



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**EMPLEO DE MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA
PRODUCIR HIERROS GRISES ALEADOS CON CR Y MO Y
SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y
MICROESTRUCTURALES OBTENIDAS.**

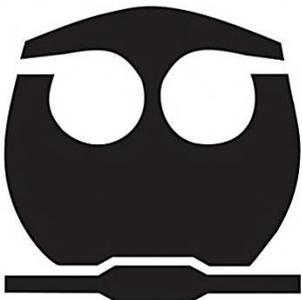
TESIS MANCOMUNADA

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

P R E S E N T A N:

OMAR ABRAHAM ALCÁNTARA ROMERO

ERGIR SÁNCHEZ ANTONIO



MEXICO, D.F.

2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M. en M. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO.

VOCAL: Dr. CARLOS GONZÁLEZ RIVERA.

SECRETARIO: M. en M. ARTURO ALEJANDRO SÁNCHEZ SANTIAGO

1er. SUPLENTE: M. en I. AGUSTÍN GERARDO RUÍZ TAMAYO

2° SUPLENTE: M. en I. ADRÍAN MANUEL AMARO VILLEDA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA, EN LA NAVE DEL EDIFICIO D, EN EL ÁREA DE FUNDICIÓN, CIUDAD UNIVERSITARIA.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Carlos González Rivera.

Firma

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. en I. Adrián Manuel Amaro Villeda.

Firma

SUSTENTANTES:

Omar Abraham Alcántara Romero.

Firma

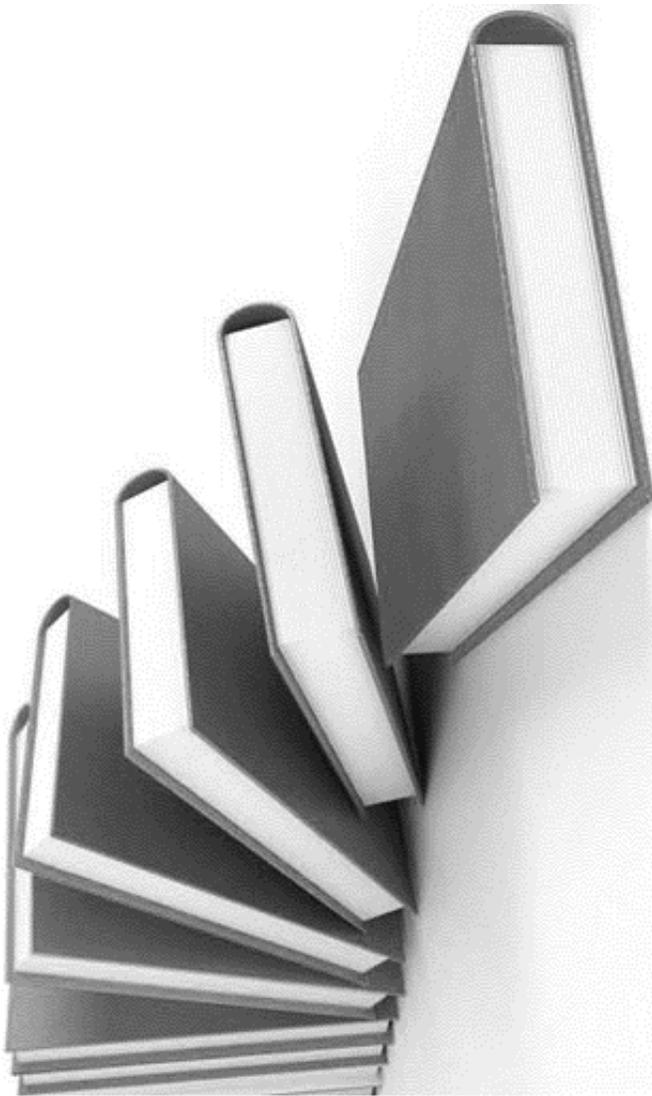
Ergir Sánchez Antonio.

Firma

Índice.

1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Producción De Hierro Gris En La Industria.	2
1.2 Clasificación De Hierros Grises.	6
1.3 Principales Propiedades De Los Hierros Grises.	8
1.4 Ventajas En La Utilización De Los Hierros Grises.....	8
1.5 Aplicación De Los Hierros Grises.	9
1.6. Influencia De Un Tercer Elemento Sobre La Temperatura De Equilibrio.	10
1.7 Efecto De Los Elementos Aleantes En La Microestructura De Hierros Grises.	12
1.7.1 Elementos Mayoritarios.	13
1.7.2 Elementos Minoritarios.	19
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	23
2.1 Hipótesis.	23
2.2 Objetivo.....	23
3. EXPERIMENTACIÓN.	24
3.1 Metodología.	24
3.2 Desarrollo Experimental.	24
3.2.1 Balance de Carga.....	24
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36
4.1 Composición Química.	36
4.2 Análisis Microestructural.	40
4.3 Análisis de Partículas.	48
4.4 Propiedades Mecánicas.....	51
5. CONCLUSIONES.....	58
BIBLIOGRAFÍA.	61

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.



1. Introducción.

1.1 Clasificación De Hierros Grises.

Principales Propiedades De Los Hierros Grises

1.2 Ventajas En La Utilización De Los Hierros Grises.

1.3 Aplicación De Las Hierros Grises.

Influencia De Un Tercer Elemento Sobre La Temperatura De Equilibrio.

1.4 Ventajas En La Utilización De Los Hierros Grises

1.5 Aplicación De Los Hierros Grises

1.6 Influencia De Un Tercer Elemento Sobre La Temperatura De Equilibrio.

1.7 Efecto De Los Elementos Aleantes En La Microestructura De Hierros Grises.

1.7.1 Elementos Mayoritarios

1.7.2 Elementos Minoritarios

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Producción De Hierro Gris En La Industria¹.

En un año la producción de los hierros colados en el mercado es tres veces mayor que el resto de las producciones de materiales ferrosos y no ferrosos juntos. Los hierros son superados solamente por la fabricación de acero laminado en el último siglo. Los hierros colados, así como los aceros, son básicamente aleaciones de hierro y carbono; por eso es usado el diagrama de dichos elementos poder predecir el tipo de matriz que se obtendrá (con ayuda del carbono equivalente, el cual será explicado posteriormente) después de la solidificación y enfriamiento del metal². En la figura 1.1, se presentan los diagramas metaestable Fe-Fe₃C (hierro-cementita) y el diagrama estable Fe-Cg (hierro - carbono grafito), en los cuales se puede observar gráficamente, en el eje de las abscisas, el contenido de carbono en % en peso, y en el eje de las ordenadas las temperaturas que marcan las transformaciones del Fe desde estado líquido a temperatura ambiente. Se sabe que un hierro colado tiene como mínimo un contenido de 2% carbono y una composición de transformación eutéctica de 4.3%C. Los hierros que contengan un carbono equivalente menor a 4.3%C son llamados hipoeutécticos y los que posean una cantidad mayor son llamados hipereutécticos.

El carbono equivalente se obtiene a partir del contenido de elementos aleantes que contiene el hierro gris. Debido a que cada aleante altera este valor de manera diferente, se han desarrollado una gran cantidad de expresiones matemáticas para el cálculo de este importante parámetro. La ecuación más comúnmente empleada en la industria es la siguiente:

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

¹ Callister, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, pp. 126

² F. Díaz, *Hierros Fundidos*, pp. 1-6

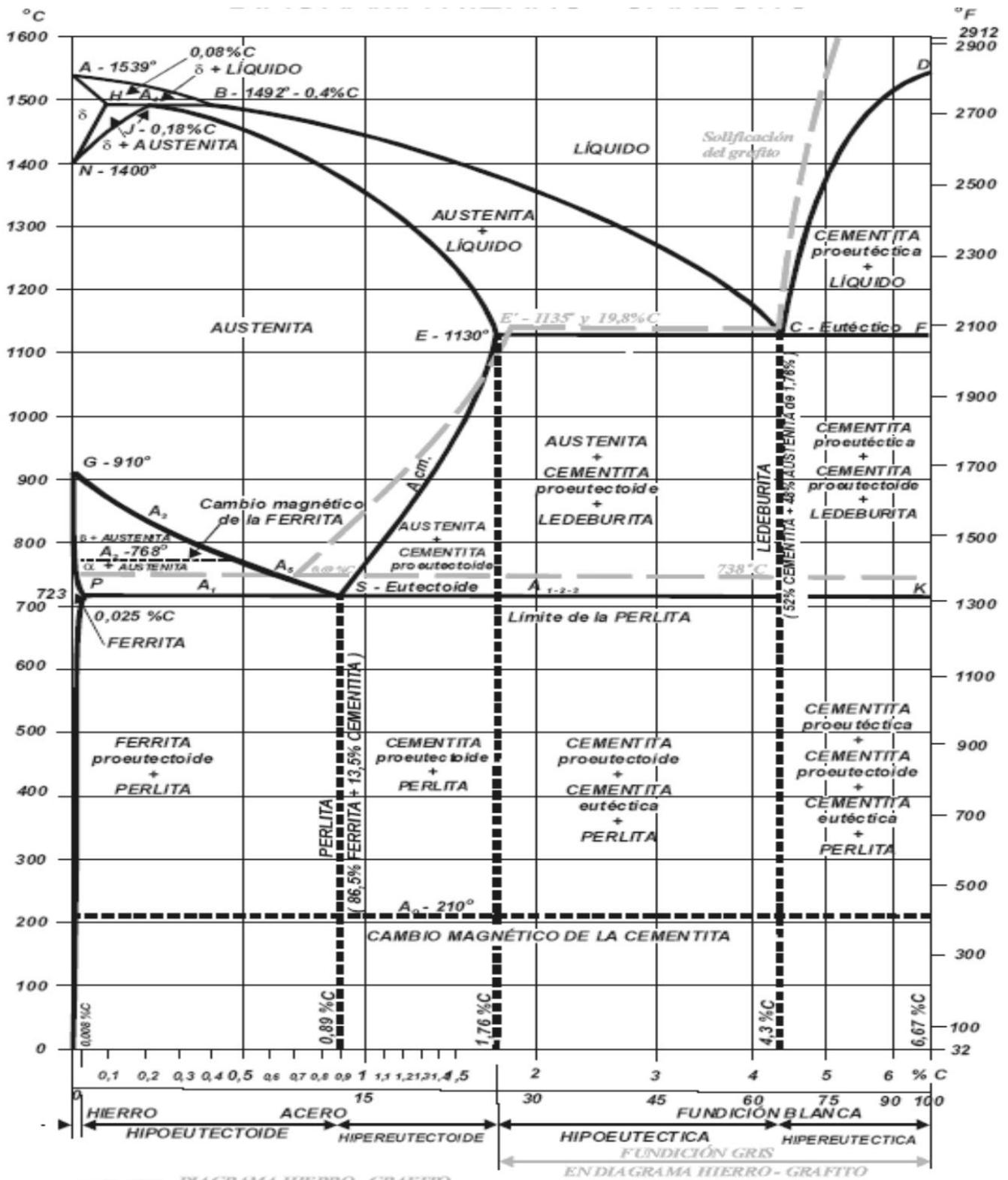


Figura 1.1 Diagrama Fe-Cg (estable, línea punteada) y Fe-Fe₃C (metaestable, línea continua), usados en la producción de hierros colados.

La línea de líquidus — que se ubica en la parte superior del dominio de estabilidad de la mezcla de fases γ + líquido — nos indica cual es la temperatura apropiada para fundir y obtener el metal líquido. En la figura 1.1, para los contenidos de carbono de interés, se puede ver que la temperatura a la cual ya se encuentra líquido el metal se ubica entre 1200°C-1300°C, aunque es recomendable darle un sobrecalentamiento de hasta 150°C en el caso de fabricar piezas con secciones delgadas, puesto que a la hora de vaciar el metal se tienen pérdidas de calor y el metal líquido se puede solidificar antes de llenar los moldes.

Hay dos tipos de elementos aleantes que son utilizados en la producción de hierros colados: los elementos grafitizantes, que son aquellos que promueven la presencia de carbono grafito libre en la matriz del hierro colado, y los elementos promotores de carburos, que favorecen la presencia de carbono combinado químicamente formando carburos. Los grafitizantes promueven la solidificación del metal líquido de acuerdo al diagrama estable Fe-C_g, y los promotores de carburos promueven dicha solidificación de acuerdo al diagrama metaestable (Fe- Fe₃C).

Los hierros fundidos contienen más carbono que el necesario para saturar la austenita a la temperatura eutéctica, por lo tanto contienen entre 2 y 6.7 % de carbono. Además, contienen silicio del 2 al 4%, manganeso hasta 1%, bajo azufre y bajo fósforo (<0.2%). Los hornos más usados para la fusión de los hierros son el horno de cubilote y el horno de inducción mostrados en la figura 1.2.

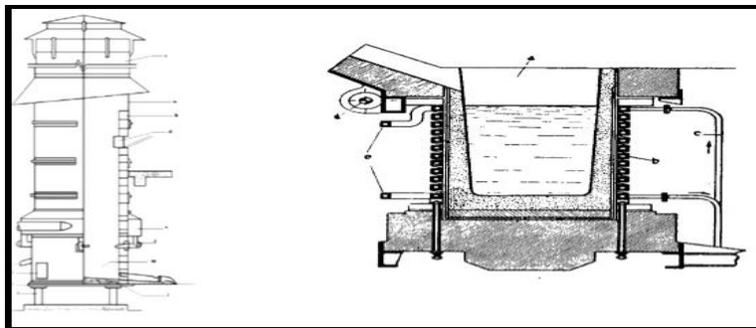


Figura 1.2. Horno de cubilote para la producción de Hierros Colados (izquierda) y Horno de inducción sin núcleo para producción de Hierros Colados (derecha).

Actualmente, el horno de cubilote es poco usado por las industrias debido a que es muy contaminante, aunque se buscan mejoras para reducir el impacto ambiental de estos hornos ya que ofrecen una alta productividad en comparación con otros hornos como el de inducción; éstos últimos son los más usados en la actualidad, ya que tienen las ventajas de obtener con mayor velocidad el metal fundido y no liberan tantos gases contaminantes para el medio ambiente.

Tabla 1.1. Composición de elementos principales de un hierro colado, de los diferentes tipos de Hierro (porcentajes en peso)³.

