

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HIERRO  
NODULAR PARA PIEZAS AUTOMOTRICES”

QUE PRESENTA  
JUAN JOSÉ RAMÍREZ NATERA

EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE MAestrÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

JULIO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DEL POSGRADO



TESIS

“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HIERRO  
NODULAR PARA PIEZAS AUTOMOTRICES”

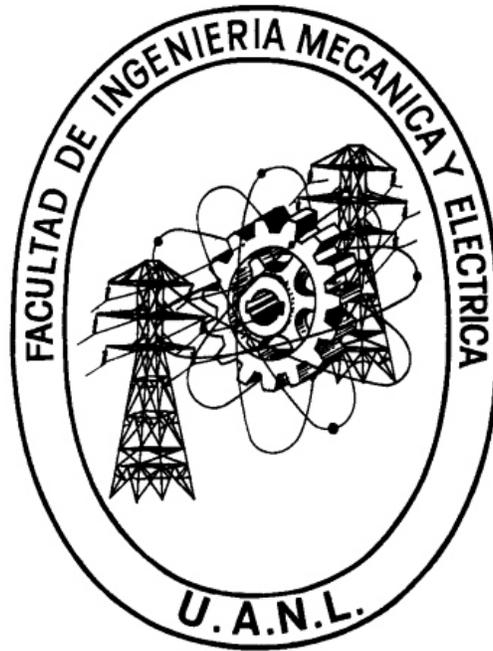
PRESENTA

JUAN JOSÉ RAMÍREZ NATERA

EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE MAestrÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

JULIO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DEL POSGRADO



TESIS

“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HIERRO  
NODULAR PARA PIEZAS AUTOMOTRICES”

PRESENTA

JUAN JOSÉ RAMÍREZ NATERA

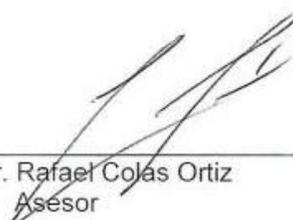
EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE MAestrÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

JULIO 2015

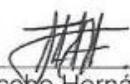
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HIERRO NODULAR PARA PIEZAS AUTOMOTRICES" realizada por el alumno JUAN JOSÉ RAMÍREZ NATERA, con número de matrícula 1696250, sea aceptada para su defensa como opción al grado de MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

El Comité de Tesis

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Rafael Colás Ortiz  
Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Sergio Mario Rodríguez  
Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Jacobo Hernández Sandoval  
Revisor

Vo. Bo.

\_\_\_\_\_  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, "29 De Junio Del 2015"

## **Agradecimientos**

### **A Dios.**

A la empresa Blackhawk, por abrirme sus puertas para realizar mi proyecto de investigación dentro de la empresa.

A Ductile Iron Society (DIS), por su enorme apoyo al compartirme los conocimientos de producción de hierro nodular, contando con el apoyo de varios de sus colaboradores entre ellos el Al Alagarsamy investigador de gran prestigio a nivel internacional, a Jim Wood, por su apoyo para la asistencia al Ductile Iron Production Seminar.

A mi asesor académico el Dr. Rafael Colás Ortiz, por su apoyo y orientación, conocimientos compartidos, por mostrarme siempre el camino a seguir, por su amistad, y sus observaciones tan atinadas. En especial al mi Asesor el Dr. Sergio Haro Rodríguez, por su gran amistad, su apoyo incondicional, arduas horas de trabajo, conocimientos compartidos, todos sus consejos, bromas, charlas y buenos momentos.

A todos mis compañeros de la empresa, que durante mi estancia me brindaron todo su apoyo en la realización de pruebas y obtención de muestras, trabajadores, técnicos, ingenieros y al gerente general el ingeniero Patricio Gil Ramos. A mis compañeros de la maestría, del doctorado en materiales, y docentes del posgrado y amigos, por su apoyo y colaboración en el manejo de equipo, análisis y realización de pruebas.

A mi familia, mi padre Juan Francisco Ramírez Hipólito y mi madre María del Carmen Natera Cordero y mis hermanos Andrea Margarita y José Luis por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento que me inspiran a siempre seguir adelante aun desde la distancia siendo mi motor y el motivo de todos mis logros, a mi novia Karen Lizeth Méndez Salas por su comprensión, cariño y apoyo siempre.

A todos los que pusieron un granito de apoyo en este proyecto, GRACIAS.

# Contenido

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b> .....	2
Introducción.....	2
Antecedentes .....	3
Problemática .....	3
Objetivo General .....	4
Objetivos Específicos .....	4
Hipótesis.....	4
<b>CAPITULO II</b> .....	6
2.1. Metalurgia de los Hierros Fundidos. ....	6
2.1.1. Hierros fundidos. ....	6
2.1.2. Clasificación de los hierros fundidos. ....	7
2.1.3. Hierro nodular.....	9
2.1.4. Influencia de los elementos primarios. ....	10
2.1.5. Influencia de elementos esferoidizantes.....	12
2.1.6. Influencia de elementos aleantes. ....	15
2.1.7. Influencia de elementos nocivos. ....	16
2.1.8. Microestructuras de hierros nodulares. ....	17
2.1.9. Propiedades de los hierros fundidos nodulares.....	18
2.1.10. Proceso de producción del hierro nodular. ....	19
2.1.11. Nodularización.....	20
2.1.12. Inoculación. ....	21
2.1.13. Nódulos de grafito. ....	22

2.1.14. Deformidades en los nódulos de grafito. ....	24
2.1.15. Aplicaciones. ....	26
2.2. Principios de solidificación de hierros nodulares.....	27
2.2.1. Nucleación.....	27
2.2.2. Crecimiento. ....	27
2.2.3. Diagrama Fe-C.....	28
2.2.4. Fenómeno de Solidificación. ....	30
2.2.5. Análisis térmico. ....	31
<b>CAPÍTULO III</b> .....	32
3.1. Manufactura de una autoparte.....	32
3.1.1 Características. ....	32
3.2. Proceso de fabricación. ....	33
3.2.1. Fusión de la carga.....	33
3.2.2. Ajuste de composición química.....	33
3.2.3. Tratamiento de nodularización. ....	34
3.2.4. Inoculación. ....	34
3.2.5. Preparación de moldes.....	35
3.2.6. Colocación de corazones. ....	36
3.2.7. Vaciado. ....	37
3.2.8. Desmoldeo.....	38
3.2.8. Problemática en su manufactura.....	39
3.2.9. Producto terminado y aplicación. ....	39
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	41
Procedimiento experimental y equipo.....	41
4.1. Diseño de experimento general. ....	41

4.2. Diagramas de flujo experimental.....	43
4.2.1. Estudio del efecto de la composición química sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	43
4.2.2. Estudio del efecto del método de inoculación sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	44
4.2.3. Estudio del efecto del tiempo de desmoldeo sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	45
4.3. Caracterización del hierro nodular. ....	46
4.3.1 Estudio del efecto de la composición química sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	46
4.3.2. Estudio del efecto del método de inoculación sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	47
4.3.3. Estudio del efecto del tiempo de desmoldeo sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	51
<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>58</b>
Análisis y discusión de resultados. ....	58
5.1 Estudio del efecto de la composición química sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	58
5.1.1 Análisis químico. ....	58
5.1.2. Análisis metalográfico.....	60
5.1.3. Dureza.....	65
5.1.4. Propiedades mecánicas. ....	66
5.2. Estudio del efecto del método de inoculación sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	70
5.2.1. Análisis químico. ....	70
5.2.2. Análisis metalográfico.....	71
5.2.3. Dureza.....	75

5.2.4. Propiedades mecánicas. ....	76
5.3. Estudio del efecto del tiempo de desmoldeo.....	80
5.3.1. Análisis químico. ....	80
5.3.2. Análisis metalográfico.....	80
5.3.3. Dureza.....	87
5.3.4. Propiedades mecánicas. ....	89
5.4. Conclusiones y recomendaciones. ....	92
5.4.1 Estudio del efecto de la composición química sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	92
5.4.2. Estudio del efecto del método de inoculación sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	93
5.4.3. Estudio del efecto del tiempo de desmoldeo sobre la microestructura y propiedades mecánicas. ....	93
5.4.4. Recomendaciones.....	94
5.4.5. Recomendaciones para trabajo a futuro.....	95
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	96
Índice de figuras.....	98
Índice de tablas.....	101
Anexos.....	103
1. Análisis de costos de los inoculantes utilizados. ....	103
2. Análisis EDX (Energy dispersive X-ray). ....	104

## **RESUMEN**

El presente trabajo de investigación se dividió en tres partes considerando los aspectos más importantes en la producción de un hierro nodular para uso automotriz. En la primera etapa se analiza el efecto de la composición química en la microestructura y las propiedades mecánicas, variando el contenido de carbono equivalente en niveles alto, medio y bajo. En la segunda etapa se analizó el efecto del método de inoculación en la microestructura y propiedades, analizando los métodos de inoculación más comúnmente usados en la industria, como lo son: la inoculación en la olla de vaciado, la inoculación en el chorro y la inoculación en el molde.

En la tercera etapa de esta investigación se realizó un estudio en la microestructura y las propiedades mecánicas variando el tiempo de desmoldeo en 2, 4, 6 y 8 horas, usando el método de inoculación en el chorro.

El análisis de microestructura, el contenido de ferrita, perlita y nódulos fueron analizados en espesores: delgado (25 mm), medio (40 mm) y grueso (53 mm) para analizar el efecto de la composición química, de los métodos de inoculación y tiempos de desmoldeo.

El análisis de propiedades mecánicas se realizó por medio de un ensayo de tensión en las secciones gruesas por ser las más críticas de cada condición para cada una de las etapas.

Los resultados indican que ligeras variaciones en el carbono equivalente del orden de 0.02% aunadas a incrementos en el contenido de perlitizantes incrementan el contenido de perlita en la matriz incrementando la resistencia, y disminuyendo la ductilidad. El método de inoculación en chorro ofrece las mejores propiedades mecánicas con la mejor relación entre resistencia y ductilidad.

El tiempo de desmoldeo con la mejor combinación de alta resistencia y buena ductilidad fue el de 8 horas para la composición química manejada.

# CAPÍTULO I

## Introducción

Durante 2010 se produjeron 94.1 millones de toneladas en piezas metálicas, de las cuales el 25% fueron de hierro nodular lo cual continúa incrementándose (1). La producción mundial anual supera los 12 millones de toneladas y se espera que en 10 años más llegue a los 20 millones de toneladas. Un tercio de la producción de hierro nodular, a nivel mundial, es destinada a tuberías de agua, un tercio para la industria automotriz y otro tercio para piezas fundidas en general. Es importante observar que el sector de más éxito es el automotriz, donde además de la gran demanda, tiene altos requerimientos de calidad y bajo coste con propiedades específicas (2).

En la actualidad la producción de hierro nodular es mayor que la de hierro maleable y acero. Muchas de las piezas que ya existían producidas con hierro gris y maleable, así como acero fundido y acero forjado se están cambiando con éxito al hierro nodular, sobre todo en regiones en desarrollo. En zonas más desarrolladas se hace la selección del hierro nodular desde las etapas de diseño inicial (2). La principal razón es la reducción de costos que representa la fundición con hierro nodular respecto de piezas maquinadas, soldadas y forjadas.

El hierro nodular tiene numerosos usos en componentes críticos en todos los sectores de la industria, esto debido a su versatilidad y su uso en aplicaciones adicionales. Para un correcto uso del hierro dúctil se han de considerar en el diseño las propiedades mecánicas aspectos como la ductilidad, resistencia, dureza, resistencia a la fractura y resistencia a la fatiga y también propiedades

físicas como la expansión térmica, conductividad térmica, densidad, propiedades magnéticas y eléctricas.

### **Antecedentes**

En 1948 se anunció el hierro nodular, hierro de grafito esferoidal o hierro dúctil en la American Foundrymen's Society Annual Conference. En los primeros años INCO, la compañía que tenía la patente, dio a conocer el hierro nodular a ingenieros y diseñadores mediante la distribución de literatura técnica y seminarios. Su utilización incrementó notablemente en los 50's y principios de los 60's. Después de que terminara la promoción por parte de INCO del hierro nodular en 1966 el mercado continuó creciendo incluso por encima de otras fundiciones ferrosas debido a sus propiedades características y al beneficio económico que ofrece (3).

### **Problemática**

En la producción de piezas vaciadas de hierro nodular intervienen diversos factores que determinan su microestructura y por consecuencia sus propiedades mecánicas. Desde la preparación del metal, iniciando con la calidad de la carga a fundir, composición química, tipo de horno, traslado, tratamiento de nodularización, inoculación, condiciones de vaciado y enfriamiento. Un buen control de estos aspectos determinará la obtención de piezas con las propiedades mecánicas óptimas y microestructurales adecuadas. En el presente trabajo se realizó utilizando diferentes métodos de inoculación, diferentes tiempos de enfriamiento dentro del molde y algunos de los efectos de la composición química en las propiedades mecánicas en distintos espesores de la pieza.

## **Objetivo General**

Determinar las condiciones de proceso para la producción de una pieza automotriz de hierro nodular con el más alto índice de calidad cumpliendo con los requerimientos del cliente.

## **Objetivos Específicos**

- Analizar el efecto de la composición química, en particular el carbono equivalente, sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de un hierro nodular D550 en una pieza automotriz.
- Determinar el efecto del método de inoculación en la microestructura y propiedades mecánicas de una pieza automotriz para espesor delgado y grueso.
- Determinar la relación que existe entre el tiempo de desmoldeo, la microestructura y propiedades mecánicas de una pieza automotriz para espesor delgado y grueso.

## **Hipótesis**

- Ligeras variaciones en el contenido de carbono equivalente tiene una influencia importante en la microestructura y las propiedades mecánicas, lo cual determina el índice de calidad del material para partes automotrices.
- La inoculación es más efectiva a una menor temperatura por lo que el método de inoculación en el molde resulta más efectivo. Una mayor densidad y menor tamaño promedio de nódulos resulta en mejores propiedades mecánicas.

- En las diferentes regiones de la pieza se producirá una diferencia en microestructura y dureza de acuerdo a las diferencias dimensionales, que ocasionan diversas velocidades de solidificación. El tiempo de desmoldeo afecta la microestructura de la pieza de hierro nodular ferrítico-perlítico grado D550, para una zona específica en la pieza a mayor tiempo de desmoldeo disminuye el porcentaje de perlita y la densidad de nódulos por milímetro cuadrado. Estos cambios en la microestructura producirían menor dureza y resistencia mecánica con un consecuente incremento en la ductilidad.

## **CAPITULO II**

### **2.1. Metalurgia de los Hierros Fundidos.**

#### **2.1.1. Hierros fundidos.**

El término de hierros fundidos, o hierros vaciados abarca una gran familia de aleaciones ferrosas cuyos principales aleantes son hierro, carbono y silicio. Debido a su alto contenido de carbono, muestran estructuras ricas en este elemento, dependiendo de la composición primaria, velocidad de enfriamiento, y tratamiento, los hierros fundidos pueden generar diferentes microestructuras que le den propiedades mecánicas específicas (4).

Se le llama hierro fundido al hierro o aleación de hierro que ha sido calentado por encima de su punto de fusión, el metal líquido se vierte entonces en un molde y al solidificar toma su forma. Generalmente la materia prima de fundición es el arrabio y la chatarra de acero.

El carbono y el silicio siendo los principales elementos de aleación, se emplean en cantidades que van desde 2,1 hasta 4% en peso y de 1 a 3% en peso, respectivamente. Las aleaciones de hierro con un menor contenido de carbono a las cantidades antes mencionadas se conocen como aceros. La solidificación del hierro fundido se comprende a partir del diagrama de fase binario hierro-carbono. Puesto que las composiciones de la mayoría de hierros colados son cercanas al punto eutéctico, las temperaturas de fusión, por lo general van

desde 1150 a 1200 °C, las cuales son aproximadamente 300 °C más bajas que el punto de fusión de hierro puro.

El hierro fundido tiende a ser frágil, a excepción de las fundiciones maleables. Con su punto de fusión relativamente bajo, buena fluidez, capacidad de moldeo, excelente maquinabilidad, resistencia a la deformación y resistencia al desgaste, los hierros fundidos se han convertido en un material de ingeniería con una amplia gama de aplicaciones, se utilizan en tubos, máquinas y partes de la industria automotriz, tales como cilindros, cabezas de motor, bloques de cilindros y cajas de cambios.

Los primeros artefactos de fundición datan del siglo V a. C. y fueron descubiertos por los arqueólogos en lo que hoy es moderno Luhe County, Jiangsu en China. La fundición de hierro fue utilizado en la antigua China para la guerra, la agricultura y la arquitectura. Durante el siglo XV, se convirtió en hierro fundido utilizado para la artillería, en Borgoña, Francia, y en Inglaterra durante la Reforma. El primer puente de hierro fundido fue construido durante la década de 1770 por Abraham Darby III, y se conoce como el Iron Bridge. El hierro fundido también se utiliza en la construcción de edificios (5).

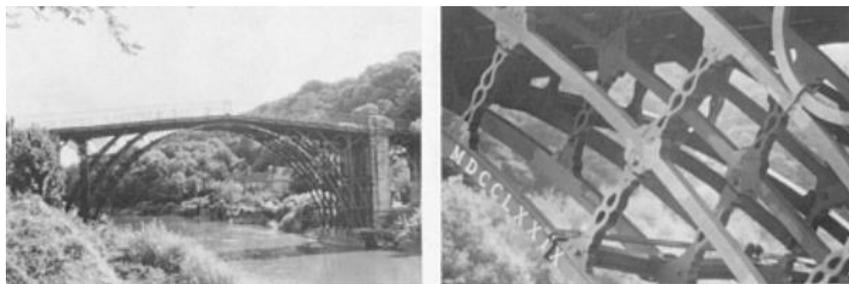


Figura 1. El Iron Bridge en el río Severn en Ironbridge Gorge (5).

### **2.1.2. Clasificación de los hierros fundidos.**

En un inicio se clasificó a los hierros en base al color de su fractura, de lo cual se conocieron dos tipos de hierros:

- *El hierro gris.* Exhibe una fractura superficial de color gris, esto debido a que la fractura se propaga a lo largo de las hojuelas de grafito como resultado de una solidificación eutéctica estable.
- *El hierro blanco.* Exhibe una fractura blanca, cristalina debido a la que la fractura ocurre a lo largo de las hojuelas de carburo de hierro como resultado de una solidificación metaestable.

De acuerdo con los porcentajes de carbono y silicio se pueden clasificar los hierros, que a diferencia de los aceros, poseen un porcentaje de carbono equivalente mayor a 2 ( $C_{eq} = \%C + 1/6\%Si > 2.0$ ). Ver la Figura 1.

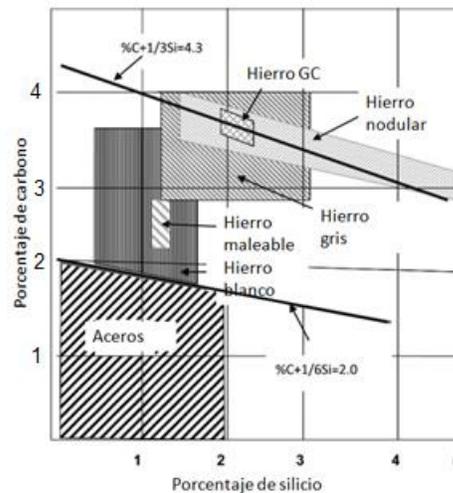


Figura 2. Porcentajes de carbono y silicio para hierros y acero. (1)

Con el avance de la metalografía otras clasificaciones basadas en características microestructurales fueron posibles:

- *Forma del grafito.* Grafito laminar, grafito esferoidal, grafito compacto, grafito templado, el cual surge de una reacción en estados sólido (maleabilización).
- *Tipo de matriz.* Ferrítica, perlítica, austenítica, martensítica y bainítica. (4)

Tabla i. Clasificación de hierros vaciados por designación comercial, estructura y fractura (4).

Designación comercial	Fase rica en carbono	Matriz (a)	Fractura	Estructura final después de
Hierro gris	Grafito laminar	P	Gris	Solidificación
Hierro nodular	Grafito esferoidal	F, P, A	Plateado-gris	Solidificación o tratamiento térmico.
Hierro de grafito compacto	Grafito vermicular compacto	F, P	Gris	Solidificación
Hierro blanco	Fe <sub>3</sub> C	P, M	Blanco	Solidificación o tratamiento térmico. (b)
Hierro moteado	Grafito laminar+ Fe <sub>3</sub> C	P	Moteado	Solidificación
Hierro maleable	Grafito templado	F, P	Plateado-gris	Tratamiento térmico
Hierro nodular austemperizado	Grafito esferoidal	B	Plateado-gris	

a) P, Perlita, F, Ferrita, M, Martensita, B, Bainita. b) los hierros blancos no son tratados térmicamente, excepto para aliviar esfuerzos y continuar con la transformación austenítica.

### 2.1.3. Hierro nodular.

El hierro nodular conocido por su ductilidad y tenacidad es un hierro que después de un tratamiento especial (con magnesio, cerio, lantano, etc.). El carbono forma partículas esferoidales de grafito en lugar de láminas (hierro gris). Debido a la forma esferoidal del grafito permite continuidad de la matriz, lo cual le brinda la ductilidad característica. (1) La mayor resistencia del hierro

nodular sobre el hierro gris y el hierro maleable le da una ventaja sobre éstos en muchas aplicaciones (4).

#### **2.1.4. Influencia de los elementos primarios.**

Los elementos considerados primarios son: carbono, silicio, azufre, fósforo y manganeso. Generalmente el nivel óptimo de cada elemento se ve influenciado por los elementos.

**Carbono y silicio.** El contenido de carbono en hierros nodulares comerciales se encuentra entre el 3 y 4%, generalmente los más bajos valores en porcentajes en secciones delgadas y los valores más bajos en secciones gruesas. Una combinación de altos valores de carbono equivalente y bajas velocidades de enfriamiento y solidificación dan como resultado grafito flotado y degenerado. Para piezas vaciadas con secciones de espesores menores de 12.7 mm se recomienda 4.55% de carbono equivalente, para secciones de 12.7 mm a 38.1 mm el porcentaje recomendado va de 4.35 a 4.45% de carbono equivalente y para secciones con espesores mayores a las 50.8 mm se recomienda un carbono equivalente no mayor al 4.3%.

El contenido típico de silicio en un hierro nodular se encuentra entre 1.8% y 2.8%, siendo un elemento potencialmente grafitizador aumentando el conteo de nódulos y disminuyendo la tendencia de formación de carburos, esto se logra con un adecuado procedimiento de inoculación.

En la solidificación de un hierro nodular, la formación de los nódulos de grafito se manifiesta por una expansión volumétrica y una reducción en el carbono equivalente.

Durante un enfriamiento lento de un hierro nodular dentro del rango de la temperatura crítica, la austenita transforma en ferrita alrededor de los nódulos de grafito, la cantidad de ferrita depende de la velocidad de enfriamiento, a

mayor tiempo de enfriamiento mayor contenido de ferrita y de la composición de la austenita (el contenido de silicio se aloja en la austenita y a mayor contenido de silicio mayor contenido de ferrita).

El contenido de silicio que se encuentra en la ferrita la endurece y le da mayor resistencia pero con una consecuente fragilización del hierro nodular.

La efecto del carbono en las propiedades mecánicas es mínimo, reduce la resistencia a la cedencia de entre 2.4 y 2.58 MPa por cada 0.1% de aumento en el carbono y la dureza disminuye 5 HB por cada 0.15% más del contenido de carbono. Aumentando el contenido de carbono incluso aumenta la elongación y la resistencia al impacto.

El contenido de silicio aumenta la resistencia a la cedencia entre 6.89 y 11.03 MPa, reduce la elongación en 0.3% y la dureza en 3 HB por cada 0.1% de contenido de silicio.

En relación con otros elementos el contenido de silicio en combinación con bajos niveles de silicio aumenta la resistencia a la tensión y a la cedencia en hierros nodulares ferríticos mientras que altos contenido de manganeso, el silicio tiene el efecto contrario en la resistencia a la tensión y a la cedencia (6).

**Azufre.** Para la producción de un hierro nodular la desulfurización es un proceso de vital importancia debido a la reacción del azufre con el magnesio formando los sulfuros de magnesio. El contenido de azufre de la base de hierro aumenta la cantidad de magnesio requerida para promover y mantener la esferoidización de grafito.

Los sulfuros de magnesio  $MgS$  y algunos óxidos de magnesio  $MgO$ , combinados con silicio forman los silicatos  $MgSiO_3$  y el azufre con oxígeno forma óxidos de azufre  $SO_2$  todos ellos se forman en el hierro como escoria en la superficie del metal líquido.

Los hierros nodulares de alta calidad se producen con porcentajes menores al 0.02% con un azufre, entre 0.008 y 0.01% se logra una muy buena nodularidad

con tan solo un 0.018% de magnesio, para porcentajes de entre 0.025 a 0.035 de azufre se requiere un 0.04% de magnesio, para hierros con un 0.085% de azufre se requiere hasta un magnesio residual del 0.055%. Pero un porcentaje de azufre menor al 0.006% antes del tratamiento de magnesio se presenta baja respuesta a la esferoidización, bajo conteo de nódulos y una alta tendencia a la formación de carburos.

**Fósforo.** Durante la solidificación del hierro dúctil el fósforo se segrega a los límites de grano que rodean las esferas de grafito, formando una red de esteadita (fosfuro frágil), por lo cual afecta negativamente la ductilidad y tenacidad. Pero a niveles controlados el fósforo estabiliza y refina la perlita aumentando la dureza y la relación de resistencia a la cedencia- resistencia a la tensión (6).

**Manganeso.** El hierro dúctil puede ser adicionado con manganeso, el rango típico es de 0.50-0.70%. El manganeso aumenta la dureza y la resistencia de la ferrita, estabilizando y refinando la perlita incluso a bajos porcentajes. Aumentando el porcentaje de manganeso se eleva la resistencia a la cedencia y la resistencia a la tensión, pero reduce la elongación. El manganeso es cinco veces más efectivo formador de perlita que el níquel, pero a contenidos mayores al 0.7% produce una red de carburos (6).

### **2.1.5. Influencia de elementos esferoidizantes.**

Hay una gran variedad de elementos que producen un grafito esferoidal en hierros con bajo contenido de azufre. Todos esos elementos muestran una baja solubilidad en el hierro fundido y son desoxidantes y desulfurizantes muy efectivos incluso en pequeñas cantidades de estos elementos. Pero el tratamiento más comúnmente utilizado en hierros dúctiles es el magnesio.

