033	0.41	0.015	0.03					
50-Nod	0	45-55	45-55	>90	235	3.74	2.35	0.026	0.90	0.026	0.41	0.012	0.03					
85-Nod	0	<20	>80	>90	245	3.68	2.20	0.040	0.94	0.10	0.40	0.010	0.03					

Tabla 4. Composición química de hierros colados. [7]

		Composición, %										
Tipo	Valor	TC	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ce	Mg
Hierro Gris	Max.	3.25	0.50	1.80	0.05	0.05	0.05	0.15	0.12	0.15	--	--
	Min.	3.50	0.90	2.30	0.45	0.20	0.10	0.40	máx.	máx.	--	--
Hierro Dúctil	Max.	3.60	0.15	1.80	0.03	0.05	0.01	0.15	0.03	0.002	0.005	0.03
	Min.	3.80	1.00	2.80	0.07	0.20	0.10	1.00	máx.	máx.	0.20	0.06

Tabla 5. Algunas propiedades mecánicas de los hierros colados. [4]

	Resistencia mecánica a la tensión (psi)	Esfuerzo de cedencia (psi)	% E*	Notas
<b>Fundiciones grises:</b>				
Clase 20	12000-40000	--	--	
Clase 40	28000-54000	--	--	
Clase 60	44000-66000	--	--	
<b>Fundiciones dúctiles:</b>				
60-40-18	60000	40000	18	Recocido
65-45-12	65000	45000	12	Ferrítico de colada
80-55-06	80000	55000	6	Perlítico de colada
100-70-03	100000	70000	3	Normalizado
120-90-02	120000	90000	2	Templado y revenido
<b>Fundiciones de grafito compacto:</b>				
Baja resistencia	40000	28000	5	90% Ferrítico
Alta resistencia	65000	55000	1	80% Perlítico

\*% de elongación

Tabla 6. Aplicaciones de los diversos hierros colados. [7, 8]

Material	Aplicaciones
Fundición gris	Bloque de motores, tambores de freno, cilindros y pistones de motores.
Fundición dúctil (esferoidal)	Válvulas y cuerpos de bombas, engranajes de alta resistencia, engranajes y rodillos.
Fundición CGI	Discos y tambores de frenos, cabezas de motor y los bloques de motores diésel.

Hierro de grafito compacto. En esta estructura, el grafito se encuentra en la forma de agregados cortos, gruesos e interconectados, que tienen superficies onduladas y extremidades redondas. Las propiedades mecánicas y físicas de este hierro fundido son intermedias entre las del hierro fundido con grafito en hojuelas y del hierro fundido con grafito esferoidal. [2]

Hierro grafito compacto (CGI) también conocido como fundición vermicular es una aleación con características atractivas que se utiliza en la industria automotriz para los discos de freno y tambores de freno, colectores de escape, cabezas de motor y los bloques de motores diesel, que se fabrican tradicionalmente de fundición gris. [2, 13, 14]

El CGI permite la fabricación de motores diesel con una mejor combustión y rendimiento. CGI se puede utilizar para las piezas ligeras fundidas con buenas propiedades mecánicas y el rendimiento, especialmente con una buena capacidad de amortiguación de las vibraciones, buena resistencia térmica. [13, 14]

## 1.2 TRATAMIENTOS AL METAL LÍQUIDO

Para obtener el CGI se usa una técnica de fusión que involucra dos aspectos importantes:

- a) Inoculación
- b) Nodularización

### *1.2.1 Inoculación*

El tratamiento del metal fundido conocido como inoculación, consiste en adicionar un agente inoculante, que permite crear muchos sitios de nucleación dentro del metal fundido, disminuyendo la formación de carburos (chill) y favoreciendo la precipitación de grafito libre.

La inoculación se realiza con compuestos comerciales citados en la tabla 7.

Inoculación en el molde es la adición de inoculante en forma tardía. En la inoculación en el molde, el inoculante se introduce en el recipiente de colada, o directamente en el sistema de llenado del molde. Por consiguiente, la disolución se produce en el tiempo de vertido. Inoculantes de partícula fina deben utilizarse para evitar aglomerados de inoculante, porque se podría correr el riesgo de tener partículas no disueltas con consecuencias negativas para la estructura del CGI.

### 1.2.2 Nodularización

El grafito esferoidal o vermicular es obtenido mediante la adición de elementos nodulizantes, que evitan que el S y el O cambien la forma de crecimiento del grafito. Los nodulizantes más comunes son, Mg, Ce, Ca y tierras raras. Lo más utilizado es el Mg, a través de una aleación de FeSiMg. [1] Algunos nodulizantes usados actualmente se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Ejemplos de inoculantes y nodulizantes utilizados en la industria. [16, 17]

Inoculantes	Nodulizantes
<b>Elkem Barinoc ®™</b> (Si 64-70%, Ca 1.0-2.0%, Ba 2.0-3.0%, Al 0.8-1.5%)	Ni aleado con Mg del 14 al 16%
<b>Elkem Superseed 75 ®™</b> (Si 73-78%, Ca 0.1% máx., Sr 0.6-1.0%, Al 0.5% máx.)	Ferrosilicio con contenido del 3 al 10% de Mg
<b>Elkem Ultraseed ®™</b> (Si 70-76%, Ca 0.75-1.25%, Ce 1.5-2.0%, Al 0.75-1.25%)	Mg puro

Uno de los procesos más empleados para la nodularización es el método sándwich.

### 1.2.3 Método Sándwich

Se deriva del método de adición simple, para evitar la pérdida de Mg este se coloca en un pequeño desnivel dentro de la olla. Consiste en cubrir la aleación madre con pequeños trozos de acero (alrededor del 2% del peso del hierro que ha de ser tratado) figura 8. Dicha cobertura retrasa el comienzo de la reacción (la vaporización y calcinación de los elementos esferoidizantes) y que reduce localmente la temperatura del líquido en torno a la aleación madre. La eficiencia del Mg es del 45% [1].

La recuperación de magnesio depende en gran medida de la temperatura de tratamiento, como puede verse en la figura 9.

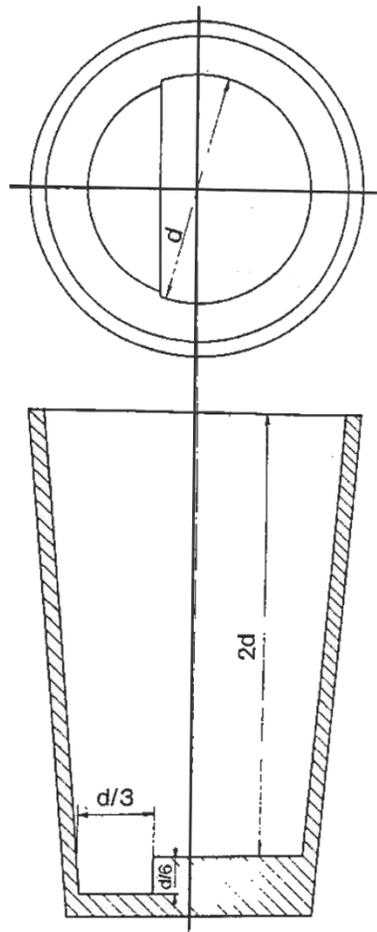


Figura 8. Relación diámetro/altura de una olla adecuada para el método sándwich. [1]

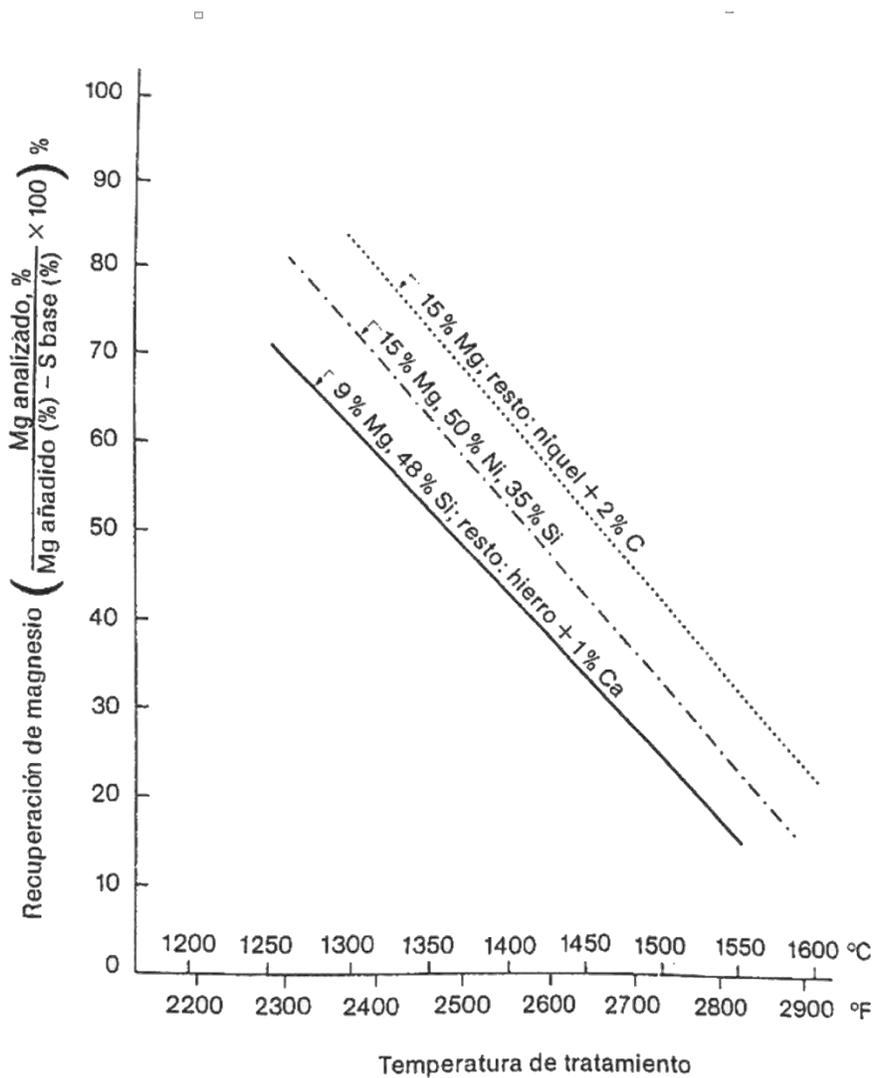


Figura 9. Valores característicos de recuperación de Mg con el aumento de la temperatura de tratamiento. [1]

### 1.3 CARBONO EQUIVALENTE (C.E.)

Expresa cuantitativamente la sustitución que presenta el carbono por parte del Si y del P y permite referirse a una fundición sobre el diagrama binario Fe-C para relacionarlo con el eutéctico binario (C.E. = 4.3%).

Para obtener el carbono equivalente se toma en cuenta la siguiente ecuación:

$$C.E. = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (1)$$

## 1.4 ELEMENTOS DE ALEACIÓN

### 1.4.1 Carbono

Es un grafitizante, baja las propiedades mecánicas, va de 2.5 a 4 % en hierros colados, dependiendo del porcentaje de carbono equivalente se puede determinar si es una fundición hipoeutéctica, eutéctica y hipereutéctica, reduce la tendencia al blanqueado, mejora la colabilidad (fluidez) y la exactitud en las dimensiones de la pieza obtenida.

### 1.4.2 Silicio

Incrementa la fluidez y tiene efecto sobre la solidificación de aleación fundida. La composición eutéctica se mueve a la izquierda (aproximadamente 0.30% de carbono por cada 1% de silicio), lo cual hace que se alcance más fácil la temperatura a la cual la aleación empieza a solidificar. Conforme aumenta el contenido de silicio, disminuye el área del campo de austenita, el contenido de carbono eutectoide decrece y la transformación eutectoide ocurre sobre un intervalo que se amplía. [9]

El silicio es un grafitizante y si no está contrabalanceado por los elementos de promoción de carburos, favorece la solidificación de acuerdo con el sistema estable hierro-grafito. Por ende, durante la solidificación en presencia de silicio, el carbono se precipita como grafito primario en forma de hojuelas, esferoides o vermículos. Una vez que se ha constituido el grafito primario, su forma no puede alterarse por ningún método. Este grafito precipitado rompe la continuidad de la matriz. [9]

### 1.4.3 Azufre

El efecto del azufre sobre la forma del carbono es el contrario que el del silicio. A mayor contenido de azufre, mayor será la cantidad de carbono combinado, tendiendo de esta manera a producir un hierro blanco, duro y frágil. [9]

A parte de producir carbono combinado, el azufre tiende a reaccionar con el hierro para formar sulfuro de hierro ( $\text{FeS}$ ). Este compuesto de baja fusión presenta delgadas capas interdendríticas y aumenta la posibilidad de que haya fisuras a altas temperaturas (fragilidad al rojo). El azufre en grandes cantidades tiende a reducir la fluidez y suele causar cavidades (aire atrapado) en las piezas fundidas. [9]

Afortunadamente, el manganeso tiene mayor afinidad para el azufre que el hierro, formando sulfuro de manganeso ( $\text{MnS}$ ). Las partículas de sulfuro de manganeso aparecen como pequeñas inclusiones ampliamente dispersadas, las cuales no perjudican las propiedades de la fundición. Es práctica común utilizar manganeso que contenga dos o tres veces su contenido de azufre. [9]

#### 1.4.4 Manganeso

Es un estabilizador de carburo que tiende a incrementar la cantidad de carbono combinado, pero es mucho menos potente que el azufre. Si el manganeso está presente en la cantidad correcta para formar sulfuro de manganeso, su efecto será reducir la proporción de carbono combinado eliminando el efecto del azufre. El exceso de manganeso tiene poco efecto en la solidificación y solo retarda débilmente la grafitización primaria; sin embargo, sobre la grafitización eutectoide, el manganeso es un fuerte estabilizador de carburos. [9]

#### 1.4.5 Fósforo

La mayor parte del fósforo se combina con el hierro para formar fosfuro de hierro ( $\text{Fe}_3\text{P}$ ), el cual constituye un eutéctico ternario con la cementita y la austenita (perlita a temperatura ambiente). El eutéctico primario se conoce como *esteadita* y es una característica normal en la microestructura de los hierros fundidos. La esteadita es relativamente frágil y con alto contenido de fósforo, en tanto que las áreas de esteadita

tienden a formar una red continua, delineando las dendritas primarias de austenita. La condición reduce la tenacidad y hace frágil al hierro fundido, de manera que el contenido de fósforo debe controlarse cuidadosamente para obtener propiedades mecánicas óptimas. [9]

El fósforo incrementa la fluidez y amplía el intervalo de solidificación eutéctica, incrementando así la grafitización primaria cuando el contenido de silicio es alto y el de fósforo bajo; por ende, es útil en piezas fundidas muy delgadas en las que un hierro menos fluido puede no tomar una impresión perfecta del molde. [9]

#### 1.4.6 Magnesio

Es el esferoidizante que más se utiliza.