Tipo de Hierro	Carbono	Silicio	Manganeso	Azufre	Fosforo
<i>Gris</i>	<i>2.5-4.0</i>	<i>1.0-3.0</i>	<i>0.2-1.0</i>	<i>0.02-0.25</i>	<i>0.02-1.0</i>
<i>Dúctil</i>	3.0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
<i>Grafito Compacto o Vermicular</i>	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1

Como se aprecia en la tabla 1.1 los hierros colados se clasifican en cuatro tipos principalmente; además se encuentran las composiciones químicas de los elementos principales para formar un hierro colado: carbono, silicio, manganeso, azufre y fósforo; de estos cuatro hierros el de interés para este proyecto es el gris, cuya composición química típica está resaltada en la tabla 1.1. A los hierros mostrados en la tabla anterior se les pueden aplicar diversos tratamientos térmicos, para mejorar una o varias de sus propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas de los hierros grises son variables y están en función directa de sus características microestructurales. Por lo general poseen una resistencia a la compresión de dos a tres veces mayor que su resistencia a la tensión, siendo su ductilidad casi nula⁴, por lo cual no puede laminarse, estirarse o trabajarse en frío o en caliente, además son poco soldables, relativamente duros y resistentes a la corrosión y al desgaste. En general son empleados en piezas de diferente tamaño y forma compleja. Como la fundición de piezas es el único

³ Walton F. Charles, *Gray and Ductile Iron Castings Handbook*, pp: 94

⁴ Angus, *Cast Iron: Physical and Engineering Properties*, pp. 73-76.

proceso aplicable a estas aleaciones se conocen también como hierros fundidos o hierros colados.

Muchas de las clases de hierro gris tienen mayor resistencia al corte torsional que algunos tipos de acero. Estas características junto con una baja sensibilidad a la presencia de muescas — concentradores de esfuerzo — hacen del hierro gris un material adecuado para diversos tipos de flechas, ejes y discos de frenos empleados en la industria automotriz.

Tabla 1.2. Contenido estructural de los Hierros Colados.

a) Hierro fundido blanco. El carbono se encuentra en un alto porcentaje, formando una red de Fe_3C	+ tipo de matriz (ferrita, perlita, martensita, etc)
b) Hierro fundido gris. El carbono se encuentra libre en la matriz, en forma de hojuelas de grafito.	
c) Hierro dúctil o nodular. El carbono se encuentra libre en forma de nódulos o esferas.	
d) Hierro maleable. El grafito se encuentra en forma de terrones o nódulos informes (carbono recocido).	

La tabla 1.2 nos indica la morfología del carbono precipitado y el tipo matriz de los hierros colados más comúnmente empleados en la industria. Las diferentes características del hierro gris pueden ser obtenidas a partir de una buena inoculación, tratamiento del metal líquido y composición química (por ejemplo, cantidad de C, Si, Mg, Mn y Cr). Las matrices perlítica o ferrítica se puede predecir mediante el cálculo del carbono equivalente y el uso de la figura 1.1.

1.2 Clasificación De Hierros Grises.

Los hierros grises se pueden clasificar de varias formas, pero una de las más usuales es la clasificación por la estructura de la matriz:

a) Hierro gris perlítico: Su estructura está formada de perlita con inclusiones de grafito, las cuales se observan con forma de hojuelas. La perlita contiene un 0.8% de C, por consiguiente esta cantidad de carbono se encuentra en el hierro gris perlítico de forma combinada, es decir, en forma de cementita. La cantidad restante se encuentra en estado libre (en forma de grafito precipitado, figura 1.3a).

b) Hierro gris matriz ferrítica-perlítica: La estructura de este hierro está formada por ferrita, perlita y hojuelas de grafito. En este hierro la cantidad de carbono combinado indicara si la matriz del material es predominantemente perlítico o ferrítico (figura 1.3b).

c) Hierro gris matriz ferrítica: En este hierro la matriz se compone principalmente de ferrita y todo el carbono que hay en la aleación se encuentra precipitado en forma de grafito (figura 1.3c).

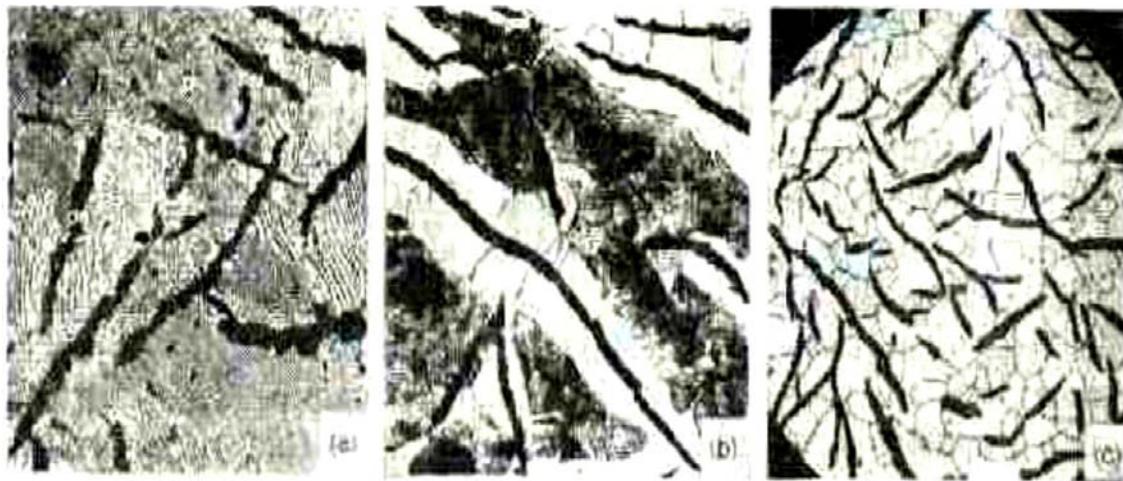


Figura 1.3. a) Hierro gris matriz perlítica; b) Hierro gris matriz ferrítica - perlítica; c) Hierro gris matriz ferrítica, imágenes tomadas a 200 X.⁵

En la figura 1.3 se muestran los diferentes tipos de matrices que se pueden presentar en los hierros grises. Las cantidades de perlita y ferrita se deben a la cantidad de carbono y silicio que contiene la aleación, aunque también influyen los elementos aleantes que se agregan durante la fusión, como se explica más adelante en la Sección 1.7.

⁵ Apraiz Barreiro, *Fundiciones*, pp:4

1.3 Principales Propiedades De Los Hierros Grises⁶.

- **Aspecto:** La superficie fracturada de la fundición es de color gris.
- **Peso específico:** 7 — 7.2 Kg/m³.
- **Temperatura de fusión:** Varía en función de la composición.
- **Contracción:** En los hierros grises durante el proceso de solidificación se precipita carbono grafito libre en la matriz del material, lo cual disminuye la densidad del hierro gris en comparación con el hierro blanco. Además esto produce una compensación de la contracción producida por la solidificación del metal líquido y por lo tanto, la contracción es muy baja. Otros factores que pueden afectar la contracción al momento de solidificar son tamaño de la pieza y la forma del molde.
- **Resistencia a la tracción:** El hierro gris tiene una carga de rotura a la tracción de cerca de 15 Kg/mm² hasta los 45 Kg/ mm². La resistencia a la compresión es mayor, por lo tanto es aconsejable someter las piezas de hierro a estos tipos de esfuerzos.
- **Resistencia al impacto:** Los hierros grises no poseen una buena resistencia al impacto, por lo que son caracterizados como materiales frágiles en los que casi no se presentan deformaciones plásticas al momento de ser sometidos a esfuerzos.
- **Dureza:** El hierro gris tiene una dureza de 140 a 250 Brinell.
- **Maquinabilidad:** Se puede maquinar fácilmente, porque la viruta se desprende mejor y la presencia de carbono grafito libre actúa como un lubricante al ser sometido a esfuerzos de desgaste y corte de la herramienta.

1.4 Ventajas En La Utilización De Los Hierros Grises.

El empleo de los hierros grises con respecto a otras aleaciones posee las siguientes ventajas: las piezas elaboradas de este material son generalmente más

⁶ Castro, *Fundiciones*, pp. 6-12.

baratas que las de acero — por lo que es el material que más se utiliza en los talleres y fábricas de maquinaria, motores, instalaciones y otros —, además su fabricación requiere de temperaturas de fusión, trabajo y tratamiento más bajas que aquellas correspondientes al acero, por lo que se reduce la cantidad de energía necesaria para producir piezas de este material y tampoco requiere de refractarios más costosos y resistentes a altas temperaturas.

Con los hierros grises se pueden fabricar con relativa facilidad piezas de grandes dimensiones, aunque también se pueden obtener piezas pequeñas, de formas complicadas y con una buena precisión dimensional. Además en este tipo de material es menos frecuente la aparición de zonas porosas en comparación de las piezas fabricadas con acero fundido.

1.5 Aplicación De Los Hierros Grises.

La capacidad de amortiguación del hierro gris es una propiedad que no se mide muy a menudo, pero que vale la pena considerar ya que estas aleaciones tienen la cualidad de absorber la energía y por lo tanto las vibraciones. Las principales aplicaciones y usos son:

- Bases o pedestales para máquinas.
- Herramientas.
- Bastidores para maquinaria pesada
- Bloques de cilindros para motores de vehículos.
- Discos de frenos.
- Herramientas agrícolas entre otras.
- Diferentes tipos de engranes.
- Recintos para equipo eléctrico.
- Carcasas de bombas y turbinas.

1.6. Influencia De Un Tercer Elemento Sobre La Temperatura De Equilibrio.

A continuación se muestra el efecto de los principales elementos aleantes con respecto al diagrama de fases y los puntos críticos de transformación en el diagrama Fe-C, figura 1.1.

La presencia de elementos disueltos en la fase líquida y sólida del hierro cambian la temperatura de equilibrio del diagrama Fe-C; esto resulta en un incremento o decremento de las fases "α" (ferrita) y "γ" (austenita) del hierro. En esta sección se hablará acerca de la influencia de un tercer elemento sobre el intervalo eutéctico estable-metaestable ($T_{est} - T_{met}$). En general los elementos que incrementan el intervalo $T_{est} - T_{met}$ (temperatura eutéctica del equilibrio estable - la temperatura eutéctica del equilibrio metaestable), promueven la formación de grafito libre. Por otro lado aquellos que disminuyen este intervalo, promueven la formación de carburos. Basados en su influencia específica sobre el intervalo $T_{est} - T_{met}$, el tercer elemento puede ser clasificado dentro de 4 grupos:

- Fuertes grafitizantes que incrementan la $T_{estable}$ y disminuyen la $T_{metaestable}$, tales como el silicio, aluminio, níquel y cobre.
- Débiles grafitizantes que reducen el intervalo entre la $T_{estable}$ y $T_{metaestable}$, pero incrementan el intervalo $T_{estable} - T_{metaestable}$, tal como el fósforo y el arsénico.
- Fuertes estabilizantes de carburos que disminuyen $T_{estable}$ pero incrementan la $T_{metaestable}$, tales como el cromo, vanadio y manganeso.
- Débiles estabilizantes de carburos que disminuyen la $T_{estable}$ y $T_{metaestable}$, tales como el molibdeno y tungsteno.

En los diagramas Fe-Cg y Fe-Fe₃C, figura 1.1, se puede observar la composición eutéctica = 4.3%C y las temperaturas eutéctica y eutectoide = 1135 y 723°C respectivamente. Estas líneas son muy importantes para la producción de los hierros grises, ya que definen el tipo de hierro colado que se obtendrá (gris, blanco o moteado). Los elementos que son de gran importancia en nuestro proyecto son el cromo y el molibdeno, ya que como se observa en la tabla 1.3, el Cr tiene un

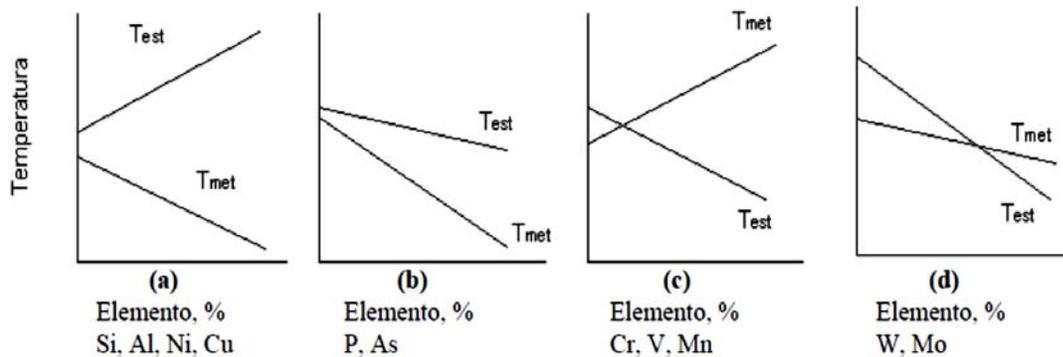
Tabla 1.3. Movimiento del eutéctico con los elementos en los hierros grises⁷.

Modificación que se produce	Si	Mn	Ni	Cr	Al	Mo
Desplazamiento del punto eutéctico.	Hacia la izquierda	Hacia la derecha	Hacia la izquierda	Hacia la izquierda		
Desplazamiento de la temperatura eutectoide.	Hacia arriba	Hacia abajo	Hacia abajo	Hacia abajo	Hacia arriba	
Templabilidad		Aumenta		Aumenta	Reduce	Aumenta
Desplazamiento del punto eutectoide.	Hacia la izquierda					

efecto muy importante sobre las líneas de transformación eutéctica, eutectoide y las temperaturas de solidificación; por el contrario el Mo no modifica estos puntos importantes de los diagramas, sin embargo tiene un efecto sobre la respuesta a los tratamientos térmicos del material (templabilidad) y la microestructura.

En la figura 1.4 se muestra gráficamente el efecto de los elementos aleantes en el diagrama de fases hierro-carbono, se puede apreciar el efecto de los elementos grafitizantes — como el Si, Al, Ni y Cu — y formadores de carburos — Cr, V y Mo — en las aleaciones de hierro colado sobre las temperaturas de solidificación, tanto del diagrama estable como metaestable.

Figura 1.4. Influencia sobre la temperatura del eutéctico estable y metaestable. a) Fuerte grafitizante; b) Débil grafitizante; c) Fuerte estabilizante del carburo; d) Débil estabilizante del carburo.⁸



⁷ Castro, *Fundiciones*, pp. 15.