**Magnesio.** El porcentaje de tratamiento de magnesio requerido para lograr un grafito completamente esferoidal va de 0.02-0.08% dependiendo éste del contenido de azufre existente en el hierro. La acción del magnesio en el hierro líquido es desoxidar, desulfurizar el metal, modificar la forma del grafito y promover la formación de carburo eutéctico. Sin embargo es necesario controlar los niveles de oxígeno y azufre en el hierro a tratar, debido a que una excesiva cantidad de estos elementos puede consumir el magnesio, dejando insuficiente nivel de magnesio residual para darle forma esferoidal al grafito. El óxido de magnesio (MgO) producido durante la desoxidación es sólido y de color blanco, que permaneciendo sólido y por su baja densidad flota en la superficie del metal fundido. El efecto desulfurizante del magnesio permite remover 1.5 unidades de azufre por cada unidad de magnesio formando sulfuro de magnesio MgS, al igual que el óxido de magnesio es de baja densidad y debe removerse para evitar que se disuelva nuevamente en el metal aunque también se evapora a la atmosfera. Con un contenido de magnesio de 0.018% se puede obtener grafito completamente esferoidal con niveles bajos de azufre y oxígeno en el metal base. La forma del grafito cambia de tipo A, a hojuela subenfriada, luego a grafito vermicular o compacto y finalmente a grafito esferoidal.

El efecto del magnesio como formador de carburos a niveles altos subenfriaría el eutéctico permitiendo que el metal solidifique formando carburos, con un conteo de nódulos el metal solidificará con regiones de carburos intercelulares e intergranulares, mientras que un conteo de nódulos alto la solidificación se completará antes de alcanzar la temperatura de formación de carburos.

El magnesio por ser un elemento volátil que hace ebullición a los 1107 °C y su contenido en el metal se reduce al permanecer por encima de dicha temperatura, la pérdida de magnesio en el metal se da por varios factores. En una olla más pequeña y descubierta se da una pérdida más rápida que en ollas grandes y cubiertas debido a la mayor relación de la área superficial con el volumen del metal.

**Cerio y otras tierras raras.** Cerio fue el elemento usado por Henton Morrogh de la British Cast Iron Research Asociation para formar el grafito esferoidal en hierros hipereutéticos neutralizando los efectos negativos del plomo, bismuto, titanio, etc.

Se utilizan comúnmente dos tipos de materiales de tierras raras en Estados Unidos, el primero basado en 50% cerio, 33% lantano, 12% neodimio y 4% praseodimio y otras tierras raras e itrio. El segundo con un alto contenido de Cerio 92%, 5% lantano, 2% neodimio y 1 % de praseodimio más itrio y otras tierras raras en menor cantidad.

El cerio al igual que el magnesio es un fuerte desoxidante, no es tan volátil debido a que su punto de evaporación es 2406°C, su adición no produce destellos luminosos mientras que los óxidos y sulfuros formados no se vuelven a disolver. Un 0.035% en peso de cerio es suficiente para producir grafito esferoidal en un hierro hipereutético, debido a que el cerio actúa como un potente estabilizador de carburos, el hierro debe contener más de 3.8% en peso de carbono y estar inoculado adecuadamente, la microestructura obtenida será dependiente del área de la sección. Una combinación de 0.015-0.02% en peso de Mg más un 0.02% en peso de Ce resulta en un grafito completamente nodular, menos afectado por la pérdida de efectividad con el tiempo (fading) además de una reducción significativa de la escoria formada.

El calcio es muy importante en la producción de hierros nodulares ya que reduce la volatilidad de la reacción del magnesio y aumenta con esto la efectividad de la inoculación. El calcio como elemento esferoidizante reacciona con el oxígeno formando óxidos de calcio CaO, los cuales flotan en la superficie del metal fundido, un alto contenido de calcio producirá un hierro sucio por la gran cantidad de óxidos producidos. Un porcentaje mayor al 0.03% en peso de calcio en hierros ayuda a promover la formación de carburos, pero debajo de esta cantidad reduce efectivamente la violencia de la reacción del magnesio.

El bario se utiliza principalmente en ferrosilicios en los cuales se recomienda entre un 2-2.5% en peso para promover un alto conteo de nódulos durante el proceso de inoculación (6).

### **2.1.6. Influencia de elementos aleantes.**

**Níquel.** Se agrega a los hierros nodulares en cantidades que van de 0.5-36% logrando estabilizar la austenita bajando la temperatura de transformación gama-alfa. Los hierros nodulares se estabilizan con un 18-36% de níquel.

A bajos niveles, el níquel endurece la solución sólida de la ferrita, la dureza Brinell puede incrementar hasta 15 unidades HB por cada 1% de níquel y el esfuerzo a la cedencia aumenta de 35-40 MPa.

**Molibdeno.** El molibdeno se agrega al hierro nodular por dos razones principales:

- Para al alcanzarla una microestructura libre de perlita.
- Obtener resistencia a altas temperaturas.

El molibdeno es un ligero formador de carburos. A niveles de 0.5% o más se puede encontrar algunos carburos intergranulares. La resistencia a la cedencia aumenta 41.3 MPa y 15 HB en dureza por cada 1% de molibdeno, mientras que la elongación es reducida un 8%.

**Cobre.** El cobre es muy conocido como un agente grafitizante y promotor de perlita, reduciendo el contenido de ferrita y acompañado de molibdeno es más efectivo. Reduce la resistencia al impacto y eleva la temperatura de transición frágil-dúctil. En porcentajes mayores al 2% es insoluble y se presenta como precipitado en los límites de grano. La mayor pureza de este elemento permite

la mayor efectividad aumentando la resistencia de la pieza y la dureza mediante la formación y refinamiento de la perlita (6).

### **2.1.7. Influencia de elementos nocivos.**

Existe una serie de elementos que puede afectar la formación de estructuras de grafito esferoidales, dichos elementos, aún en pequeñas cantidades son suficientes para interferir en la formación del grafito esferoidal, otros elementos son deseables en ciertas concentraciones, mientras que pueden ser nocivos en concentraciones mayores o menores.

Dichos elementos se pueden clasificar dentro de tres grupos:

- Elementos que promueven el grafito grueso.
- Elementos que forman grafito en forma de hojuelas.
- Elementos que interfieren en el crecimiento del grafito.

Los elementos que promueven el grafito grueso pueden ser contrarrestados con los elementos que promueven el grafito en forma de hojuelas. Y los elementos que promueven el grafito en forma de hojuelas se contrarrestan con los elementos que promueven el grafito grueso. El tercer grupo de elementos reacciona químicamente con el magnesio, por lo tanto la adición de magnesio como nodularizante tiene por objeto controlar estos elementos en niveles bajos. Estos elementos son: telurio, plomo, titanio, aluminio, antimonio, bismuto y otros.

### 2.1.8. Microestructuras de hierros nodulares.

Las microestructura, que constituye la matriz, determina en gran medida las propiedades mecánicas, logrando combinaciones de resistencia y elongación.

En seguida se describe de manera breve los microconstituyentes en las fundiciones de hierro (7).

**Ferrita.** A temperatura normal la ferrita tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo, y es relativamente suave, dúctil y con resistencia moderada. En los hierros vaciados el silicio se encuentra en la ferrita y junto con otros elementos la endurecen y le dan resistencia (la dureza varía de 140-200 HB). La ferrita se puede encontrar en forma libre o dentro de la perlita. En los hierros dúctiles la ferrita se forma inicialmente alrededor de los nódulos de grafito y con un favorable potencial grafitizador se extiende a los límites de grano (1).

**Perlita.** La perlita es una mezcla de láminas de ferrita y cementita alternadas. Con buena resistencia, leve ductilidad y una dureza que va de los 200-300 HB. La cantidad de perlita está influenciada por el grado de grafitización (1).

**Austenita.** En los hierros vaciados la austenita es una fase de alta temperatura y tiene una estructura cristalina cúbica centrada en las caras. Con un enfriamiento lento se transforma a ferrita, perlita o una combinación de ambas. Es posible encontrarse a temperatura ambiente en hierros con un alto porcentaje de níquel y cromo (1).

**Bainita.** Se forma a partir de la transformación de la austenita, su microestructura consta de agujas o láminas de cementita  $Fe_3C$  en una matriz de ferrita, requiere un enfriamiento más rápido que la perlita, debido a esto presenta una mayor dureza, resistencia y ductilidad (7).

**Cementita.** Es una combinación química representada por  $Fe_3C$ , la cual se puede generar en forma masiva durante la solidificación de hierros blancos o

enfriados. La cementita es muy dura y frágil reflejándose en las propiedades mecánicas en cantidades significativas, su peso es 15 veces el peso del carbono (1).

### 2.1.9. Propiedades de los hierros fundidos nodulares.

Las propiedades mecánicas de los hierros fundidos resultan del porcentaje, tamaño y forma del grafito, de su matriz, de su composición química (en especial el contenido de carbono y silicio) y de la rapidez de enfriamiento. Las propiedades de los hierros vaciados varían de acuerdo a la estructura de su matriz.

Los estándares de especificaciones para fundiciones de hierro nodular tienen como objetivo brindar información útil para fundidores y diseñadores para seleccionar el tipo de hierro nodular que mejor cumpla con los requerimientos para aplicaciones específicas. En la siguiente tabla se muestran las especificaciones de la SAE por sus siglas en inglés (*Society of Automotive Engineers*).

Tabla ii. Especificación de la SAE para piezas fundidas de hierro nodular en la industria automotriz. (8)

SAE J434 FEB2004 FUNDICIONES AUTOMOTRICES DE HIERRO NODULAR										
Grado	Esfuerzo máximo a la tensión.		Esfuerzo de cedencia.		Espesor de sección relativo	Energía de impacto Charpy, valores típicos de impacto.		Elongación	Dureza	Estructura
	MPa	ksi	MPa	ksi		N-m	ft.-lb.			
D400 (D4018)	400	58	275	40	<=20mm	120	90	18	143-170 (1402-1667)	Ferrita
D450 (D4512)	450	65	310	45	<=20mm	80	60	12	156-217 (1530-2128)	Ferrita-Perlita
D500	500	73	345	50	<=20mm	54	40	6	187-229	Ferrita-

(D5506)									(1834-2246)	Perlita
D550 (D5504)	550	80	380	55	<=20mm	40	30	4	217-269 (2128-2638)	Perlita- Ferrita
D700 (D7003)	700	102	450	65	<=20mm	27	20	3	241-302 (2363-2961)	Perlita
D800	800	116	480	70				2	255-311 (2501-3050)	Perlita de martensita templada
DQ&T	Es posible una amplia variedad de propiedades. Las propiedades mínimas son acordadas por el diseñador y comprador.								Rango especificado por acuerdo	Martensita templada

Los hierros nodulares ferríticos de alta ductilidad muestran un alargamiento en el intervalo de 18-30 %, con resistencias a la tracción equivalentes a los encontrados en acero de bajo carbono. El hierro nodular perlítico, tienen resistencias a la tracción superiores a 825 MPa, pero una ductilidad reducida. El hierro nodular austemperizado (ADI), ofrece aún mayores propiedades mecánicas y resistencia al desgaste, con los grados de ASTM proporciona resistencia a la tracción superior a 1600 MPa. La aleación especial de hierros dúctiles, proporciona una fluencia y resistencia a la oxidación a altas temperaturas, resistencia a la fatiga térmica, resistencia a la corrosión, propiedades físicas especiales, o tenacidad a baja temperatura (8).

### 2.1.10. Proceso de producción del hierro nodular.

Los hierros son muy sensibles a las variables del proceso, las cuales afectan la microestructura y por consiguiente las propiedades mecánicas. Los factores más significativos son:

- El carbono en un hierro vaciado como elemento libre formando lo que se conoce como grafito. Para hierros grises, el carbono precipita en forma de hojuelas con un porcentaje que varía del 6 al 16 % del volumen total.

Otras formas de grafito son nodular o esférico, tal es el caso del hierro nodular, grafito vermicular como en el hierros de grafito compacto.

- El control de la matriz, obtenido en un hierro nodular convencional, ya sea "de colada" a través de una combinación de la composición, el control del proceso o por medio de un tratamiento térmico, da al diseñador la posibilidad de seleccionar el grado de hierro nodular que proporciona la combinación más adecuada de las propiedades de acuerdo a su aplicación (8).

El hierro nodular obtenido con un hierro vaciado de bajo azufre con un aditivo base magnesio (también puede ser cerio) e inoculado antes o durante el vaciado con una aleación maestra base silicio (inoculante). Las formas de tratamiento son muy variadas, la composición es muy similar a la del hierro gris con ligeras diferencias en algunos elementos como el carbono, cobre, azufre, magnesio y cerio como opcional.

Para la producción de un hierro nodular se considera una composición química muy similar a la de un hierro gris. La forma esferoidal del grafito que caracteriza el hierro nodular es producto del contenido de magnesio, el cual debe estar entre 0.04 a 0.06% (8).

#### **2.1.11. Nodularización.**

En la actualidad existe una gran cantidad de tratamientos para producir hierro nodular todos ellos basados en aleaciones de magnesio. Para la formación de nódulos el porcentaje mínimo necesario de magnesio es del 0.01% con adiciones de cerio y otras tierras raras, o de 0.02% cuando se usa magnesio puro. Para piezas de espesores más gruesos se requiere mayores cantidades de magnesio residual. Los tratamientos de nodularización más comunes son:

**Cuchara abierta.** Es el método más sencillo y utilizado, donde la aleación de magnesio, se coloca en el fondo de la cuchara de tratamiento vacía, vertiendo el metal sobre ella.

**Cuchara abierta (Sándwich).** Se coloca la aleación de magnesio en la misma cuchara como el método anterior, solo que se protege colocando unos trozos de metal sobre ella para retrasar la reacción y reducir la temperatura del metal mejorando la recuperación del magnesio. Se puede utilizar Fe-Si para alternar el proceso de inoculación.

**Métodos de cuchara cerrada.** Este método evita la admisión de oxígeno en la cuchara además de que permite una reducción de humo y destellos luminosos, mejora en la recuperación del magnesio, menor pérdida de temperatura y mayor regularidad en el magnesio final.

**Método de inmersión.** En este procedimiento se sumerge una campana de grafito o revestida con refractario conteniendo la aleación de magnesio en su interior. La campana se mantiene casi en el fondo de la cuchara provocando una reacción violenta. Su eficiencia es similar a la del método sándwich, pero es más común para tratar grandes cantidades de metal.

**Procesos INMOLD.** O proceso instantáneo, en este método se coloca la aleación de Fe-Si-Mg en una cámara de reacción situada en los canales de entrada del metal en el molde, se requiere un control de la velocidad de llenado.

### **2.1.12. Inoculación.**

Desde antes de la invención del hierro dúctil, la inoculación es un proceso que se estableció para fundiciones de hierros grises, la mayoría de los inoculantes se basan en aleaciones de ferrosilicio (FeSi). Grandes mejoras en la obtención de propiedades se han logrado adicionando pequeñas cantidades de inoculante

en cucharón, incluso que adicionando la misma cantidad de inoculante directo en el horno.

El mejor método de inoculación consiste en agregar al chorro durante el llenado del molde, la cantidad de inoculante está determinada por el tipo de hierro, espesor de sección y velocidad de solidificación de la pieza. En espesores delgados se usa hasta un 1% de inoculante, mientras que para piezas de espesores mayores se reduce a un 0.25% como forma de mantener el carbono equivalente debajo del 4.5% y evitar con esto la flotación del carbono (9).

Hay tres formas de inocular el hierro fundido, dependiendo de la fundición se pueden utilizar unitariamente o combinándolos.

- 1 En la cuchara o en la **olla** de transporte.
- 2 En el **chorro** al vaciar el metal en el molde.
- 3 En el **molde**.

### **2.1.13. Nódulos de grafito.**

En un hierro nodular, los nódulos de grafito son la característica microestructural más importante y para caracterizarlo se toma en cuenta el tamaño, la forma y la cantidad de nódulos.

#### **Tamaño de nódulo**

El tamaño de grano se designa por los número del 1 al 8, los números representan la dimensión máxima promedio en milímetros de los nódulos tipo I y II medidas en micrografías amplificadas a 100X.

Tabla iii. Clasificación del grafito basado en el tamaño de los nódulos (6).

Clase	Dimensión máx. (mm)*100
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

### Forma de nódulo

Los tipos de formas de nódulos se designan por números romanos I, II, III, IV y V, Figura 3. La forma de nódulos predominante se reporta revisando una micrografía a 100X y el porcentaje de nódulos de cada tipo es estimado o contabilizado.

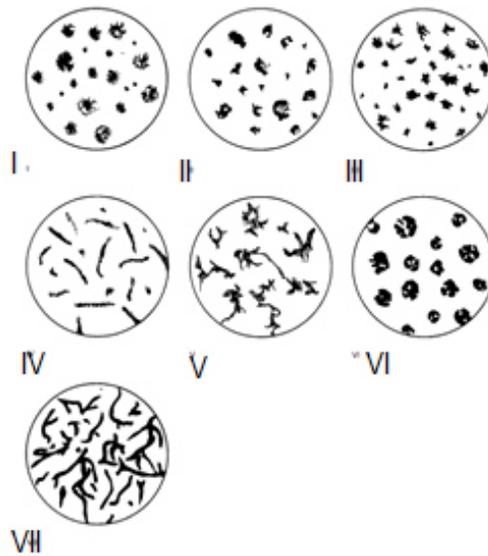


Figura 3. Formas típicas de grafito ASTM A247. I grafito esferoidal, II grafito esferoidal imperfecto, III Grafito templado, IV Grafito compacto, V Grafito cangrejo, VI Grafito explotado y VII Grafito vermicular (1).

### Conteo de nódulos

El conteo de nódulos se expresa en número de nódulos por milímetro cuadrado (Nod/mm<sup>2</sup>). El conteo se realiza en micrografías a 100X con incrementos de 25 y 50 Nod/mm<sup>2</sup>. El método de estimación manual se hace por comparación con micrografías con conteos de nódulos estándar. Para una mayor precisión en el valor se requiere analizar las micrografías en un analizador de imágenes (6).

#### 2.1.14. Deformidades en los nódulos de grafito.

Algunos de los fenómenos presentados en la forma de los nódulos alteran negativamente las propiedades mecánicas, a continuación se describen algunas de las formas más comunes.

**Grafito alineado:** Franjas de grafito alineadas como dendritas largas que pueden provocar la reducción en las propiedades mecánicas. La causa es una baja nucleación y altas temperaturas de vaciado.

**Grafito aglomerado:** Agrupaciones de nódulos generalmente de tamaños pequeños en áreas sobreinoculadas. Generalmente se asocia con granos gruesos de inoculante no disueltos.

**Flotación de carbono:** El grafito libre que se forma antes de la solidificación en hierros hipereutécticos y flota a la superficie de la pieza.

**Grafito compacto:** Es una forma intermedia de grafito que se describe hojuelas cortas interconectadas con extremos redondeados.

**Grafito cangrejo (crab):** Una forma degenerada de grafito nodular caracterizado por grafito distorsionado con delgadas hojuelas alargadas asemejando patas de cangrejo. Es causada generalmente por exceso de magnesio en tratamiento y/o elementos subversivos.

**Grafito explotado:** Es una forma de grafito encontrada generalmente en la parte superior de las fundiciones y en secciones gruesas de hierros hipereutécticos con altos magnesio residuales.

**Grafito laminar en hierro nodular:** Se presenta en la superficie o como una capa de islas de gris. Generalmente se atribuye a interferencia metal-molde por reacciones de azufre, reversiones de escoria, salpicaduras de metal no tratado en la cavidad del molde.

**Grafito irregular:** Nódulos de forma desordenada relacionados con falta de nodularizantes, excesos de cerio, sobretratamientos o incluso el trabajo mecánico.

**Grafito nodular:** Grafito esferoidal o redondeado creado por un tratamiento de bajo azufre con agentes nodularizantes.

**Grafito secundario:** Partículas de grafito que se forman después de la solidificación por la precipitación de carbono previamente combinado. Se observa en tratamientos ferritizantes o en fundiciones con enfriamientos suficientemente lentos. Se forman en los alrededores del grafito primario.

**Grafito puntiagudo:** Nódulos con unas o más protuberancias afiladas semejantes al grafito cangrejo.

**Grafito vermicular:** Forma degenerada del grafito, redondas láminas delgadas en forma de gusano, usualmente resultante de bajo magnesio residual, similar al grafito compacto (6).

#### **2.1.15. Aplicaciones.**

El hierro nodular ha encontrado aplicación en una amplia variedad de componentes en los cuales ha remplazado al hierro gris debido a sus mejores propiedades. Algunos ejemplos de partes automotrices de hierro nodular son cigüeñales, colectores de escape, anillos de pistones, camisas de cilindros, entre otros.

El uso del hierro nodular permite incrementar la resistencia de los componentes y ahorro de peso. En la agricultura y el movimiento de tierras se utiliza ampliamente en soportes, rodillos, válvulas hidráulicas, ruedas dentadas y componentes de la vía con resistencia y tenacidad mejoradas.

En aplicaciones generales incluyen cilindros hidráulicos, mandriles, bastidores de las máquinas, equipos de conmutación, tren de laminación, rollos, segmentos de túnel, rollos de bajo costo, la barra de acciones, moldes de goma, mobiliario urbano tales como tapas y marcos, y soportes de riel de ferrocarril, dándoles un mejor rendimiento y ahorro de peso (5).

## **2.2. Principios de solidificación de hierros nodulares.**

### **2.2.1. Nucleación.**

La forma del grafito cambia dramáticamente de forma laminar a esferoidal cuando el azufre y oxígeno son extraídos del metal fundido por los elementos activos como el magnesio, calcio y tierras raras. Después de que el azufre y oxígeno son extraídos en forma de sulfuros y óxidos una pequeña cantidad de magnesio ocasiona que el grafito precipite en forma esferoidal. Pero además del magnesio es necesaria una post inoculación que provea al metal de núcleos para la precipitación del grafito. Sin la post inoculación adecuada el hierro puede solidificar con carburos debido a la falta de nucleación de grafito y su crecimiento resultante a bajas temperaturas. A diferencia de los hierros grises la mayoría de los hierros nodulares se producen en el rango hipereutético  $C_{eq} > 4.3\%$ .

Las propiedades de los hierros nodulares son variadas principalmente por la variación de los componentes de la matriz como la ferrita, la perlita, la martensita, por el uso de elementos aleantes, y en menor medida por el enfriamiento dentro y fuera del molde.

### **2.2.2. Crecimiento.**

El grafito esferoidal nuclea alrededor de inclusiones introducidas al hierro fundido durante la inoculación y como la mayoría de los hierros nodulares son de composición hipereutética, el grafito crece en contacto con el líquido antes de su encapsulación en la austenita. Además el crecimiento ocurre con la difusión del carbono a través del caparazón de austenita depositándose en la superficie del nódulo. El desarrollo del grafito se puede describir en tres etapas: el núcleo oscuro en el centro, el crecimiento del nódulo de grafito en contacto

con el líquido como un grafito denso en el centro y después el crecimiento por difusión de carbono a través de la austenita.

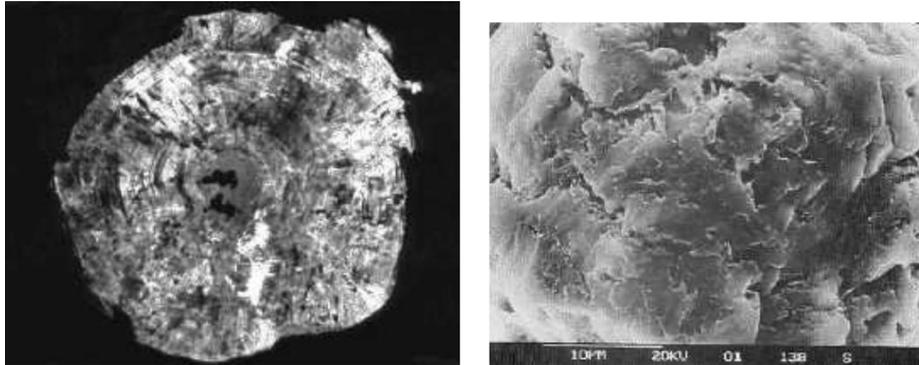


Figura 4. a) Sección transversal de un grafito esferoidal removido por ataque profundo en los planos cristalográficos radial y angular. b) Detalle de la superficie de un nódulos de grafito (10).

### 2.2.3. Diagrama Fe-C.

El diagrama hierro carbono mostrado en la figura sirve para entender mejor el fenómeno de solidificación y la formación de microestructuras.

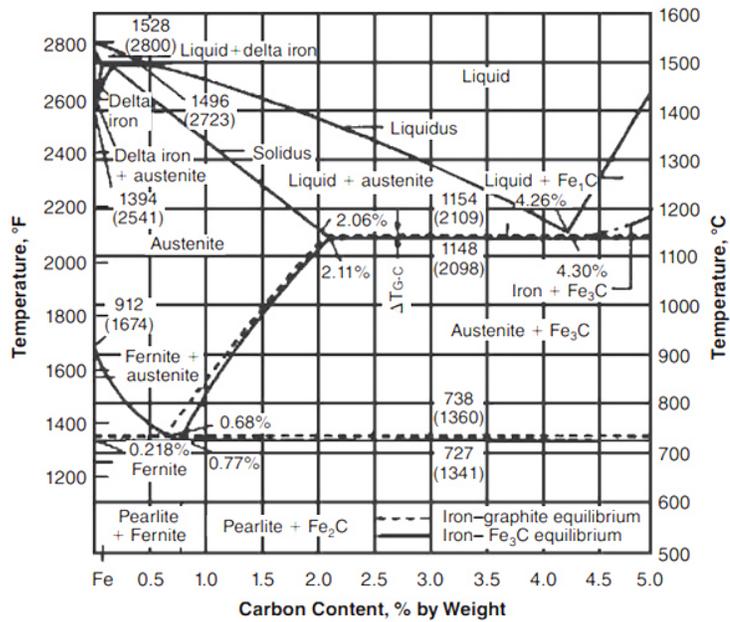


Figura 5. Diagrama hierro carbono para fases estables y metaestables sin silicio (1).