El contenido mínimo de magnesio necesario en la pieza, para esferoidizar el grafito, puede ser tan bajo como 0.01% o sobrepasar el 0.02%. Si no se añade más esferoidizante que el magnesio, su concentración no debe ser menor de 0.02%. Las adiciones coincidentes de cerio, otras tierras raras o calcio permiten reducir el nivel mínimo de magnesio a 0.01%, pero de este valor no se puede pasar. [1]

Al especificar la cantidad mínima de magnesio necesaria para el metal líquido, surge una dificultad debido a los errores derivados de la técnica de muestreo. Una gran cantidad de inclusiones de MgS en la muestra indicaría un nivel de Mg más alto que el descrito antes, porque el análisis no distingue entre Mg y MgS. [1]

Existen numerosas fórmulas para calcular la cantidad de magnesio que ha de añadirse. De todas ellas, la más simple y segura es la siguiente:

$$Mg \text{ que hay que añadir}(\%) = \frac{\text{Contenido de Mg deseado}(\%)}{\text{Recuperación de Mg}(\%) \times 0.01} + S \text{ de base}(\%) \quad (2)$$

#### 1.4.7 Efecto del titanio

El titanio es un elemento anti esferoidizante y también formador de carburo en hierro dúctil. [13]

Hierros con adición de titanio exhiben mayor dureza Brinell, menor elongación, y menor resistencia al impacto debido probablemente al porcentaje de grafito compacto y a la presencia de carburos de titanio que facilita la propagación de fracturas. Sin embargo, en comparación con el hierro no-aleado, la resistencia a la fractura aumenta junto con la resistencia a la tracción del hierro. [2,12]

El titanio está presente en los hierros fundido en un rango del 0.005% al 0.02%, reacciona con el carbono y/o el nitrógeno presente en el metal fundido para formar inclusiones de carbonitruro de titanio ( $Ti(C, N)$ ) que son más duras que el carburo de tungsteno figura 10.

El titanio puede ser añadido intencionalmente para formar el carbunitruro y mejorar la resistencia al desgaste del material. En el caso del hierro con grafito compacto, se han utilizado cantidades mayores de titanio para evitar la formación de grafito esferoidal y por lo tanto aumentar el intervalo de magnesio estable para la producción de CGI tabla 8.

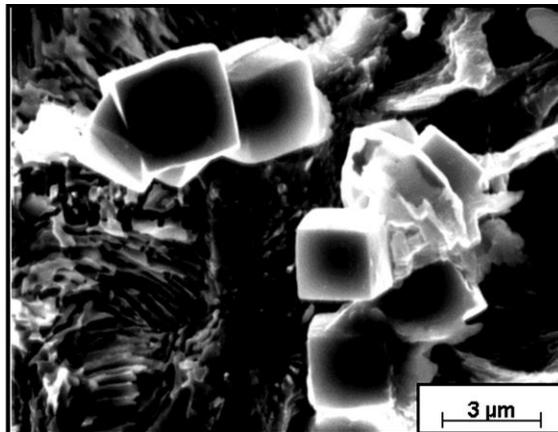


Figura 10. Inclusiones cúbicas de carbonitruro de titanio.

Tabla 8. Niveles de titanio y sus efectos.

% Ti	Efecto del titanio en el hierro
0.005-0.02	Nivel de trazas típico.
0.04-0.07	Adición intencional para mejorar la resistencia al desgaste.
0.10-0.25	Adición intencional para incrementar la producción de CGI.

## 1.5 DUREZA

Se define como la resistencia a la indentación permanente. Una dureza buena significa que el metal es resistente a las rayaduras y al uso. Ésta es una característica importante para muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo el herramental usado en el área de manufactura. [3]

Comúnmente se utilizan estas las pruebas para verificar o evaluar las propiedades de los materiales porque son rápidas y convenientes. Las pruebas más conocidas son las de Brinell y Rockwell.

### 1.5.1 Prueba de dureza Brinell

Se usa mucho para medir la dureza de metales y no metales de dureza baja a media. En la prueba, se presiona una esfera de acero endurecido (o carburo de WC) de 10 mm de diámetro, contra la superficie del material, con cargas de 500, 1500 o 3000 Kg. Después, se divide la carga entre el área de indentación para obtener el Número de Dureza Brinell (BHN). El BHN resultante tiene unidades de  $\text{Kg/mm}^2$ , por lo general las unidades se omiten cuando se expresa el número. Para materiales más duros (+500 BHN), se emplea la esfera de carburo de WC porque la de acero experimenta deformación elástica que tiene como consecuencia una

mala exactitud de la lectura. Asimismo, para materiales más duros es común utilizar cargas mayores (1500 y 3000 Kg). [3]

Para obtener el Número de Dureza Brinell se aplica la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{2F}{\pi D_b (D_b - \sqrt{D_b^2 - D_i^2})} \quad (3)$$

Donde HB = Número de Dureza Brinell (BHN);  $F$  = carga a aplicar, Kg;  $D_b$  = diámetro de la esfera, mm; y  $D_i$  = diámetro de la indentación sobre la superficie, mm.

### 1.5.2 Prueba de dureza Vickers

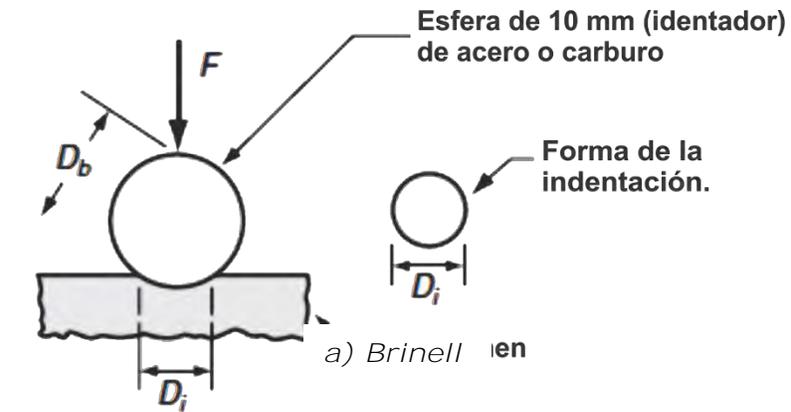
Esta prueba, utiliza un indentador de forma piramidal hecho de diamante. Se basa en el principio de que las impresiones dejadas por él son similares en cuanto a su geometría sin importar la carga que se emplee. La prueba Vickers se utiliza para todos los metales y tiene una de las escalas más amplias entre las pruebas de dureza. [3]

Se determina la dureza Vickers (HV) por medio de la fórmula:

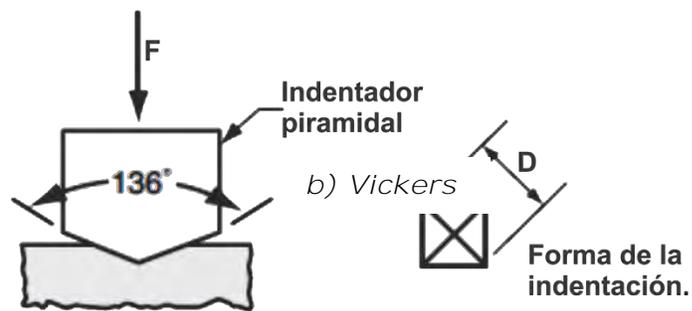
$$HV = \frac{1.854 F}{D^2} \quad (4)$$

Donde  $F$  = carga aplicada, Kg; y  $D$  = diagonal de la impresión hecha por el indentador, mm.

En la figura 10 se muestran diferentes tipos de ensayos de dureza, así como el tipo de indentador que se utiliza y la forma de la indentación.



**a) Brinell**



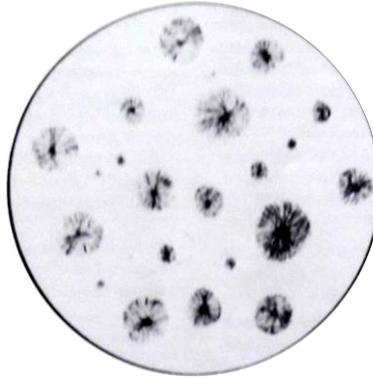
**b) Vickers**

Figura 11. Métodos de prueba de durezas: (a) Brinell y (b) Vickers. [3]

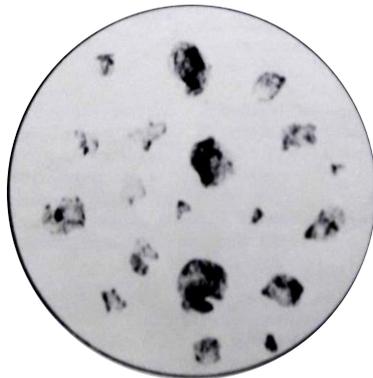
## 1.6 ANTECEDENTES

### 1.6.1 Tipo de carbono grafito

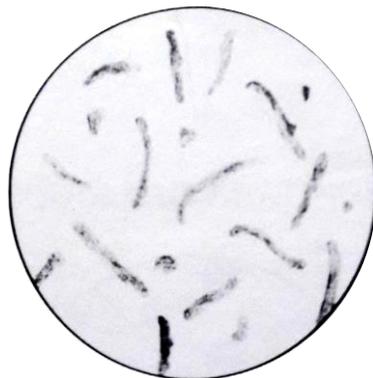
De la figura 12 a la figura 16 se muestran los diferentes tipos de carbono grafito definidos del *Foundrymen's Guide to Ductile Iron Microstructures* [10].



*Figura 12. Tipo I grafito esferoidal 100X sin ataque. [10]*



*Figura 13. Tipo II grafito irregular 100X sin ataque. [10]*



*Figura 14. Tipo IV grafito vermicular o grafito compacto 100X sin ataque. [10]*



Figura 15. Tipo V grafito cangrejo 100X sin ataque. [10]

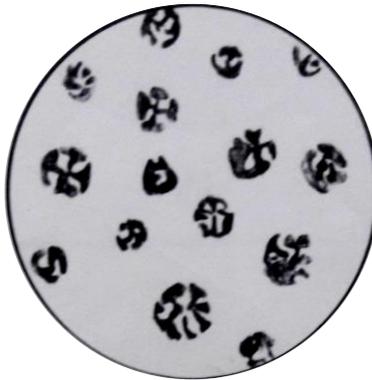


Figura 16. Tipo VI grafito explotado 100X sin ataque. [10]

### 1.6.2 Nodularidad

Es el grado de redondez del grafito presente en el hierro dúctil.

Para la evaluación de la nodularidad se aplican los patrones que se observan en las figuras 17 a 24 obtenidas del *Foundrymen's Guide to Ductile Iron Microstructures* [10].