⁸ De la Cruz Quiroz, "Metalurgia físico-química y caracterización de las fundiciones de grafito laminar", pp.58.

1.7 Efecto De Los Elementos Aleantes En La Microestructura De Hierros Grises.

Generalmente, los elementos aleantes en los hierros grises están divididos en dos categorías, la primera incluye a los elementos mayoritarios y en la segunda los elementos minoritarios o a nivel de trazas.

La mayoría de hierros grises son aleaciones hipoeutécticas que contienen entre 2.5 y 4% de carbono. El proceso de grafitización se realiza con mayor facilidad si el contenido de carbono y las temperaturas de trabajo son elevadas y si hay una cantidad adecuada de elementos grafitizantes presentes, especialmente el silicio. La morfología comúnmente deseada del carbono grafito libre es de hojuelas, ya que son las que proporcionan al hierro gris las mejores propiedades mecánicas.

Si la composición y la velocidad de enfriamiento son tales que la cementita eutectoide se descompone en ferrita y grafito, presentará entonces una estructura totalmente ferrítica. Por el contrario, si se impide la grafitización de la cementita eutectoide, la matriz será totalmente perlítica. El hierro gris se conforma por una mezcla de grafito, ferrita y perlita en diferentes proporciones, las cuales se modificarán en función del tipo de aplicación de la pieza. El carbono libre es la fase más blanda presente en la matriz. La resistencia a la tracción y la dureza aumentan con la cantidad de carburos presentes. Algunos otros elementos de aleación también incrementan la dureza de la matriz, como se ve en la figura 1.5, alcanzando su valor máximo en hierro gris perlítico.

En la figura 1.5, se observa de qué manera afectan los elementos aleantes a las propiedades mecánicas de las piezas. Los elementos a evaluar en este proyecto — Cr y Mo — tienden a aumentar la dureza y resistencia de la aleación, pero se debe tener en cuenta que no se pueden agregar cantidades excesivas ya que se pueden ocasionar fallas en las piezas debido a la presencia de fases frágiles en la matriz (carburos del tipo ledeburíticos y aleados).

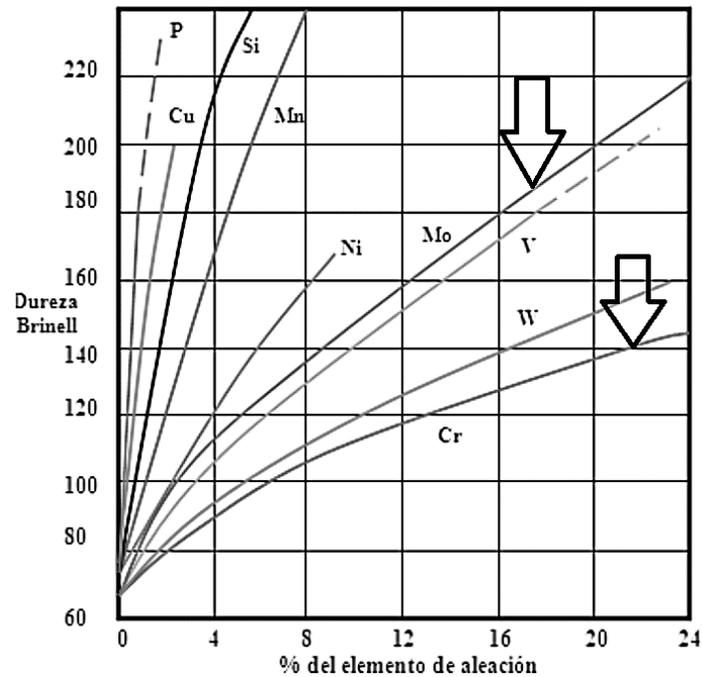


Figura 1.5. Aumento de dureza Brinell conforme al incremento de elementos aleantes.

1.7.1 Elementos Mayoritarios⁹.

- *Carbono.*

Principal aleante de hierros y aceros. Es prácticamente insoluble en el Fe α (ferrita) a temperatura ambiente, aunque su solubilidad se incrementa marcadamente en Fe γ (austenita). Durante la solidificación de fundiciones ferrosas, el grafito puede formar diferentes estructuras en combinación con el Fe; lo cual brinda una gran diversidad en cuanto a propiedades mecánicas y microestructurales. Las propiedades físicas y en particular las mecánicas varían dentro de amplios intervalos respondiendo a factores como la composición química, rapidez de enfriamiento durante la solidificación, tamaño y espesor de las piezas, tratamiento térmico y parámetros microestructurales como la naturaleza de la matriz, la forma y tamaño de las hojuelas de grafito.

El tipo y tamaño de hojuela se determina de manera tradicional por simple comparación contra el patrón ASTM (American Society for Testing and Materials), norma A247, figura 1.6. Esta caracterización se debe realizar a 100 X.

⁹ American Society for Metals, Metals Handbook, Vol. 15, *Castings*, pp: 1366-1367

- ❖ Grafito tipo A: Suele ser el más común. Aparece en el centro de las piezas de cierto espesor fabricadas de hierros grises con composición química próxima a la eutéctica. El hierro con este tipo de grafito es empleado para la fabricación de piezas para maquinaria.

- ❖ Grafito tipo B: Es el resultado de aleaciones enfriadas rápidamente. Aparece comúnmente en piezas de secciones delgadas y en algunas ocasiones su presencia se debe a una inoculación inapropiada.

- ❖ Grafito tipo C: Cuando un hierro gris tiene composición hipereutéctica, la solidificación comienza con la formación de grafito primario en el intervalo entre la temperatura del líquido y la temperatura eutéctica. Este grafito se forma libremente en el interior del líquido, lo cual favorece el crecimiento de láminas alargadas cuyo espesor supera al que presentará el grafito eutéctico.

- ❖ Grafito tipo D: Ocurre en hierros con alto contenido de silicio que son rápidamente enfriados y carecen de inoculación o ésta es deficiente, lo que produce la formación de una matriz ferrítica con presencia de dendritas desorientadas.

- ❖ Grafito tipo E: Se suele presentar cuando el hierro es hipoeutéctico, es decir cuando tiene bajo contenido en carbono. Este hierro requerirá más silicio para evitar el blanqueo o aparición de ledeburita transformada. La formación de este tipo de grafito también se favorece cuando la temperatura de colada decae muy rápidamente o cuando se presentan subenfriamientos muy grandes. La morfología que se presenta son dendritas más finas que el tipo D y orientadas. Las propiedades mecánicas que posee este material son las más bajas de todos los tipos anteriores de hojuela, por lo que es la estructura menos deseada industrialmente.

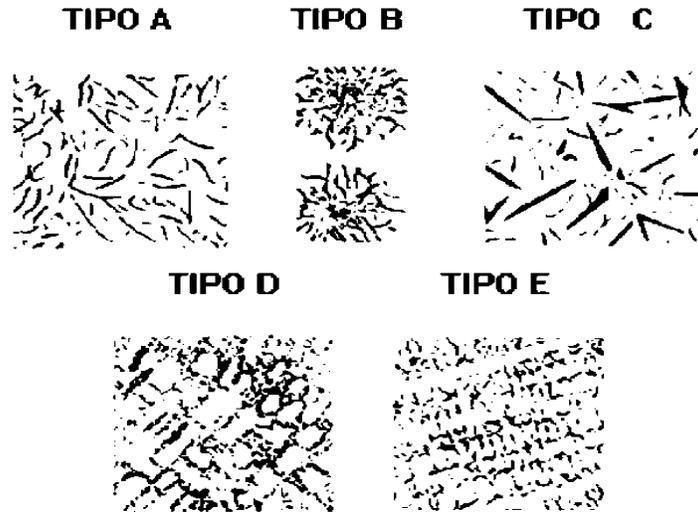


Figura 1.6.Tipos de hojuela en Hierros Grises clasificados por la norma ASTM A247.

- *Silicio.*

Se considera un agente grafitizador y promueve la formación de una estructura ferrítica, además disminuye el tamaño de las celdas eutécticas, con lo que se obtiene una disminución en la formación de carburos, la cual dependerá del tiempo de incorporación en el metal líquido y de una efectiva inoculación. Además produce un marcado efecto en la posición de las líneas del diagrama hierro – carbono, figura 1.1, donde se produce un desplazamiento del punto eutéctico, de tal manera que dicha composición se mueve a la izquierda 0.30% por cada 1% de silicio, aproximadamente.

- *Fósforo.*

Se encuentra en todos los hierros grises. Es raramente agregado intencionalmente, pero viene en conjunto con el arrabio, el cual proviene del mineral de hierro, en cantidades que varían entre 0.10 y 0.90%. Su principal función es la de aumentar la fluidez del hierro. El fósforo forma un fosfato eutéctico ternario con la cementita y la austenita de bajo punto de fusión que es comúnmente conocido como esteadita; el cual facilita la grafitización aumentando el tiempo crítico de acción del silicio. En altos niveles, produce porosidad por rechupes, además de formación redes de esteadita, las cuales comprometen seriamente las propiedades mecánicas, mientras que en bajos niveles incrementa

la penetración del metal en el molde¹⁰. La mayoría de los hierros se producen con 0.02 a 0.2% P. La cantidad de esteadita presente en la matriz, debido a sus propiedades mecánicas, debe ser controlada.

- *Azufre.*

Una gran cantidad de investigadores han mostrado que el azufre juega un papel significativo en la nucleación de grafito en los hierros grises. Aunque el azufre no participa en la formación de carburos, estabiliza químicamente la cementita. Además, el azufre tiende a reaccionar con el hierro para formar FeS, el cual es un compuesto de bajo punto de fusión que se presenta en delgadas capas interdendríticas y aumenta la posibilidad de que haya fisuras a altas temperaturas. En grandes cantidades tiende a reducir la fluidez y suele causar cavidades (aire atrapado) en las piezas. Es importante que el contenido de azufre sea balanceado con manganeso para promover la formación de sulfuros de manganeso.

Los hierros colados aleados son aquellos que contienen Ni, Cr, Mo, Cu, etc, en porcentaje suficiente para mejorar las propiedades mecánicas de los hierros o para conferirles alguna otra propiedad especial, como alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la corrosión, a las altas temperaturas, etc.

Los elementos de aleación modifican también, como en los aceros, la ubicación de los puntos críticos y además ejercen una acción muy importante y compleja de la grafitización. De los elementos antes mencionados, el cromo y el molibdeno tienen especial interés en este trabajo debido a las modificaciones microestructurales que provocan en la matriz de los hierros grises.

- *Cromo.*

El cromo estabiliza la cementita y evita la grafitización. En un análisis térmico este efecto se asocia con la disminución de la temperatura de transformación de grafito eutéctico y con el incremento de la temperatura eutéctica de formación de

¹⁰ Park and Shin, *Microstructure and wear properties of all alloy phosphoric gray cast irons*, pp.63-70.

carburos, por lo que el Cr es clasificado como un elemento blanqueador¹¹. También reduce ligeramente el tamaño de las láminas de grafito, afina y aumenta la dureza de la matriz. Las adiciones pequeñas (0.5 a 0.75%) del cromo causan aumentos significativos en la resistencia del hierro gris. Se fabrican hierros con 12 a 30% de cromo los cuales cuentan con una gran resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas. Forma carburos de cromo que son muy estables a altas temperaturas.

El Cromo incrementa el carbono combinado formando carburos complejos más estables. Tiende a aumentar la resistencia y la dureza, reduciendo la maquinabilidad, pero sobre todo la estructura resultante resiste mejor el calor y el desgaste. Los porcentajes de aleación van desde 1% hasta 35%, lográndose un amplio espectro de estructuras. La influencia que ejercen diversos contenidos de cromo, así como las microestructuras y características que se obtienen en cada caso, se describen a continuación:

El cromo en porcentajes de 0.10 a 0.20% afina la perlita y el grafito de los hierros ferrítico - perlíticos. La aparición de carburos de gran dureza se produce a partir del 1% de cromo, que además son muy estables a altas temperaturas.

Para porcentajes de 0.3-0.4 %Cr, el efecto blanqueador de este elemento puede ser contrarrestado añadiendo Cu o Sn, siendo el Cu el que presenta mejores cualidades grafitizantes, sin embargo, el Sn incrementa la dureza en mayor proporción que el Cu al mantener la cantidad de Cr constante.¹²

A diferencia del molibdeno, un incremento en la cantidad de Cr no afecta la resistencia al choque térmico, aunque si suele afectar la cantidad de grafito libre, principalmente en presencia de Mo y Ni. Esto afecta principalmente a la

¹¹ T. Kanno, T. Kikuchi, I.Kang (2005), *Effect of Alloying Elements on the Eutectic Temperatures in Cast Irons*.

¹² I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan, L. Riposan (2000), *Evaluation of Tin-Copper-Chromium Relationship in Gray Cast Irons*.

conductividad térmica de la aleación, de tal manera que a menores contenidos de grafito libre se reduce la conductividad térmica.¹³

- Molibdeno.

Es principalmente un estabilizador de carburos y en hierros grises promueve la formación de perlita. Porcentajes de molibdeno inferiores a 0.8 % tienen una acción más débil, y contenidos más elevados tienen una acción más intensa en la formación de carburos.

El general, mejora las propiedades mecánicas. En cantidades de 0.25 a 1.25%, el molibdeno retarda la transformación de la austenita, incrementando así la templabilidad (ya que descompone preferentemente a los carburos durante la transformación de fase a austenita)¹⁴ y reduce la presencia de fisuras y deformación.

En secciones pesadas define el tipo de matriz que se obtiene en el hierro; en la Tabla 1.4, se muestra el efecto de la cantidad de molibdeno en la formación de la matriz perlítica, así como el tamaño y tipo de hojuela de grafito obtenido. W. Xua y M. Ferry¹⁵ analizaron los efectos microestructurales de diferentes cantidades de molibdeno, donde se concluyó que porcentajes mayores a 0.62% de éste elemento genera matrices ausferríticas sin alterar la morfología del grafito.