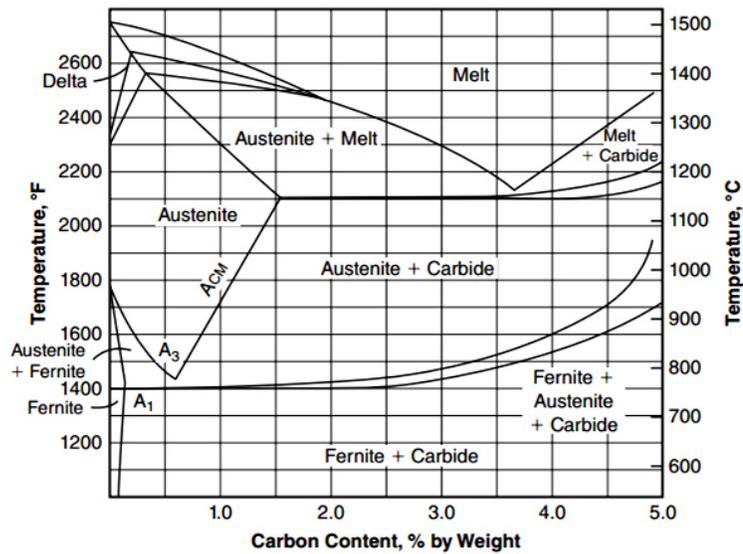


Figura 6. Diagrama hierro carbono solo para fases estables y un 2% de silicio (1).

#### **2.2.4. Fenómeno de Solidificación.**

Alrededor del mundo se han postulado diversas teorías acerca de la nucleación del grafito esferoidal y modelos de solidificación desde el descubrimiento del hierro nodular. Pero ninguna de esas teorías cuenta con un sustento universal por la comunidad académica e industrial. Algunas investigaciones realizadas por microscopio electrónico de transmisión y de barrido han revelado la presencia de complejos óxidos y sulfuros de silicio y magnesio en el centro del nódulo.

La solidificación del hierro nodular está condicionada por la precipitación de dos fases: austenita y grafito, de manera muy similar a los hierros grises. La nucleación y crecimiento de estas dos fases que determinan las propiedades mecánicas son afectadas por la composición química, exclusivamente carbono, silicio y la inoculación.

La diferencia de la solidificación del grafito laminar presente en los hierros grises respecto del hierro nodular es el contacto entre austenita, grafito y hierro líquido. En el hierro gris, durante la solidificación eutéctica, todas las fases se encuentran en contacto a lo cual se le denomina “crecimiento acoplado” (1).

Hay dos teorías fundamentales sobre solidificación:

1. Llamada teoría de fusión; propone que los nódulos de grafito se forman simultáneamente con las dendritas de austenita, las cuales rápidamente encapsulan el grafito en una cascara de austenita.
2. La teoría del crecimiento dendrítico, sostiene que las dendritas de austenita precipitan del hierro fundido enriqueciéndola de carbono y posteriormente los nódulos surgen del hierro líquido supersaturado de carbono en los intersticios entre las dendritas (11).

### **2.2.5. Análisis térmico.**

El análisis térmico lleva ya bastante tiempo desde su inicio, con la ayuda de modernas computadoras, lecturas de alta precisión así como procedimientos matemáticos a través de derivadas de diferente orden se pueden obtener las transformaciones de diferentes fases y estructuras en hierros e interpretarlas dentro de lecturas de composición química y microestructura usuales, la ventaja es obtener información a nivel de piso sin la necesidad de desperdiciar tiempo en los laboratorios con tardados análisis.

El problema de contracción puede ser visto como un balance de energía en la curva del análisis térmico.

Una curva de análisis térmico es la medición de la cristalización de una muestra de metal que puede ser comparada con una pieza de fundición, si tiene una masa, sección, velocidad de enfriamiento y una química de acuerdo con el metal y la pieza en producción.

Las velocidades de enfriamiento promueven diferentes microestructuras, en diferentes secciones delgadas, generalmente se utiliza una muestra representativa estandarizada para realizar el análisis, solo en casos extremos se recurre a destruir una pieza para confirmar la microestructura.

La mayoría de los metales están compuestos de fases que precipitan a diferentes temperaturas, cada fase posee una cierta característica térmica que altera la forma de la curva del análisis térmico, el efecto puede ser minúsculo, pero con equipo lo suficientemente preciso puede ser medido y cuantificado (1).

## CAPÍTULO III

### 3.1. Manufactura de una autoparte.

#### 3.1.1 Características.

La swing tower es una pieza de fundición de hierro nodular basada en la especificación SAE J434 D550 (12) propiedad de la empresa CNH. El peso de la pieza es de 191 kg.

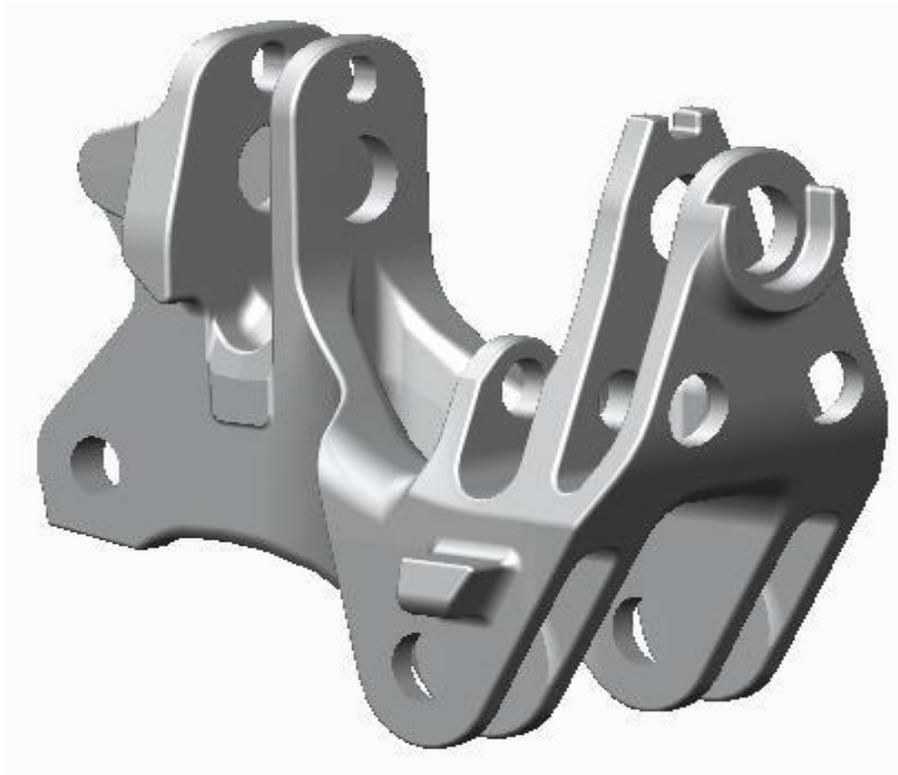


Figura 7. Pieza swing tower de hierro nodular.

## **3.2. Proceso de fabricación.**

### **3.2.1. Fusión de la carga**

Para la fusión de la carga se utiliza un horno de inducción sin núcleo de 6 toneladas. La materia prima utilizada para preparar el metal fundido utiliza una combinación de:

- Acero.
- Rebaba.
- Lingotes y hierro de retorno.
- Carbono.
- Silicio.

El contenido de cada uno es de acuerdo al tipo de metal que se requiera, para reducir al mínimo el uso de elementos aleantes para alcanzar la composición final. Para el caso específico de la swing tower se prepara un hierro ferrítico.

### **3.2.2. Ajuste de composición química**

Una vez fundido el metal después de un tiempo aproximado de 50 minutos se procede a hacer el ajuste químico después de obtener una muestra que es enviada al laboratorio para su análisis químico, donde se determinan los elementos que han de ajustarse (ver Tabla iv). Para el hierro nodular ferrítico perlítico que se requiere, se hace un ajuste en contenidos de cobre y estaño entre otros. Obteniendo el hierro ferrítico perlítico requerido (ver Tabla v). La temperatura promedio de trabajo del horno es de 1500 °C.

Tabla iv. Composición química nominal de un hierro ferrítico

	%	C	Si	Mn	S	Mo	Sn	Cu	P	Cr	Ti	Al	Pb
Hierro ferrítico	Min.	3.82	1.78	0.0	.005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Max.	3.95	1.88	0.5	.025	0.05	0.01	0.3	0.05	0.07	0.01	0.05	0.003

Tabla v. Composición química para ajuste de hierro ferrítico a Ferrítico-perlítico.

%	C	Si	Mn	Cr	Cu	Sn
Horno	3.82-3.95	1.78-1.88	0-0.50	0.0-0.07	0.0-0.3	0.0-0.01
Línea	3.82-3.95	2.35-2.50	0.55-0.60	Residual	0.65-0.70	Residual

### 3.2.3. Tratamiento de nodularización.

Después de que el metal ha sido liberado por el laboratorio metalúrgico con la composición química adecuada, se coloca en el fondo de la olla de transporte la liga de FeSiMg cubierta de rebaba de metal de acuerdo al método Sándwich descrito en el capítulo anterior. Se vacía de 1200 a 1500 kg de metal fundido en la olla de transporte que se desliza en un riel hasta donde se encuentra la olla de vaciado, en el traslado se observa la reacción del magnesio caracterizada por destellos luminosos.

### 3.2.4. Inoculación.

El proceso de inoculación se da en primera parte al momento de vaciar el metal de la olla de traslado a la olla de vaciado agregando el inoculante (FeSi) en grano directamente al chorro de metal de manera homogénea. Posteriormente

se agrega el desescoriador y se extrae la nata espesa formada en la superficie del metal misma que es un contaminante y fuente de defectos en la pieza.

La segunda parte de la inoculación se da al momento de vaciar el metal en el molde agregando mediante un dispositivo inoculador en el pico de la olla el inoculante en polvo al chorro de metal que cae en la copa del molde.

### **3.2.5. Preparación de moldes.**

Los moldes se produjeron en el proceso de arena No bake, con un 80% de arena recuperada mecánicamente y un 20% de arena nueva, mezclada con un 0.8% de resina total, de la cual el 58% en peso es resina parte I y el 42% restante es resina parte II y con un catalizador correspondiente al 3% del peso de la resina I. Se aplicó desmoldante a la caja de modelo, posteriormente se llenó la caja del modelo con arena ya mezclada y se obtuvieron las dos partes de la caja del molde: cope (tapa) y drag (base). Posteriormente se pintaron las dos partes del molde para mejorar el acabado superficial de la pieza, se hizo un secado con flama y se pasaron al área de colocación de corazones.



Figura 8. Molde pintado (parte cope).

### 3.2.6. Colocación de corazones.

Una vez preparado el molde, parte cope (tapa) y drag (base), se colocaron los 9 corazones en cada una de las dos cavidades que posee el molde, los corazones que van en la parte cope se ajustaron con pegamento y tornillos para evitar que se desprendan en el momento de cerrar el molde. Para la condición de inoculación en molde con pastilla se colocó en esta etapa la pastilla dentro de la copa del molde entre los filtros.



Figura 9. Parte drag del molde con los corazones sentados.



Figura 10. Parte cope del molde con los corazones sentados.

Una vez colocados los corazones se colocaron los candados para evitar desfase y se colocó pegamento para evitar una posible fuga de metal, se cerró la caja y se colocaron las abrazaderas para asegurar el cerrado.

### **3.2.7. Vaciado.**

El vaciado de metal se realiza a una temperatura de entre 1380 y 1400 °C, el tiempo de vaciado oscila entre 30 y 40 segundos con una altura de vaciado entre 10 a 15 centímetros. Se vacían dos moldes por olla y en cada molde hay dos piezas.



Figura 11. Vaciado de metal en el molde.

### 3.2.8. Desmoldeo

Después de vaciados los moldes, se desplazan hacia la línea de enfriamiento, donde permanecen por un tiempo de 8 horas, para después pasar a la mesa vibradora donde se rompe el molde para extraer las piezas y enfriarse al aire libre. Se granallan para limpiar cualquier residuo de arena, después de esto se cortan las guías, alimentaciones y mazarotas.



Figura 12. Extracción de piezas con los moldes en la mesa vibradora.

### **3.2.8. Problemática en su manufactura.**

La Swing tower es una de las piezas de mayor tamaño producida en la planta No Bake cuyos espesores la hacen una pieza crítica al poseer espesores que van desde los 25 hasta los 53 milímetros. Los requerimientos del cliente son altos debido a su aplicación que será descrita en el siguiente apartado. Los principales problemas a los que se enfrenta la empresa al producir la pieza son, una baja dureza y baja resistencia a la tensión, ambas desencadenadas por situaciones microestructurales específicas, mismas que son controladas por varios aspectos del proceso, como son la composición química, método de inoculación, tiempo de enfriamiento en el molde, espesor de sección, calidad del metal, tipo de molde entre otros.

### **3.2.9. Producto terminado y aplicación.**

La pieza se utiliza en maquinaria pesada como acoplador entre una máquina retroexcavadora y el brazo extensible permitiendo su rotación horizontal y vertical. Cabe destacar la importancia de una buena resistencia debido a las grandes cargas aplicadas y a las vibraciones a las que se encuentra sometida.



Figura 13. Pieza final utilizada como acoplamiento de la máquina retroexcavadora con el brazo extensible.

## **CAPÍTULO IV**

### **Procedimiento experimental y equipo.**

#### **4.1. Diseño de experimento general.**

El presente trabajo se dividió en tres etapas; influencia de composición química, del método de inoculación y del tiempo de desmoldeo en la microestructura y en las propiedades mecánicas de una pieza de hierro nodular.

- La primera etapa consistió en manejar niveles: alto, medio y bajo de carbono equivalente dentro del rango especificado por norma. El método de inoculación utilizado fue inoculación en chorro, con un tiempo de desmoldeo de 8 horas. Ver Figura 15.
- La segunda etapa con un químico en el nivel medio al especificado consistió en manejar 3 métodos de inoculación: en olla de vaciado, en chorro, y en el molde. El tiempo de desmoldeo fue de 8 horas. Ver Figura 16
- La tercera etapa con un químico dentro del rango especificado por la norma, un método de inoculación en chorro, el tiempo de desmoldeo: 2, 4, 6, y 8 horas. Ver Figura 17.

En cada etapa se realizó el análisis microestructural por medio del microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido (MEB) y de propiedades mecánicas, por medio de un ensayo de tensión y pruebas de dureza. Se analizaron los resultados y se obtuvieron las conclusiones. Ver Figura 14.

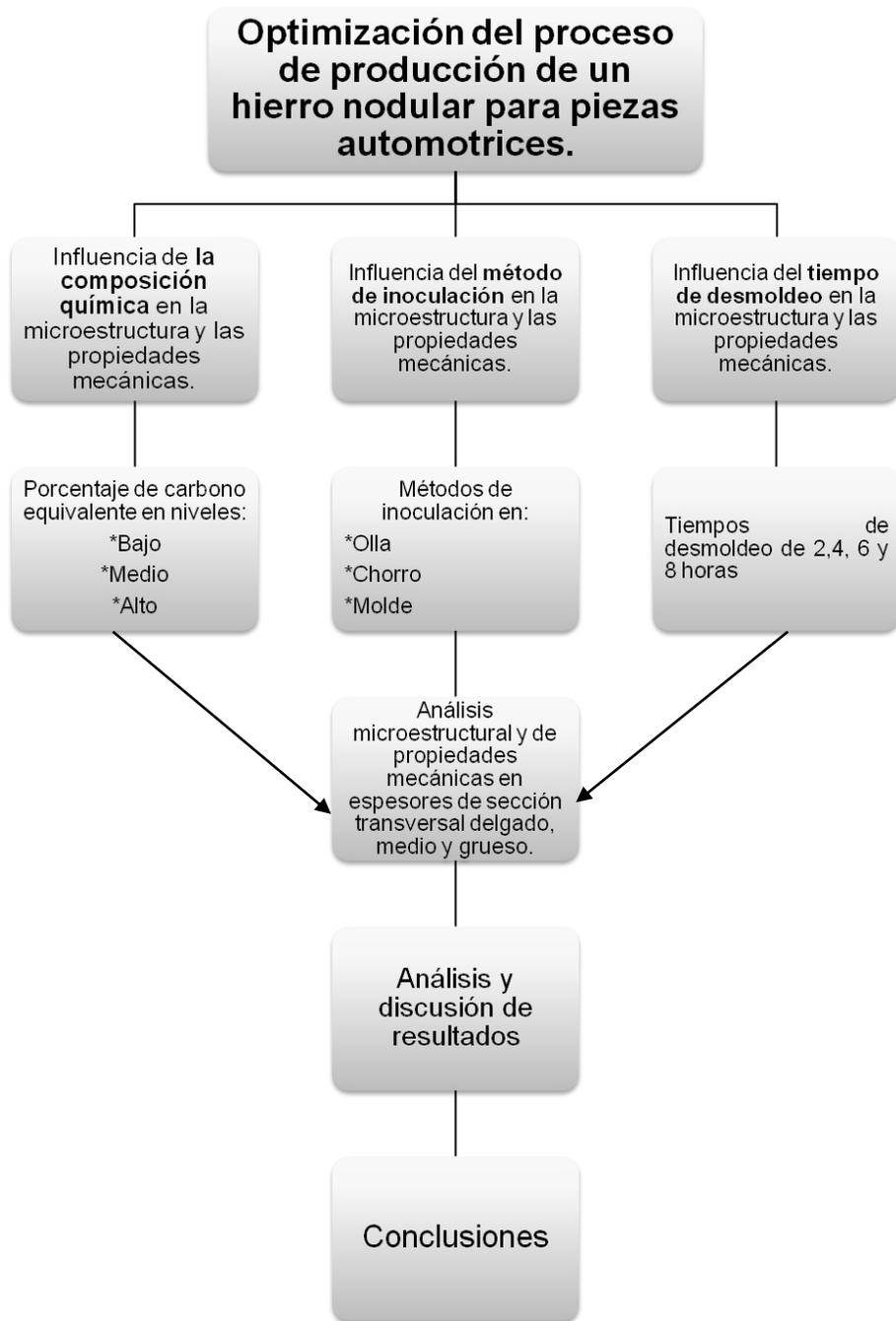


Figura 14. Diagrama experimental general.

## 4.2. Diagramas de flujo experimental.

### 4.2.1. Estudio del efecto de la composición química sobre la microestructura y propiedades mecánicas.

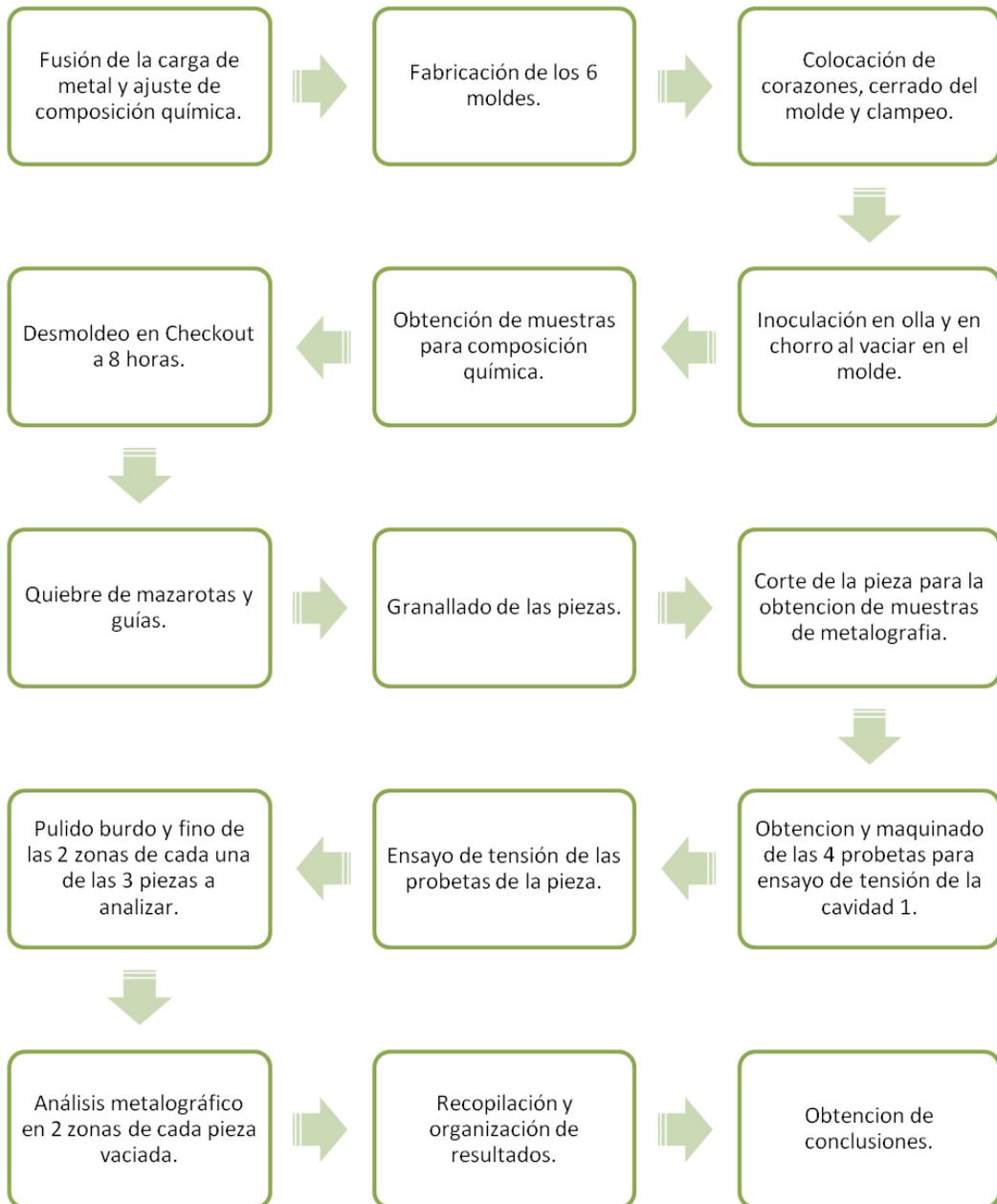


Figura 15. Diagrama experimental del efecto de la composición química en la microestructura y las propiedades mecánicas.

#### 4.2.2. Estudio del efecto del método de inoculación sobre la microestructura y propiedades mecánicas.



Figura 16. Diagrama experimental del efecto método de inoculación sobre la microestructura y propiedades mecánicas.

### 4.2.3. Estudio del efecto del tiempo de desmoldeo sobre la microestructura y propiedades mecánicas.

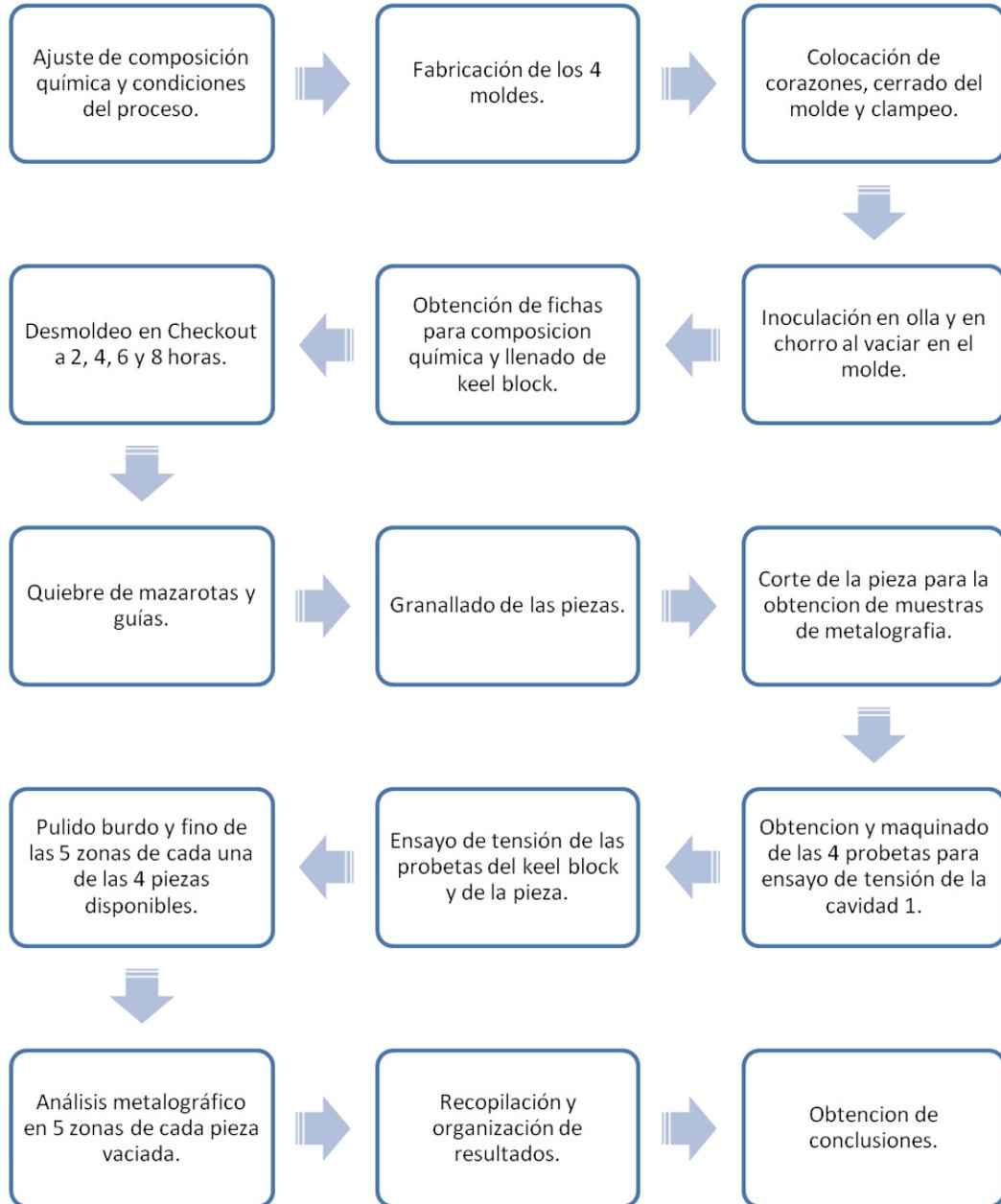


Figura 17. Diagrama experimental del efecto del tiempo de desmoldeo en la microestructura y las propiedades mecánicas.

### 4.3. Caracterización del hierro nodular.

#### 4.3.1 Estudio del efecto de la composición química sobre la microestructura y propiedades mecánicas.

- Procedimiento de ajuste de composición química de la carga.

De acuerdo a la composición nominal establecida en la empresa Blackhawk, se realizó la fusión de chatarra retorno y elementos aleantes para obtener la composición que se muestra en la Tabla vi.