Figura 17. 100% Nodularidad. [10]

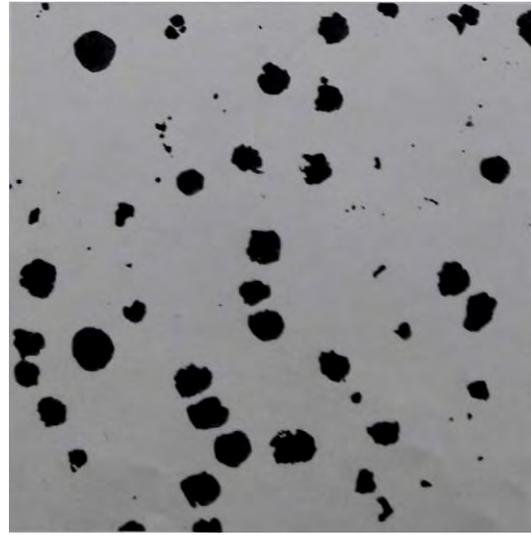


Figura 18. 90% Nodularidad. [10]



Figura 19. 80% Nodularidad. [10]



Figura 20. 80% Nodularidad. [10]



Figura 21. 70% Nodularidad. [10]



Figura 22. 70% Nodularidad. [10]



Figura 23. 60% Nodularidad. [10]

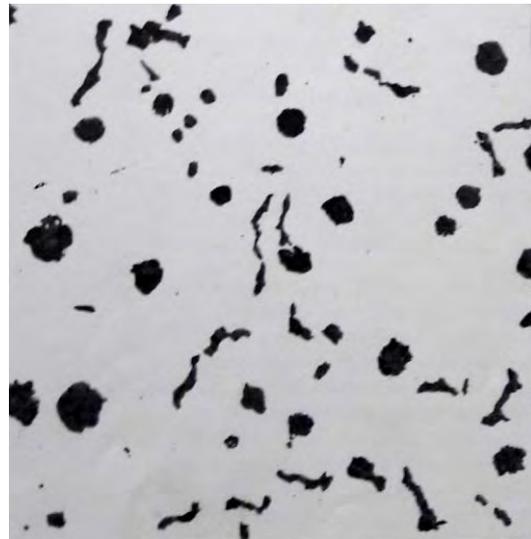
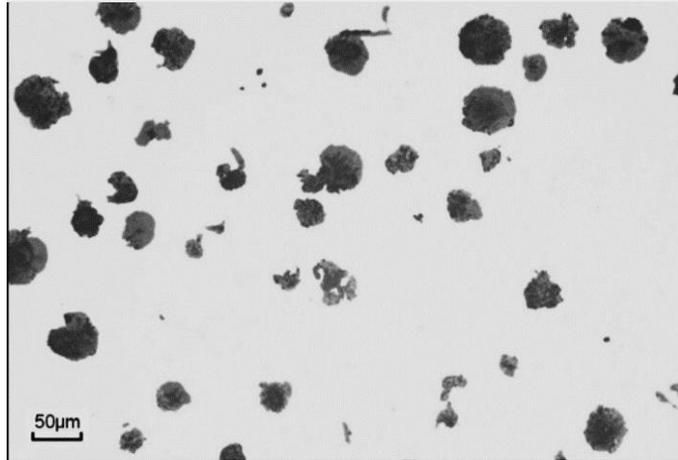
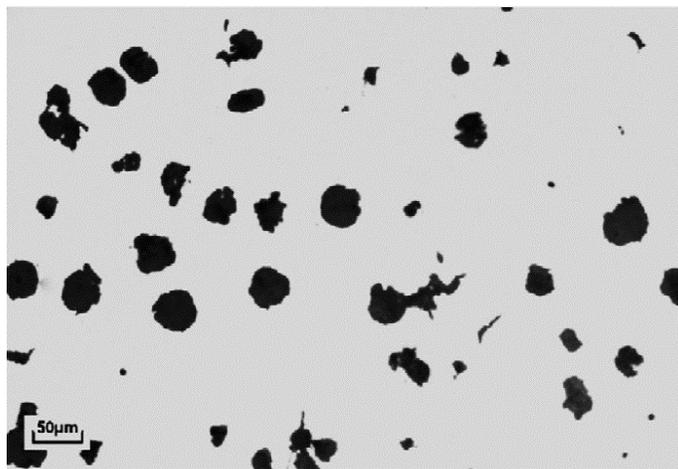


Figura 24. 50% Nodularidad. [10]

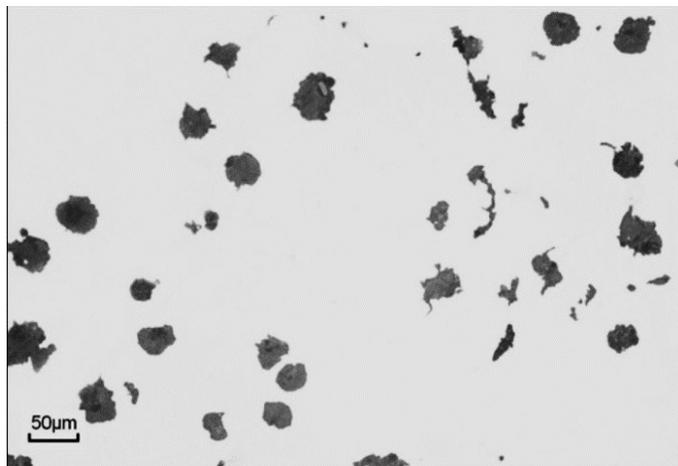
En las figuras 25 a 37 están las nodularidades recopiladas de diversas fuentes de acuerdo a la tesis *Estudio y fabricación de fundición vermicular* [11].



*Figura 25. Recopilación 80% Nodularidad. [11]*



*Figura 26. Recopilación 72% Nodularidad. [11]*



*Figura 27. Recopilación 64% Nodularidad. [11]*

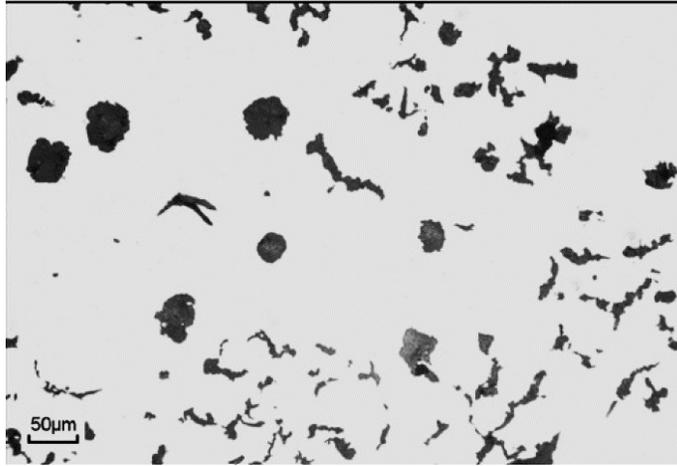


Figura 28. Recopilación 33% Nodularidad. [11]

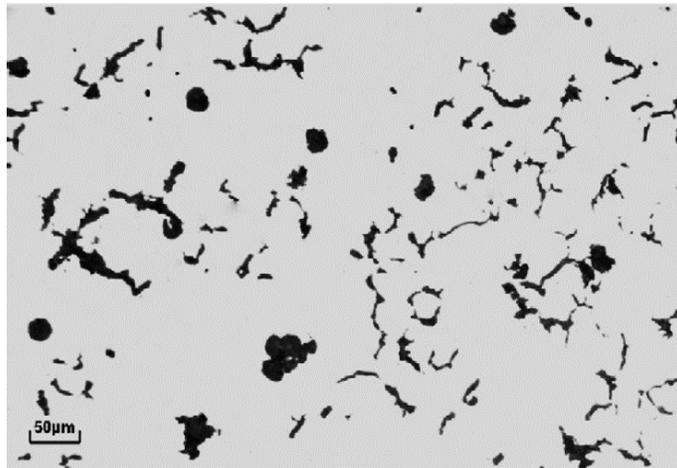


Figura 29. Recopilado 28% Nodularidad. [11]

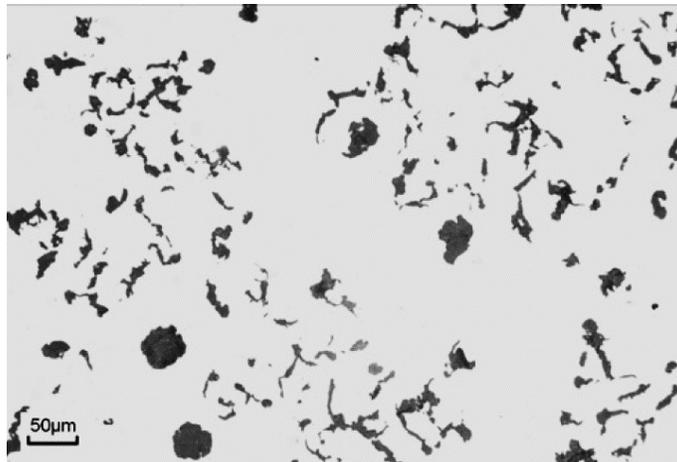


Figura 30. Recopilado 22% Nodularidad. [11]

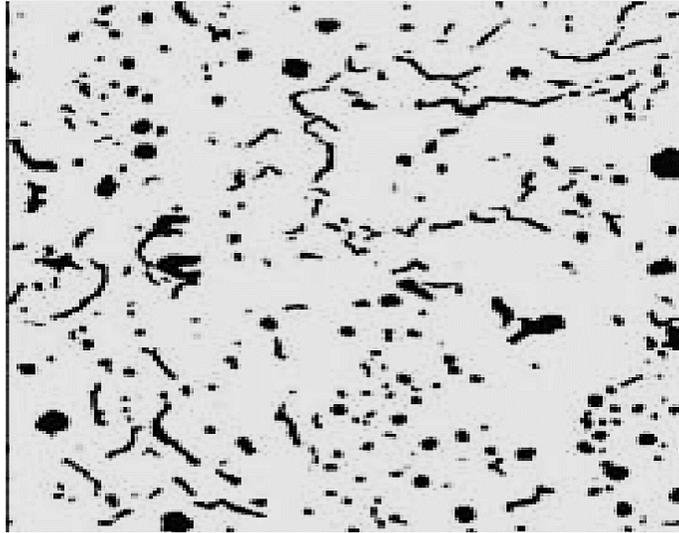


Figura 31. Recopilación 21% Nodularidad. [11]

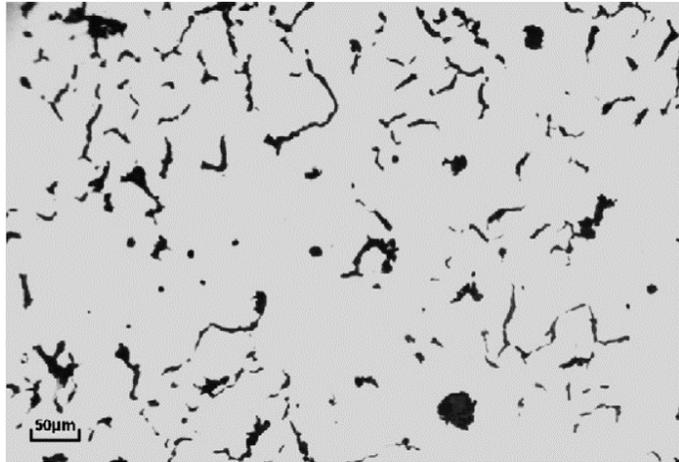


Figura 32. Recopilación 13% Nodularidad. [11]

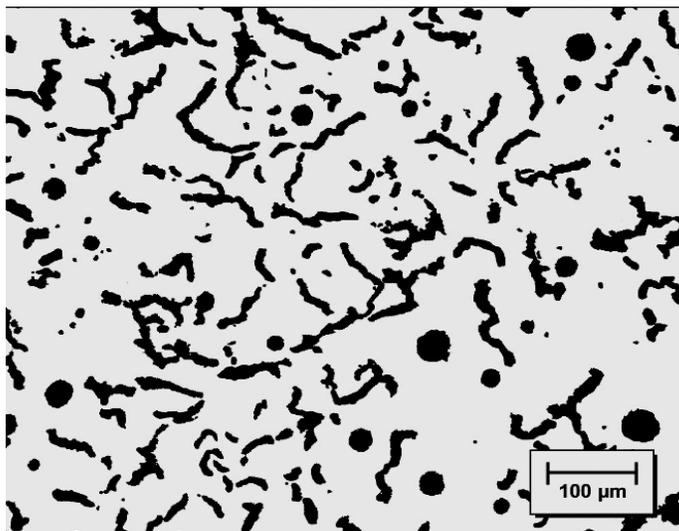
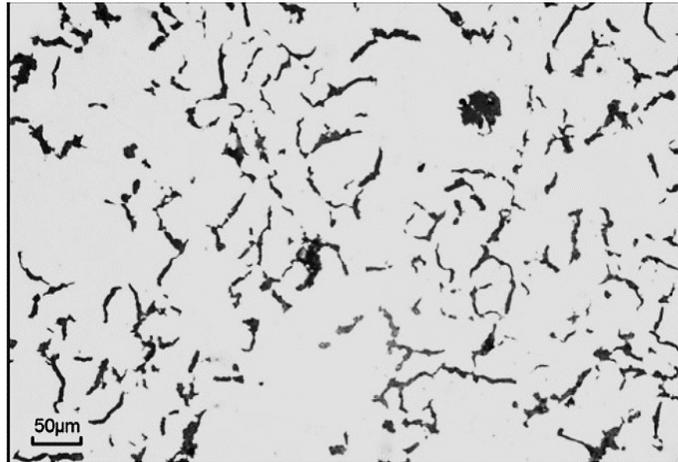


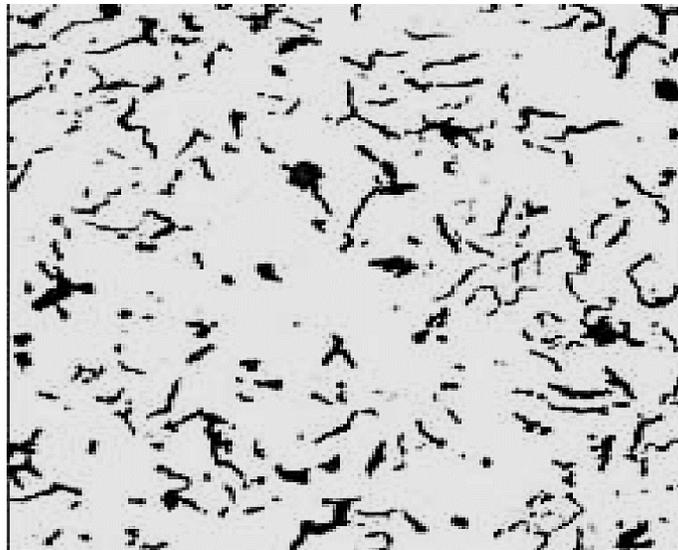
Figura 33. Recopilación 10% Nodularidad. [11]



*Figura 34. Recopilación 9% Nodularidad. [11]*



*Figura 35. Recopilación 7% Nodularidad. [11]*



*Figura 36. Recopilación 3% Nodularidad. [11]*

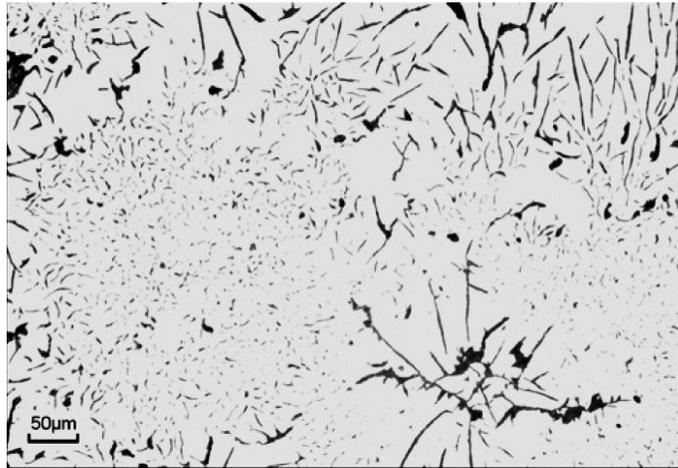


Figura 37. Recopilación -5% Nodularidad. [11]

### 1.6.3 Tamaño de nódulo

La evaluación del tamaño del nódulo se evalúa por comparación con los patrones presentados en las figuras 38 a 43. Como se indica en las figuras, la evaluación se debe hacer a 100X.