Para porcentajes mayores de 0.95%, el Mo empieza a promover la formación de carburos aleados. Además, la resistencia al choque térmico de los hierros grises se eleva cuando el contenido de molibdeno se incrementa de 0.2% - 0.8%.¹⁶

¹³ M. Moonesan, A. Honarbakhsh Raouf, F. Madah, A. Habibollah Zadeh (2012), *Effect of alloying elements on thermal shock resistance of gray cast iron.*

¹⁴ S.V. Subramanian, A.J. Genualdi (1996), *Optimization of Damping Capacity and Strength in Hypereutectic Gray Cast Iron.*

¹⁵ W. Xu, M. Ferry, Y. Wang, (2005), *Influence of alloying elements on as-cast microstructure and strength of gray iron.*

¹⁶ M. Moonesan, A. Honarbakhsh Raouf, F. Madah, A. Habibollah Zadeh (2012), *Effect of alloying elements on thermal shock resistance of gray cast iron.*

Tanto el Cr como el Molibdeno propician el efecto de blanqueo de los hierros grises. Los elementos que propician este efecto, ordenados de mayor a menor son los siguientes:

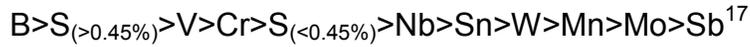


Tabla 1.4. Matriz obtenida dependiendo del contenido de Molibdeno.

Mo (%)	Microestructura de la Matriz (%)		Hojuelas de Grafito	
	Austenita	Perlita	Tipo	Porcentaje
0.11	0	100	E	7.5
0.22	0	100	E	8.2
0.31	0.8	94.5	E	7.9
0.4	3.8	80.2	E	7.5
0.51	21.1	28	E	6.8
0.62	27.8	5	E	6.5
0.73	28.7	2.3	E	6.7
0.95	31.9	0	E	6.4
1.17	31.3	0	E	6.1

1.7.2 Elementos Minoritarios¹⁸.

- *Aluminio.*

Promueve la formación de defectos llamados “picaduras”, especialmente cuando se moldea con arena en verde en niveles por encima de 0.005%. Neutraliza la acción del nitrógeno.

- *Cobre.*

El cobre es un grafitizador, pero solo la quinta parte de eficaz que el silicio, aunque el cobre tiende a romper las placas de cementita y a hacer resistente la matriz, por lo que promueve la formación de perlita. También mejora la resistencia al desgaste y al impacto, así como la resistencia a la corrosión.

¹⁷ T. Kanno, T. Kikuchi, I.Kang (2005), *Effect of Alloying Elements on the Eutectic Temperatures in Cast Irons*.

¹⁸ American Society for Metals, Metals Handbook, Vol. 15, *Castings*, pp: 1368-1370

- *Níquel.*

Es un grafitizador, aunque es tres veces menos efectivo que el silicio, además disminuye la estabilidad del carburo. Aumenta la dureza y la resistencia de la matriz y reduce el tamaño de las láminas de grafito. Evita la formación de fundición blanca en las esquinas y secciones delgadas de las piezas y mejora su maquinabilidad.

- *Titanio.*

En cantidades de 0.1 a 0.2% tiene una acción grafitizante más intensa que el silicio, aunque decae conforme su porcentaje aumenta. A nivel de trazas, promueve grafito sobre enfriado y el defecto “picadura” del hidrógeno cuando hay aluminio presente. Se combina con el nitrógeno para neutralizar sus efectos adversos.

- *Vanadio.*

Su principal efecto es la de promover carburos. Su efecto sobre la morfología del grafito es la de afinar el tamaño de hojuela.

- *Plomo.*

Favorece la formación de estructura Widmanstätten y grafito puntiagudo, especialmente en secciones pesadas con alto contenido de hidrogeno. Puede reducir la resistencia a la tensión en un 50% aun en bajos niveles (>0.0004%).

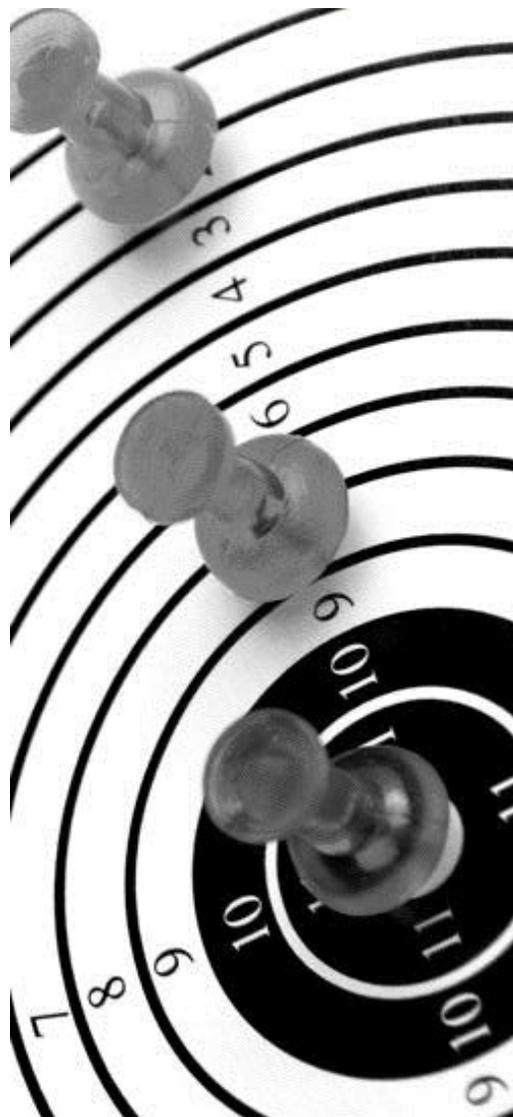
En la tabla 1.5 se muestra a manera de resumen, el efecto de los elementos aleantes y de aleación más importantes de los hierros grises aleados, destacando el efecto del Cr y Mo, los cuales son principalmente estabilizadores de carburos y promotores de matriz perlítica.

Elemento	Grafitización y coeficientes de grafitización	Efecto sobre los carburos a alta temperatura	Efecto en la estructura del grafito	Efecto en el carbono combinado de la perlita	Efecto que produce en la matriz
Carbono	Favorece	Decrece estabilidad	Engruesa	Decrece fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Silicio	Favorece +1	Decrece estabilidad	Engruesa	Decrece fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Aluminio	Favorece +0,5	Decrece estabilidad	Engruesa	Decrece fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Titanio	Favorece +0,4	Decrece estabilidad	Afina fuertemente	Decrece	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Níquel	Favorece +0,35	Decrece ligeramente estabilidad	Afina ligeramente	Decrece y estabiliza la perlita	Afina la perlita y da dureza
Cobre	Favorece +0,20	Indiferente	Indiferente	Decrece ligeramente	Da dureza
Manganeso	Se opone -0,25	Estabiliza	Afina ligeramente	Aumenta	Afina la perlita y da dureza
Molibdeno	Se opone -0,30	Indiferente	Afina fuertemente	Aumenta ligeramente	Afina la perlita y da resistencia
Cromo	Se opone -1	Estabiliza fuertemente	Afina ligeramente	Aumenta	Afina la perlita y da dureza
Vanadio	Se opone -2,5	Estabiliza fuertemente	Afina	Aumenta	Afina la perlita y da dureza

Tabla 1.5. Efecto de los elementos aleantes en hierros grises¹⁹.

¹⁹ Apraiz Barreiro, *Fundiciones*, pp: 72-73

CAPÍTULO 2: HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.



2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.

2.1. *Hipótesis.*

2.2. *Objetivo.*

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.

2.1 Hipótesis.

- a) El empleo de un nuevo método de aleación, en donde son incorporados Cr y Mo como partículas aleantes usando un dispositivo especial, permite fabricar hierros aleados con Cr y Mo de características similares a las obtenidas mediante el método convencional de manufactura en el horno, lo cual no se puede obtener mediante la adición directa — sin el dispositivo especial — de las partículas aleantes en el chorro metálico de la aleación base.

- b) La composición química, las propiedades mecánicas y la estructura de las piezas elaboradas mediante el nuevo método de aleación y el método convencional son similares entre sí, pero diferentes con respecto a lo observado en hierros producidos mediante la adición directa de partículas aleantes.

2.2 Objetivo.

Establecer si es posible o no producir hierros aleados con Cr y Mo de manera no convencional, mediante la adición directa de partículas aleantes en el chorro metálico y mediante el uso de un dispositivo especial.

CAPÍTULO 3: EXPERIMENTACIÓN.



3. EXPERIMENTACIÓN.

3.1 Metodología.

3.2 Desarrollo Experimental.

3.2.1 Balance de Carga.

3. EXPERIMENTACIÓN.

3.1 Metodología.

El objetivo se pretende alcanzar a partir de la comparación de la composición química, las propiedades mecánicas — las obtenibles a partir de un ensayo de tracción y de la determinación de dureza Brinell — y las microestructuras de un hierro colado aleado producido convencionalmente mediante fusión en horno de inducción — Método A —, con respecto al mismo hierro producido mediante adición directa de partículas aleantes de Cr y Mo en el chorro metálico durante su ingreso en la impresión en un molde, de una barra de masa conocida — Método B — y mediante el empleo de un nuevo método de aleación — Método C — usando un dispositivo especial, y explicar los resultados obtenidos proponiendo una explicación fenomenológica a lo encontrado.

De acuerdo a lo antes mencionado, se consideran tres métodos de elaboración del hierro gris aleado:

1. Aleación convencional que involucra la adición de todos los elementos químicos constitutivos de las aleaciones bajo estudio en el horno de inducción para su total fusión, previo al llenado de una olla de vaciado, de la que se obtendrán muestras sólidas, llenando con el metal líquido, moldes de arena. En la figura 3.1 se muestra el llenado de los moldes de arena empleados en los métodos A y C.

2. Se parte del hierro líquido con los contenidos requeridos de C, Si y Mn fundido en el horno de inducción, se realiza un análisis de contenidos iniciales de Cr y Mo para que mediante un balance de carga, se determine la cantidad de polvos aleantes de Fe-Mo y Fe-Cr que permitirán alcanzar los contenidos de Cr y Mo presentes en la aleación convencional de referencia y que son considerados como los requeridos, mediante adición de partículas aleantes de ferroaleaciones de estos dos metales directamente en el chorro metálico durante el vaciado del horno a un molde de Silicato/CO₂ en forma de

una barra, de masa previamente conocida, tal y como se aprecia en la figura 3.2, donde se muestra la incorporación de los polvos aleantes mediante una cuchara de hierro, directamente al chorro metálico.

3. Se parte del hierro colado líquido con los contenidos requeridos de C, Si y Mn en el horno de inducción, se realiza un análisis químico para determinar los contenidos iniciales de Cr y Mo. Posteriormente, mediante un balance de carga, se determinaron las cantidades de polvos aleantes de Fe-Mo y Fe-Cr requeridos para alear los 90 Kg de metal líquido. Con ésta información se calculará un gasto volumétrico conocido de aleación base dentro de un dispositivo de aleación rápida — que constituye el nuevo método de fabricación — por medio del cual se añadirán los elementos aleados necesarios para obtener la composición química objetivo (método C, figura 3.1).



Figura 3.1. Llenado de un molde de arena con la aleación líquida obtenida, Métodos A y C

La metodología incluye:

- i. La elaboración en el horno de inducción del hierro líquido aleado con Cr y Mo mediante el método convencional y la obtención de las respectivas muestras sólidas.



Figura 3.2. Vaciado en moldes de Silicato/CO₂. Método B.

ii. La elaboración en el horno de inducción del metal líquido base y la obtención del hierro aleado con Cr y Mo. Para ello se realizó un balance de carga y se llevó a cabo la adición directa de partículas aleantes de manera simultánea al ingreso del metal líquido de aleación base en un molde receptor elaborado mediante el método de Silicato/CO₂ para producir una barra de masa conocida.

iii. La implementación del arreglo experimental para el empleo del nuevo dispositivo de aleación para la obtención de hierros grises aleados que incluye: caracterización del gasto volumétrico promedio del dispositivo, caracterización del gasto volumétrico de un dosificador de polvos aleantes, la realización de los balances de carga y del balance de flujos másicos para establecer las condiciones de operación del dispositivo, elaboración en el horno de inducción del hierro colado líquido base y el empleo del dispositivo para incorporar las partículas aleantes de Cr y Mo para obtener la aleación objetivo.

iv. Para ello se realizará la caracterización química, mecánica y microestructural en todos los métodos antes mencionados y se compararán los resultados obtenidos.

3.2 Desarrollo Experimental.

Se procedió a elaborar un hierro aleado con la composición objetivo mostrada en la tabla 3.1, en donde la composición química requerida fue proporcionada por la empresa –Rasinni Frenos, la composición química objetivo es el resultado de promediar los límites de la composición requerida con la finalidad de realizar los balances de carga correspondientes — los cuales serán descritos posteriormente — y los rendimientos de los elementos fueron determinados experimentalmente.

Tabla 3.1. Composición química del hierro gris 14.

	C.Q. REQUERIDA (%).	C.Q. OBJETIVO (%).	RENDIMIENTO (η) (%).
<i>C</i>	3.38- 3.43	3.405	92
<i>Si</i>	1.93- 1.98	1.955	90
<i>Mn</i>	0.62- 0.68	0.65	93
<i>P</i>	max 0.1	0.1	100
<i>S</i>	max 0.1	0.1	100
<i>Cr</i>	0.23- 0.28	0.255	98
<i>Mo</i>	max 0.1	0.1	96

Las materias primas que se emplearon son las siguientes y sus composiciones químicas se muestran en la tabla 3.2, estas fueron proporcionadas por la empresa Rasinni Frenos y la composición química fue determinada por medio de espectrometría de emisión atómica.

Base de cálculo 90Kg;

Inoculación 0.10% base silicio.

Tabla 3.2. Composición química de la materia prima usada.

Materias Primas	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
<i>Retorno</i>	3.7025	1.8575	0.7175	0	0	0.1875	0
<i>Rebaba (CH₁)</i>	3.519	2.097	0.667	0	0	0.2309	0.009
<i>Arrabio (CH₂)</i>	4.15	1.2	1.2	0.15	0.05	0.2	0.1
<i>Forja (CH₃)</i>	1.2	1.2	1.8	0.05	0.1	1.5	0.7

3.2.1. Balance de Carga.

1.- Cálculo de la cantidad de elementos necesarios.