Tabla vi. Composición química nominal de un hierro dúctil ferrítico-perlítico D550\* (12).

Elemento	C	Si	Mn	S	Mg	Cu	Cr	Sn	Ti	C eq.	Cu/10+Sn
<b>Especificación</b>	3.50-	2.20-	0.30-	0.025	0.030-	0.4	0.05	0.05	0.05	4.23-	0.08
<b>SAE J434 D550*</b>	3.90	2-80	0.50	máx.	0.060	- 0.6	máx.	máx.	máx.	4.93	máx.

El ajuste final para alcanzar la composición química establecida se da en la olla de traslado con el tratamiento nodularizante de la liga de FeSiMg y el FeSiBa como agente inoculante. Se aumentó el contenido de carbono equivalente en rangos alto, medio y bajo dentro de la especificación de norma SAE J434 D550.

Tabla vii. Diseño de experimento del efecto del químico en la microestructura y las propiedades mecánicas.

Condición	Espesor de sección (mm)	Carbono equivalente, Ceq
1	25	Bajo
	40	
2	25	Medio
	40	
3	25	Alto
	40	
Norma SAE J434 D550 para un Hierro nodular F-P automotriz. (12)		4.23-4.83

#### 4.3.2. Estudio del efecto del método de inoculación sobre la microestructura y propiedades mecánicas.

En el análisis el efecto del método de inoculación en la microestructura y las propiedades mecánicas se plantearon 3 métodos distintos, que se describen a continuación. Ver Tabla viii.

Tabla viii. Métodos de inoculación experimentados.

Condición	Procedimiento	Método de inoculación	Descripción
1	Simple	Inoculación en la olla	Adición de 0.38%* en peso del inoculante, grano.
2	Doble	Inoculación en chorro	Adición de 0.20%* en peso del inoculante, en grano, olla de vaciado. Adición de 0.18%* en peso de inoculante en polvo, chorro en el vaciado.
3	Doble	Inoculación en molde	Adición de 0.20%* en peso de inoculante en grano, a la olla de vaciado. Adición de pastilla de inoculante 0.18%* en peso dentro del molde.

\*Cantidad recomendada por los proveedores.

Se fabricaron 3 moldes que fueron vaciados con hierro nodular de acuerdo a la especificación SAE J434 D550 (12), en la primer condición se inoculó el metal en la olla, para la segunda condición la inoculación se realizó directo al chorro durante el vaciado y para la tercer condición se inoculó directamente dentro del molde colocando una pastilla en la copa del molde. Para cada condición se realizó un análisis microestructural de 5 secciones de la pieza con espesores de 25, 30, 32, 40 y 53 mm. Y se realizó un ensayo de tensión tomando la probeta de la sección más gruesa, 53 mm, analizando, como área más crítica.



Tabla ix. Especificación de los inoculantes utilizados.

Inoculante	Características	Composición	Costo estimado Dólares/kg
Inoculante en polvo. HIBACAL 75%Ba3	0.15-0.6 mm	65-75% Si, 0.5-1.5% Al, 1-2% Ca y 2-3% Ba.	3.79
Inoculante en grano. HIBACAL 75%Ba3	2-6 mm	65-75% Si, 0.5-1.5% Al, 1-2% Ca y 2-3% Ba.	3.05
Inoculante en pastilla. Germalloy	Pastilla de 0.9 Kg	70-78% Si, 0.3-1.5% Ca, 3.2-4.5% Al	7.2

\*Ver análisis de costo, Anexo 1.

En el método de inoculación con pastilla, esta se colocó en la copa del molde.



Figura 19. Pastilla de inoculante colocada en la copa del molde antes de los filtros.

### 4.3.3. Estudio del efecto del tiempo de desmoldeo sobre la microestructura y propiedades mecánicas.

Tabla x. Tiempos de desmoldeo experimentados.

Condición	Tiempo de desmoldeo, h
1	2
2	4
3	6
4	8

Se fabricaron 8 piezas de hierro dúctil ferrítico-perlítico grado D550, vaciadas en moldes de arena No Bake, después del vaciado se desmoldaron en 4 tiempos diferentes: 2, 4, 6 y 8 horas.

- Desmoldeo

Las piezas se desmoldaron en tiempos de 2, 4, 6 y 8 horas en la mesa vibradora y se extrajeron para enfriamiento al aire.



Figura 20. Desmoldeo de piezas en mesa vibradora.

En cada condición se realizó lo siguiente:

- Corte de mazarotas, guías y granallado.

Una vez que las piezas se enfriaron, con el objetivo de realizar los cortes para la obtención de muestras, se realizó el quiebre de mazarotas y guías para posteriormente granallarlas y eliminar cualquier residuo de arena.

- Obtención de muestras para metalografía, dureza y tensión.

Considerando que cada molde tiene dos cavidades, obteniendo una pieza en cada cavidad, y que hay simetría en entre ellas, para el análisis en esta investigación se tomó solamente una pieza de cada cavidad.

Tabla xi. Ubicación de las muestras analizadas para metalografía y dureza.

<b>Espesor de sección, mm.</b>	<b>Ubicación en molde</b>
<b>25 (Delgado)</b>	<b>Cope (tapa)</b>
<b>40 (Medio)</b>	
30	Drag ( base)
32	
<b>53 (Grueso)</b>	<b>Centro de la pieza</b>

La ubicación de las muestras obtenidas en la pieza se muestra en la Figura 21. Los espesores de sección que se muestran en los resultados por conveniencia son: delgado (25mm), medio (40mm) y grueso (53mm).

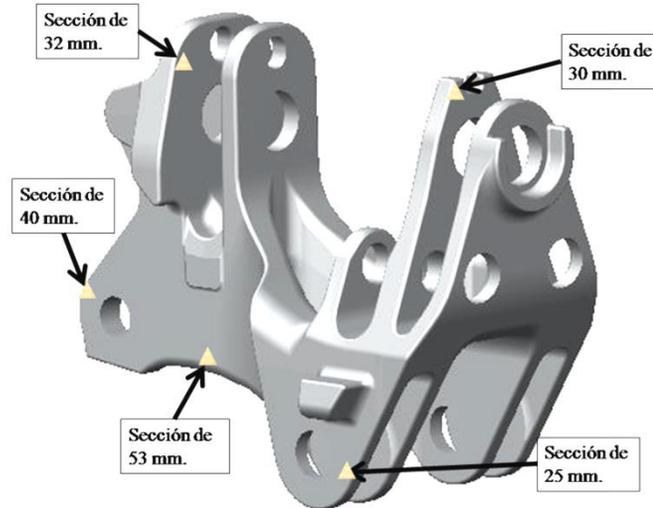


Figura 21. Ubicación de las muestras para metalografía y dureza y probeta de tensión en cada sección.

- Maquinado de las probetas de tensión

Se obtuvieron las muestras para ensayo de tensión, correspondientes a la zona centro de la pieza, espesor de 53 mm, Figura 21. Las probetas fueron maquinadas y dimensionadas de acuerdo a la norma ASTM E-8.

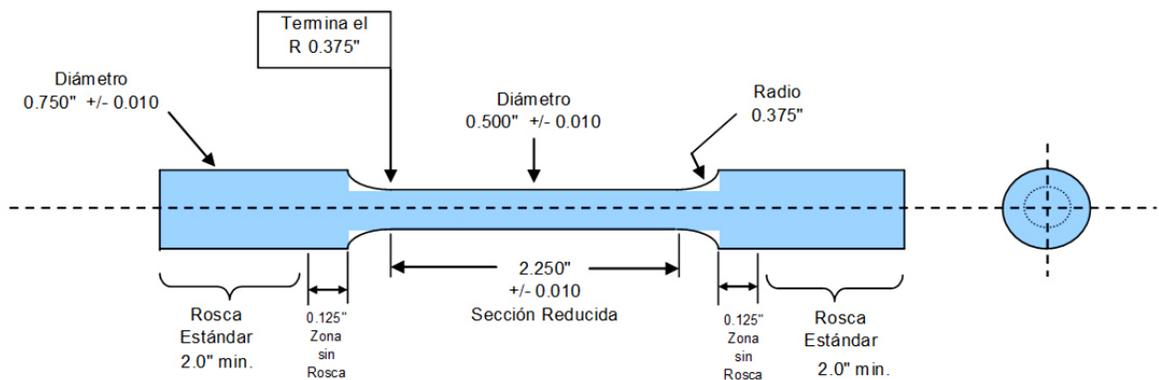


Figura 22. Dimensiones de acuerdo a la norma para probeta roscada de hierro nodular ASTM E-8.

- Ensayo de tensión.

El ensayo de tensión de las probetas se realizaron en una máquina universal Tinius Olsen, 60 Ton. Se obtuvo el esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo a la tensión y la elongación. Por medio de la siguiente relación: índice de calidad  $IC = \frac{\text{Resistencia a la tensión}^2 \cdot \text{elongación}}{1000}$  (unidades en ksi) es posible determinar la calidad del hierro nodular en base a sus propiedades mecánicas.



Figura 23. Máquina universal de tensión Tinius Olsen, 60 Ton.

- Prueba de dureza.

La prueba de dureza se realizó a cada una de las muestras correspondientes a diferentes zonas mencionadas en la tabla en una máquina portátil King Portable Brinell con una carga de 3000 Kg y una esfera de 10 mm.



Figura 24. King Portable Brinell.

- Preparación de las muestras para metalografía.

Cada una de las muestras para metalografía se realizó el pulido burdo en una pulidora Struers con lijas 80, 120, 220, 500, 800, 1200; el pulido fino se realizó con paño y alúmina de 5 y 3  $\mu\text{m}$ .



Figura 25. Pulidora Struers Labopol-1.

El análisis metalográfico se realizó en un microscopio óptico Olympus.



Figura 26. Microscopio óptico Olympus BX51M.

Para observar nodularidad y densidad de nódulos, se hizo una observación en el microscopio, posteriormente se atacó con Nital al 4% (Alcohol 100ml +Ácido nítrico 4ml) para observar el porcentaje de ferrita y perlita y se tomaron las micrografías a 100X. y se analizaron por medio del software Image J para realizar el conteo, tamaño promedio y fracción de área de los nódulos de grafito y al porcentaje de ferrita y perlita presentes en la matriz.

Para el análisis en el microscopio electrónico de barrido se utilizaron las muestras anteriores, se recubrieron con oro con un tiempo de 20 segundos.

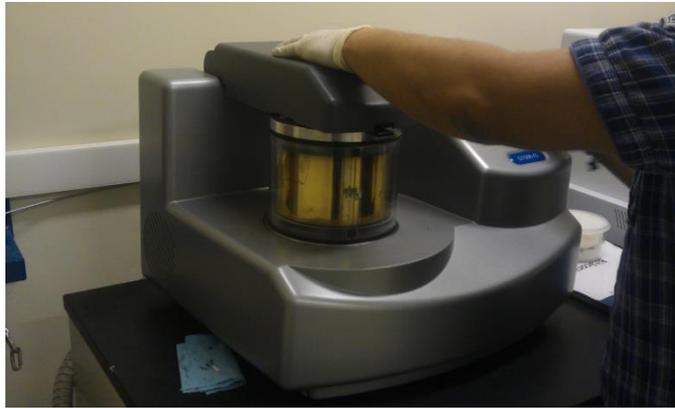


Figura 27. Recubrimiento de las piezas con oro en una estación de Cryomicroscopía modelo PP3000T.

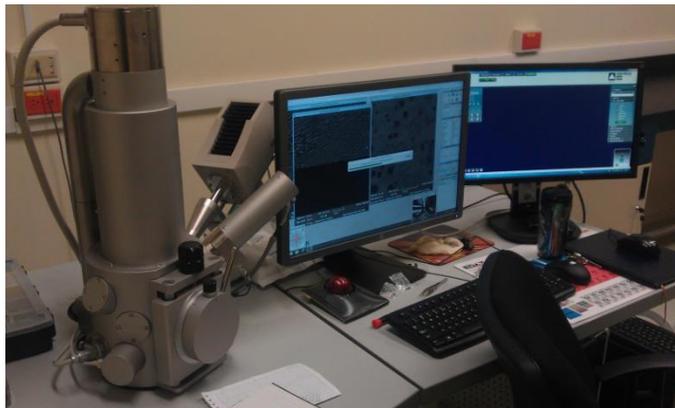


Figura 28. Microscopio electrónico de barrido MEB TESCAN VEGA 3

## CAPÍTULO V

### Análisis y discusión de resultados.

#### 5.1 Estudio del efecto de la composición química sobre la microestructura y propiedades mecánicas.

Se realizó considerando el método de inoculación en chorro, con un tiempo de desmoldeo de 8 horas y las condiciones generales de producción descritas en el Capítulo III.

##### 5.1.1 Análisis químico.

El análisis químico de las piezas vaciadas se presenta en la Tabla xii. Se anexan unos barridos con rayos X de concentración de los elementos. Anexo 1

Tabla xii. Composición química resultante variando el carbono equivalente.

% en Peso	C	Si	Mn	S	Sn	Cu	Cr	Mg	Ti	Ceq	Cu/10+Sn
1. Bajo	3.9	2.1	0.59	0.027	0.005	0.67	0.035	0.036	0.011	4.6	0.072
2. Medio	3.83	2.38	0.58	0.018	0.006	0.68	0.039	0.048	0.01	4.62	0.074
3. Alto	3.89	2.58	0.51	0.009	0.017	0.67	0.033	0.039	0.01	4.75	0.084

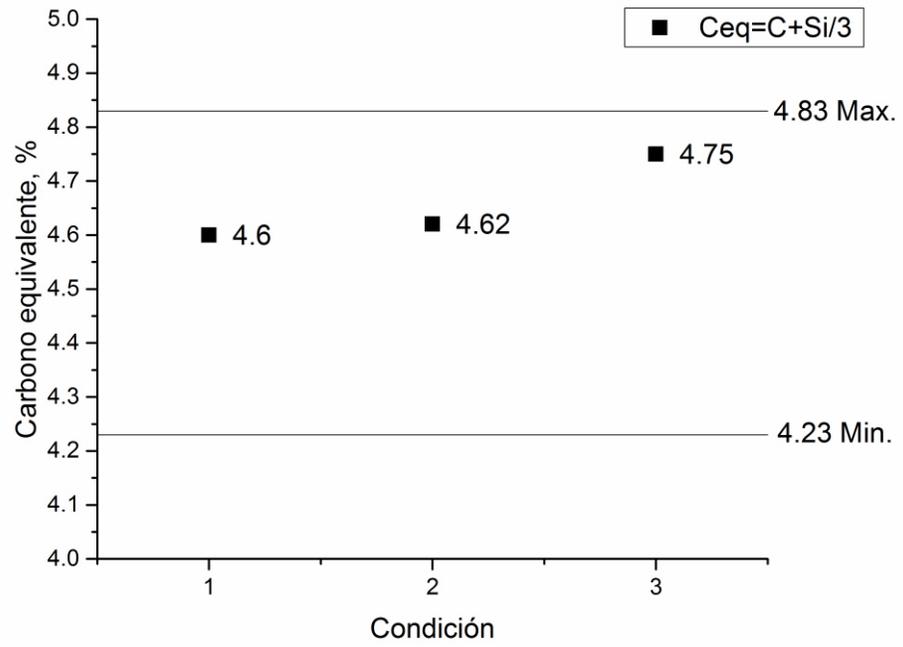


Figura 29. Carbono equivalente de las condiciones analizadas (12).

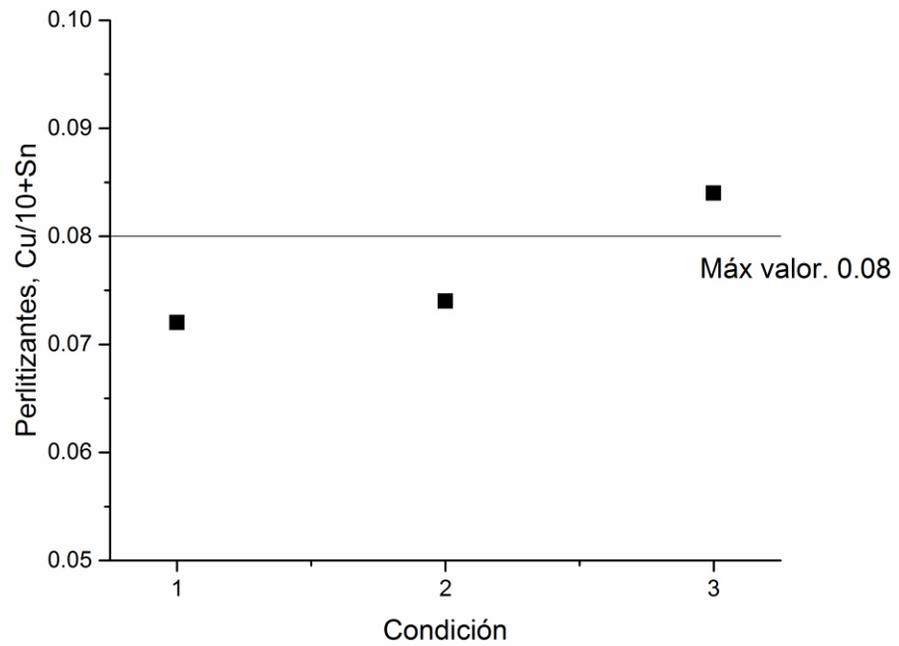


Figura 30. Contenido de perlitzantes de las condiciones analizadas (12).

Los resultados de carbono equivalente de las tres condiciones experimentadas, con respecto al valor mínimo y máximo de la norma de un hierro nodular D550, Figura 29. Se observa que las condiciones experimentadas están dentro de norma SAE J434 D550. El contenido de elementos perlitizantes, Figura 30, observa un comportamiento ascendente de la condición 1 a 3.

### 5.1.2. Análisis metalográfico.

Para el análisis metalográfico se analizaron 2 secciones de la pieza para cada condición con espesores de 25 y 40 milímetros con las ubicaciones mostradas en la Figura 21 del Capítulo IV. En la Tabla xiii se muestran los resultados obtenidos de la sección de 25 milímetros para cada condición.

Tabla xiii. Análisis metalográfico de la sección de 25 mm de espesor para cada condición. 100X

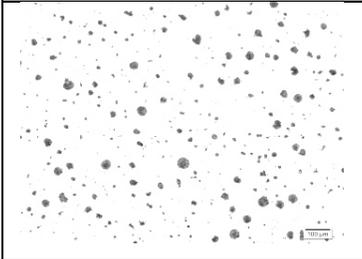
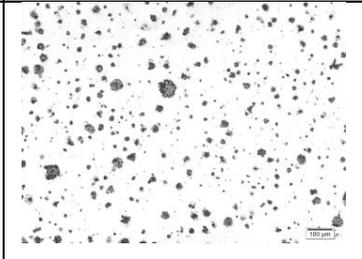
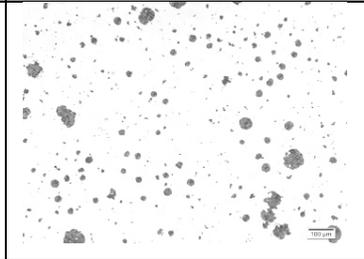
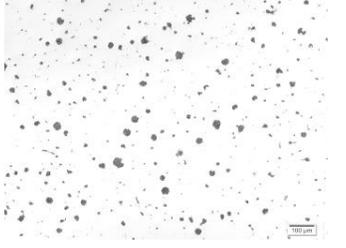
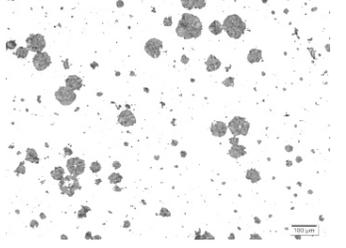
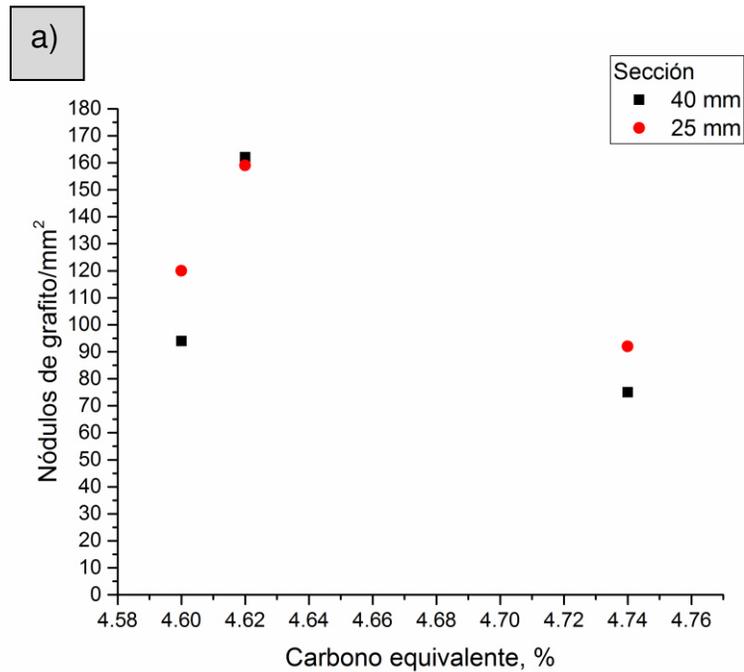
Condición		
1	2	3
Ceq= 4.6	Ceq= 4.62	Ceq= 4.75
		
<b>Número de nódulos de grafito/mm<sup>2</sup></b>		
120	164	92
<b>Tamaño promedio de nódulo de grafito, um<sup>2</sup></b>		
4.2	3.7	5.6
<b>Área de nódulos de grafito, %</b>		
5	6.2	5.2

Tabla xiv. Análisis metalográfico de la zona de 40 mm para cada condición. 100X.

Condición		
1	2	3
Ceq= 4.6	Ceq= 4.62	Ceq= 4.75
		
<b>Número de nódulos de grafito/mm<sup>2</sup></b>		
94	114	75
<b>Tamaño promedio de nódulo de grafito, um<sup>2</sup></b>		
3.1	2.2	10
<b>Area de nódulos de grafito, %</b>		
3	2.6	6.6



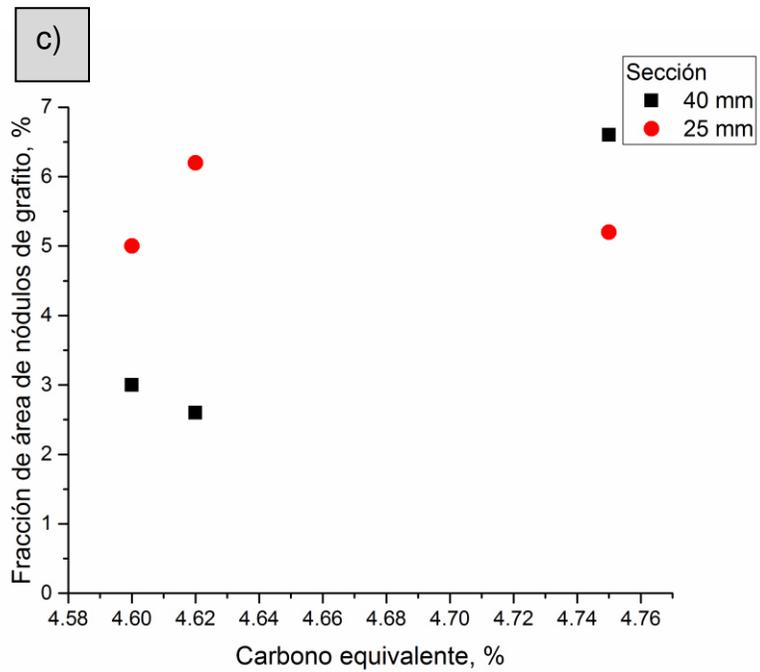
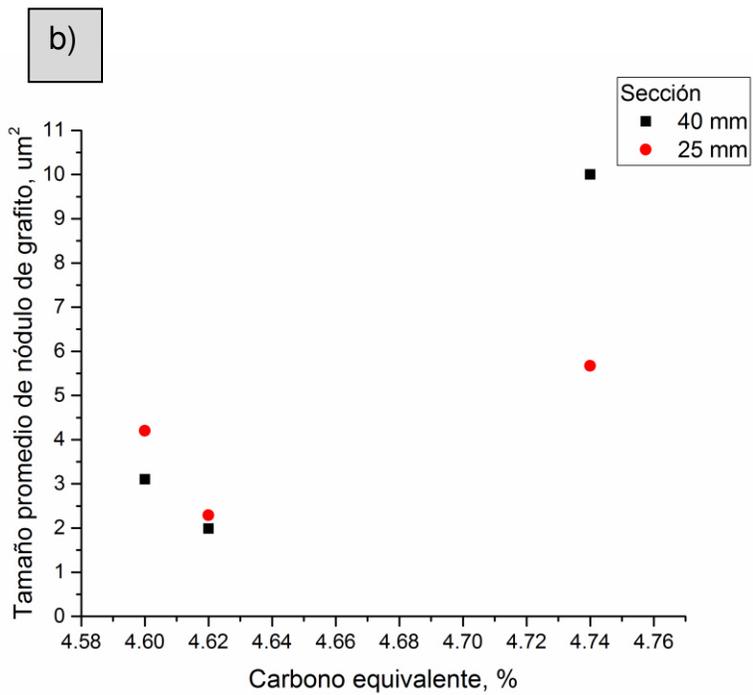


Figura 31. Resultados a) Nódulos de grafito/ $\text{mm}^2$ , b) Tamaño promedio de nódulos de grafito y c) Fracción de área nódulos de grafito para los espesores de 25 y 40 mm en cada condición.

Los resultados muestran que en secciones delgadas se produjo un mayor número de nódulos por milímetro cuadrado, porque en secciones gruesas, con mayor tiempo de solidificación se da un crecimiento de los nódulos mediante mecanismo de coalescencia lo que reduce el número de nódulos por milímetro cuadrado. Figura 31 a.

Para un carbono equivalente de 4.62% se observa un mayor número de nódulos comparado con las otras dos condiciones experimentales, esto se explica porque en esta condición se tiene un contenido de magnesio de 0.049 % que es relativamente mayor. El principal efecto del magnesio es actuar como nodularizante.

El mayor tamaño de nódulo de grafito para la condición de carbono equivalente de 4.75, Figura 31 b, se explica debido al mayor contenido de carbono, lo que afecta también a la fracción de área de los nódulos de grafito, Figura 31 c.