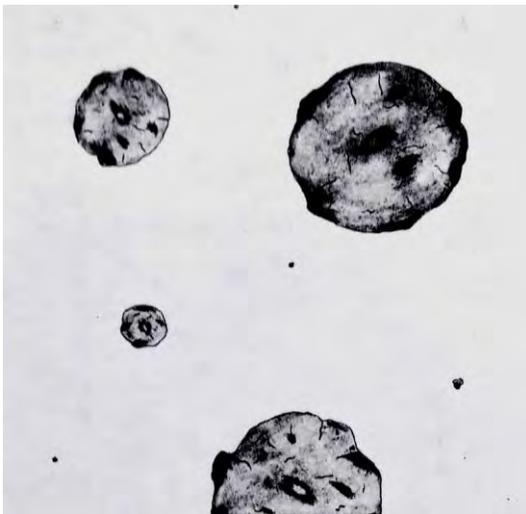


Figura 38. Tamaño 3, 32mm de diámetro 100X sin ataque. [10]

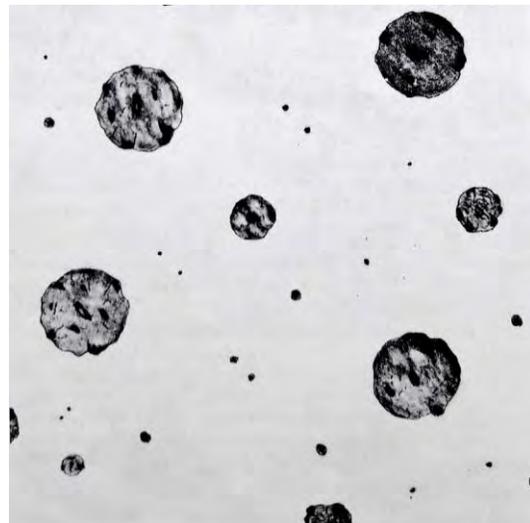


Figura 39. Tamaño 4, 16 mm de diámetro 100X sin ataque. [10]

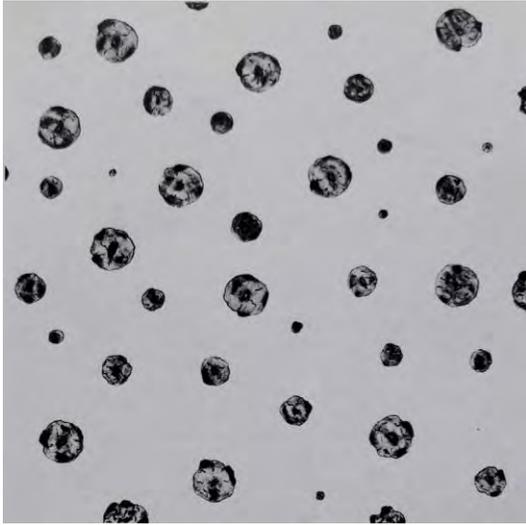


Figura 40. Tamaño 5, 8 mm de diámetro  
100X sin ataque. [10]

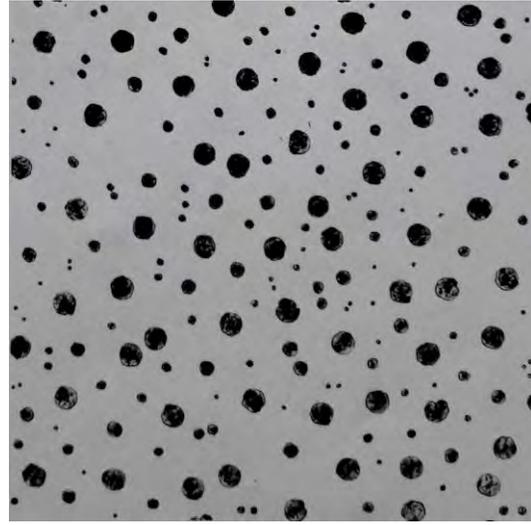


Figura 41. Tamaño 6, 4 mm de diámetro  
100X sin ataque. [10]

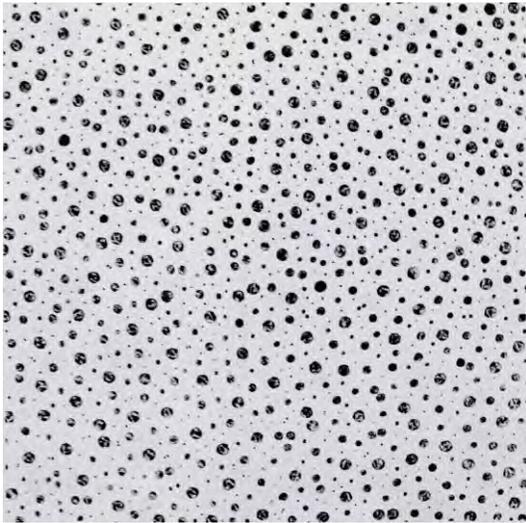


Figura 42. Tamaño 7, 2 mm de diámetro  
100X sin ataque. [10]



Figura 43. Tamaño 8, 1 mm de diámetro  
100X sin ataque. [10]

#### 1.6.4 Conteo de nódulos

Es la cantidad de nódulos/mm<sup>2</sup>. Se realiza a 100X sin ataque.

Las figuras siguientes muestran los patrones para evaluar el contero de nódulos.

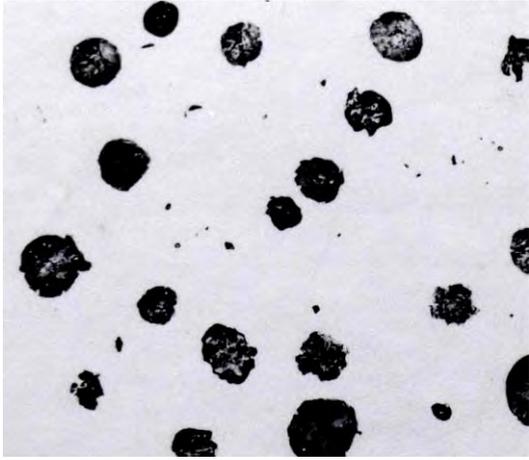


Figura 44. 25 Nódulos/mm<sup>2</sup>, 100X. [10]

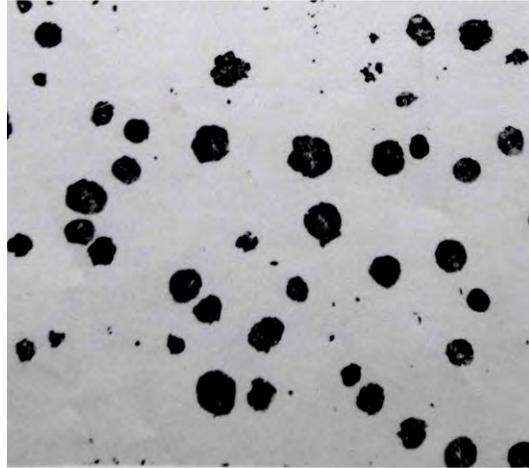


Figura 45. 50 Nódulos/mm<sup>2</sup>, 100X. [10]



Figura 46. 100 Nódulos/mm<sup>2</sup>, 100X. [10]



Figura 47. 150 Nódulos/mm<sup>2</sup>, 100X. [10]

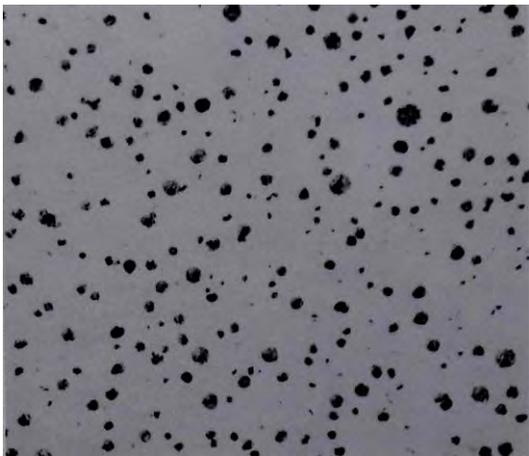


Figura 48. 200 Nódulos/mm<sup>2</sup>, 100X. [10]

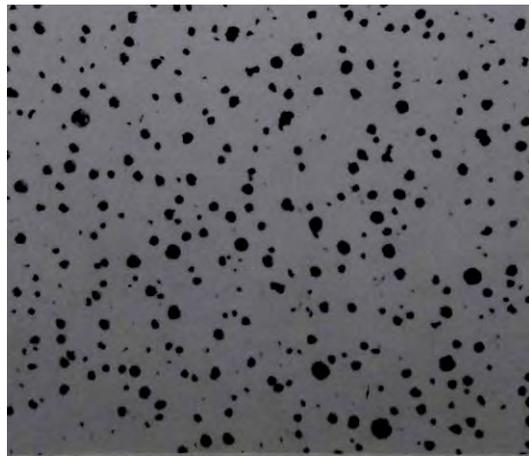


Figura 49. 250 Nódulos/mm<sup>2</sup>, 100X. [10]



Figura 50. 300 Nódulos/mm<sup>2</sup>, 100X. [10]

### 1.6.5 Titanio

La microestructura de la figura 51, presenta hierro dúctil contaminado con Ti [10].

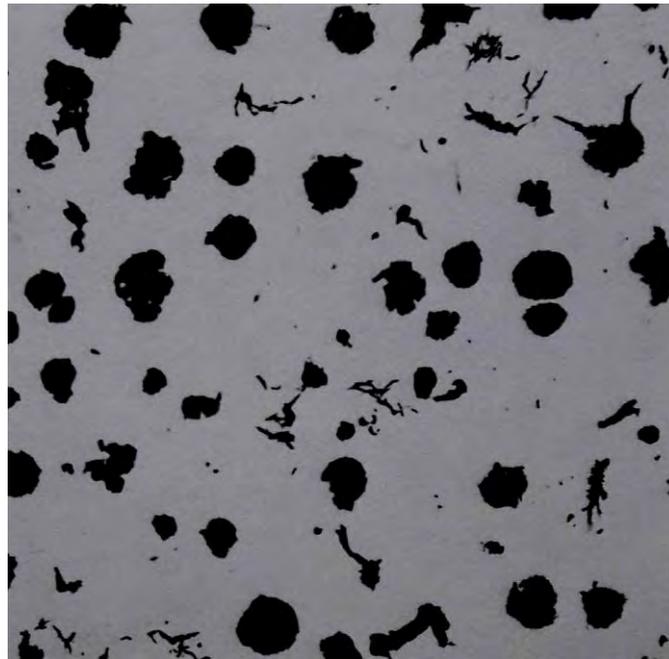


Figura 51. Esferoides con hojuelas, 100X sin ataque. Estructura causada usualmente por contaminación con titanio. [10]

CAPÍTULO 2  
DESARROLLO  
EXPERIMENTAL

## CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La experimentación se realizó de acuerdo con la siguiente:

### 2.1 METODOLOGÍA

- a) Elaboración de un modelo de fundición para la obtención de muestras. El modelo seleccionado es el escalón descrito en la figura 52 y 53.
- b) Fabricación de un hierro vermicular (CGI) con 0.02% de Mg residual sin adición de Ti. Método usado: Sándwich. (Colada 1)
- c) Fabricación de un hierro vermicular con 0.02% de Mg residual y 0.05% de Ti. Método empleado: Sándwich. (Colada 2)
- d) Fabricación de un hierro vermicular con 0.02% de Mg residual y 0.10% de Ti. Método utilizado: Sándwich. (Colada 3)
- e) Fabricación de un hierro vermicular con 0.02% de Mg residual y 0.15% de Ti. Método empleado: Sándwich. (Colada 4)
- f) Análisis metalográfico del material de cada colada con énfasis en la medición del % de nodularidad, tamaño y conteo nodular.
- g) Realización de pruebas de dureza Brinell y micro Vickers a cada colada.
- h) Análisis de los parámetros de fabricación y resultados.

### 2.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el procedimiento experimental se utilizó el modelo presentado en las figuras 52 y 53.