En función de los parámetros de fusión: Rendimientos y tratamientos del metal líquido.

$$C = \frac{90Kg * \left(\frac{3.405}{100}\right)}{\left(\frac{92}{100}\right)} = 3.331Kg.$$

$$P = \frac{90Kg * \left(\frac{0.1}{100}\right)}{\left(\frac{100}{100}\right)} = 0.09Kg.$$

$$Si = \frac{90Kg * \left(\frac{2.6}{100} - \frac{0.1}{100}\right)}{\left(\frac{90}{100}\right)} = 2.5Kg.$$

$$S = \frac{90Kg * \left(\frac{0.1}{100}\right)}{\left(\frac{100}{100}\right)} = 0.09Kg.$$

$$Mn = \frac{90Kg * \left(\frac{0.65}{100}\right)}{\left(\frac{93}{100}\right)} = 0.629Kg.$$

$$Cr = \frac{90Kg * \left(\frac{0.255}{100}\right)}{\left(\frac{98}{100}\right)} = 0.2342Kg.$$

$$Mo = \frac{90Kg * \left(\frac{0.1}{100}\right)}{\left(\frac{96}{100}\right)} = 0.09375Kg.$$

2. Cálculo de la cantidad de elementos aportados por las materias primas prefijadas. Retornos (10%) y chatarra 1.

10% Retorno= 9Kg.

15% CH₂= 13.5Kg.

$$C = 9 * \left(\frac{3.7025}{100}\right) = \mathbf{0.333Kg.}$$

$$C = 13.5 * \left(\frac{4.15}{100}\right) = \mathbf{0.56025Kg.}$$

$$Si = 9 * \left(\frac{1.8575}{100}\right) = \mathbf{0.1671Kg.}$$

$$Si = 13.5 * \left(\frac{1.2}{100}\right) = \mathbf{0.162Kg.}$$

$$Mn = 9 * \left(\frac{0.7175}{100}\right) = \mathbf{0.06457Kg.}$$

$$Mn = 13.5 * \left(\frac{1.2}{100}\right) = \mathbf{0.162Kg.}$$

$$P = 9 * \left(\frac{0}{100}\right) = \mathbf{0g.}$$

$$P = 13.5 * \left(\frac{0.15}{100}\right) = \mathbf{0.0203Kg.}$$

$$S = 9 * \left(\frac{0}{100}\right) = \mathbf{0Kg.}$$

$$S = 13.5 * \left(\frac{0.05}{100}\right) = \mathbf{6.75 \times 10^{-3}Kg.}$$

$$Cr = 9 * \left(\frac{0.1875}{100}\right) = \mathbf{0.01687Kg.}$$

$$Cr = 13.5 * \left(\frac{0.2}{100}\right) = \mathbf{0.027Kg.}$$

$$Mo = 9 * \left(\frac{0}{100}\right) = \mathbf{0Kg.}$$

$$Mo = 13.5 * \left(\frac{0.1}{100}\right) = \mathbf{0.0135Kg.}$$

3. Balance en función de un elemento "crítico". Elemento crítico seleccionado: C.

$$Ret + CH_2 = \mathbf{22.5Kg.} \quad CH_1 + CH_3 = \mathbf{77.5kg} \quad \therefore CH_1 = 77.5 - CH_3kg.$$

$$3.331 = 0.333 + 0.56025 + \left(CH_1 * \frac{3.519}{100}\right) + \left(CH_3 * \frac{1.2}{100}\right).$$

$$3.331 = 0.8933 + \left([77.5 - CH_3] * \frac{3.519}{100}\right) + \left(CH_3 * \frac{1.2}{100}\right).$$

$$3.331 = 0.8933 + 2.7272 - \left(CH_3 * \frac{3.519}{100}\right) + \left(CH_3 * \frac{1.2}{100}\right).$$

$$3.331 - 0.8933 - 2.7272 = - \left(CH_3 * \frac{3.519}{100}\right) + \left(CH_3 * \frac{1.2}{100}\right).$$

$$-0.28947 = CH_3 \left(\frac{-3.519}{100} + \frac{1.2}{100} \right).$$

$$CH_3 = \frac{-0.28947}{-2.319} (100) = \mathbf{12.483Kg}.$$

$$CH_1 = 77.5 - CH_3 = 77.5 - 12.483 = \mathbf{65.017Kg}.$$

4. Cálculo de la cantidad de elementos aportados por:

$$CH_1 = 65.017Kg.$$

$$CH_3 = 12.483Kg.$$

$$C = 65.017 * \left(\frac{3.519}{100} \right) = \mathbf{2.288Kg}.$$

$$C = 12.483 * \left(\frac{1.2}{100} \right) = \mathbf{0.1497Kg}.$$

$$Si = 65.017 * \left(\frac{2.097}{100} \right) = \mathbf{1.363Kg}.$$

$$Si = 12.483 * \left(\frac{1.2}{100} \right) = \mathbf{0.1497Kg}.$$

$$Mn = 65.017 * \left(\frac{0.667}{100} \right) = \mathbf{0.4336Kg}.$$

$$Mn = 12.483 * \left(\frac{1.8}{100} \right) = \mathbf{0.2247Kg}.$$

$$P = 65.017 * \left(\frac{0}{100} \right) = \mathbf{0g}.$$

$$P = 12.483 * \left(\frac{0.05}{100} \right) = \mathbf{6.242x10^{-3}Kg}.$$

$$S = 65.017 * \left(\frac{0}{100} \right) = \mathbf{0Kg}.$$

$$S = 12.483 * \left(\frac{0.1}{100} \right) = \mathbf{0.0125Kg}.$$

$$Cr = 65.017 * \left(\frac{0.239}{100} \right) = \mathbf{0.1554Kg}.$$

$$Cr = 12.483 * \left(\frac{1.5}{100} \right) = \mathbf{0.1872Kg}.$$

$$Mo = 65.017 * \left(\frac{0.009}{100} \right) = \mathbf{5.852x10^{-3}Kg}.$$

$$Mo = 12.483 * \left(\frac{0.7}{100} \right) = \mathbf{0.0874Kg}.$$

Las cantidades introducidas al horno como ferroaleación o recarburante, para los elementos aleantes principales, son las siguientes:

Carbono, faltan 0.8933 Kg, utilizando carbocoque bajo azufre (C>98%):

$$\frac{0.8933Kg}{0.98} = 0.912 Kg$$

Silicio, faltan 0.9873 Kg, utilizando Ferro silicio 75% ($\approx 76.5\%$ Si):

$$\frac{0.9873Kg}{0.765} = 1.29 Kg$$

Manganeso, faltan 0.0293 Kg, utilizando Ferromanganeso alto carbono ($\approx 75\%$ Mn):

$$\frac{0.0293Kg}{0.75} = 0.04 Kg$$

Y finalmente, se realizó una post inoculación de 0.1% base Si; para ello se consideró una masa total de molde de 9.6 Kg y se empleó Fe-Si inoculante con 75% de Si:

$$9.6Kg * \frac{0.1}{100} = 9.6 \times 10^{-3} Kg * \frac{1}{0.75} = 0.0128Kg = 12.8g Fe - Si$$

Al realizar la primera fusión para comprobar los resultados del balance de carga y realizar los ajustes pertinentes previos a la fabricación de la aleación tipo 14, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.3, los cuales fueron determinados experimentalmente mediante espectrometría de emisión.

Los resultados a destacar son las composiciones de Cr y Mo, las que difieren de la composición objetivo en un 0.75% y 0.1% respectivamente. En el caso del Mo, la cantidad contenida cae por debajo de los límites de detección del espectrómetro, por lo que se adicionara el Fe-Mo necesario para incrementar el porcentaje de Mo en 0.1% en peso.

Tabla 3.3. Composición química de la aleación base objetivo y antes de realizar la aleación.

Tipo	% C	% Si	% S	% Mn	<u>% Cr</u>	% Cu	<u>% Mo</u>
<i>Base objetivo</i>	3.40	1.95	0.1	0.65	<u>0.25</u>	0.3687	<u>0.1</u>
<i>Base 14 antes de aleación</i>	3.46	1.98	0.12	0.696	<u>0.1743</u>	0.3587	<u><0.05</u>

Con base en la información obtenida en la Tabla 3.3, se realizaron los balances de flujo másico de las ferroaleaciones — Fe-Cr, Fe-Mo — para ajustar la composición química. A continuación se muestra el cálculo para el caso del ferrocromo:

Masa total de metal a tratar = 90 Kg

Tiempo de adición= 29 segundos.

Gasto másico de metal base: $\frac{90\text{Kg}}{29\text{s}} = 3.1\text{Kg/s}$

En una base de cálculo de 1 segundo:

$$m_{\text{final}}^{\text{Cr}} = m_{\text{inicial}}^{\text{Cr}} + m_{\text{adicionada}}^{\text{Cr}}$$

$M_{\text{Final}} = 3.1 \text{ Kg}$, la composición objetivo de %Cr= 0.27, y por el análisis químico sabemos que %Cr inicial= 0.1743, por lo que:

$$m_{\text{final}}^{\text{Cr}} = \frac{0.27 * 3.1\text{Kg}}{100} = 8.37 \times 10^{-3} \text{Kg}$$

$$m_{\text{inicial}}^{\text{Cr}} = \frac{0.1743 * 3.1\text{Kg}}{100} = 5.4 \times 10^{-3} \text{Kg}, \text{ por lo tanto:}$$

$$m_{\text{adicionada}}^{\text{Cr}} = m_{\text{final}}^{\text{Cr}} - m_{\text{inicial}}^{\text{Cr}} = 2.97 \times 10^{-3} \text{Kg}$$

De acuerdo a las materias primas proporcionadas por Rassini Frenos, el ferrocromo con el que realizará este ajuste contiene un 62% de cromo, además, tomando en consideración un porcentaje de eficiencia de mezclado del 80% — el

cual fue obtenido en base a múltiples experimentos — obtenemos que la cantidad de ferroaleación a alimentar en el dispositivo es:

$$\frac{2.97 \times 10^{-3} \text{Kg}}{0.62 * 0.80} = 5.98 \times 10^{-3} \text{Kg/s}$$

Un cálculo similar es realizado para el ferro molibdeno, debido a que la composición química inicial presenta un valor por debajo del límite de detección del equipo, se consideró que la aleación base carecía completamente de este elemento aleante, además se estableció una eficiencia de mezclado idéntica al caso del cromo. Se trabajó con un ferro molibdeno con 60% de Mo, por lo que la cantidad a adicionar es 6.45×10^{-3} Kg/s.

Además se encontró la necesidad de agregar 173.42 gr de Cr y 187.05 gr de Mo en un total de 29 segundos (información obtenida a partir de simulación computacional en fases previas del proyecto), asumiendo un factor de eficiencia de incorporación del 80% en ambos casos.

La composición química fue ajustada para los tres métodos de incorporación considerados en este trabajo y se procedió a obtener las muestras para caracterización química y micro estructural.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS.



4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1 Composición Química.

4.2 Análisis Microestructural.

4.3. Análisis de Partículas.

4.4 Propiedades Mecánicas

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1 Composición Química.

Se procedió a analizar los resultados empezando por la comparación de las composiciones químicas obtenidas para los materiales fabricados mediante los tres métodos antes descritos. Todos los porcentajes de elementos aleantes reportados son porcentajes en peso (%wt.).

La Tabla 4.1 muestra la composición química obtenida por espectrometría de emisión de la aleación tipo 14 elaborada de manera convencional, mientras que las Tablas 4.2 y 4.3 muestran las composiciones químicas obtenidas mediante el Método B y el Método C respectivamente. En los tres casos se trató de alcanzar la misma composición final objetivo en cuanto a contenidos de Cr y Mo.

Tabla 4.1. Composición química obtenida mediante espectrometría de emisión atómica de la aleación tipo 14 elaborada por el método convencional (Método A).

% C	% Si	% Mn	% P	% S	<u>% Cr</u>	<u>% Mo</u>	% Ni	% Cu
3.550	1.970	0.655	0.0197	0.1154	<u>0.2620</u>	<u>0.0724</u>	0.0982	0.3684

Tabla 4.2. Composición química obtenida mediante espectrometría de emisión atómica de la aleación tipo 14 elaborada por el Método B (Adición directa de polvos Cr – Mo.)

% C	% Si	% Mn	% P	% S	<u>% Cr</u>	<u>% Mo</u>	% Ni	% Cu
3.423	2.140	0.705	0.0155	0.1121	<u>0.1791</u>	<u>0.0574</u>	0.0942	0.4600

Puede observarse en las Tablas 4.1 y 4.3, que las composiciones químicas que presentan las aleaciones producidas mediante los Métodos A y C son similares, lo cual sugiere que el nuevo dispositivo de aleación puede emplearse para incorporar elementos aleantes de alta temperatura de fusión (1500 °C>) dentro de los rangos requeridos industrialmente.

Tabla 4.3. Composición química obtenida mediante espectrometría de emisión atómica de la aleación tipo 14 elaborada por el Método C. (Adición de partículas de Cr – Mo en el dispositivo)

% C	% Si	% Mn	% P	% S	<u>% Cr</u>	<u>% Mo</u>	% Ni	% Cu
3.385	2.004	0.668	0.0211	0.0853	<u>0.2725</u>	<u>0.0879</u>	0.0977	0.3631

Por otra parte la aleación 14 producida mediante el Método B —Tabla 4.2—, se observan menores contenidos de Cr y Mo a los especificados. Además se colaron cuatro moldes idénticos para la obtención de barras de peso conocido mediante el Método B, modificando la temperatura a la cual se vaciaba el metal al molde y adicionando la misma cantidad de partículas aleantes en cada uno de ellos.

En la Tabla 4.4 se muestran los contenidos de Cr y Mo incorporados en las muestras obtenidas así como la temperatura a la que se adicionaron los polvos aleantes al chorro metálico.

Tabla 4.4. Contenidos de Cr y Mo y temperatura de colada (T_c) en las muestras obtenidas de aleación 14 producida mediante el Método B.