Tabla xv. Análisis metalográfico de la zona 3 con ataque para los diferentes contenidos de carbono equivalente, sección de 25 mm. 100X.

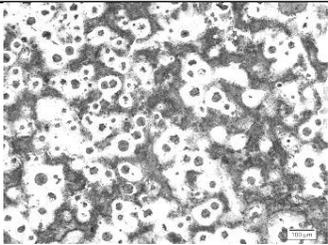
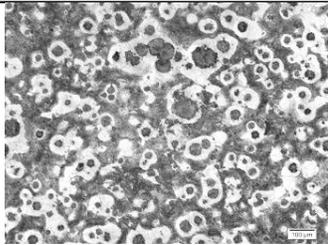
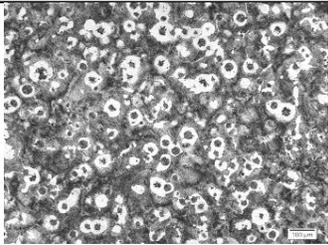
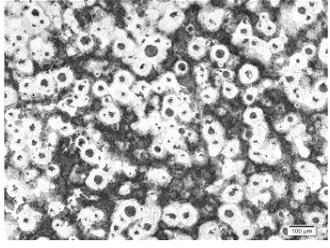
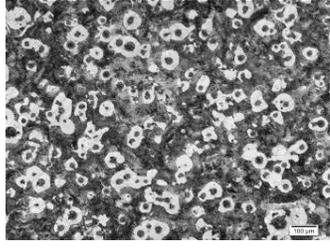
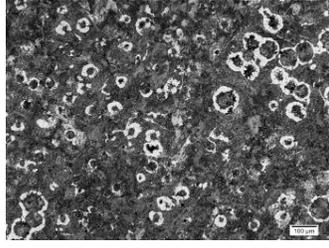
Condición		
1	2	3
Ceq = 4.6	Ceq= 4.62	Ceq= 4.75
		
<b>Perlita, %</b>		
55	57	78
<b>Ferrita, %</b>		
45	43	22

Tabla xvi. Análisis metalográfico y dureza de la sección gruesa con ataque para los diferentes tiempos de desmoldeo, sección 40 mm.100X.

Condición		
1	2	3
4.6	4.62	4.75
		
<b>Perlita, %</b>		
52	72	83
<b>Ferrita, %</b>		
48	28	17

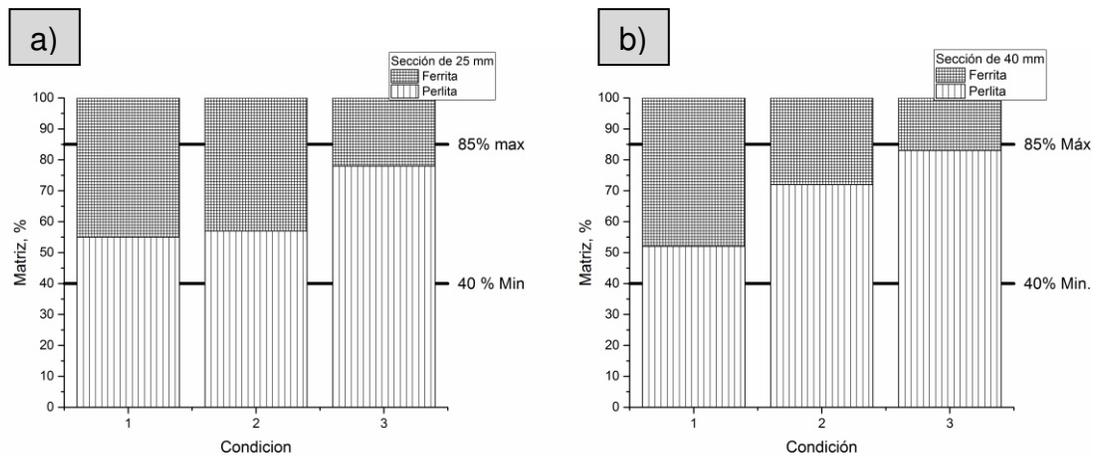


Figura 32. Porcentaje de ferrita y perlita para los espesores de: a) 25 mm y b) 40 mm.

En las tres condiciones experimentales el efecto del contenido de perlizantes permitió un mayor contenido de perlita reduciendo proporcionalmente el contenido de ferrita, tal como se muestra en la Figura 32 a y b,

independientemente del espesor de sección. Secciones gruesas presentan mayor contenido de perlita en relación con espesores menores.

Se observa en la Figura 32 que a mayor contenido de carbono equivalente hay un mayor porcentaje de perlita. De lo anterior también se concluye cualquiera de las tres condiciones experimentadas cumple con los requerimientos de la especificación D550 sobre las características microestructurales (12).

### **5.1.3. Dureza.**

Al evaluar la influencia del contenido de carbono equivalente en cada una de las condiciones se observó un ligero incremento en la dureza a mayor contenido de carbono equivalente, Figura 33, y se compara con los límites mínimo y máximo establecidos por la norma SAE J434 D550. La mayor dureza se observó en la tercera condición debido a un alta relación  $Cu/10+Sn$ , ya que el cobre y estaño actúan como grafitizantes y promotores de perlita, como se mostró en el apartado anterior. Todos los resultados de dureza para ambos espesores de sección quedan dentro de la norma.

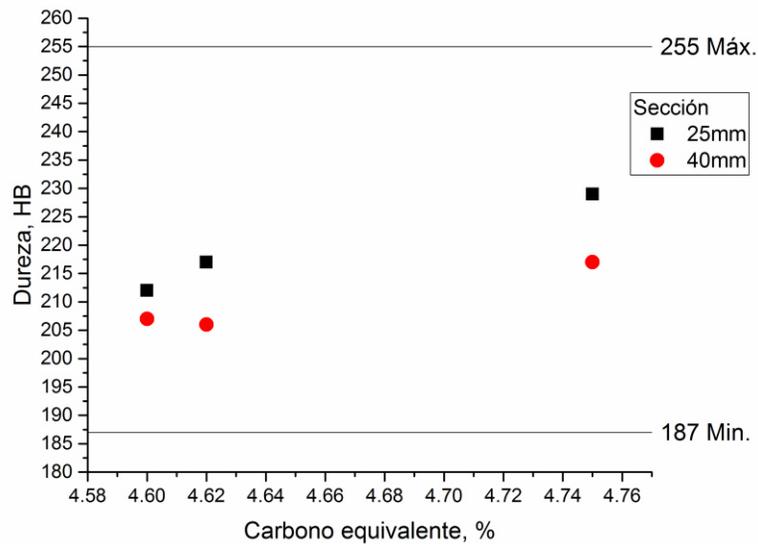


Figura 33. Dureza de cada condición para los espesores de 25 y 40 mm.

Los resultados muestran que en el comportamiento microestructural, los contenidos de magnesio, como elemento nodularizante y el estaño más el cobre como elementos grafitizantes y promotores de perlita juegan un rol muy importante y por lo tanto influyen las propiedades mecánicas de la aleación, que se describen en el siguiente apartado.

#### 5.1.4. Propiedades mecánicas.

Los resultados de las pruebas de tensión analizados en diferentes secciones: espesores de 53 mm para las condiciones 1 y 2, espesores de 25 y 40 mm para la condición 3.

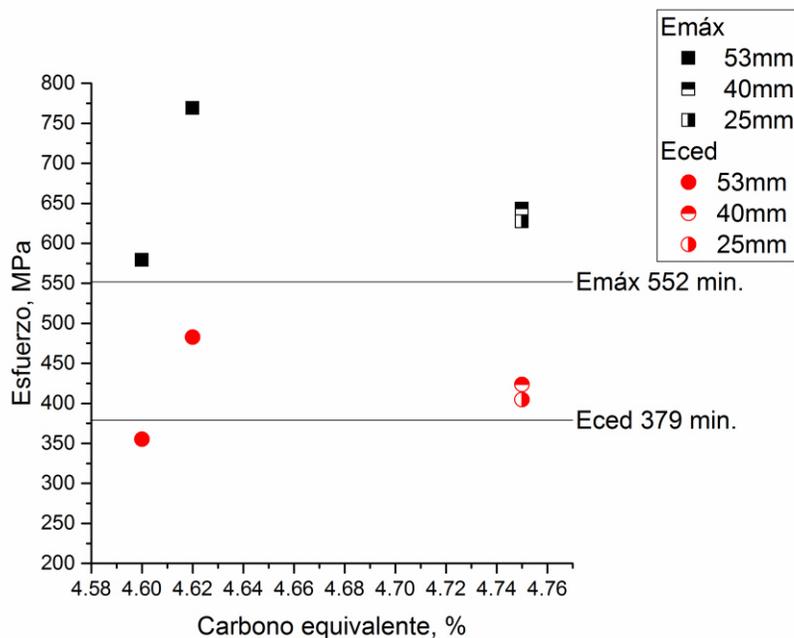


Figura 34. Esfuerzo de tensión en función del espesor de sección para cada condición.

Para secciones gruesas, espesor de 53 mm, el incremento en el carbono equivalente en conjunto con un incremento en perlitizantes da como resultado una mayor resistencia a la tensión y esfuerzo de cedencia, Figura 34, valores comparados con los mínimos especificados por la norma (12). Esto se explica con un mayor contenido de perlita, un mayor número de nódulos de grafito por milímetro cuadrado y un menor tamaño de los mismos.

Para secciones delgadas, espesores de 25 milímetros, a mayor contenido de carbono equivalente hay una mayor resistencia a la tensión. Además de la influencia de elementos como el magnesio y elementos perlitizantes como el cobre y el estaño. Los cuales al promover un mayor contenido de perlita incrementan la resistencia a la tensión.

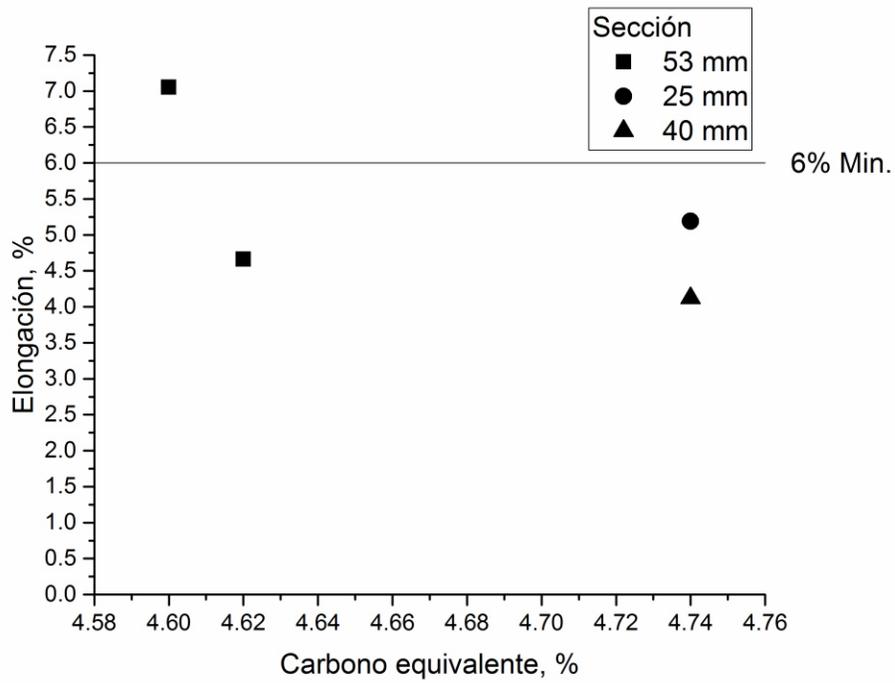


Figura 35. Elongación obtenida en las diferentes secciones analizadas y su relación con el carbono equivalente.

En cuanto a la ductilidad, expresada como la elongación, el incrementar el contenido de carbono equivalente, disminuyó ligeramente. Esto debido a un mayor contenido de perlita efecto del mayor porcentaje de perlitizantes. Solo la primera condición está dentro de la norma J434 D550 que establece un 6% mínimo de elongación.

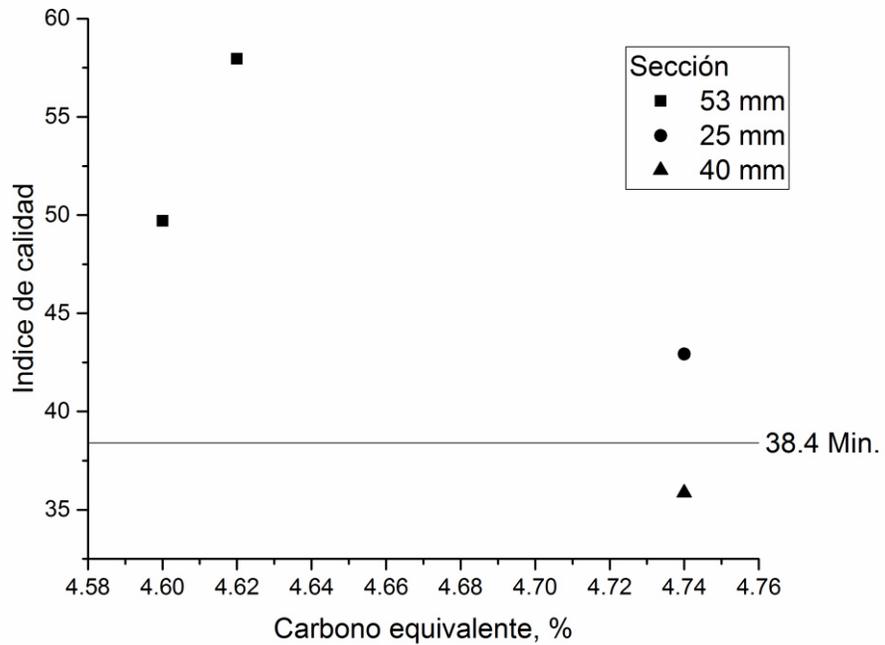


Figura 36. Efecto del carbono equivalente en el índice de calidad para cada una de las tres condiciones en diferentes espesores.

Para espesores gruesos, 53 mm, a mayor contenido de carbono equivalente se eleva el índice de calidad, debido al incremento en el contenido de silicio, los efectos de los elementos perlitizantes combinados.

En espesores delgados-medios, 25-40 mm, para un carbono equivalente de 4.75%, presentan mayor índice de calidad, esto debido a una buena combinación de ductilidad y alta resistencia.

## 5.2. Estudio del efecto del método de inoculación sobre la microestructura y propiedades mecánicas.

Con el objeto de analizar el efecto del método de inoculación se utilizó un contenido de carbono equivalente intermedio y un tiempo de desmoldeo de 8 horas. Se anexan unos barridos con rayos X de concentración de los elementos. Anexo 1

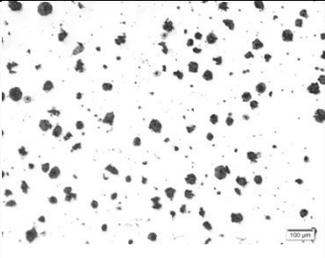
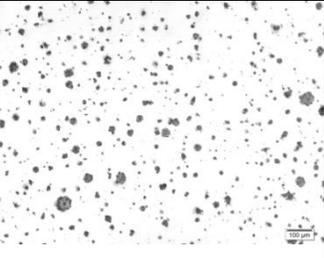
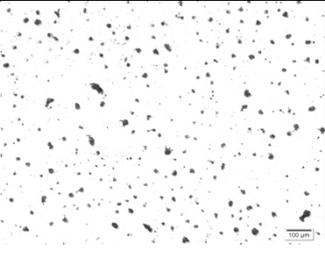
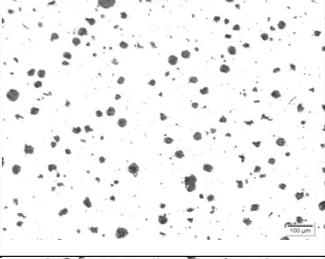
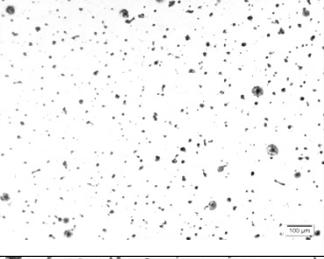
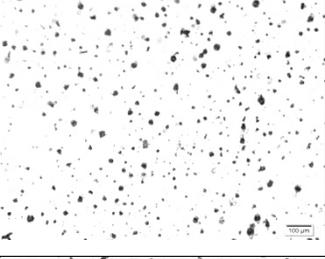
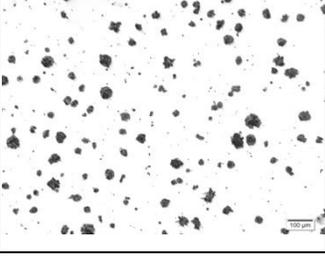
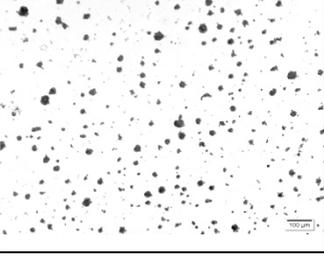
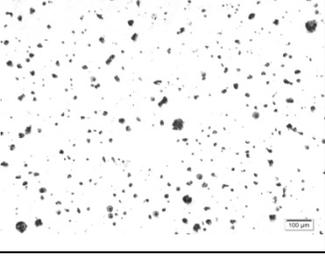
### 5.2.1. Análisis químico.

Tabla xvii. Composición química de las condiciones experimentadas.

Elemento, %	C	Si	Mn	S	Mg	Cu	Cr	Sn	Ti	Ceq.	Cu/10+Sn
Inoculación en olla	3.83	2.31	0.578	0.018	0.049	0.67	0.039	0.006	0.01	4.6	0.073
Inoculación en chorro	3.83	2.38	0.58	0.018	0.048	0.68	0.039	0.006	0.01	4.62	0.074
Inoculación en molde	3.83	2.41	0.54	0.018	0.063	0.65	0.028	0.005	0.009	4.63	0.07

## 5.2.2. Análisis metalográfico.

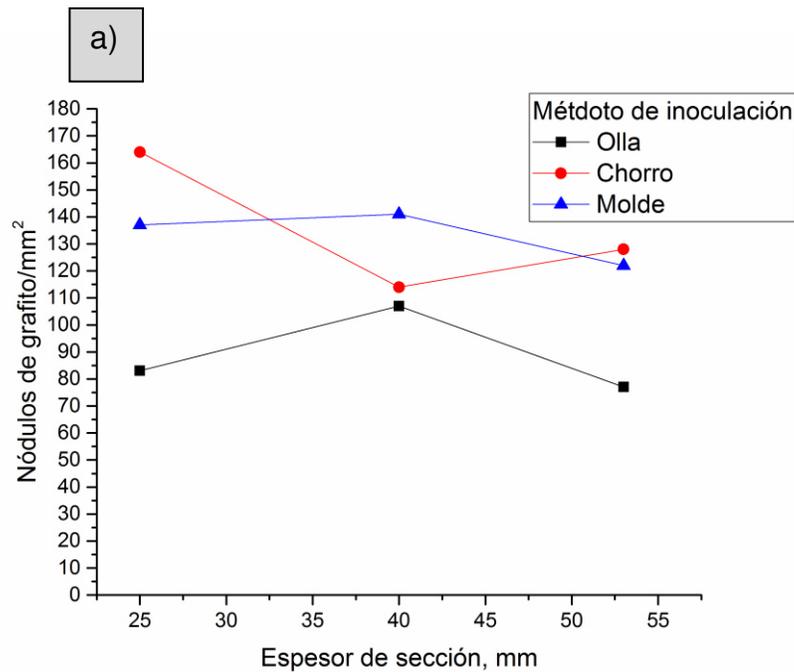
Tabla xviii. Análisis metalográfico para los tres métodos de inoculación en cada sección. 100X.

Condición Sección	Inoculación en olla	Inoculación en chorro	Inoculación en molde
Delgada 25 mm			
Media 40 mm			
Gruesa 53 mm			

El método de inoculación en olla presenta nódulos de grafito gruesos y distribuidos irregularmente en su sección delgada, media y gruesa. El método de inoculación en chorro presenta nódulos finos, distribuidos de manera regular. En el método de inoculación en el molde permite, además de nódulos finos, una

mejor distribución de los mismos. El espesor de sección no presenta efecto significativo sobre los nódulos.

La caída de la resistencia de la condición de método de inoculación doble: olla+molde: se presenta debido al mecanismo de debilitamiento de la matriz perlítica con una visualmente corta distancia internodular, específicamente entre la fase ferrítica.



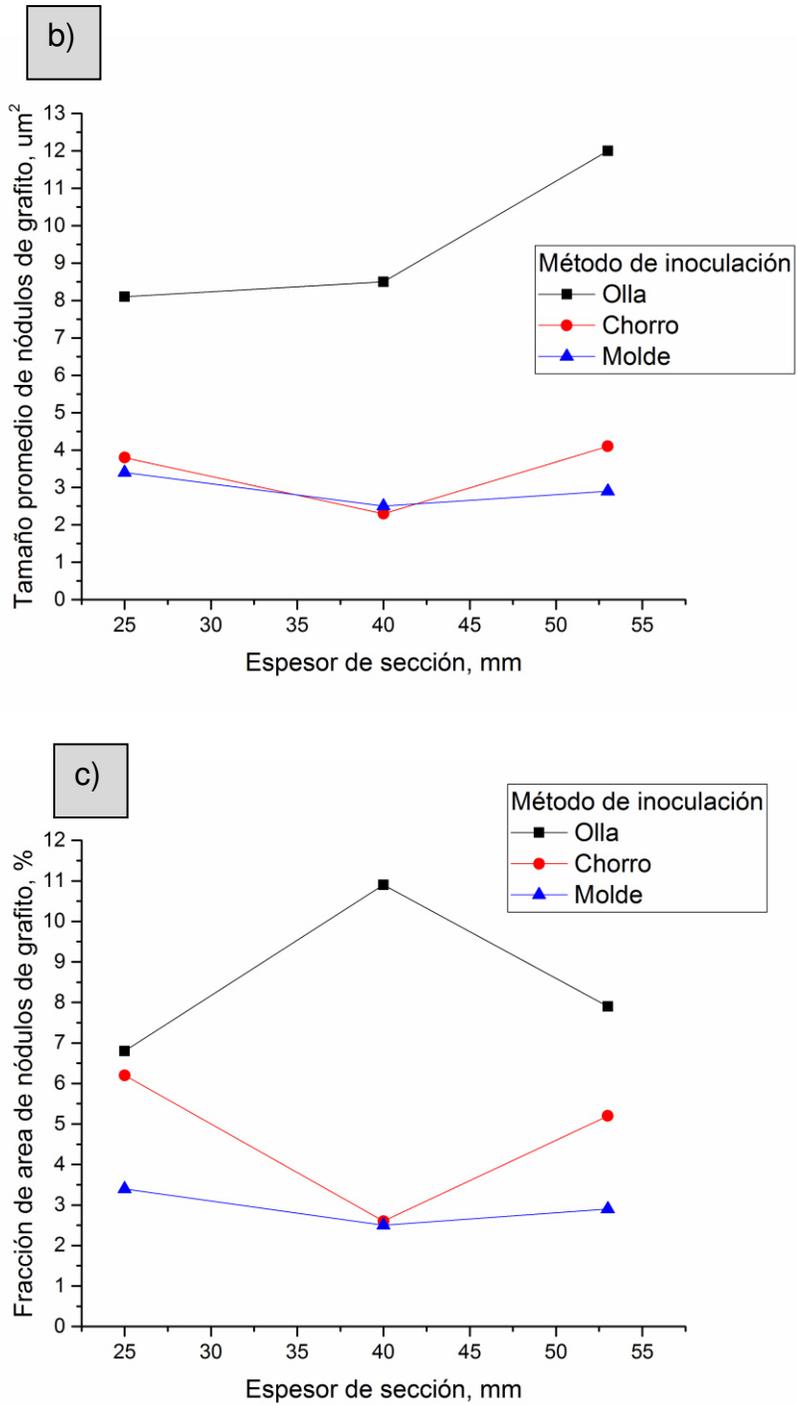
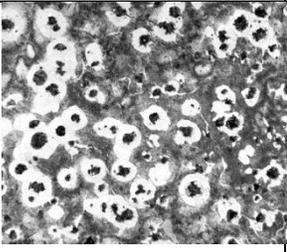
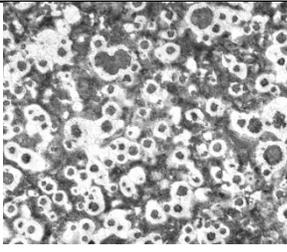
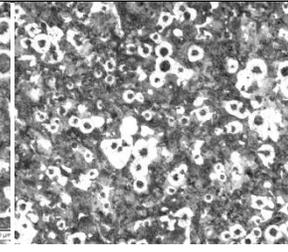
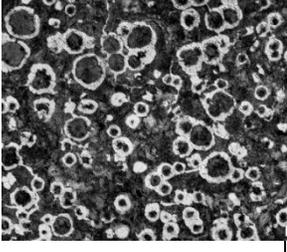
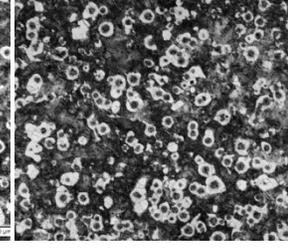
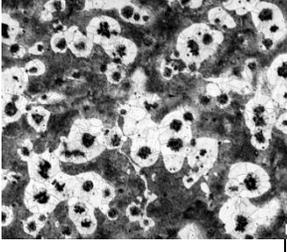
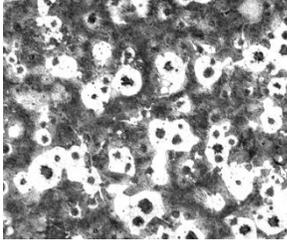
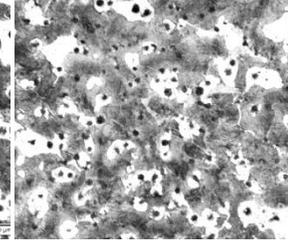


Figura 37. a) Nódulos de grafito/mm<sup>2</sup>, b) Tamaño promedio de nódulos de grafito y c) Fracción de área nódulos de grafito para las secciones: delgada, media y gruesa en cada método de inoculación.

La eficiencia en la inoculación depende de la presentación del inoculante y la temperatura a la que se añade, esta última depende del proceso. Granulometrías muy finas de inoculantes favorecen el proceso de inoculación. La inoculación doble es más eficiente que la inoculación sencilla. El método de inoculación doble que emplea inoculante en pastilla (composición y forma) presentó mayor cantidad, tamaño más fino y mejor distribución de nódulos de grafito.