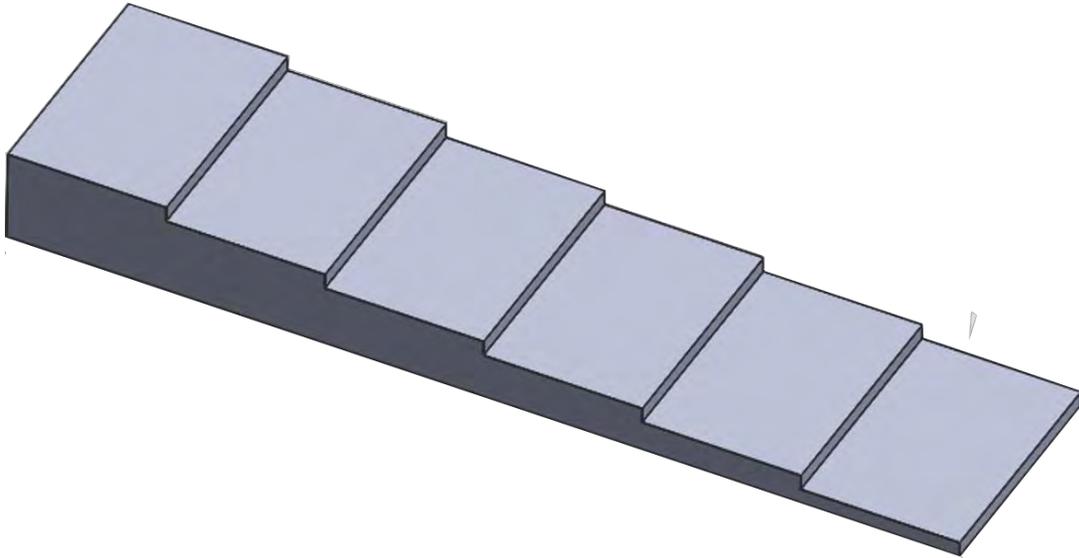


Figura 52. Modelo de escalón, utilizado para el estudio de la fundición vermicular del presente trabajo.

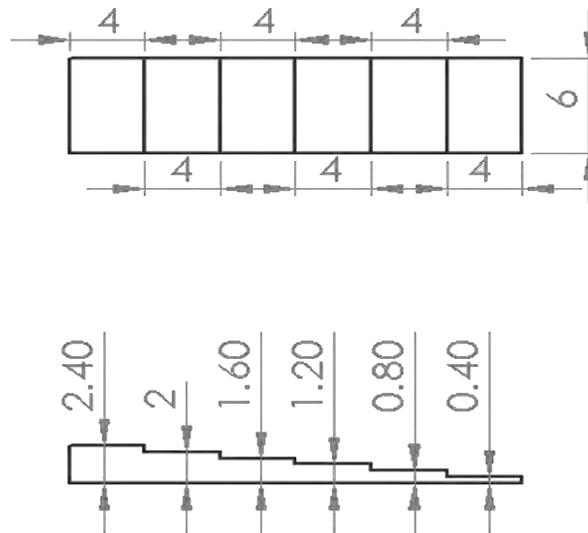


Figura 53. Medidas del modelo usado para el estudio de la fundición vermicular.

La figura 54 resume las condiciones experimentales aplicadas en este trabajo.

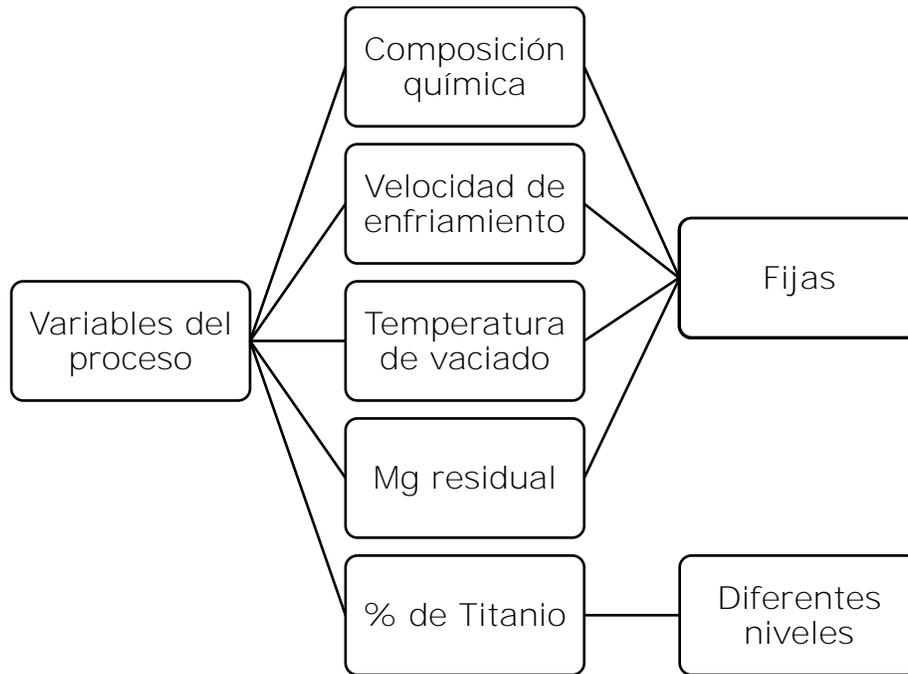


Figura 54. Variables del proceso a considerar fijas y variables.

El procedimiento para fabricar un hierro vermicular partió de la composición química de un hierro nodular.

La composición química del hierro nodular 100-70-03 se presenta en la tabla 9:

Tabla 9. Composición química de hierro nodular 100-70-03

		% C	% Si	% Mn	% S	% P	% Mg
100-70-03	Mín.	3.00	2.40	0.20			0.03
	Máx.	4.00	3.10		0.020	0.10	0.05

Se tomó en cuenta la información de la tabla 2 para realizar un diseño de experimentos. La metodología de adición del Ti se propuso debido al tamaño de partícula del FeTi, ya que es muy pequeña, casi polvo, por lo cual si se añadía sin una cubierta, podría correr el riesgo de no mezclarse por completo y quedar atrapado en la escoria.

La tabla 10 muestra el diseño experimental resumido.

Tabla 10. Diseño experimental.

Colada	% Mg residual	Inoculación % base Si	% Ti Adicionado	Método de adición de Ti
1	0.02	0.2	-----	----
2	0.02	0.2	0.05	Dentro de un tubo de 1mm de espesor y 1 pulgada de diámetro.
3	0.02	0.2	0.10	Dentro de un tubo de 1mm de espesor y 1 pulgada de diámetro.
4	0.02	0.2	0.15	Dentro de un tubo de 1mm de espesor y 1 pulgada de diámetro.

## 2.3 TÉCNICA DE FUSIÓN

Tomando en cuenta la tabla 8 se diseñó la experimentación a proseguir de acuerdo a los pasos siguientes:

- ❖ Se seleccionó materias primas (chatarras) afines a la composición deseada.
- ❖ Balance de carga, para obtener los kilogramos de cada chatarra (acero, hierro, retornos, recarburante, ferroaleaciones, etc.)
- ❖ Acondicionamiento de la chatarra el cual se realizó limpiando, secando y precalentando las materias primas.
- ❖ Se verifico que todas las unidades que componen al horno de inducción funcionen correctamente. (unidad de enfriamiento, unidad de potencia y unidad de fusión)
- ❖ Se encendió la unidad de enfriamiento del horno de inducción.
- ❖ Enseguida, el horno de inducción se trabajó con una potencia de 15KW, para el precalentamiento del horno por 15 minutos, seguido de un aumento gradual hasta llegar a la potencia de 45KW.
- ❖ Se empezó a cargar el horno de inducción con chatarra de hierro nodular.

- ❖ Enseguida se introdujo la chatarra de acero. Tomando en cuenta que el acero es soluble en el hierro líquido. Después de que se disolvió la chatarra de acero se adiciono el recarburante.
- ❖ Fundidas las chatarras, se obtiene la muestra (moneda) para determinar la composición química preliminar que presenta el metal fundido por medio del espectrómetro de emisión atómica.
- ❖ Con los resultados del análisis químico se realizó el ajuste conveniente para tener la composición deseada.
- ❖ Alcanzada la composición química deseada se midió la temperatura del metal líquido con un termopar tipo S y se aumentó la potencia para alcanzar la temperatura de trabajo.
- ❖ Obtenida la temperatura de trabajo de 1510 °C aproximadamente se continuó con un desescorificado para retirar la mayor cantidad de escoria del metal líquido.
- ❖ La adición del Ti se realizó con un encapsulado en tubo de acero ya descrito para evitar que el FeTi flote en la superficie superior del metal líquido, dicha capsula se intentó introducir hasta el fondo del horno. Este método se aplicó en el caso de la segunda, tercera y cuarta colada. Con las características propuestas en la tabla 8.
- ❖ Alcanzadas las condiciones requeridas, temperatura y composición química, se procedió el vaciado a la olla de tratamiento (método sándwich), en la cual ya se encontraba agregado el nodulizante. (A una temperatura aproximada de 1510 °C). El método sándwich, por las reacciones que se llevan a cabo, garantiza la homogenización del Mg dentro del baño líquido.
- ❖ Terminada la reacción se procede al vaciado a molde y simultáneamente se adiciona el FeSi inoculante para la realización de la inoculación tardía. (A una temperatura de 1470 °C).

## 2.4 PREPARACIÓN METALOGRAFICA

- ❖ Se realizaron los cortes a la pieza de acuerdo a la figura 55.

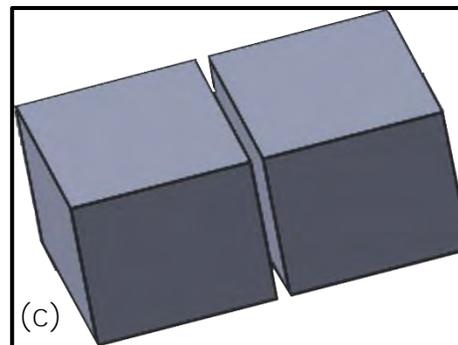
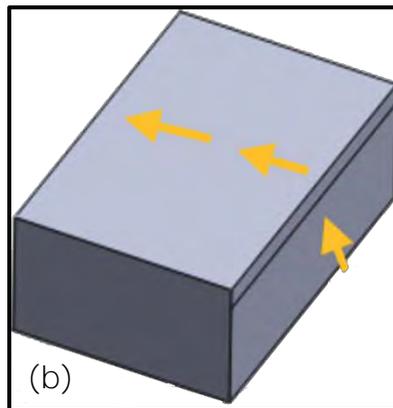
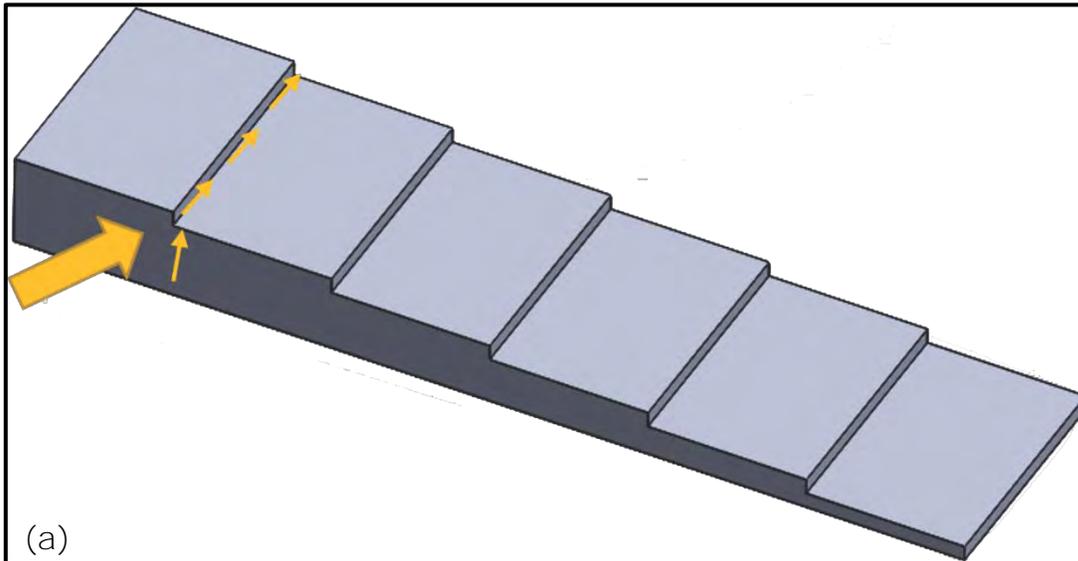


Figura 55. Diagrama de los cortes realizados a la pieza de colada. (a) Marca de corte del escalón más grande. (b) Escalón grande con marcas del siguiente corte. (c) Último corte.

Solo se realizó un corte en el escalón con medidas 6.0 x 4.0 x 2.4 cm, para realizar el examen metalográfico y la determinación de dureza.

Una de las dos piezas que resultaron del último corte fue la que se destinó para realizar las pruebas, tales fueron realizadas en la cara donde fue el corte.

Para la preparación metalográfica se aplicaron los siguientes pasos:

❖ Desbaste grueso

Se realiza el desbaste con lija de 80 granos /cm<sup>2</sup> para emparejar la zona interna del corte.

❖ Desbaste fino

El desbaste fino se hizo con lijas de 240, 320, 400, 600, 1000 y 1500 granos/cm<sup>2</sup> en la cara interna del corte.

Se comenzó con la lija de 240 y se giró 90° cambiando el número de lija en el momento que no se percibieron las líneas del desbaste grueso.

Así mismo entre las lijas del desbaste fino se cambió de número de lija y la orientación cuando las líneas del anterior desbaste se dejaron de ver.

Los desbastes grueso y fino se hicieron sin agregar agua a las lijas con el fin de conservar el grafito libre.

❖ Pulido

Fue hecho con paño fino en una pulidora giratoria a ciertas rpm, con adición de un poco de agua y alúmina (Al<sub>3</sub>O<sub>2</sub>).

Se realizó un pulido en seco, con el paño estático y con la pieza en movimiento para retirar el exceso de agua y a su vez preservar el grafito libre.

Seguido de un secado adicionando alcohol a la superficie pulida y acercándola a una toma de aire con filtro.