Elementos	% C	% Si	% Mn	% P	% S	<u>% Cr</u>	<u>% Mo</u>	% Cu
<i>Preliminar</i>	3.444	1.962	0.672	0.0180	0.1000	<u>0.1737</u>	<u><0.0500</u>	0.3578
$T_c=1405\text{ }^\circ\text{C}$	3.775	1.932	0.679	0.0122	0.1184	<u>0.2078</u>	<u>0.0807</u>	0.3326
$T_c=1365\text{ }^\circ\text{C}$	3.631	1.922	0.695	0.0131	0.1162	<u>0.2017</u>	<u>0.0752</u>	0.3300
$T_c=1327\text{ }^\circ\text{C}$	3.661	1.924	0.681	0.0137	0.1184	<u>0.1839</u>	<u>0.0764</u>	0.3334
$T_c=1275\text{ }^\circ\text{C}$	3.528	1.899	0.696	0.0160	0.1106	<u>0.1857</u>	<u>0.0525</u>	0.3362

En la Tabla 4.4, se aprecia una variación significativa en los contenidos de Cr y Mo medidos en las cuatro probetas de la aleación 14 obtenidas mediante el Método B a diferentes temperaturas de colada (T_c), lo cual indica que a mayor temperatura de vaciado se obtiene una mayor cantidad de elementos aleantes incorporados; sin embargo se observa que dichos contenidos son, en todos los casos, inferiores a los indicados en la composición química objetivo.

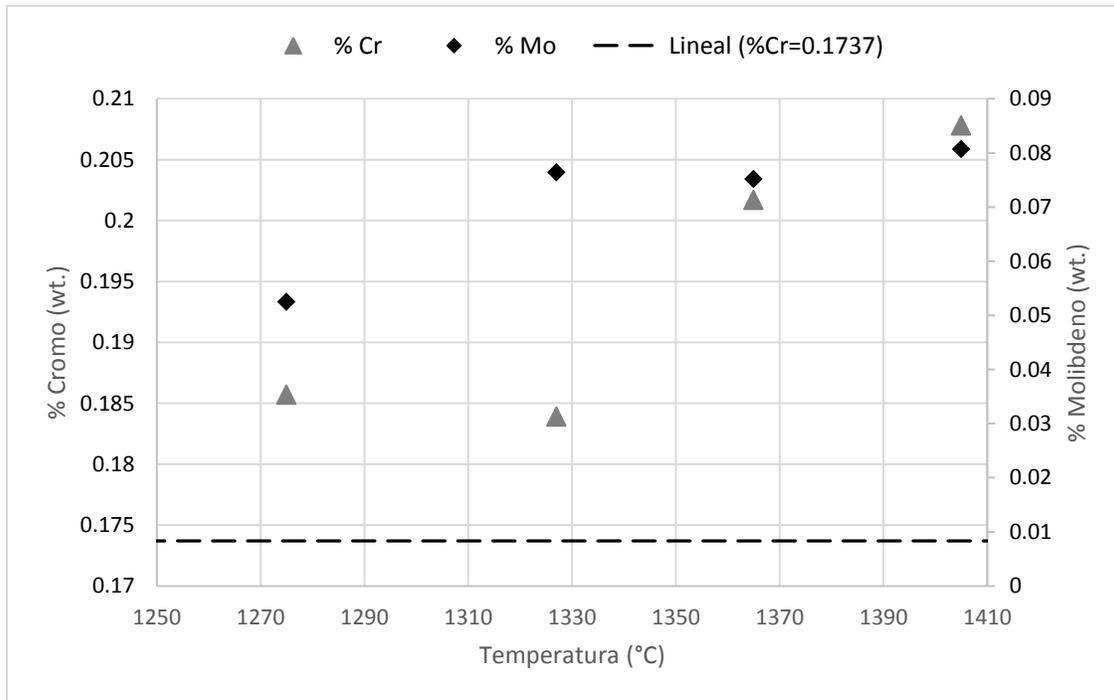


Figura 4.1. Incremento de la cantidad de elemento aleante (Método B) disuelto en el metal líquido (Cr y Mo) en función de la temperatura de colada.

Adicionalmente, se aprecia gráficamente en la figura 4.1, que la cantidad de elemento aleante disuelto de forma efectiva en el metal líquido es muy sensible a la temperatura de vaciado, obteniéndose un incremento en la cantidad incorporada de Cr y Mo cuando elevan las temperaturas de colada. También se aprecia que la disolución del molibdeno es más sensible a la elevación de la temperatura de vaciado, esto es debido a que la temperatura de fusión de la ferroaleación Fe-Mo es inferior a la del Fe-Cr —1488 y 1580 °C, respectivamente—. Todo lo anterior nos obliga a realizar un gasto de energía adicional para lograr la disolución completa de las partículas aleantes en caso de que este método sea empleado.

El decremento de los contenidos de elementos aleantes podría explicarse como resultado de una disolución parcial de los mismos. Este efecto se muestra dependiente de la temperatura y no se puede controlar dentro de lo requerido para producir una aleación industrial.

Tabla 4.5. Composiciones químicas requeridas así como determinadas antes y después producir la aleación 14 con el nuevo dispositivo de aleación.

Tipo	% C	% Si	% S	% Mn	<u>% Cr</u>	% Cu	<u>% Mo</u>	% Sn
<i>14 objetivo</i>	3.30-3.50	1.8-2.0	0.15 max	0.6-0.8	<u>0.23-0.28</u>	0.2-0.5	<u>0.1</u>	0.04-0.08
<i>14 antes</i>	3.46	1.98	0.12	0.696	<u>0.1743</u>	0.3687	<u><0.05</u>	0.016
<i>14 después</i>	3.385	2.004	0.08	0.668	<u>0.2725</u>	0.3631	<u>0.09</u>	0.017

En la Tabla 4.5, se muestran las composiciones químicas antes de agregar partículas y después de agregarlas mediante el empleo del nuevo dispositivo de aleación — durante la manufactura de la aleación tipo 14 — incluyendo las especificaciones requeridas o composiciones de la aleación.

Cabe señalar que en vista de que se cumplían originalmente las especificaciones de Cr — dada la naturaleza y composición de las materias primas provistas por Rassini — se agregó la cantidad necesaria de polvo aleante para incrementar el porcentaje en 0.1% de Cr, asumiendo una eficiencia de incorporación del 80%. Puede observarse que en el caso de la aleación fabricada con el dispositivo, se obtuvieron composiciones químicas que demuestran la incorporación adecuada de las partículas aleantes, lo cual sugiere que el nuevo método de aleación es viable para incorporar partículas con un alto punto de fusión.

Se puede constatar en la Tabla 4.5, que el nuevo dispositivo de aleación fue capaz de incrementar los contenidos de Cr y de Mo hasta alcanzar las composiciones esperadas. Además, se observa un ligero incremento en las composiciones de estos elementos, con respecto al método A, lo que sugiere una mayor eficiencia de incorporación de partículas que con el método convencional.

4.2 Análisis Microestructural.

Se procedió a la preparación metalográfica de las muestras. En la imagen 4.2 se muestran las probetas que se fabricaron para analizar el método A y C, además en la imagen 4.3 se presenta la pieza correspondiente al método B.

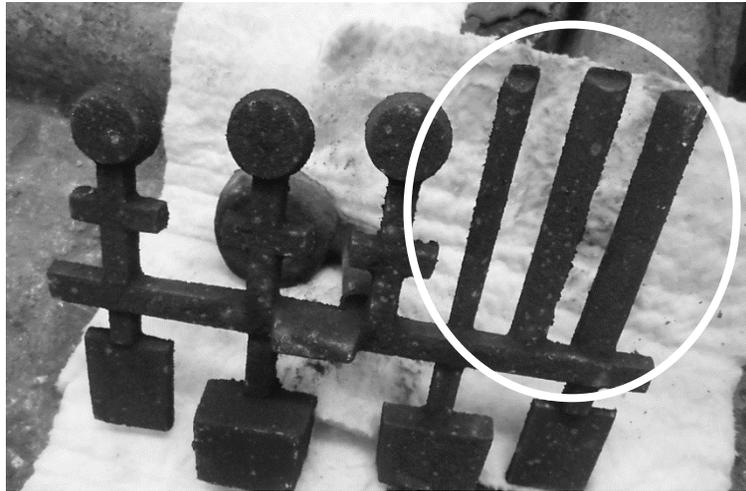


Figura 4.2. Piezas producidas en los métodos A y C, las barras cilíndricas —señaladas con un contorno blanco — fueron cortadas y preparadas metalográficamente para su evaluación micro estructural, la barra de en medio fue la usada para preparación metalográfica y determinación de dureza.



Figura 4.3. Piezas producidas para el método B, las barras cilíndricas fueron cortadas y preparadas metalográficamente para su evaluación micro estructural, la barra es del mismo tamaño que las del método A y C. Piezas similares fueron trabajadas mecánicamente para llevar a cabo ensayos de tracción.

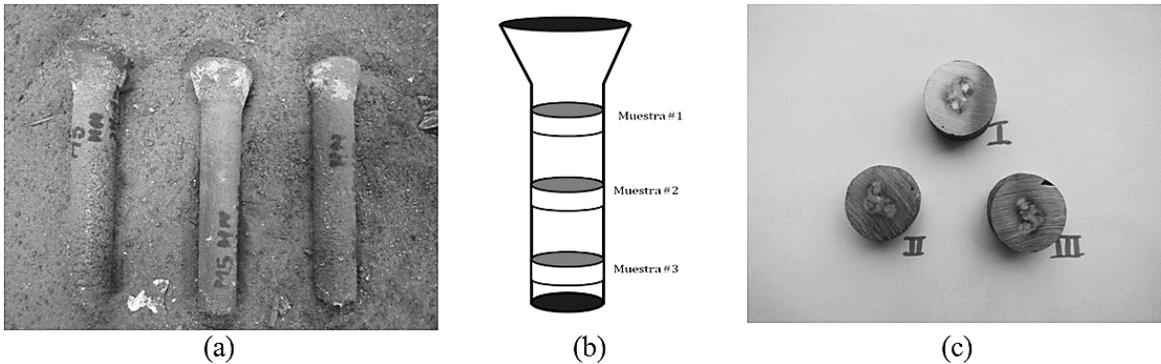


Figura 4.4 .a) Barras cilíndricas de masa conocida, se generaron por medio de los tres métodos, **b)** se muestra la forma en la que fueron cortadas las barras para su análisis metalográfico, en diferentes secciones transversales de la barra, **c)** se observan los cortes de las probetas.

Para ser estudiadas metalográficamente, se realizaron cortes como se muestra en la figura 4.4. Con ayuda de un disco de corte de SiC se seccionaron las probetas en tres posiciones distintas de la pieza, de tal manera que se pueda obtener información con respecto a la distribución de las partículas aleantes (en el caso del método B y C).

La preparación metalográfica se realizó con respecto a la norma ASTM E 3-1, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, utilizando durante el desbaste grueso, lijas de SiC con la siguiente secuencia: P240, P320, P400, P600 y P1200. Para el pulido fino se emplearon paños microcloth con abrasivo de alúmina con tamaño de partícula de $1\mu\text{m}$. Se realizó también una limpieza ultrasónica de algunas muestras que fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido, con la finalidad de observar partículas no disueltas en la matriz del material, principalmente para los métodos B y C. Las micrografías fueron adquiridas por medio de una cámara AxioCam IC de la empresa Zeiss, con una resolución de 1.4 MP y un software de captura y procesamiento de imágenes proporcionado por la misma compañía.

En las figuras 4.5, 4.6 y 4.7, se observan que las morfologías del grafito obtenido por los tres métodos presentan diferencias relevantes a continuación descritas:

1. El método A (figura 4.5) presenta grafito tipo C en general, el cual se caracteriza por tener hojuelas de grafito muy gruesas, la muestra también presentó algunas zonas dendríticas tipo D orientado, pero no fue predominante.

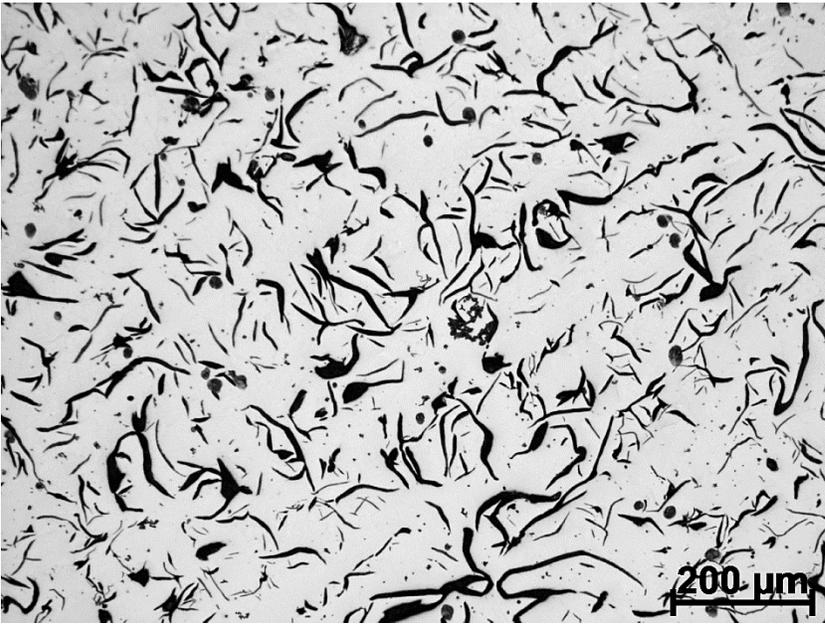


Figura 4.5.

Método A, sin ataque, aleación en el horno. Se aprecian hojuelas de grafito gruesas tipo C.

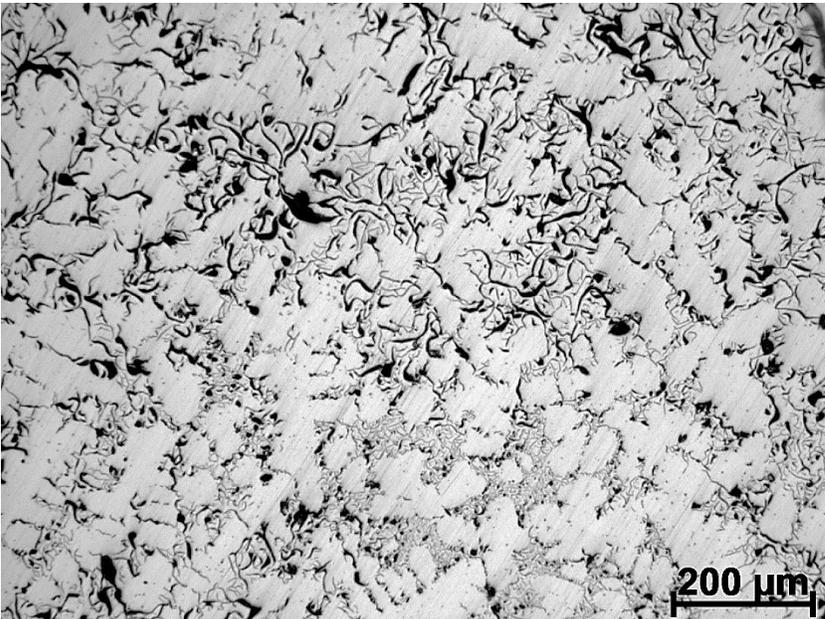


Figura 4.6.