Tabla xix. Análisis metalográfico para los tres métodos de inoculación en cada sección con ataque a 100x.

Condición / Sección	Inoculación en olla	Inoculación en chorro	Inoculación en molde
Delgada 25 mm			
Media 40 mm			
Gruesa 53 mm			

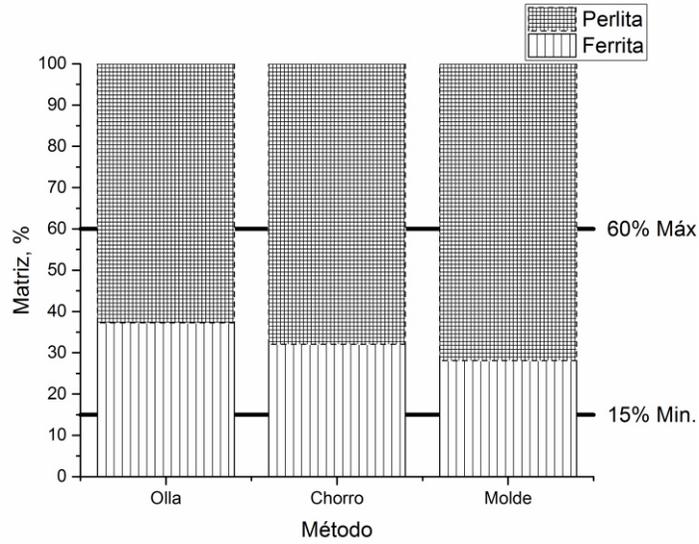


Figura 38. Porcentaje de ferrita y perlita para cada método de inoculación.

### 5.2.3. Dureza.

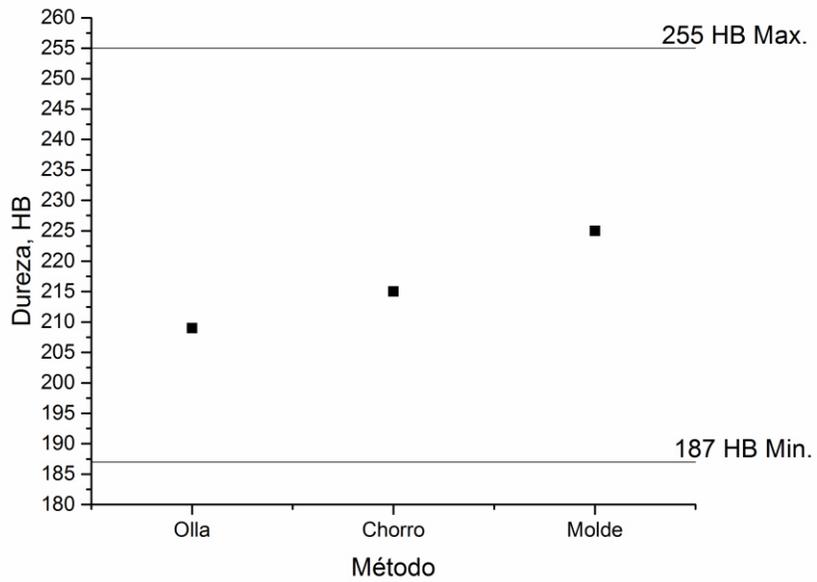


Figura 39. Dureza de cada método de inoculación.

Paralelo con los resultados de porcentaje de ferrita para cada uno de los métodos de inoculación se observa que mayor porcentajes de perlita, mayor dureza, encontrando en el método de inoculación en la olla, la más baja dureza Brinell HB, y en el método de inoculación en el molde la mayor dureza, efecto también de la mejor distribución de nódulos y su menor tamaño.

#### 5.2.4. Propiedades mecánicas.

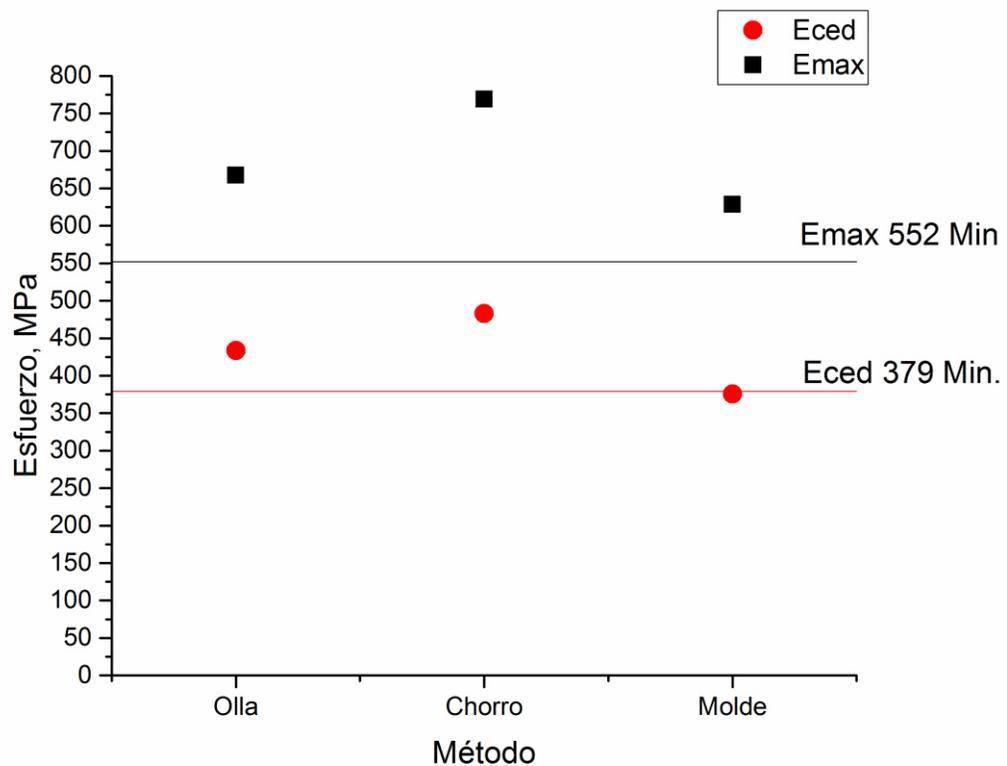


Figura 40. Esfuerzo a la tensión y cedencia obtenidos en cada método de inoculación.

El método de inoculación olla+**chorro** tiene los valores de esfuerzo máximo a la tensión y esfuerzo de cedencia más altos, mientras que el método de inoculación en el olla+**molde** presenta menor resistencia.

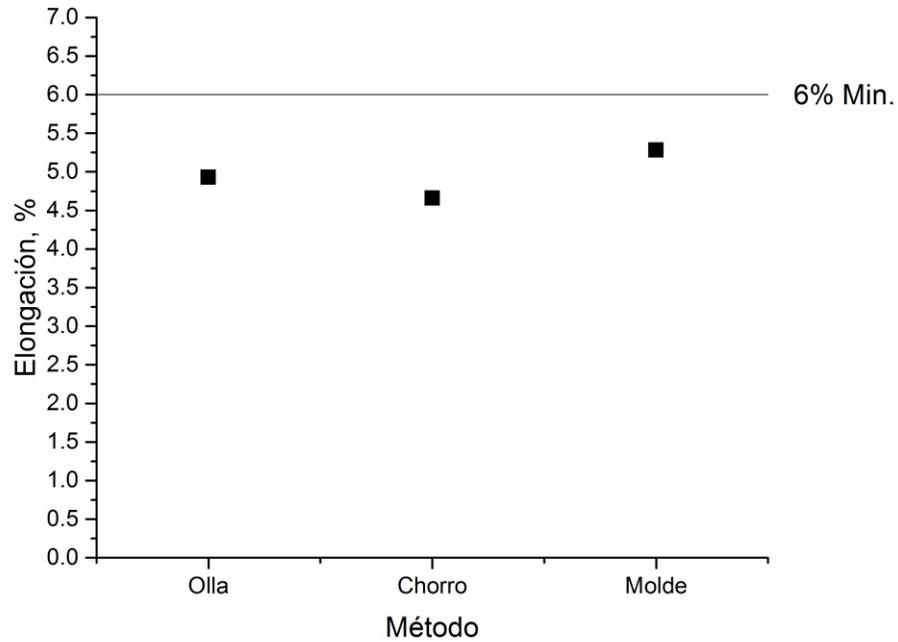
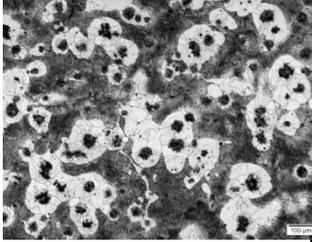
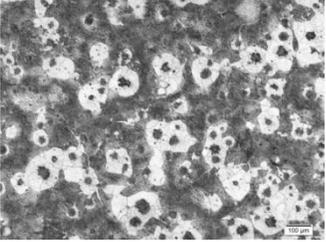
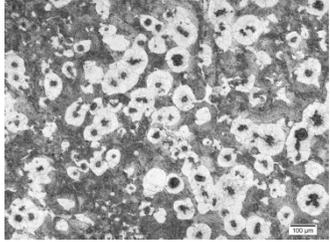
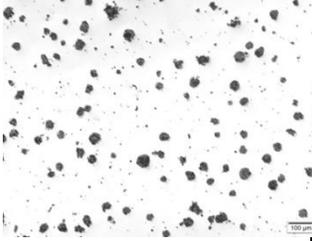
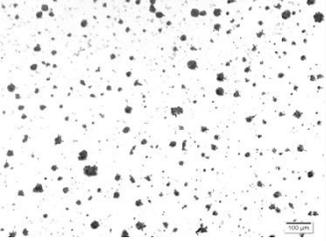
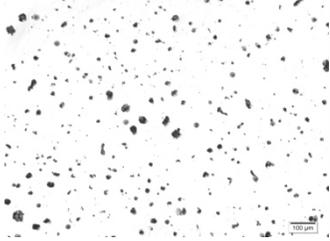


Figura 41. Efecto del método de inoculación en la elongación de la pieza.

Tabla xx. Comparación microestructural de los tres métodos de inoculación en espesor de 53 mm, atacadas y sin atacar. 100X.

Condición Sección	Inoculación en olla	Inoculación en chorro	Inoculación en molde
53 mm			
53 mm			

La determinación de las propiedades de tensión se llevó a cabo en la sección de 53mm de espesor por conveniencia, al ser la sección más crítica.

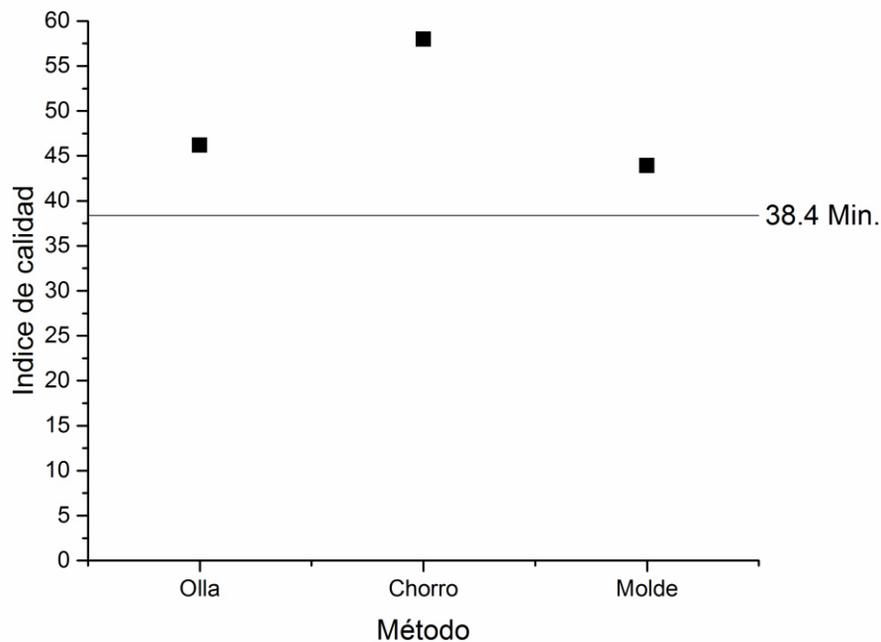


Figura 42. Efecto método de inoculación en el índice de calidad.

De los métodos de inoculación analizados, el más alto índice de calidad basado en sus propiedades mecánicas por lograr una mejor relación entre resistencia y esfuerzo máximo a la tensión es el método de inoculación doble en olla+chorro, siendo el método de inoculación con el más bajo índice de calidad el método de inoculación solo en olla. Ver Figura 42.

El índice de calidad de un hierro nodular está determinado por tres factores como son: el carbono equivalente, el contenido de magnesio residual y el efecto perlitizante del estaño. En este estudio se observó que pequeñas variaciones, del orden de 0.010% de estaño, ocasionaron un cambio notable en el contenido de perlita.

### 5.3. Estudio del efecto del tiempo de desmoldeo.

#### 5.3.1. Análisis químico.

A efecto de evaluar la influencia del tiempo de desmoldeo se tiene el análisis químico en la pieza para los tiempos de 2, 4, 6 y 8 horas de desmoldeo. Se buscó una composición química similar. Se utilizó el método de inoculación en chorro. Se anexan unos barridos con rayos X de concentración de los elementos. Anexo 1

Tabla xxi. Composición química resultante de la aleación para la prueba de tiempos desmoldeo.

% en peso	C	Si	Mn	S	Sn	Cu	Cr	Mg	Ti	Ceq	Cu/10 +Sn
2 y 4 horas	3.9	2.29	0.57	0.027	0.004	0.6	0.032	0.038	0.013	4.66	0.064
6 y 8 horas	3.9	2.29	0.59	0.027	0.006	0.66	0.034	0.037	0.011	4.66	0.072

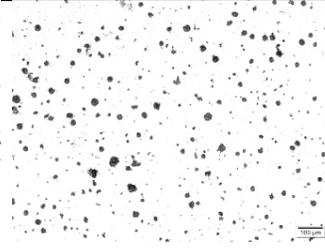
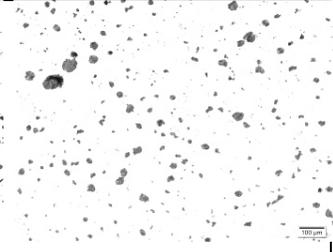
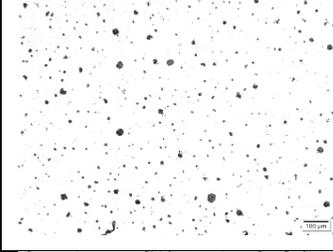
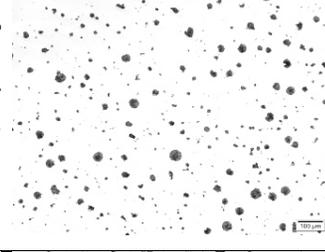
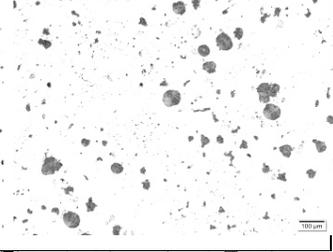
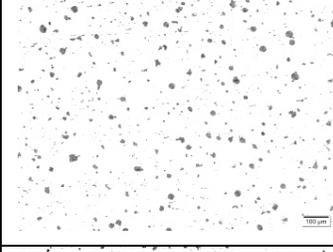
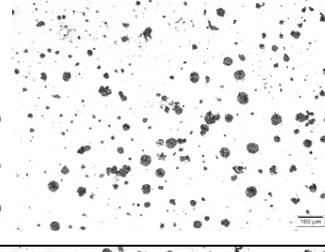
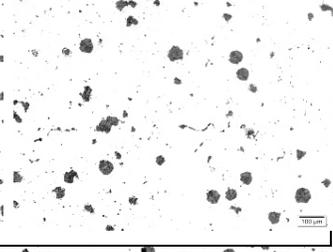
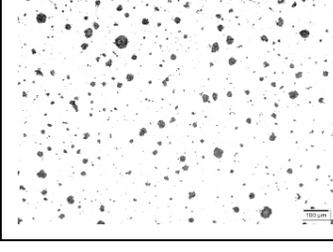
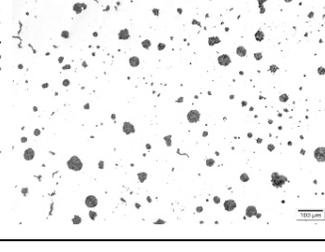
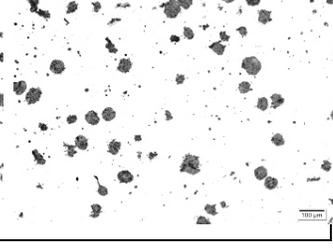
No se muestran diferencias en cuanto a la composición química permitiendo evaluar solamente el tiempo de desmoldeo. Ver Tabla xxi.

#### 5.3.2. Análisis metalográfico.

El análisis metalográfico se realizó en los espesores: delgado (25 mm), medio (40 mm) y grueso (53 mm) de cada tiempo de desmoldeo.

Del análisis de micrografías sin ataque de los diversos espesores, se observa una clara tendencia: a mayor tiempo de desmoldeo mayor crecimiento de nódulos de grafito eso ocasiona una menor densidad de nódulos/mm<sup>2</sup>, observable particularmente en el centro de la pieza, sección gruesa. Tabla xxii.

Tabla xxii. Análisis metalográfico del espesor delgado, medio y grueso para los diferentes tiempos de desmoldeo. 100X.

Tiempo de desmoldeo	Espesor de sección		
	Delgada	Media	Gruesa
2 h			
4 h			
6 h			
8 h			

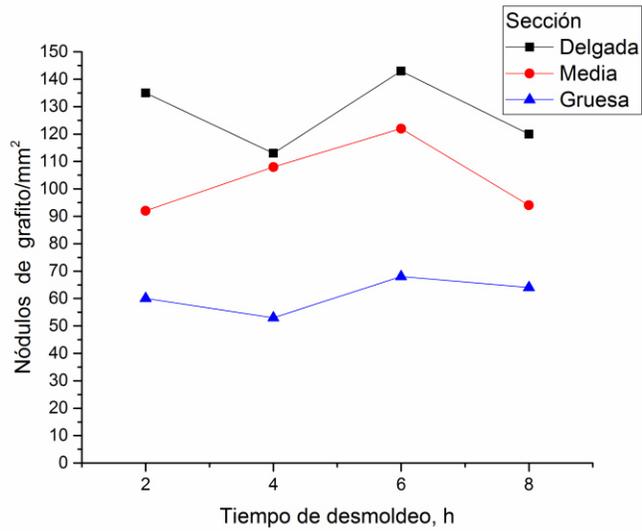


Figura 43. Nódulos de grafito en cada sección para los diferentes tiempos de desmoldeo.

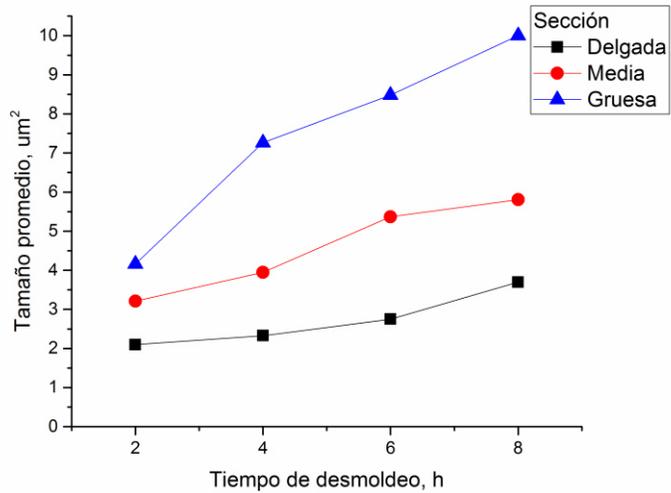


Figura 44. Tamaño promedio del nódulo de grafito en cada sección para los diferentes tiempos de desmoldeo.

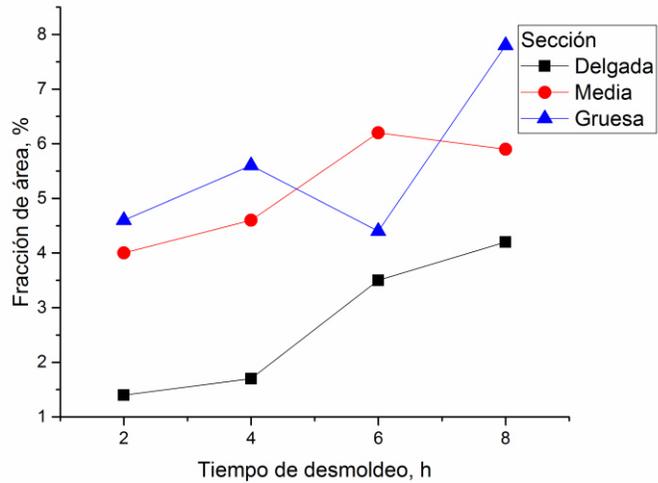
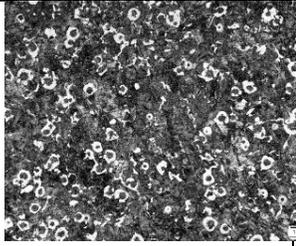
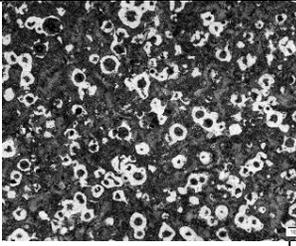
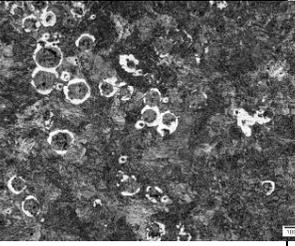
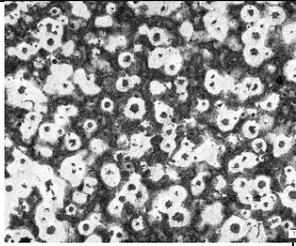
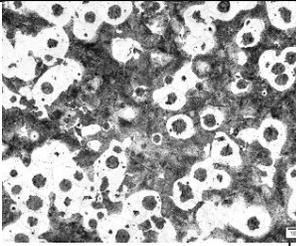
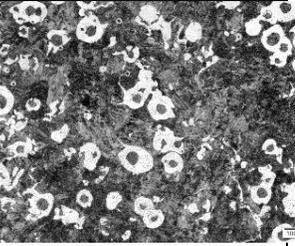
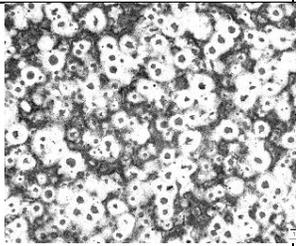
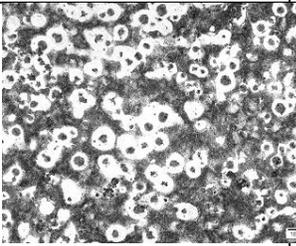
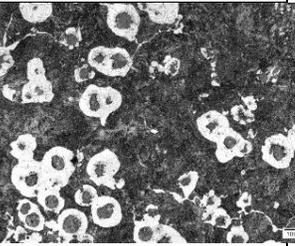
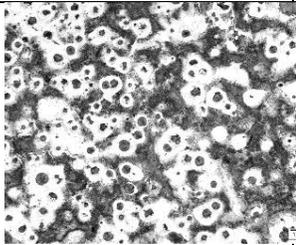
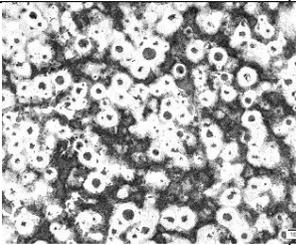
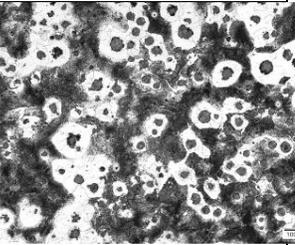


Figura 45. Fracción de área de los nódulos de grafito en cada sección para los diferentes tiempos de desmoldeo.

El número y tamaño de nódulos son similares para los espesores: delgado y medio, mientras que para espesores gruesos es menor. En espesores gruesos el número de nódulos de grafito aumenta considerablemente con el tiempo de desmoldeo, Figura 43. Mientras que en la Figura 44 se observa un mayor tamaño de nódulo para espesor grueso que para espesores delgado y medio. Se observa también una mayor fracción de área de nódulo de grafito. Figura 45.

Para el análisis del porcentaje de ferrita y perlita constituyente de la matriz se atacaron las muestras químicamente con nital, en la siguiente tabla se muestra la perlita como la porción oscura y la ferrita es la porción clara.

Tabla xxiii. Análisis metalográfico del espesor delgado, medio y grueso para los diferentes tiempos de desmoldeo, atacadas con nital al 4%. 100X.

Tiempo de desmoldeo	Espesor de sección		
	Delgada (25 mm)	Media (40 mm)	Gruesa (53 mm)
2 h			
4 h			
6 h			
8 h			

## Sobre el porcentaje de perlita y ferrita

La observación microestructural mostró en general, que mayor tiempo de desmoldeo provoca un crecimiento de nódulos de grafito y por consiguiente un incremento en el contenido de ferrita y disminución en el contenido de perlita. Ver Tablas xxii y xxiii en espesor delgado, medio y grueso, lo que ocasiona una caída en la dureza del hierro dúctil F-P nodular. Ver Figura 48.