❖ Ataque

Utilizando una solución conocida como Nital 2, con un algodón empapado en tal solución se procedió a depositar el nital en la pieza pulida hasta observar un cambio en la superficie (disminución del brillo o zonas opacas), seguido de poner la cara atacada en un chorro constante de agua evitando un sobre ataque, para el secado

se adiciono alcohol y se secó la pieza en una toma de aire con una salida constante.

## 2.5 PRUEBAS DE DUREZA

### ❖ Macro dureza Brinell

La prueba se realizó con un durómetro Brinell por triplicado.

Las condiciones de ensayo fueron: indentador de 10 mm, una carga de 3000 Kgf y un tiempo de aplicación de carga de 15 segundos.

Este ensayo se efectuó para cada pieza, es decir una pieza por colada.

Las huellas obtenidas se midieron con un microscopio de campo propio del durómetro.

Para obtener los resultados de dureza de uso la ecuación 3.

### ❖ Micro dureza Vickers

La prueba se realizó con un durometro microVickers.

Realizando 7 penetraciones con una carga de 980 mN, tiempo de aplicación de carga de 20 segundos por pieza de cada colada.

El equipo calcula y registra las durezas al realizar las mediciones de las diagonales horizontal y vertical, y el equipo usa la ecuación 4.

Las unidades que maneja el equipo para carga son N, y las **diagonales se miden en  $\mu\text{m}$ . El resultado se proporciona el  $\text{Kg}/\text{mm}^2$ .**

## 2.6 EQUIPO

- ❖ Horno de inducción de 100Kg y 750 KW, marca inductotherm.
- ❖ Adquisidor de datos modelo Personal Daq/56, marca iotech.
- ❖ Espectrómetro de emisión atómica
- ❖ Equipo de metalografía del Departamento de Ingeniería Metalúrgica
- ❖ Microscopio metalúrgico invertido modelo XJL-17, marca hinotek.
- ❖ Cámara fotográfica para microscopio anterior, marca hinotek.

- ❖ Durómetro Brinell modelo THB-3000E, marca time group inc.
- ❖ Durómetro microVickers marca shimadzu

# CAPÍTULO 3

## RESULTADOS

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS

Las composiciones químicas obtenidas de las coladas se presentan en las tablas 11, 12, 13 y 14. Se muestra el Ti teórico calculado y agregado y el Ti real que se obtuvo.

Tabla 11. Composición química colada 1, Ti teórico=0%, Ti real=0.0071%.

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Ti	% Mg	% C.E.
3.445	2.260	0.670	0.0192	0.0125	0.0071	0.0285	4.20

Tabla 12. Composición química colada 2, Ti teórico=0.05%, Ti real=0.047%.

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Ti	% Mg	% C.E.
3.589	2.210	0.657	0.0195	0.0174	0.047	0.0346	4.33

Tabla 13. Composición química colada 3, Ti teórico=0.1%, Ti real=0.0954%.

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Ti	% Mg	% C.E.
3.517	2.200	0.637	0.0195	0.0217	0.0954	0.0310	4.26

Tabla 14. Composición química colada 4, Ti teórico=0.15%, Ti real=0.1363%

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Ti	% Mg	% C.E.
3.375	2.172	0.645	0.0182	0.0157	0.1363	0.0276	4.11

Los resultados de dureza HBN y microVickers se presentan en la tabla 15, con una conversión de microVickers a HRC.

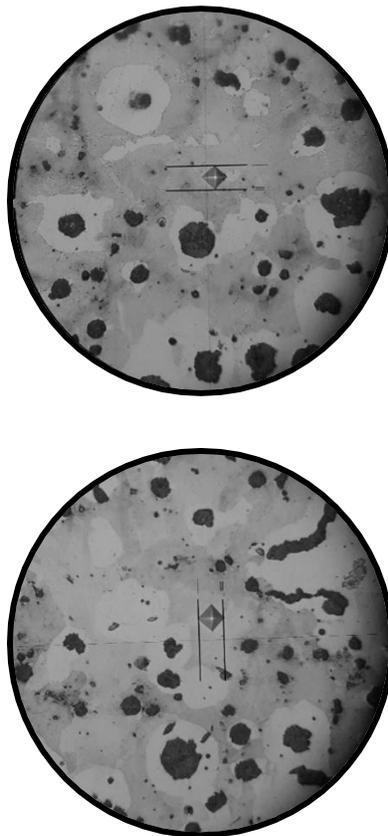
Tabla 15. Resultados de las pruebas de dureza.

	Dureza HBW30 (Kg/mm <sup>2</sup> )	HV (Kg/mm <sup>2</sup> )	HRC (conversión)
Blanco	247.32	269.00	25.23
0.05% Ti	216.50	301.17	29.78
0.1% Ti	206.87	278.50	26.63
0.15% Ti	168.58	285.80	27.66

La macrodureza Brinell presenta una tendencia a disminuir debido a que la superficie de contacto es amplia, así puede estar incidiendo la carga en un grafito, una zona con matriz ferrítica o perlítica, incluso en microporos o microrechupes. Se toma una huella muy general y como no se sabe que hay debajo de la zona de ensayo en la que se está trabajando, es posible que haya microrechupes o carbono grafito precipitado.

Por lo anterior se determinó efectuar la dureza microVickers en la cual se puede obtener la dureza puntual para la matriz perlítica, obteniendo valores proporcionados por el equipo en HV y su conversión en Rockwell C (HRC).

La figura 56 muestra la huella de la dureza microVickers en los materiales obtenido.



*Figura 56. Huella de dureza microVickers.*

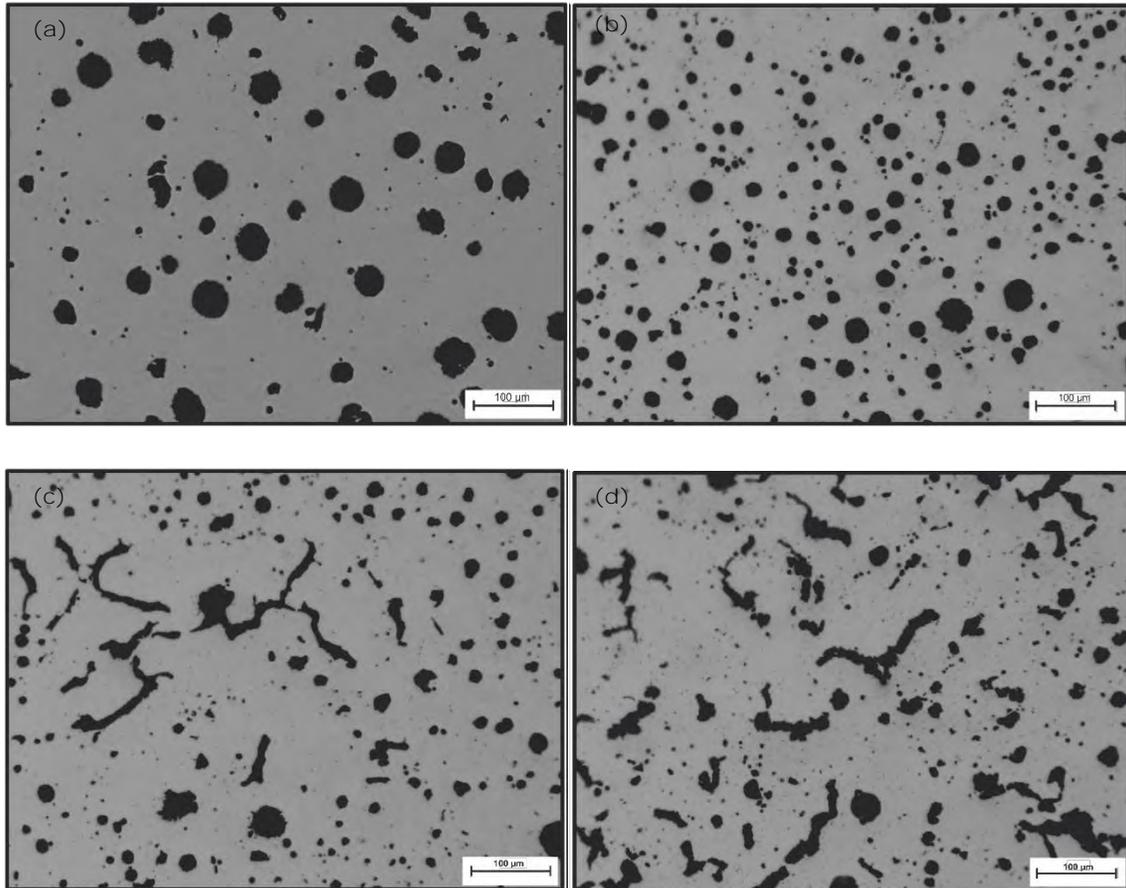


Figura 57. Microestructuras sin ataque (100X), vistas con microscopio óptico. (a) Colada 1, sin Ti. Las zonas de color negro son de grafito precipitado en forma esferoidal (b) Colada 2, 0.05% Ti. Las partes redondas son de carbono grafito esferoidal (c) Colada 3, 0.1% Ti. Los gusanos o corales negros son de carbono grafito compacto y las figuras redondas negras de grafito esferoidal (d) Colada 4, 0.15% Ti. Las partes en forma de gusanos negros son de carbono grafito compacto y las pocas zonas esféricas son de grafito esferoidal.

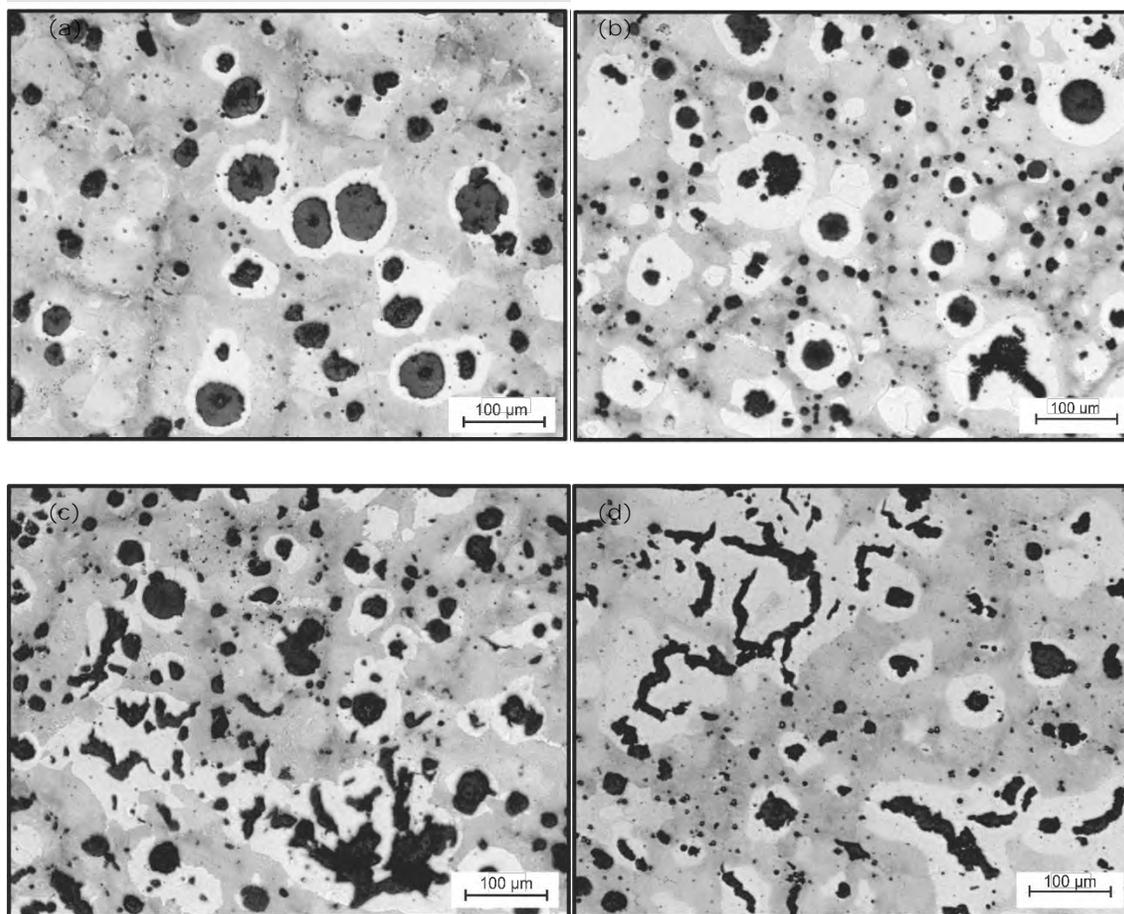


Figura 58. Microestructuras con ataque, nital 2, (100X), vistas con microscopio óptico. (a) Colada 1, sin Ti. Las zonas blancas son de ferrita, las grises son de perlita y las más oscuras son de carbono grafito esférico. (b) Colada 2, 0.05% Ti. Se observa Ferrita en color blanco, la perlita en color gris y en negro el grafito esférico. (c) Colada 3, 0.1% Ti. El color blanco indica presencia de ferrita, el gris obtención de perlita y el negro son partículas de grafito esférico y vermicular. (d) Colada 4, 0.15% Ti. Se observa una zona gris claro la cual indica que hay ferrita, una de color gris oscuro que presenta perlita y partículas de grafito vermicular y grafito nodular.

La caracterización del grafito para cada condición experimental se muestra en la tabla 16.

Detalles de la microestructura de las coladas experimentales se presentan en las figuras 59 y 60.

Tabla 16. Caracterización de grafito.