Método B, sin ataque, aleación directa. Se aprecian tres morfologías de grafito predominantes en la muestra, tipo A, C y D (dendrítico orientado).

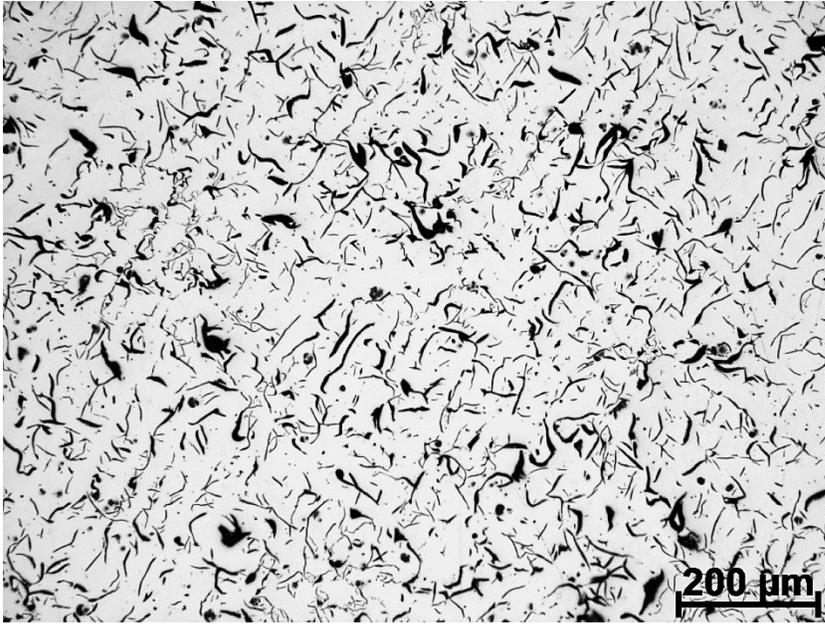


Figura 4.7.

Método C sin ataque, con dispositivo de aleación. Predominan las morfologías de grafito C y A (un poco refinado en comparación con la fabricación en el horno) en toda la muestra.

2. El método B (figura 4.6) presenta las mayores discrepancias con los demás métodos. La morfología del grafito es muy irregular, ya que se observaron tres diferentes tipos de grafito: tipo A (hojuelas homogéneas), tipo C, y tipo D (hojuelas finas con patrón detrítico orientado). Cabe destacar que la morfología de grafito tipo D está asociado a matrices predominantemente ferríticas y altas velocidades de enfriamiento. Debido a que se controló el espesor de las probetas en los métodos A y B, así como el medio de moldeo (Silicato de Sodio/ CO_2), el principal causante de esta morfología de grafito posiblemente se debe a la inoculación y el contenido de elementos aleantes.
3. El método C (figura 4.7) presentó una combinación de dos tipos de grafito, tipo A y tipo C, aunque las hojuelas son un poco más finas en comparación con las que se presentan en el método convencional. Esto puede deberse a que el contenido de elementos estabilizadores de carburos (Cr y Mo) — tablas 4.1 y 4.3 — son mayores en el método C que en el método A, los cuales obstaculizan la precipitación y el crecimiento del carbono libre en la matriz del material. Además se aprecian algunas zonas con carburos al

centro de la pieza, las cuales serán más fácilmente observables después de atacar las muestras.

En las figuras 4.8, 4.9 y 4.10, se observan que las matrices obtenidas por los tres métodos presentan diferencias relevantes a continuación descritas:



Figura 4.8.

Método A, ataque con Nital 3, aleación fabricada en el horno. Se observa matriz completamente perlítica.

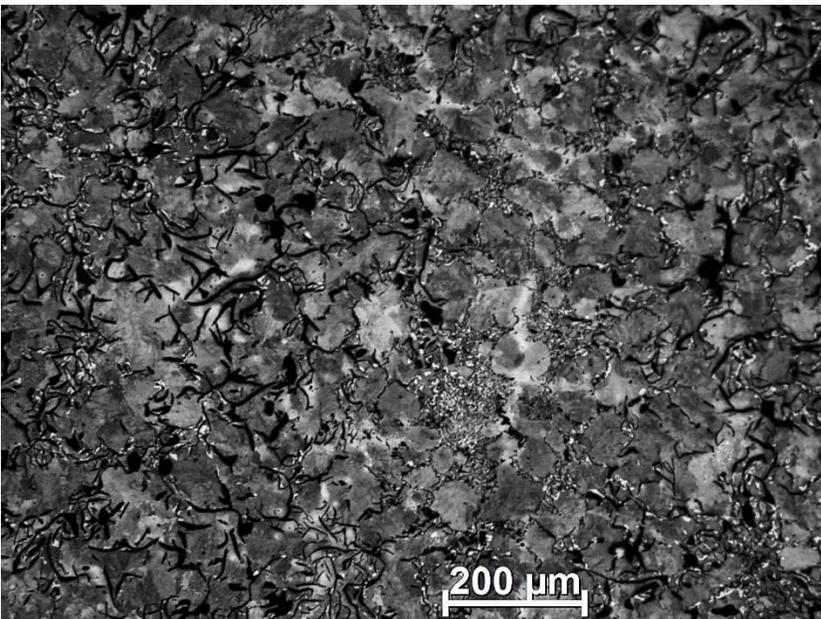


Figura 4.9.

Método B, ataque con Nital 3, aleación directa. Se observa una matriz predominantemente perlítica con un contenido muy pequeño, pero apreciable de ferrita, ver figura 4.12.

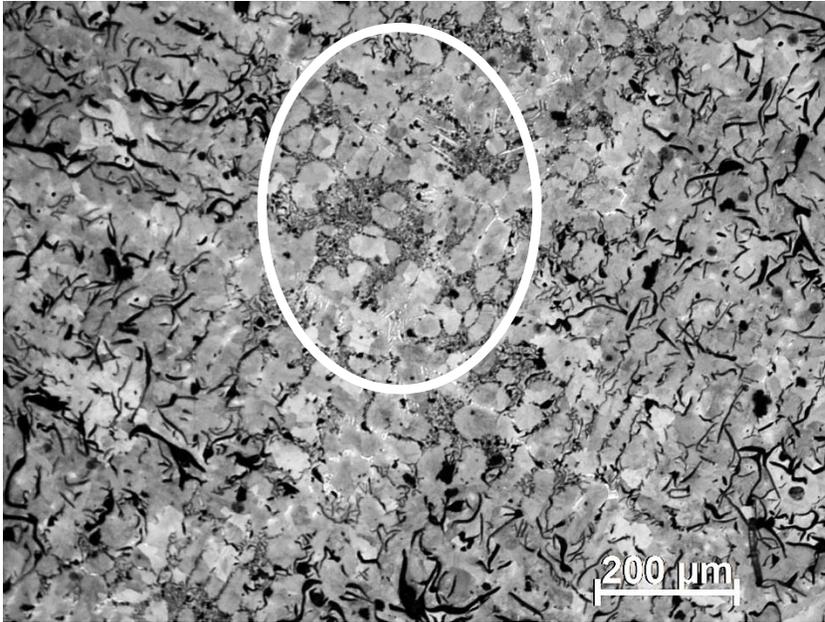


Figura 4.10.

Método C, ataque con Nital 3, con dispositivo de aleación. Se muestra una matriz completamente perlítica y también hay presencia de algunos carburos ledeburíticos en la zona superior y media de la pieza (ver figura 4.13 para mejor apreciación).

1. La matriz que presenta el método A (Figura 4.8), es completamente perlítica, debido principalmente a los contenidos de Mn, Cr y Mo. Se observan también distintos tipos de perlita: fina y gruesa (Figura 4.11), cabe destacar que estos dos tipos de perlita se presentan en las muestras de los tres métodos.

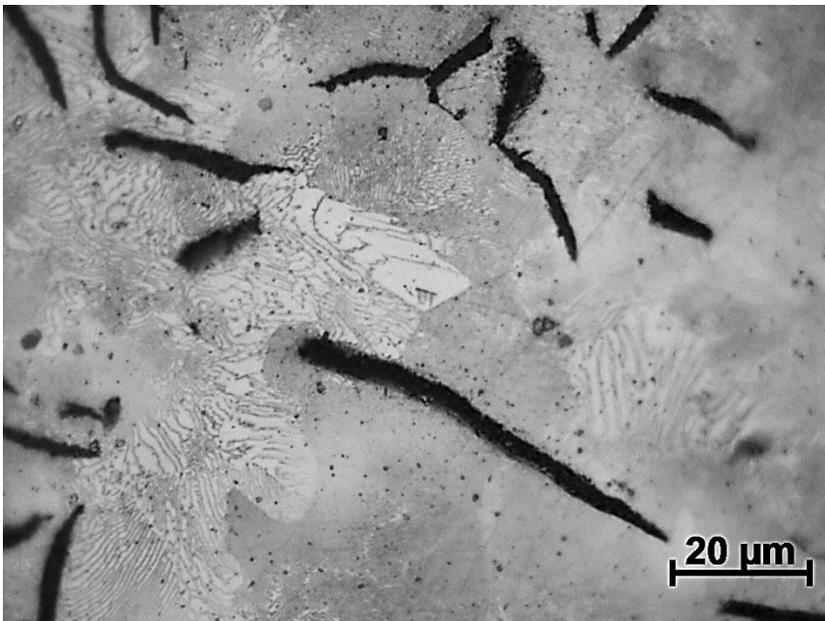


Figura 4.11

Perlita fina y gruesa.

2. El método B (Figura 4.9) se observa perlítica-ferrítica, con aproximadamente 5% de ferrita, que aunque es un contenido mínimo, es observable en la microestructura (Figura 4.12) y podría comprometer las propiedades mecánicas de la aleación. La presencia de ferrita puede deberse a los bajos contenidos de Mo y Cr, siendo este último el de mayor relevancia, ya que está aproximadamente 0.1% por debajo de las aleaciones fabricadas por los otros dos métodos, además la presencia de grafito tipo D (figura 4.6) fomenta la aparición de ferrita en la matriz.

3. En el método C (Figura 4.10), la matriz es completamente perlítica, al igual que en el método A, pero a diferencia de éste, se observan varios carburos en las zonas interdendríticas. La apariencia de estos carburos indican que pueden tratarse de carburos ledeburíticos (Figura 4.13), posiblemente causados por un efecto de segregación de los elementos aleantes estabilizadores de carburos en distintas zonas de la matriz.

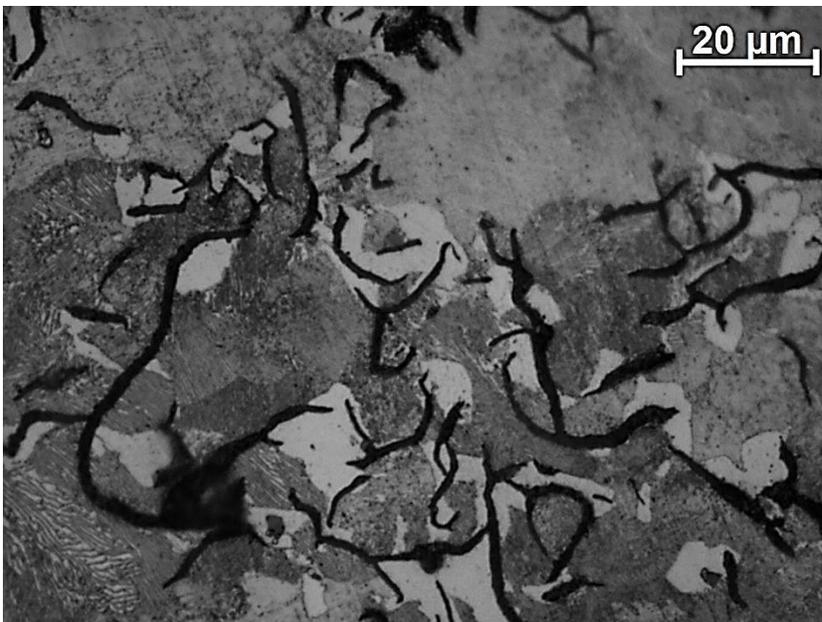


Figura 4.12.

*Probeta del método B.
Imagen en alta
resolución de las zonas
que presentan ferrita.
Se aprecia el patrón
típico de la ferrita, al
formarse cerca de las
hojuelas de carbono
grafito.*

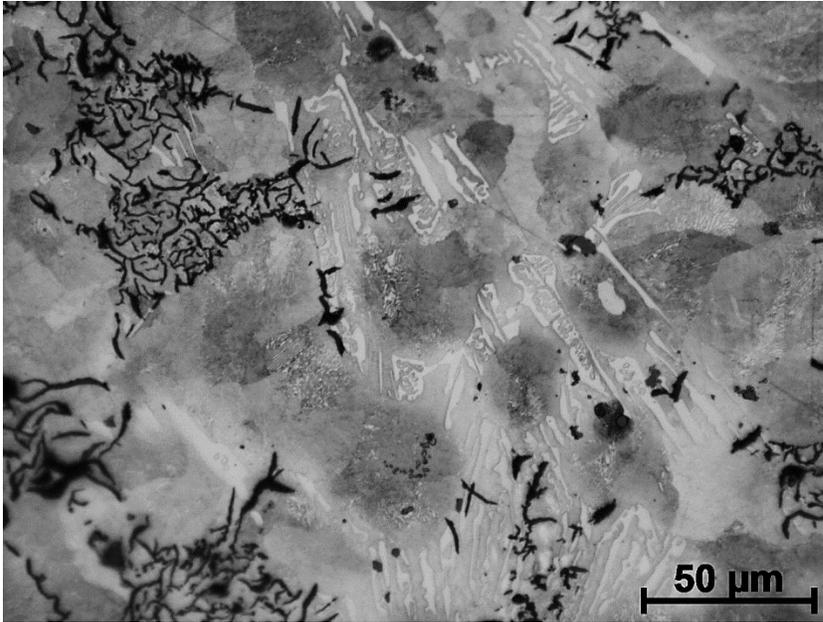


Figura 4.13.