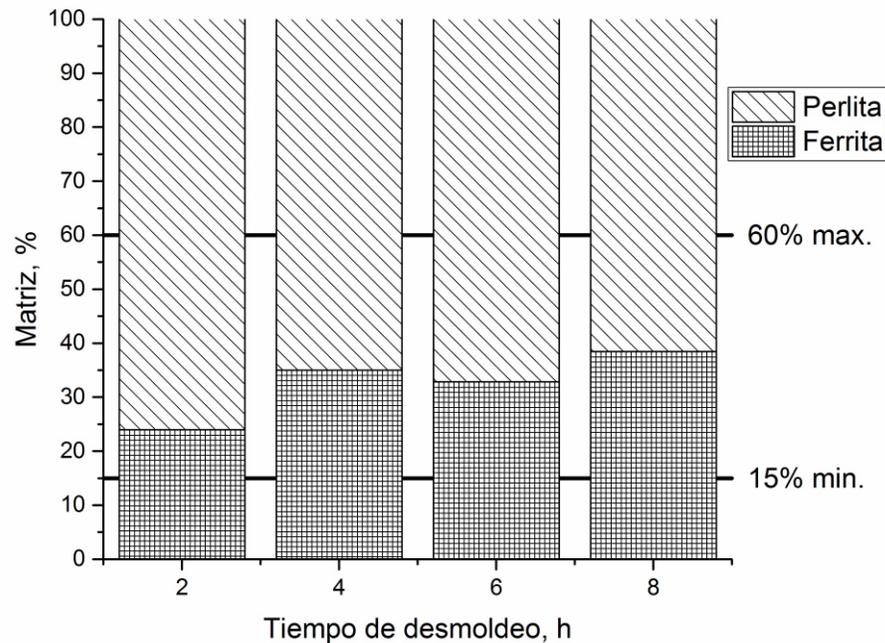
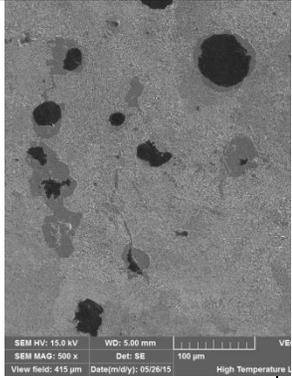
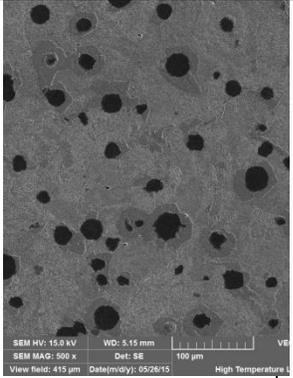
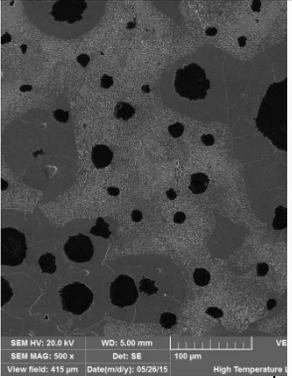
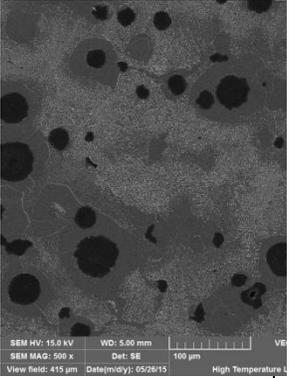
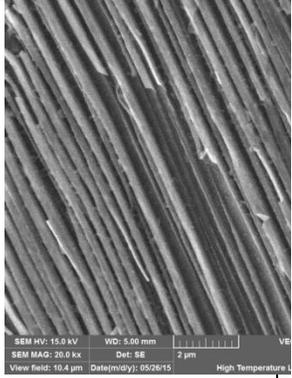
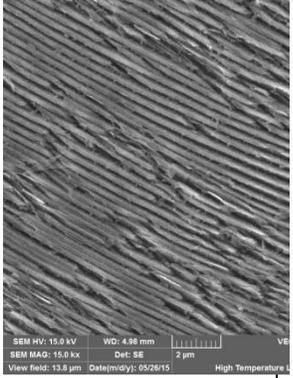
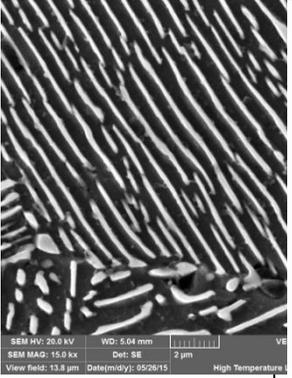
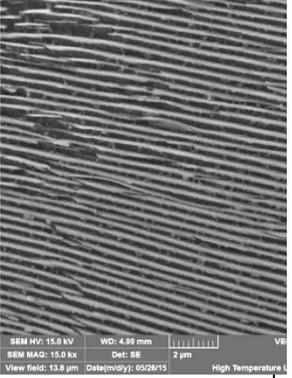
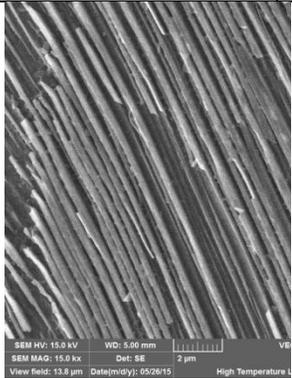
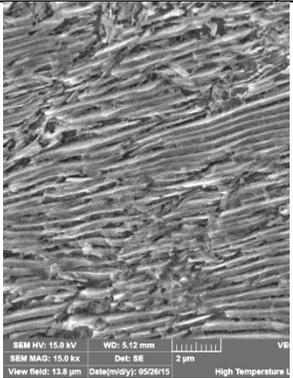
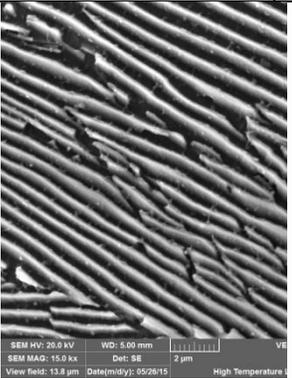
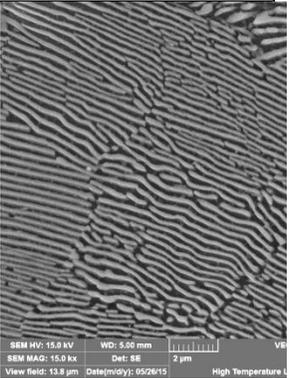


Figura 46. Porcentaje de ferrita y perlita en la matriz para cada uno de los tiempos de desmoldeo.

De anterior se concluye que los porcentajes promedio de ferrita en las piezas desde 2 hasta 6 horas, cumplen con los requerimientos de la norma sobre las características microestructurales.

Tabla xxiv. Micrografías tomadas en el microscopio electrónico de barrido (MEB), de los diferentes tiempos de desmoldeo.

TIEMPO DE DESMOLDEO			
2h Sección gruesa	2h Sección delgada	8h Sección gruesa	8h Sección delgada
<b>500X</b>			
			
<b>15000X</b>			
			
			

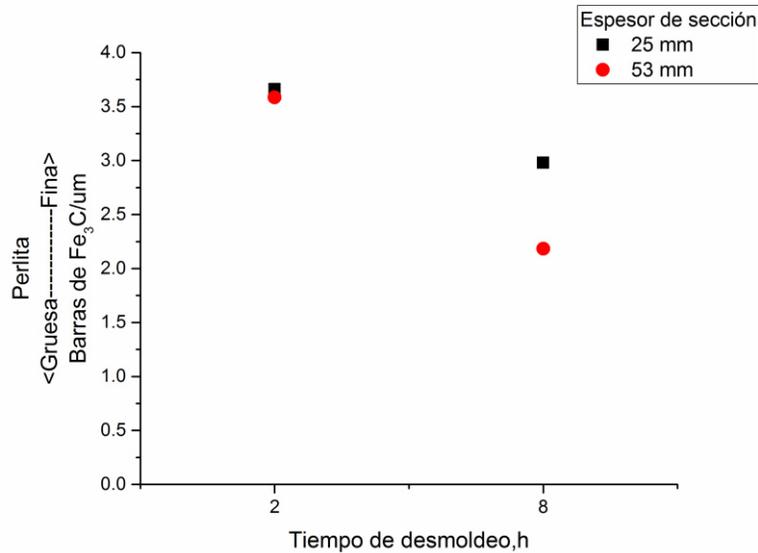


Figura 47. Espacio interlaminar de la perlita en tiempos de desmoldeo de 2 y 8 horas y espesores de 25 y 53 mm.

A mayor tiempo de desmoldeo, se encontró una perlita más gruesa para los espesores: delgado y grueso. Un espesor de sección delgado mostró en general una perlita más fina, comparada con espesores gruesos. El tiempo de desmoldeo tiene una influencia de engrosamiento de la perlita más evidente en espesores gruesos.

### 5.3.3. Dureza.

Al evaluar la influencia del tiempo de desmoldeo sobre la dureza promedio (obtenido de la dureza de todas las secciones), se observó que debido a la reducción en el contenido de perlita y el incremento en el contenido de ferrita, al aumentar el tiempo de desmoldeo, se produjo una reducción en la dureza de la pieza, en sus diferentes secciones. La Figura 48 muestra el comportamiento general, con valores de dureza promedio, correspondiente a las mediciones de

dureza de todas las zonas, en función del número de molde y tiempo de desmoldeo.

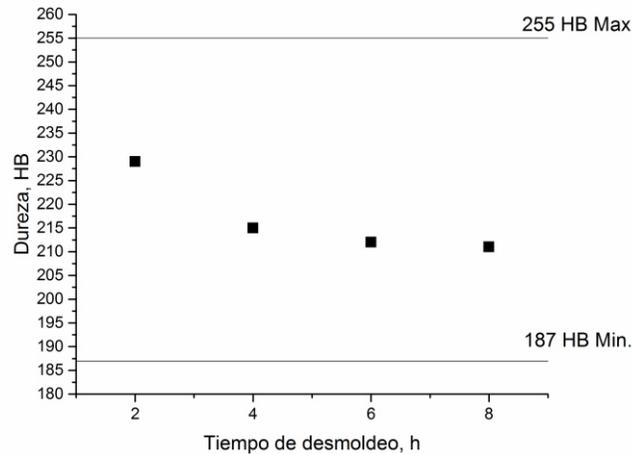


Figura 48. Dureza promedio de las piezas para los diferentes tiempos de desmoldeo.

Los resultados de dureza también mostraron que la dureza máxima siempre se presentó con un tiempo de desmoldeo de 2 horas, mientras que la menor dureza correspondió al mayor tiempo de desmoldeo, 8 horas.

De anterior se concluye que para la pieza desmoldeada a las 2 horas así como para la pieza desmoldeada a 8 horas, cumplen con los requerimientos de especificación sobre dureza (12). Si se quiere obtener una pieza con mayor dureza, deberá aplicarse un tiempo de desmoldeo menor.

### 5.3.4. Propiedades mecánicas.

Los resultados de las pruebas de tensión en sección gruesa para cada uno de los moldes vaciados, a diferentes tiempos de enfriamiento. Figura 49.

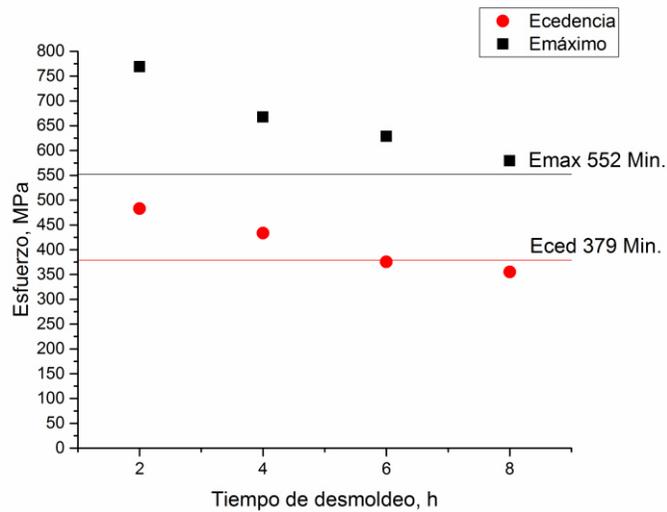


Figura 49. Esfuerzo de tensión en función del tiempo de desmoldeo en la zona centro de la pieza.

Como se observa en la Figura 49, a medida que aumenta el tiempo de desmoldeo de 2, 4, 6 y 8 horas, hay un descenso significativo en el esfuerzo a la cedencia y en el esfuerzo máximo. Esto debido a la reducción del porcentaje de perlita y su consecuente aumento de ferrita acompañado de un crecimiento de los nódulos de grafito.

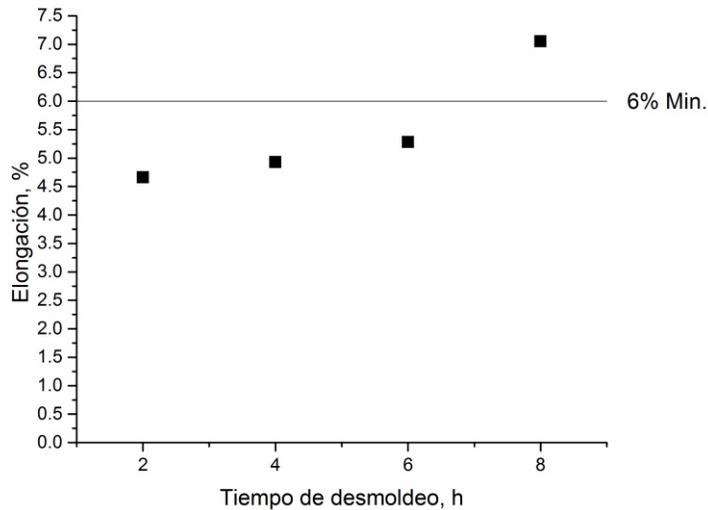


Figura 50. Efecto del tiempo de desmoldeo en la elongación.

En cuanto a la ductilidad, expresada como la elongación, el incrementar el tiempo de desmoldeo entre 2 a 8 horas, elevó ligeramente los valores de elongación, siendo la pieza desmoldeada a 8 horas la que cumple con la especificación. Ver Figura 50.

Los resultados mostraron que el tiempo de desmoldeo tiene un efecto significativo en la resistencia y ductilidad de la pieza. De las condiciones ensayadas se observa que con un tiempo de desmoldeo de 2 horas, se tiene un máximo en la resistencia, superior en un 39% al requerimiento de la norma. El aplicar un tiempo de desmoldeo de 8 horas cumple con el requerimiento de la norma en cuanto al esfuerzo máximo, siendo superior un 5 %. Sin embargo en solo en uno de los casos experimentados, es decir para tiempo de desmoldeo entre 8 horas, se cubre con el requerimiento de la norma en cuanto a la elongación que debe ser superior al 6%.

La Figura 49 muestra el efecto del tiempo de desmoldeo en las propiedades mecánicas de tensión, el incrementar el tiempo de desmoldeo de 2 a 4 horas, produjo un caída drástica en el esfuerzo máximo a la tensión del 18%, mientras

que para un tiempo de desmoldeo a 6 horas, el caída en el esfuerzo máximo fue del 7 % y para el tiempo de desmoldeo de 8 horas hay un decremento del 9%.

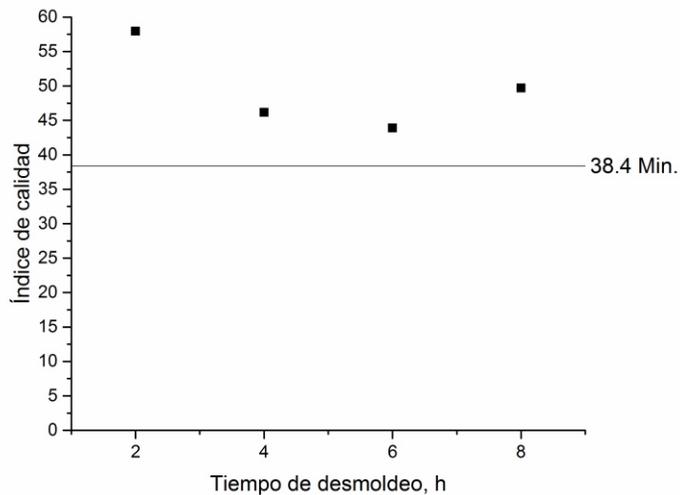


Figura 51. Efecto del tiempo de desmoldeo en el índice de calidad, respecto de la especificación (12).

En el presente grafico se muestra la relación del cuadrado del esfuerzo máximo multiplicado por la elongación que representa el índice de calidad del material. Logrando la mejor relación el tiempo de desmoldeo de 6 horas. Pese a no cumplir con el mínimo de elongación requerido.

## **5.4. Conclusiones y recomendaciones.**

### **5.4.1 Estudio del efecto de la composición química sobre la microestructura y propiedades mecánicas.**

El efecto del contenido de carbono equivalente es muy claro en las tres condiciones experimentales, a mayor contenido de carbono equivalente mayor contenido de perlita.

El número de nódulos por milímetro cuadrado depende del carbono equivalente y del contenido de magnesio.

En general el tamaño de nódulos de grafito está influenciado directamente por el espesor de sección, sin embargo, cuando el contenido de carbono equivalente y de magnesio es alto, la influencia del espesor de sección no es significativa.

Tanto para secciones gruesas como para secciones delgadas a mayor contenido de carbono equivalente se presenta mayor resistencia a la tensión y mayor dureza. Además del carbono equivalente también tienen una influencia importante los contenidos de magnesio como elemento nodulizante y el estaño como promotor de perlita.

En general, a mayor contenido de carbono equivalente da como resultado un mayor contenido de perlita y por lo tanto una menor elongación.

Todas las condiciones ensayadas cumplen con el índice de calidad mínimo requerido por la norma SAE J434 D550. Un contenido de carbono equivalente de 4.71 presentó un índice de calidad 50% mayor al requerido por norma.

El índice de calidad de un hierro nodular está determinado por tres factores como son: el carbono equivalente, el contenido de magnesio residual y el efecto perlitizante del estaño. En este estudio se observó que pequeñas variaciones,

del orden de 0.010% de estaño, ocasionaron un cambio notable de hasta un 20% en el contenido de perlita.

#### **5.4.2. Estudio del efecto del método de inoculación sobre la microestructura y propiedades mecánicas.**

La inoculación por el método de olla+chorro presentó una ventaja significativa respecto de la inoculación simple en olla, los resultados muestran un incremento en el índice de calidad del 25%.

La inoculación doble por el método de olla+ molde presenta desventaja significativa respecto de la inoculación simple en olla, además de ser más costosa representa una caída en el índice de calidad del 5%. Debido a que la inoculación es más eficiente y presenta mayor número de nódulos de grafito finos y distribuidos se presenta un mecanismo de debilitamiento de la matriz perlítica por la cercanía de los nódulos de grafito y la ferrita circundante.

#### **5.4.3. Estudio del efecto del tiempo de desmoldeo sobre la microestructura y propiedades mecánicas.**

El tiempo de desmoldeo afecta la microestructura de la pieza. A mayor tiempo de desmoldeo produce un crecimiento de los nódulos de grafito, reduciendo el porcentaje de perlita con un consecuente aumento de ferrita en el área circundante al nódulo.

Estos cambios en la microestructura produjeron cambios en la dureza. A mayor tiempo de desmoldeo se reduce la dureza.

Para cualquiera de los tiempos de desmoldeo, dependiendo de la posición en el molde se tienen diferentes condiciones de solidificación, por lo tanto, se tiene diferente microestructura y dureza. Las orejas interiores del chasis superior e inferior, a así como las orejas de montaje tienen diferente dureza comparados con el centro de la pieza.

Con un tiempo de desmoldeo de entre 2 y 6 horas se obtiene un esfuerzo máximo que cumple con los requerimientos de la norma, sin embargo el % de elongación queda por debajo del mínimo requerido.

El tiempo de desmoldeo afecta significativamente la resistencia a la tensión mientras que no es un factor importante para variar la elongación.

La obtención de la microestructura y las propiedades mecánicas adecuadas de la pieza es complejo, por los cambios de sección y control del proceso de fabricación. La composición química, contenido de carbono equivalente y perlizantes. El método de inoculación así como el tiempo de desmoldeo son aspectos muy importantes a controlar para con óptimos tiempos de producción, no vulnerar las propiedades mecánicas de la pieza.

#### **5.4.4. Recomendaciones.**

Recomendación 1:

Se recomienda tener un estricto control en la composición química del producto, ya que ligeras variaciones en elementos potencialmente activos, como el estaño y cobre, generan cambios microestructurales que afectaran positiva o negativamente las propiedades mecánicas.

Recomendación 2:

Se recomienda utilizar el método de inoculación doble, olla+chorro, por sus ventajas en su índice de calidad y en costo de materia prima.

Se recomienda hacer una experimentación adicional con menores porcentajes de inoculante en pastilla. Podría encontrarse la cantidad adecuada para obtener un mayor índice de calidad.

Recomendación 3:

Se recomienda reducir el nivel de manganeso a fin de aumentar la ductilidad de la pieza con un tiempo de desmoldeo de 4 horas, logrando el esfuerzo de cedencia y esfuerzo máximo a la tensión dentro de las especificaciones requeridas por el cliente.

Inspeccionar cuidadosamente los contenidos de carbono y silicio, ya que estos afectan las propiedades mecánicas (esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo a la tensión y elongación).

Un tratamiento para olla menor a 800 kg representa un riesgo para controlar la composición química.

Para tener una mejor caracterización de la zona cope de la pieza es necesario analizar una pieza completa y observar su comportamiento y diferencia respecto de la zona drag.

#### **5.4.5. Recomendaciones para trabajo a futuro.**

El uso de los datos obtenidos en este trabajo, permite realizar simulaciones en un software de simulación como el MAGNASOFT obteniendo mejores aproximaciones y evitando de este modo realizar pruebas costosas. Es conveniente realizar una medición de la temperatura en diferentes espesores, calculando la velocidad de solidificación y el tiempo de enfriamiento de cada espesor. Relacionando estos datos con las microestructuras obtenidas en este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Alagarsamy, Al.** Cast Irons. 2014, págs. 489-581.
2. **Karsay, Stephen I.** *Fundición con Grafito esferoidal I Producción.* Frankfurt/Chicago : Talleres graficos Edelvives, 1992.
3. **Society, Ductile Iron.** Ductile Iron Data For Design Engineers. [En línea] 2013. [Citado el: 28 de Septiembre de 2014.] <http://www.ductile.org/didata/forward.htm>.
4. **ASM International Handbook Committee.** *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, steels and high-performance alloys.* s.l. : ASM International, 2005.
5. **Committee, ASM Handbook.** *ASM Handbook, Volume 15, Casting.* s.l. : ASM International, 1992.
6. **INC., American Foundryman's Society.** *Ductile Iron Handbook.* U.S.A. : American Foundryman's Society INC., 1992.
7. **Callister, William D.** *Materials Science and Engineering.* Utah : John Wiley & Sons, Inc, 2007.
8. **Society, Ductile Iron.** *DUCTILE IRON DATA FOR DESIGN ENGINEERS.* Ohio, USA : Rio Tinto Iron & Titanium Inc, 2013.
9. **Society, American Foundrymen's.** *Ductile Iron Handbook.* U.S.A. : American Foundrymen's Society, 1992.
10. *Structure of Spheroidal Graphite in Cast Iron.* **C. R. Loper, Jr, and K. Fang.** 673-682, s.l. : AFS Transactions, 2008.
11. *Austenite shell evidence in ductile iron solidification.* **Sá, H. Santos and C.** 2004, international journal of cast metal research, págs. 319-320.
12. *AUTOMOTIVE DUCTILE IRON CASTINGS.* **SAE.** 2004, SAE.

13. **Voort, George F. Vander.** *Metallography, Principles and Practice.* United States of America : ASM International, 1999.
14. **Campbell, Flake C.** *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys.* United States of America : ASM International, 2008.
15. **Karsay, Stephen I.** *Fundición con Grafito esferoidal I Produccion.* s.l. : Talleres graficos Edelvives, 1992.
16. *DUCTILE IRON QUALITY INDEX.* **BV, Ir G.D HENDERIECKX.** s.l. : GIETECH BV, 2004.