	Nodularidad (%)	Tamaño	Conteo de Nódulos o vermículos/mm <sup>2</sup>
Blanco	90	6-7	200
0.05% Ti	90	7-8	250
0.1% Ti	50	7-8	250
0.15% Ti	15	7-8	250

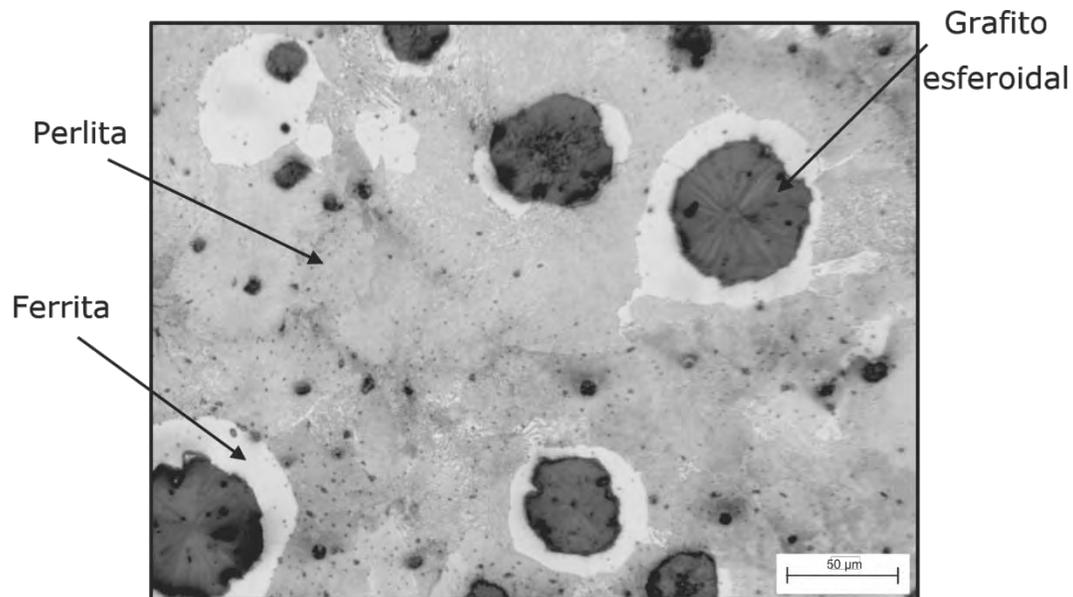
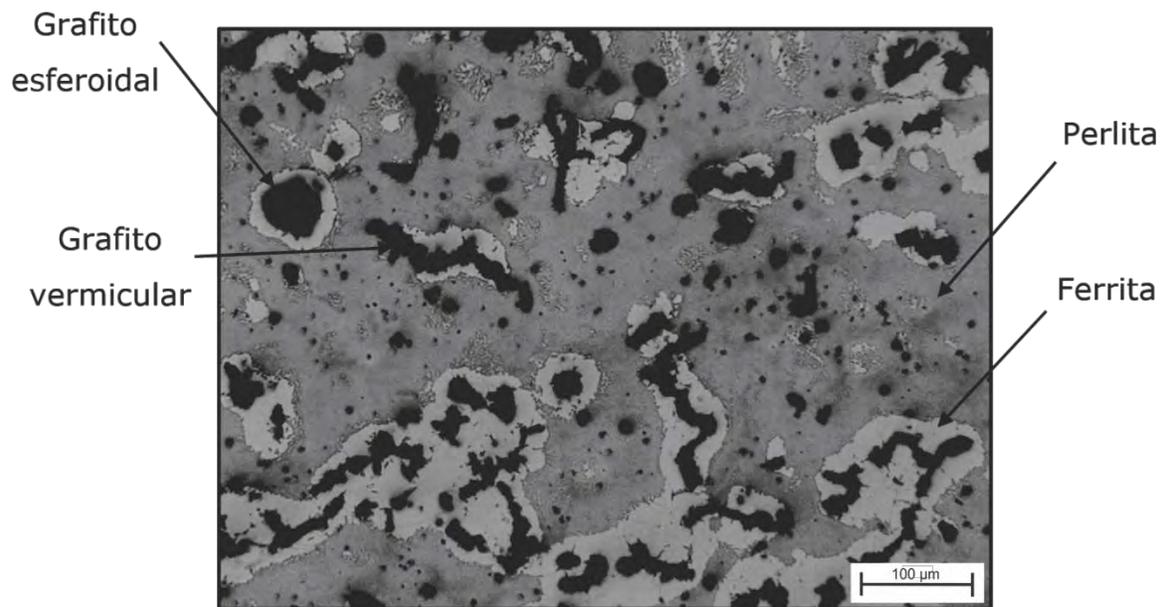


Figura 59. Microestructura con ataque (200X), colada 1, sin Ti. Tipo de grafito esferoidal, matriz perlítica-ferrítica.



*Figura 60. Microestructura con ataque (100X), colada 4, con 0.15% Ti. Tipo de grafito vermicular, matriz perlítica-ferrítica.*

CAPÍTULO 4  
ANÁLISIS DE  
RESULTADOS

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 COLADA 1

Se puede observar en la composición química que el porcentaje de titanio es ligeramente diferente del % teórico que se definió, probablemente la carga se contaminó con éste elemento. Esta es la muestra de referencia para poder compararla con las piezas a las que si se agregó titanio, (colada 2, 3 y 4). Con respecto a esta colada las características que presenta son las de un hierro nodular con matriz perlítica – ferrítica, debido al 0.67% de Manganeso el cual favorece la presencia de la perlita. Y al contenido de Mg residual de 0.028%.

Con respecto a lo anterior el porcentaje de Mg residual está un poco más alto al deseado que es de 0.02% por tal motivo la nodularidad de grafito se presenta en un 90%. No se observa ningún grafito vermicular en la metalografía.

La densidad de precipitados de grafito (esferoides o vermículos) es de 200 partículas/mm<sup>2</sup> lo que indica una buena práctica de la inoculación.

La dureza Brinell es de 247.32 Kg/mm<sup>2</sup>, comparado con la dureza de un hierro al 85% nodular que se muestra en la tabla 3 es muy similar. Lo cual indica que esta pieza cumple con las propiedades mecánicas deseadas. Como esta dureza tiene un área de contacto en la cual se puede encontrar un carbono grafito, una matriz ferrítica y una matriz perlítica el resultado es una dureza promedio, que es la correcta para hierros nodulares y grises.

Con respecto a la dureza microVickers se obtuvo un valor de 269 Kg/mm<sup>2</sup>, se presenta un aumento debido a que este tipo de dureza es más puntual, en una zona específica, de tal manera que al seleccionar la matriz perlítica la cual está en mayor proporción y obtener la dureza (figura 55), esta es

mayor. Aun así se obtiene un resultado favorable que indica que se obtuvo un hierro nodular.

#### 4.2 COLADA 2

El porcentaje de magnesio es de 0.0346%, más alto al esperado, solo existe una explicación para esto la cual es que la eficiencia del método sándwich aumento.

La adición de titanio tiene una eficiencia menor a la esperada, por lo cual se obtiene un porcentaje del 0.047%. Se observa que la morfología de grafito no cambia, sigue siendo esferoidal. Sin embargo el tamaño disminuye, los esferoides presentan un tamaño heterogéneo.

La cantidad de nódulos es de 250 esferoides/mm<sup>2</sup>, tal aumento se debe a la disminución del tamaño del esferoide obtenido y a la inoculación efectiva.

Con respecto a la dureza Brinell la cual dio un resultado de 216.50 Kg/mm<sup>2</sup>, la causa por la cual disminuye la dureza es por el tamaño que presenta el esferoide que es heterogéneo y tiene un valor de 7.

Para verificar el anterior resultado de dureza se realiza la dureza microVickers, obteniendo un valor de 301.17 Kg/mm<sup>2</sup> seleccionando la matriz perlítica para tal prueba.

Tal diferencia se debe a que la dureza Brinell tiene más área de aplicación de la fuerza, esto puede ocasionar que se aplique la prueba en una zona donde hay grafito esferoidal, matriz ferrítica y matriz perlítica, así mismo que en una parte más interna se encuentre otro grafito esferoidal por lo cual la dureza disminuye más.

### 4.3 COLADA 3

El porcentaje de magnesio sigue siendo alto debido a que la eficiencia del proceso, se tomó 50% de eficiencia y se obtuvo un porcentaje del 0.031%.

El titanio resultante es del 0.0954%, en este caso la morfología ya tiene un cambio considerable, el carbono grafito ya no presenta una forma de esferoide, se obtienen esferoides en mayor cantidad y vermiculos en menor cantidad.

La densidad de partículas es de 250 partículas/mm<sup>2</sup>, aunque se presentan menos esferoides la cantidad de vermiculos es muy similar a la colada 3.

En esta colada se presenta una dureza Brinell de 206.87 Kg/mm<sup>2</sup>, en comparación con las durezas de las coladas anteriores está disminuye debido al área de penetración del indentador, ya que está tomando grafito vermicular y grafito esferoidal, además del tipo de matriz aunque es en mayor medida perlítica. Tal efecto ocurre en la profundidad ya que no se puede visualizar que hay en la zona interna (carbono grafito, matriz perlítica o matriz ferrítica).

El valor de dureza microVickers es de 278.50 Kg/mm<sup>2</sup>, comparado con la dureza Brinell es mayor debido a que la zona de aplicación es la matriz perlítica. En comparación con la colada 1 la dureza es mayor, debido a que la formación de vermiculos ya es notable, el material presenta aumento en las propiedades.

### 4.4 COLADA 4

La eficiencia del método sándwich fue obtenida en un 53%, el magnesio residual es del 0.0276%, muy parecido al de la colada 1.

El porcentaje de titanio obtenido es del 0.1363%, la morfología de las partículas de carbono grafito es en su mayoría vermicular, aunque se presentan algunas partículas esféricas.

El conteo de partículas dio como resultado una igualdad con la colada 3, obteniendo un valor de 250 partículas/mm<sup>2</sup>.

El resultado con respecto a la dureza disminuye con respecto a las coladas 1,2 y 3 dando un valor de 168.58 Kg/mm<sup>2</sup>, las consecuencias de esto son que el material presenta microrechupes al igual que en las coladas anteriores por motivos del área de penetración es un valor muy general se toman zonas donde se encuentra grafito vermicular además de las matrices (perlítica y ferrítica), aunque la nodularidad es menor y el vermiculo está presente en mayor cantidad, por tal motivo se realiza dureza microVickers para verificar tal resultado.

Respecto a la dureza microVickers se tiene un resultado más alto que la colada 1 el cual es de 285.80 Kg/mm<sup>2</sup>, de igual manera se obtiene por la zona de aplicación (matriz perlítica), este valor no se ve afectado por la profundidad de la huella siendo más verídico. Así mismo se mantiene una dureza mayor con respecto a la del hierro nodular obtenido en la colada 1, lo cual indica que si se presenta una tendencia a aumentar la dureza, solo de la matriz.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

El contenido de titanio efectivamente modifica la morfología del carbono grafito obteniendo una forma esferoidal a niveles cercanos a 0%, y consiguiendo una formación de gusano o vermículo a niveles en un rango del 0.1 al 0.15%.

Un grafito esferoidal de tamaño homogéneo se obtiene con 0% de Ti. Con la adición de un 0.05%, se alcanza a modificar el tamaño consiguiendo una heterogeneidad (esferoides grandes y pequeños), teniendo un 0.1% de Ti en composición la deformación del esferoide se asegura obteniendo una forma de gusano o vermículo, aunque esta no es la que predomina, ya que hay presencia de esferoides. Así mismo cuando se obtiene un porcentaje cercano al 0.15% la formación del vermículo se asegura, dando un hierro vermicular.

La dureza cuando el material no contiene titanio es la de un hierro dúctil, así mismo cuando se adiciona el Ti se modifica tal propiedad.

Cuando se obtiene un porcentaje de Ti del 0.05%, la dureza aumenta por la cantidad de nódulos y su diferencia en tamaño, tal propiedad cambia con la adición del 0.1% de Ti, es mayor que la de un hierro dúctil pero menor a la que posee la fundición con 0.05% de Ti.

Para una composición con 0.15% de Ti es mayor la dureza a la obtenida con el 0.1% de Ti.

La dureza sigue una tendencia a aumentar, conforme el contenido de titanio aumenta.

## REFERENCIAS

- [1] Karsay S. I. (1976), *Fundición con grafito esferoidal I Producción*, Montreal, Canadá, Qit-Fer Et Titane Inc.
- [2] Górný M., Kawalec M. (2013), *Effects of Titanium Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Thin-Walled Compacted Graphite Iron Castings*, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22(5), 1519-1524.
- [3] Groover M. P. (2007), *Fundamentos de manufactura moderna* (3 ed.), México, D.F., McGraw Hill.
- [4] Askeland D. R. (1998), *Ciencia e ingeniería de los materiales* (3 ed.), México, D.F., International Thomson Editores.
- [5] American Society for Metals, (1998), *Metals Handbook, Metallography and Microstructures*, Vol. 9, U.S.A., ASM International.
- [6] Dawson S., Hollinger I. (2001), *The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron*, Society of Automotive Engineers.
- [7] American Society for Metals, (1995), *Metals Handbook, Properties and selection: irons, steels and high performance alloys*, Vol. 1, U.S.A., ASM International.
- [8] William D., Callister J. (1995), *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, España, Reverté.
- [9] Avner S. H. (1989), *Introducción a la metalurgia física* (2 ed.), México, D.F., McGraw Hill.
- [10] Ryntz E. F. (1984), *Foundrymen's guide to ductile iron microstructures*, U.S.A., American Foundrymen's Society.