## Índice de figuras

Figura 1. El Iron Bridge en el río Severn en Ironbridge Gorge (5). -----	7
Figura 2. Porcentajes de carbono y silicio para hierros y acero. (1) -----	8
Figura 3. Formas típicas de grafito ASTM A247. I grafito esferoidal, II grafito esferoidal imperfecto, III Grafito templado, IV Grafito compacto, V Grafito cangrejo, VI Grafito explotado y VII Grafito vermicular (1).-----	24
Figura 4. a) Sección transversal de un grafito esferoidal removido por ataque profundo en los planos cristalográficos radial y angular. b) Detalle de la superficie de un nódulos de grafito (10). -----	28
Figura 5. Diagrama hierro carbono para fases estables y metaestables sin silicio (1). -----	29
Figura 6. Diagrama hierro carbono solo para fases estables y un 2% de silicio (1). -----	29
Figura 7. Pieza swing tower de hierro nodular. -----	32
Figura 8. Molde pintado (parte cope). -----	35
Figura 9. Parte drag del molde con los corazones sentados.-----	36
Figura 10. Parte cope del molde con los corazones sentados. -----	37
Figura 11. Vaciado de metal en el molde.-----	38
Figura 12. Extracción de piezas con los moldes en la mesa vibradora. -----	38
Figura 13. Pieza final utilizada como acoplamiento de la máquina retroexcavadora con el brazo extensible. -----	40
Figura 14. Diagrama experimental general. -----	42
Figura 15. Diagrama experimental del efecto de la composición química en la microestructura y las propiedades mecánicas. -----	43
Figura 16. Diagrama experimental del efecto método de inoculación sobre la microestructura y propiedades mecánicas. -----	44
Figura 17. Diagrama experimental del efecto del tiempo de desmoldeo en la microestructura y las propiedades mecánicas. -----	45
Figura 18. Tiempo y temperatura en el proceso de vaciado del metal fundido para la prueba con distintos métodos de inoculación. -----	49

Figura 19. Pastilla de inoculante colocada en la copa del molde antes de los filtros.-----	50
Figura 20. Desmoldeo de piezas en mesa vibradora. -----	51
Figura 21. Ubicación de las muestras para metalografía y dureza y probeta de tensión en cada sección.-----	53
Figura 22. Dimensiones de acuerdo a la norma para probeta roscada de hierro nodular ASTM E-8. -----	53
Figura 23. Máquina universal de tensión Tinius Olsen, 60 Ton. -----	54
Figura 24. King Portable Brinell. -----	55
Figura 25. Pulidora Struers Labopol-1. -----	55
Figura 26. Microscopio óptico Olympus BX51M. -----	56
Figura 27. Recubrimiento de las piezas con oro en una estación de Cryomicroscopía modelo PP3000T. -----	57
Figura 28. Microscopio electrónico de barrido MEB TESCAN VEGA 3 -----	57
Figura 29. Carbono equivalente de las condiciones analizadas (12). -----	59
Figura 30. Contenido de perlitizantes de las condiciones analizadas (12). -----	59
Figura 31. Resultados a) Nódulos de grafito/mm <sup>2</sup> , b) Tamaño promedio de nódulos de grafito y c) Fracción de área nódulos de grafito para los espesores de 25 y 40 mm en cada condición.-----	62
Figura 32. Porcentaje de ferrita y perlita para los espesores de: a) 25 mm y b) 40 mm.-----	64
Figura 33. Dureza de cada condición para los espesores de 25 y 40 mm. -----	66
Figura 34. Esfuerzo de tensión en función del espesor de sección para cada condición. -----	67
Figura 35. Elongación obtenida en las diferentes secciones analizadas y su relación con el carbono equivalente. -----	68
Figura 36. Efecto del carbono equivalente en el índice de calidad para cada una de las tres condiciones en diferentes espesores. -----	69
Figura 37. a) Nódulos de grafito/mm <sup>2</sup> , b) Tamaño promedio de nódulos de grafito y c) Fracción de área nódulos de grafito para las secciones: delgada, media y gruesa en cada método de inoculación.-----	73

Figura 38. Porcentaje de ferrita y perlita para cada método de inoculación. ----	75
Figura 39. Dureza de cada método de inoculación. -----	75
Figura 40. Esfuerzo a la tensión y cedencia obtenidos en cada método de inoculación. -----	76
Figura 41. Efecto del método de inoculación en la elongación de la pieza. ----	77
Figura 42. Efecto método de inoculación en el índice de calidad. -----	79
Figura 43. Nódulos de grafito en cada sección para los diferentes tiempos de desmoldeo. -----	82
Figura 44. Tamaño promedio del nódulo de grafito en cada sección para los diferentes tiempos de desmoldeo. -----	82
Figura 45. Fracción de área de los nódulos de grafito en cada sección para los diferentes tiempos de desmoldeo. -----	83
Figura 46. Porcentaje de ferrita y perlita en la matriz para cada uno de los tiempos de desmoldeo. -----	85
Figura 47. Espacio interlaminar de la perlita en tiempos de desmoldeo de 2 y 8 horas y espesores de 25 y 53 mm. -----	87
Figura 48. Dureza promedio de las piezas para los diferentes tiempos de desmoldeo. -----	88
Figura 49. Esfuerzo de tensión en función del tiempo de desmoldeo en la zona centro de la pieza. -----	89
Figura 50. Efecto del tiempo de desmoldeo en la elongación. -----	90
Figura 51. Efecto del tiempo de desmoldeo en el índice de calidad, respecto de la especificación (12).-----	91

## Índice de tablas

Tabla i. Clasificación de hierros vaciados por designación comercial, estructura y fractura (4).....	9
Tabla ii. Especificación de la SAE para piezas fundidas de hierro nodular en la industria automotriz. (8) .....	18
Tabla iii. Clasificación del grafito basado en el tamaño de los nódulos (6). .....	23
Tabla iv. Composición química nominal de un hierro ferrítico.....	34
Tabla v. Composición química para ajuste de hierro ferrítico a Ferrítico-perlítico. ....	34
Tabla vi. Composición química nominal de un hierro dúctil ferrítico-perlítico D550* (12).....	46
Tabla vii. Diseño de experimento del efecto del químico en la microestructura y las propiedades mecánicas.....	47
Tabla viii. Métodos de inoculación experimentados.....	48
Tabla ix. Especificación de los inoculantes utilizados.....	50
Tabla x. Tiempos de desmoldeo experimentados.....	51
Tabla xi. Ubicación de las muestras analizadas para metalografía y dureza....	52
Tabla xii. Composición química resultante variando el carbono equivalente. ...	58
Tabla xiii. Análisis metalográfico de la sección de 25 mm de espesor para cada condición. 100X .....	60
Tabla xiv. Análisis metalográfico de la zona de 40 mm para cada condición. 100X. ....	61
Tabla xv. Análisis metalográfico de la zona 3 con ataque para los diferentes contenidos de carbono equivalente, sección de 25 mm. 100X. ....	63
Tabla xvi. Análisis metalográfico y dureza de la sección gruesa con ataque para los diferentes tiempos de desmoldeo, sección 40 mm.100X. ....	64
Tabla xvii. Composición química de las condiciones experimentadas.....	70
Tabla xviii. Análisis metalográfico para los tres métodos de inoculación en cada sección. 100X. ....	71

Tabla xix. Análisis metalográfico para los tres métodos de inoculación en cada sección con ataque a 100x. ....	74
Tabla xx. Comparación microestructural de los tres métodos de inoculación en espesor de 53 mm, atacadas y sin atacar. 100X. ....	78
Tabla xxi. Composición química resultante de la aleación para la prueba de tiempos desmoldeo. ....	80
Tabla xxii. Análisis metalográfico del espesor delgado, medio y grueso para los diferentes tiempos de desmoldeo. 100X. ....	81
Tabla xxiii. Análisis metalográfico del espesor delgado, medio y grueso para los diferentes tiempos de desmoldeo, atacadas con nital al 4%. 100X. ....	84
Tabla xxiv. Micrografías tomadas en el microscopio electrónico de barrido (MEB), de los diferentes tiempos de desmoldeo. ....	86

## Anexos

### 1. Análisis de costos de los inoculantes utilizados.

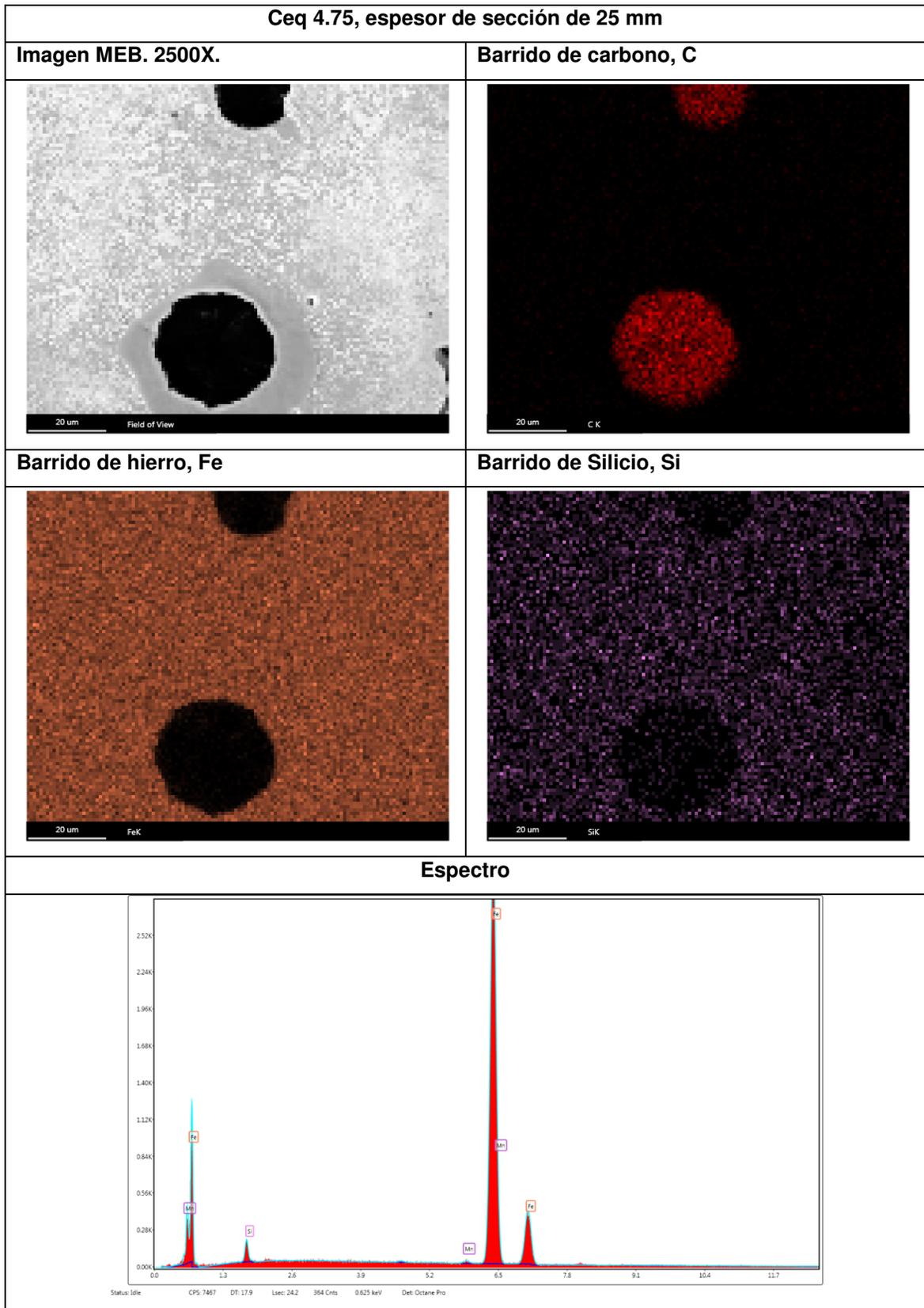
Costo

	Inoculación normal (olla y chorro)		Inoculación en olla		Inoculación con pastilla	
	Cantidad por olla (Kg)	Costo \$	Cantidad por olla (Kg)	Costo \$	Cantidad por olla (Kg)	Costo \$
<b>FeSi Grano</b>	3	9.15	5.7	17.385	3	9.15
<b>FeSi Polvo</b>	1	3.79	n/a		n/a	
<b>Pastilla</b>	n/a		n/a		0.9	7.2
<b>Costo Total Molde (\$)</b>	8.365 dólares		8.692 dólares		11.775 dólares	
<b>Costo Total Pieza (\$)</b>	4.1825 dólares		4.346 dólares		5.8875 dólares	

### Comparativo de los tres métodos de inoculación.

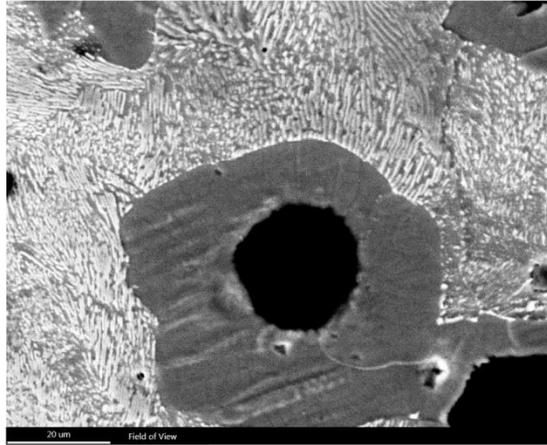
	Inoculación normal (olla y chorro)	Inoculación en olla	Inoculación con pastilla
<b>Ventajas</b>	Menor costo. Mayor efectividad que la inoculación en olla.	Menor tiempo de vaciado. Mayor certidumbre en la medición del contenido de silicio al obtener la muestra del chorro.	Más alta efectividad en la inoculación. Requiere menor cantidad de perlitizantes.
<b>Desventajas</b>	Mayor tiempo de vaciado. Aplicación no homogénea del inoculante en chorro. Variación en la medición del contenido de silicio al obtener la muestra en chorro.	Más baja efectividad de la inoculación. Más alto costo relacionado con una mayor cantidad de inoculante requerido.	Más costoso que la inoculación normal (en chorro y en olla). No se puede obtener mediante pastilla el químico final en pieza.

## 2. Análisis EDX (Energy dispersive X-ray).

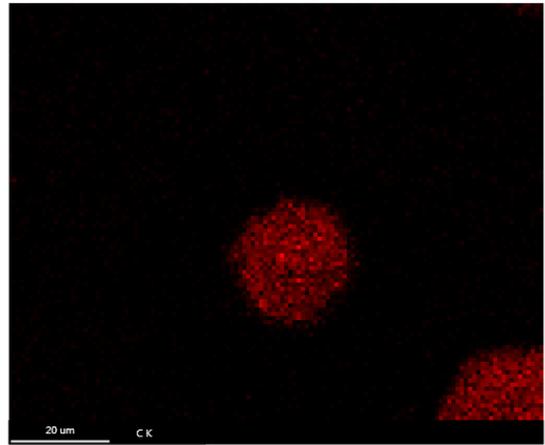


Ceq 4.75, espesor de sección de 40 mm

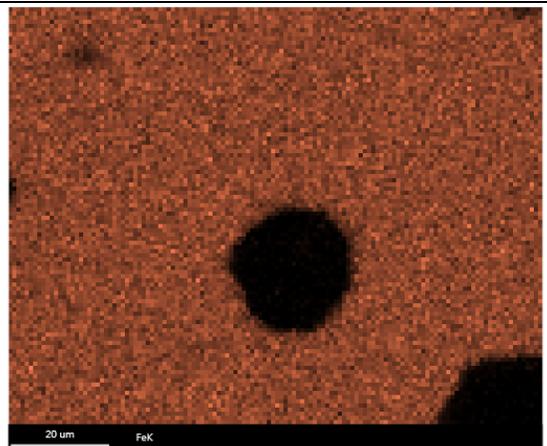
Imagen MEB. 2500X.



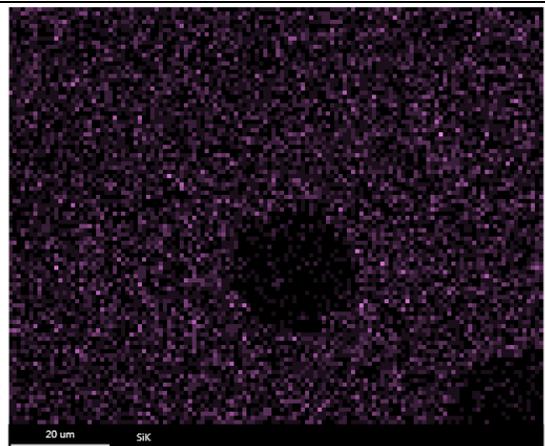
Barrido de Carbono, C



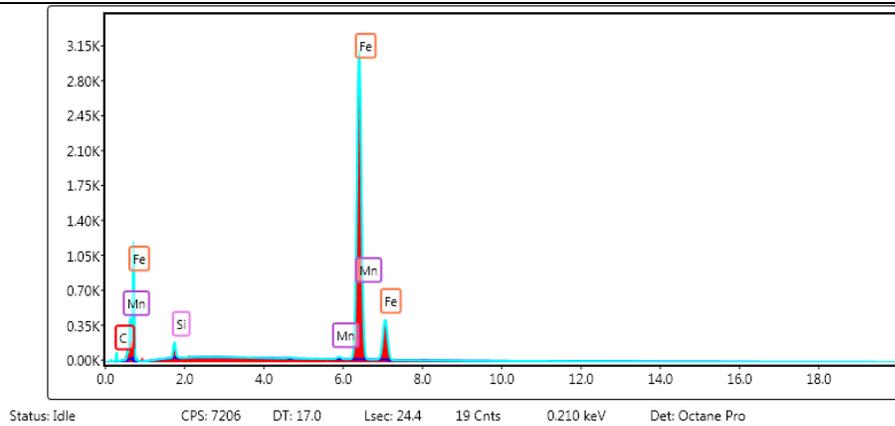
Barrido de hierro, Fe



Barrido de silicio, Si

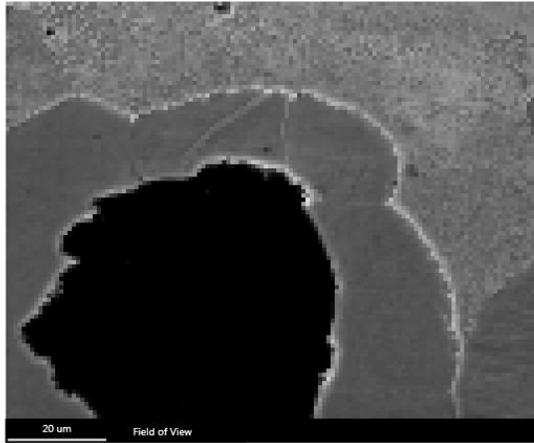


Espectro

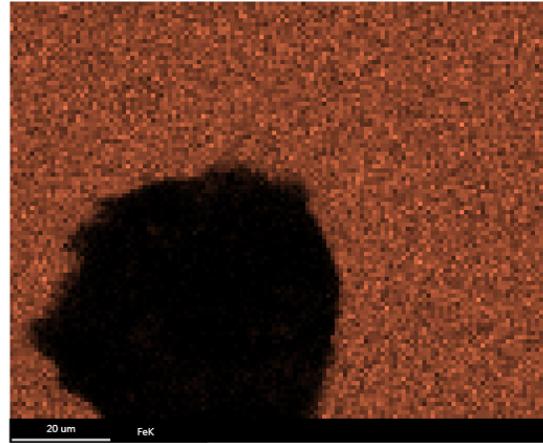


Inoculación en el molde (Sección de 53 mm)

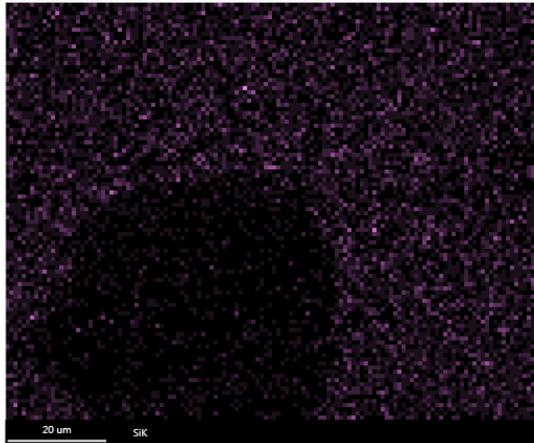
Imagen MEB. 2500X.



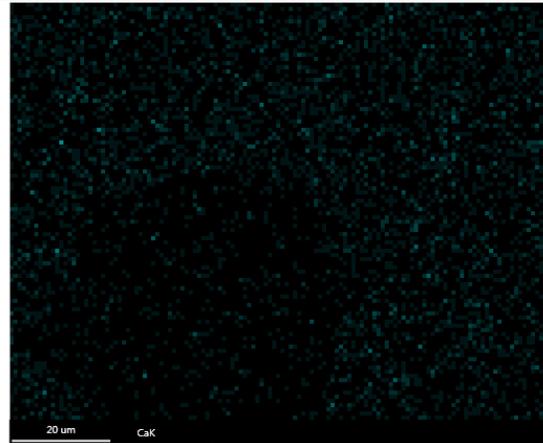
Barrido de Hierro, Fe



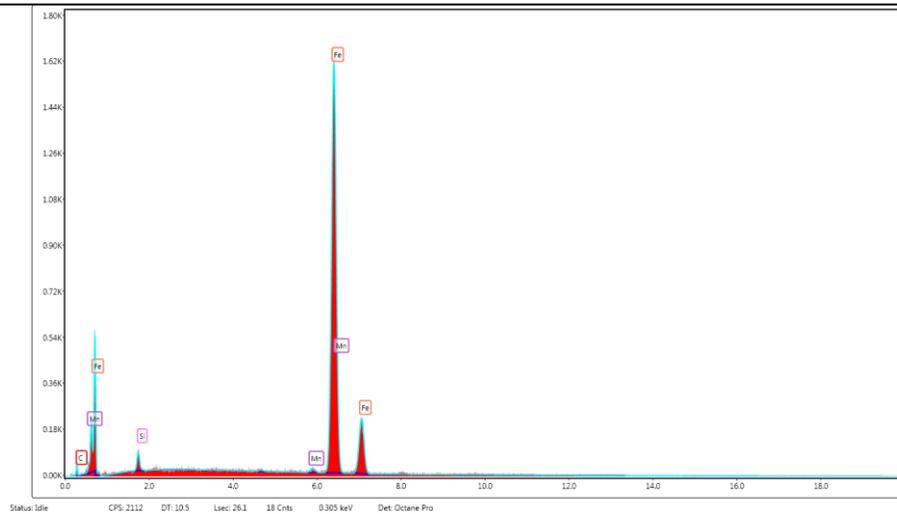
Barrido de Silicio, Si



Barrido de Calcio, Ca.

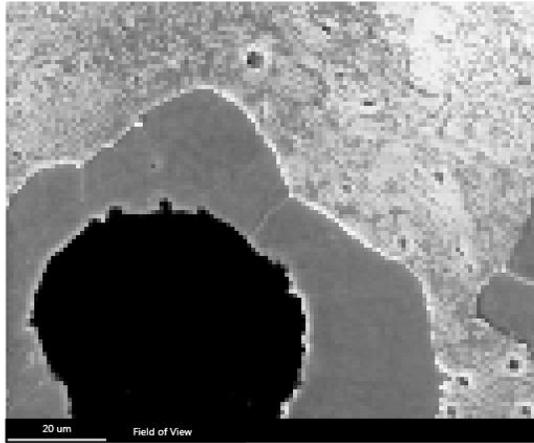


Espectro

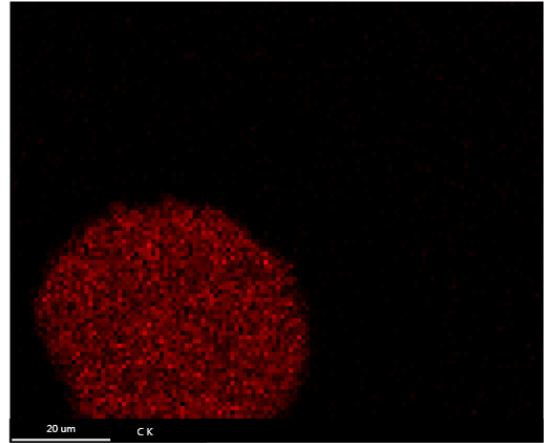


Inoculación en chorro, espesor de sección de 53 mm.

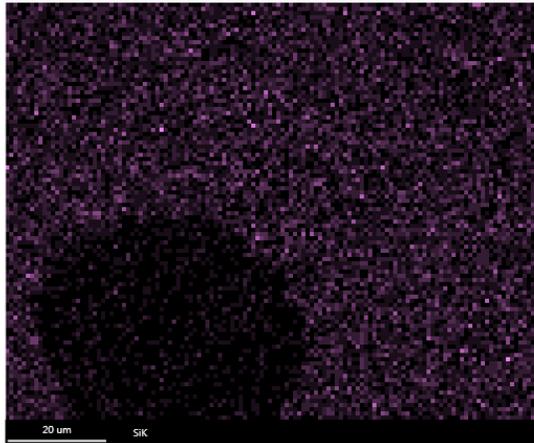
Imagen MEB. 2500X.



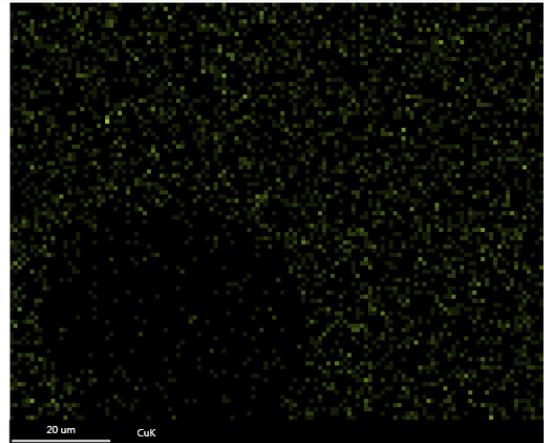
Barrido de carbono, C



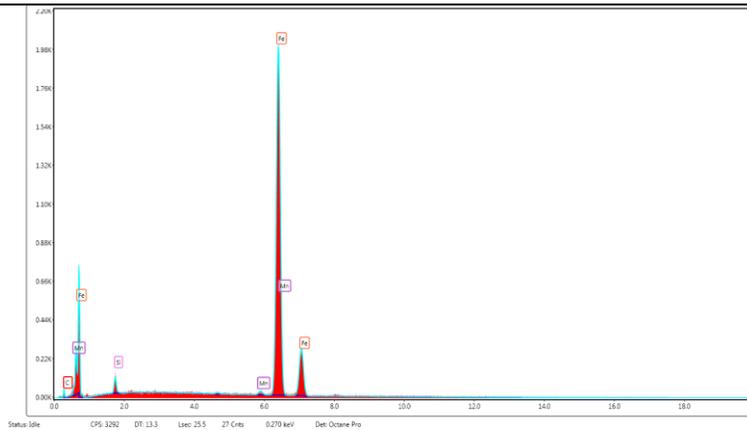
Barrido de silicio, Si



Barrido de cobre, Cu



Espectro

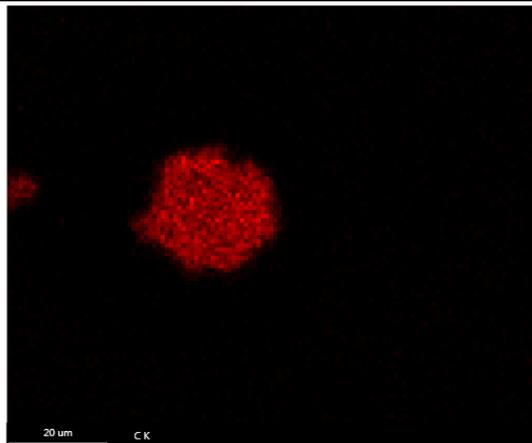


Tiempo de enfriamiento de 8 horas, Ceq 4.6 espesor de sección de 53 mm.

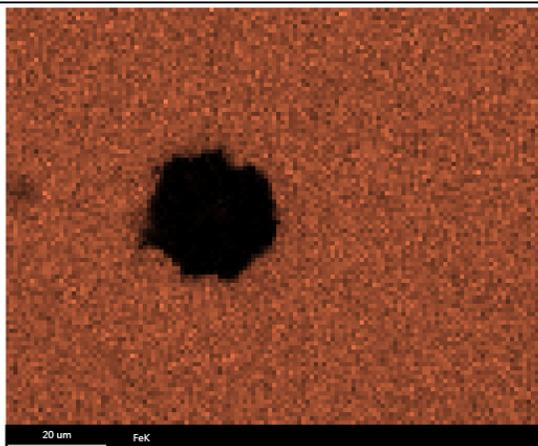
Imagen MEB. 2500X.



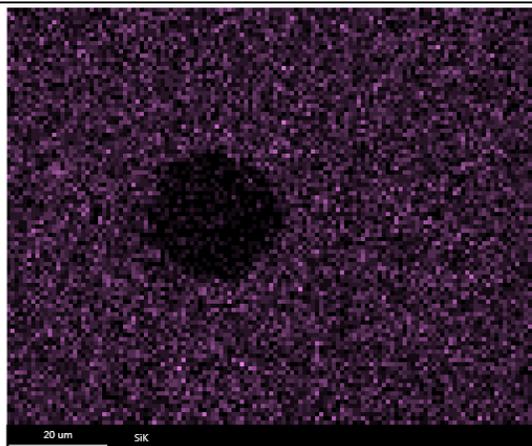
Barrido de carbono, C



Barrido de hierro, Fe



Barrido de silicio, Si



Espectro