- [11] García Díaz A. (2013), *Estudio y fabricación de fundición vermicular*, Tesis de Licenciatura, México, D.F., Facultad de Química, UNAM.
- [12] Górný M., Kawalec M. (2013), *Role of Titanium in Thin Wall Vermicular Graphite Iron Castings Production*, Archives of Foundry Engineering, Vol. 1, Issue 2, 25-28.
- [13] Shy Y.-H., Hsu C.-H., Lee S.-C., Hou C.-Y. (2000), *Effects of titanium addition and section size on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron*, Materials Science and Engineering, 54-60.
- [14] Guesser W., Schroeder T., Dawson S. (2001), *Production Experience With Compacted Graphite Iron Automotive Components*, American Foundrymen's Society.
- [15] Paknikar S. K. (2014), *Compacted Graphite Iron: Modern Production Technology for Automobile Castings*, Indian Foundry Journal, Vol. 60, India.
- [16] American Society for Metals, (1998), *Metals Handbook, Casting*, vol. 15, U.S.A., ASM International.
- [17] <http://www.hempelmetals.com/en/product-range.htm>, 24 de junio del 2017, 12:56 p.m.

## ANEXOS

### ANEXO 1 CÁLCULOS DE BALANCE DE CARGA Y AJUSTE DE CARGA

Se fijó una carga de chatarra de hierro gris de 60 Kg y de chatarra de acero de 30 Kg para tener un total en el horno de 90 Kg.

Cálculos de elementos requeridos para la fabricación del hierro vermicular:

$$C: 90Kg \left( \frac{3.65}{100} \right) = 3.285Kg$$

$$Si: 90Kg \left( \frac{2.45}{100} \right) = 1.738Kg$$

$$Mn: 90Kg \left( \frac{0.6}{100} \right) = 0.54Kg$$

$$P: 90Kg \left( \frac{0.05}{100} \right) = 0.045Kg$$

$$S: 90Kg \left( \frac{0.015}{100} \right) = 0.0135Kg$$

$$Cu: 90Kg \left( \frac{0.35}{100} \right) = 0.315Kg$$

Elementos aportados por las chatarras:

*Tabla 17. Kg aportados de cada elemento de la chatarra de hierro dúctil (ch1).*

Elemento	Cantidad (Kg)
C	1.853
Si	1.288
Mn	0.152
P	0.011
S	0.011
Cu	0.071

Cálculos para obtener los Kg de cada elemento que aporta la chatarra de hierro dúctil:

$$C: 60Kg \left( \frac{3.089}{100} \right) = 1.853Kg$$

$$Si: 60Kg \left( \frac{2.1465}{100} \right) = 1.288Kg$$

$$Mn: 60Kg \left( \frac{0.2539}{100} \right) = 0.152Kg$$

$$P: 60Kg \left( \frac{0.0187}{100} \right) = 0.011Kg$$

$$S: 60Kg \left( \frac{0.01775}{100} \right) = 0.011Kg$$

$$Cu: 60Kg \left( \frac{0.1175}{100} \right) = 0.071Kg$$

Tabla 18. Kg aportados de cada elemento de la chatarra de acero.

Elemento	Cantidad (Kg)
C	0.012
Si	0.009
Mn	0.180
P	0.003
S	0.001
Cu	0.027

Cálculos para obtener los Kg de cada elemento que aporta la chatarra de acero:

$$C: 30Kg \left( \frac{0.04}{100} \right) = 0.012Kg$$

$$Si: 30Kg \left( \frac{0.03}{100} \right) = 0.009Kg$$

$$Mn: 30Kg \left( \frac{0.6}{100} \right) = 0.180Kg$$

$$P: 30Kg \left( \frac{0.01}{100} \right) = 0.003Kg$$

$$S: 30Kg \left( \frac{0.004}{100} \right) = 0.001Kg$$

$$Cu: 30Kg \left( \frac{0.09}{100} \right) = 0.027Kg$$

Cálculos para obtener la cantidad faltante de cada elemento:

$$C \text{ falta: } 3.285Kg - 1.853Kg - 0.012Kg = 1.420 Kg$$

$$Si \text{ falta: } 1.738Kg - 1.288Kg - 0.009Kg = 0.441 Kg$$

$$Mn \text{ falta: } 0.54Kg - 0.152Kg - 0.180Kg = 0.208 Kg$$

$$Cu \text{ falta: } 0.315Kg - 0.071Kg - 0.027Kg = 0.218 Kg$$

Tabla 19. Cantidad teórica de los materiales de ajuste de carga.

Material	Cantidad
Recarburante (Kg)	1.497
FeMn (g)	286
Cu (g)	224

Cálculos para obtener la cantidad teórica de los materiales de ajuste de carga:

$$\text{Recarburante} = 1.42 \left( \frac{100}{99.8} \right) \left( \frac{100}{95} \right) = 1.497Kg$$

$$FeMn = 0.208 \left( \frac{100}{74} \right) \left( \frac{100}{98} \right) = 286g$$

$$Cu = 0.218 \left( \frac{100}{100} \right) \left( \frac{100}{97} \right) = 224g$$

Obteniendo los análisis preliminares por medio del espectro de los elementos a ajustar (Si, Mn y Cu), se recalculo el ajuste de la siguiente manera:

Tabla 20. Cantidades preliminar de los siguientes elementos para realizar el ajuste de carga.

% Si	% Mn	% Cu
1.658	0.2796	0.1196

Cálculos para obtener la cantidad real de los materiales de ajuste de carga, basados en los porcentajes preliminares:

$$Kg\ FeMn = 90Kg \left( \frac{0.6 - 0.2796}{100} \right) \left( \frac{100}{74} \right) \left( \frac{100}{98} \right) = 0.398Kg$$

$$Kg\ Cu = 90Kg \left( \frac{0.35 - 0.1196}{100} \right) = 0.20736Kg$$

Para el ajuste del Si en horno se debe de tomar en cuenta el %Si de la inoculación y de la nodularización.

Para la primera y segunda colada se mantuvo la eficiencia del método sándwich en un 45%, de la nodularización.

Ocupando la ecuación 2 se obtiene el porcentaje de Mg a adicionar como se muestra en el siguiente cálculo:

$$\%Mg\ adicionar = \left( \frac{0.02}{45 * 0.01} \right) + 0.015 = 0.059\%$$

Se presentan los cálculos para obtener el porcentaje de FeSiMg y las cantidades en Kg de FeSiMg y Si que se requieren, al igual que el % de Si que aporta el nodulizante:

$$\%FeSiMg = 0.059 \left( \frac{100}{7.57} \right) = 0.785\%$$

$$KgFeSiMg = 20 \left( \frac{0.785}{100} \right) = 0.157Kg$$

$$KgSi\ en\ FeSiMg = 0.157 \left( \frac{45.73}{100} \right) = 0.072Kg$$

$$\%Si\ en\ FeSiMg = 0.072 \left( \frac{100}{20} \right) = 0.359\%$$

$$\%Si \text{ horno} = \%Si \text{ requerido} - \%Si \text{ inoculación} - \%Si \text{ nodularización} \quad (5)$$

Recordando que el %Si en inoculación es de 0.2%, se calculó a continuación el % de Si en el horno que se requiere tener, tomando en cuenta la ecuación 5:

$$\%Si \text{ horno} = 2.45\% - 0.2\% - 0.359\% = 1.891\%$$

Así mismo se muestra el cálculo para obtener la cantidad de FeSi en el ajuste:

$$Kg \text{ FeSi} = \left( \frac{1.891 - 1.658}{100} \right) \left( \frac{100}{98} \right) \left( \frac{100}{76.5} \right) = 0.28Kg$$

En la tercera colada se decidió modificar la eficiencia del método sándwich al 50%. Para calcular de la siguiente manera el % Mg a adicionar:

$$\%Mg \text{ adicionar} = \left( \frac{0.02}{50 * 0.01} \right) + 0.015 = 0.055\%$$

Se presentan los cálculos para obtener el porcentaje de FeSiMg y las cantidades en Kg de FeSiMg y Si que se requieren, al igual que el % de Si que aporta el nodulizante:

$$\%FeSiMg = 0.055 \left( \frac{100}{7.57} \right) = 0.727\%$$

$$KgFeSiMg = 20 \left( \frac{0.727}{100} \right) = 0.145Kg$$

$$KgSi \text{ en FeSiMg} = 0.145 \left( \frac{45.73}{100} \right) = 0.066Kg$$

$$\%Si \text{ en FeSiMg} = 0.066 \left( \frac{100}{20} \right) = 0.332\%$$

Utilizando la ecuación 5 se calcula el % de Si en horno que se necesita y la cantidad de FeSi para ajustar, y mostrando el cálculo a continuación:

$$\%Si \text{ horno} = 2.45\% - 0.2\% - 0.332\% = 1.918\%$$

$$Kg FeSi = \left( \frac{1.918 - 1.658}{100} \right) \left( \frac{100}{98} \right) \left( \frac{100}{76.5} \right) = 0.31Kg$$

Para la cuarta colada se modificó la eficiencia del método sándwich a un 53% por la composición química que arrojó el espectro en la colada 3, y recalculando las cantidades.

Utilizando la ecuación 2 se calcula el % de Mg a adicional de la siguiente manera:

$$\%Mg \text{ adicional} = \left( \frac{0.02}{53 * 0.01} \right) + 0.015 = 0.053\%$$

A continuación se muestran los cálculos para obtener el % de FeSiMg, los Kg de FeSiMg, los Kg y el % de Si que aporta el FeSiMg.

$$\%FeSiMg = 0.053 \left( \frac{100}{7.57} \right) = 0.697\%$$

$$KgFeSiMg = 20 \left( \frac{0.697}{100} \right) = 0.139Kg$$

$$KgSi \text{ en } FeSiMg = 0.139 \left( \frac{45.73}{100} \right) = 0.064Kg$$

$$\%Si \text{ en } FeSiMg = 0.064 \left( \frac{100}{20} \right) = 0.319\%$$

Tomando en cuenta la ecuación 5 se calcula el % de Si en el horno de la siguiente manera:

$$\%Si \text{ horno} = 2.45\% - 0.2\% - 0.319\% = 1.931\%$$

Y su respectivo ajuste con FeSi se calcula así:

$$Kg FeSi = \left( \frac{1.931 - 1.658}{100} \right) \left( \frac{100}{98} \right) \left( \frac{100}{76.5} \right) = 0.33Kg$$

Tabla 21. Datos para realizar los cálculos de cantidad de inoculante y nodulizante.

Densidad metal (g/cm <sup>3</sup> )	7.2
Capacidad del horno (Kg)	90
Capacidad de la olla de tratamiento (Kg)	20
Rendimiento método sándwich (%)	45
Mg residual (%)	0.02
Inoculación tardía (%)	0.2

Tabla 22. Silicio base en la inoculación tardía.

Metal demandado por molde (Kg)	6.7
FeSi (g)	18

Cálculo para obtener la cantidad de FeSi inoculante con respecto a los Kg de metal que demanda el molde:

$$Kg \text{ FeSi (inoculación)} = 6.7Kg \left( \frac{0.2}{100} \right) \left( \frac{100}{76.5} \right) \left( \frac{100}{98} \right) = 0.018Kg$$

Tabla 23. Cantidad de Ti y FeTi teóricos.

Colada	Ti (%)	FeTi (g)
1	-----	-----
2	0.05	50
3	0.10	41
4	0.15	25

Se toma una base de cálculo debido a que la adición del FeTi fue en horno. En la primer colada se vació 20Kg de los 90Kg que tenía el horno inicialmente, por lo tanto, queda 70Kg.

En cada colada se vacían 20Kg, así se recalcula el FeTi a adicionar con una diferente base de cálculo. Además, se toma en cuenta el porcentaje de Ti de la colada anterior.

Los cálculos se muestran a continuación:

$$\text{Colada 2: } g \text{ FeTi} = 70\text{Kg} \left( \frac{0.05}{100} \right) \left( \frac{100}{70} \right) \left( \frac{1000}{1} \right) = 50g$$

$$\text{Colada 3: } g \text{ FeTi} = 50\text{Kg} \left( \frac{0.1 - 0.0466}{100} \right) \left( \frac{100}{70} \right) \left( \frac{100}{92} \right) \left( \frac{1000}{1} \right) = 41g$$

$$\text{Colada 4: } g \text{ FeTi} = 30\text{Kg} \left( \frac{0.15 - 0.096}{100} \right) \left( \frac{100}{70} \right) \left( \frac{100}{92} \right) \left( \frac{1000}{1} \right) = 25g$$

## ANEXO 2 COMPOSICIONES DE CHATARRAS Y MATERIALES DE AJUSTE DE CARGA

### Chatarras

Tabla 24. Composición química de la chatarra de hierro dúctil (ch1).

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu
3.089	2.1465	0.2539	0.0187	0.01775	0.1175

Tabla 25. Composición química de la chatarra de acero (ch2).

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu
0.04	0.03	0.6	0.01	0.004	0.09

### Materiales de ajuste de carga utilizados

Tabla 26. Composición química del inoculante (FeSi 75%)\*.

% Si	% C	% S	% P	% Mg	% Al	% Fe
74-79	0.15	0.025	0.035	0.55	1.5	23-28

\*Este FeSi también se empleará como inoculante. Eficiencia del Si: 98%.

Tabla 27. Composición química Recarburante.

% C	% S	% Cenizas
99.8*	0.008	0.1

\*Eficiencia del C: 95%.

Tabla 28. Composición química del FeMn y Cu.

	% Mn	% Cu	% Eficiencia
FeMn	74		98
Cu puro		100	95

Tabla 29. Composición química del Ferrotitanio.

% Ti	% Al	% C	% P	% S
65-75*	1.41	<0.2	<0.05	<0.05

\*Eficiencia del Ti: 100%.

Tabla 30. Composición química del nodulizante (Noduloy R6).

% Si	% Mg	% Al	% Ca	TRE
45.43	6.42*	0.62	1.12	1.09

\*Eficiencia del Mg: 45%.