Método C, ataque con Nital 3. Se observa ledeburita transformada en el espacio interdendrítico de la matriz perlítica. Estos carburos se encontraron en pequeñas proporciones en distintas zonas de la muestra.

Adicionalmente se observó de forma general en los tres métodos, la aparición de inclusiones de MnS (Figura 4.14), esto como resultado de la presencia de azufre en el metal líquido, siendo este compuesto un elemento común en los hierros grises y no suele comprometer de forma relevante las propiedades mecánicas de la aleación.



Figura 4.14.

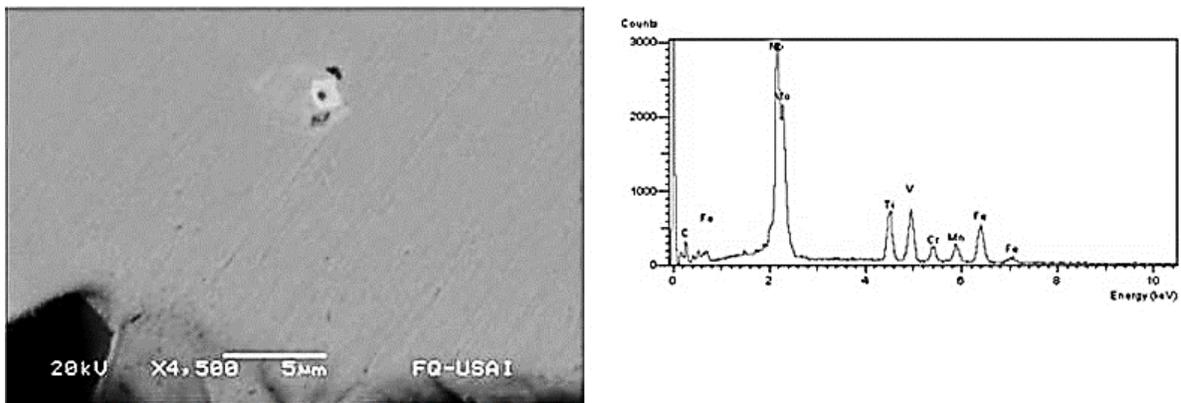
Inclusión de MnS presente en todas las muestras fabricadas de los tres métodos.

4.3 Análisis de Partículas.

Con el propósito de establecer la presencia o no de partículas aleantes no disueltas, se analizaron en el microscopio electrónico de barrido las muestras obtenidas mediante el empleo del nuevo dispositivo de aleación, contra las muestras obtenidas con polvos aleantes agregados directamente al chorro, que llenaba impresiones de barras de masa conocida en moldes de arena fabricados por el método de Silicato/CO₂.

Solo en este último caso, se detectaron partículas parcialmente disueltas de Fe-Mo como se muestra en la Figura 4.15 a. La Figura 4.15 b muestra el resultado del análisis por Rayos X de la partícula en donde se observa la presencia de Mo y de Nb.

En la Figura 4.16 se muestra el mapeo atómico de la zona aledaña a la partícula detectada, donde se observa claramente la presencia de contenidos no despreciables de Mo y Nb. La Figura 4.17 a, muestra la imagen de otra partícula de Fe-Mo parcialmente disuelta con su respectivo análisis de rayos X (Figura 4.17 b) y su mapeo atómico (Figura 4.18).



(a)

(b)

Figura 4.15. a) Partícula parcialmente disuelta de Fe-Mo detectada en una muestra de aleación 14 obtenida mediante el método B, b) Análisis por Rayos X de la partícula mostrada en (a) en donde se observa la presencia de Mo y de Nb.

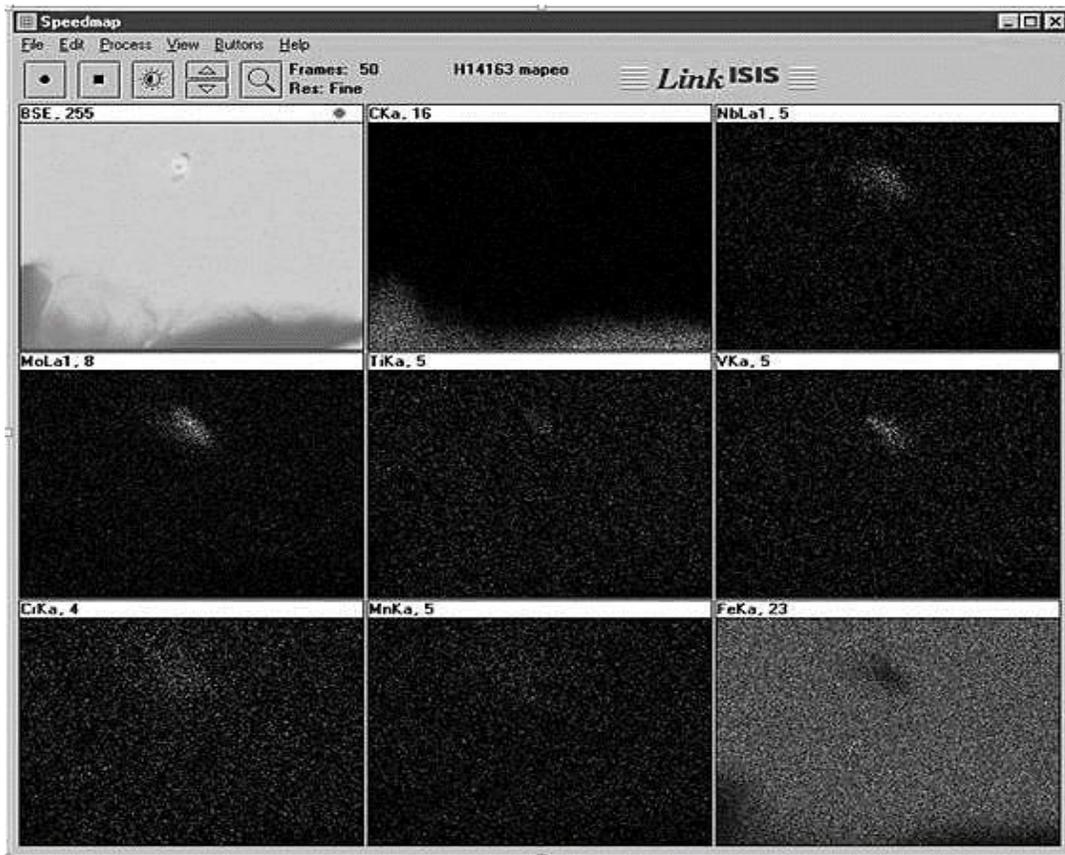
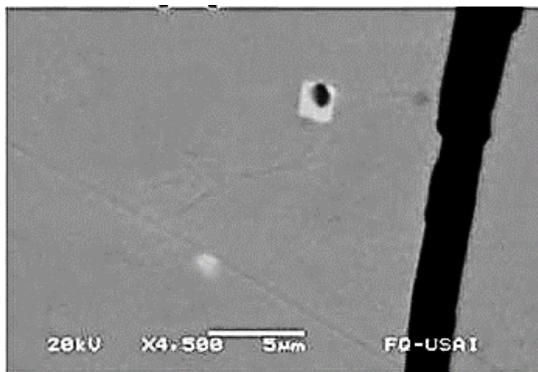
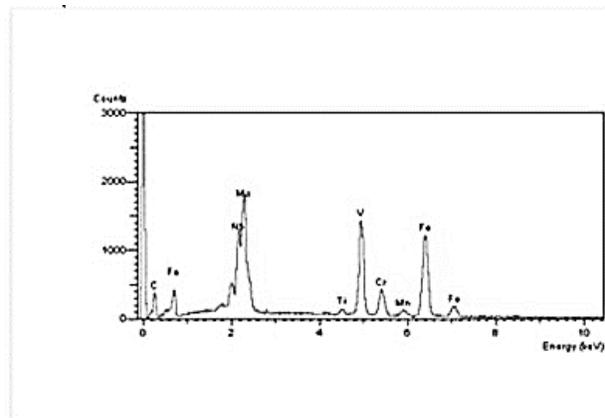


Figura 4.16. Mapeo atómico de la zona aledaña a la partícula.



(a)



(b)

Figura 4.17. a) Partícula parcialmente disuelta de Fe-Mo detectada en la muestra obtenida mediante el método B. b) Análisis por Rayos X de la partícula mostrada en (a) en donde se observa la presencia de Mo y de Nb.

El análisis de las muestras asociadas con las aleaciones producidas empleando el nuevo dispositivo de aleación no mostró la presencia de partículas sin disolver.

Los resultados muestran que la adición directa de polvos aleantes, sin el uso del dispositivo, provocan la presencia de partículas aleantes no disueltas, lo cual produce mucha variación en los contenidos de aleantes obtenidos en el sólido, como lo muestran las tablas 4.1, 4.2 y 4.3; lo descalifica como método de elaboración de hierros grises aleados.

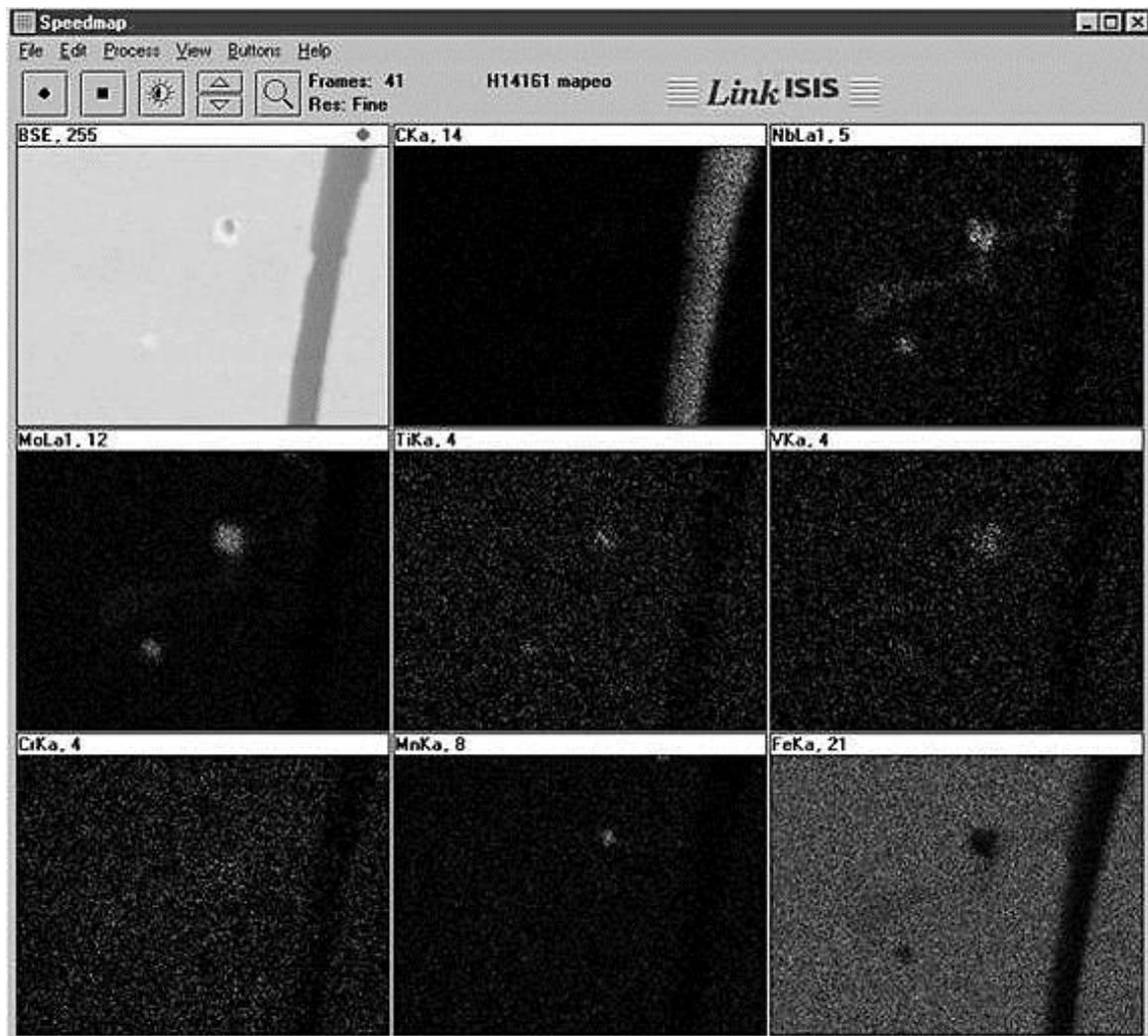


Figura 4.18.- Mapeo atómico de la zona aledaña a la partícula.

4.4 Propiedades Mecánicas.

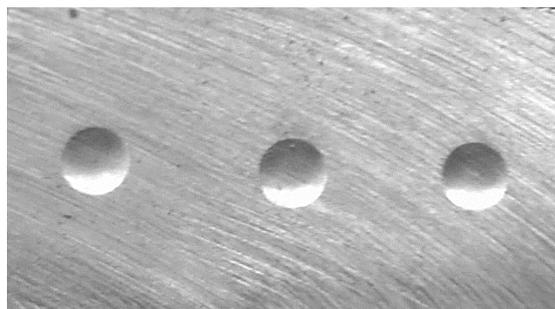
A continuación en la tabla 4.6, se muestran los resultados de dureza obtenidas a partir de las muestras fabricadas por los tres métodos.

Para obtener las durezas se tomaron seis muestras de cada método, a las cuales se les aplicó el test por triplicado de acuerdo a la norma ASTM E10 – 14: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials con los siguientes parámetros: fuerza aplicada 3000 Kg y 10 segundos de aplicación. La prueba se realizó como se observa en la figura 4.19.

Tabla 4.6. Resultados de Dureza Brinell para los Métodos A, B y C.

	Método A	Método B	Método C
<i>Muestra 1</i>	219.103	220.988	226.786
<i>Muestra 2</i>	208.257	214.488	230.772
<i>Muestra 3</i>	219.103	224.829	226.786
<i>Muestra 4</i>	211.786	213.582	232.803
<i>Muestra 5</i>	219.103	215.400	230.772
<i>Muestra 6</i>	210.011	206.525	234.860
<u>Promedio</u>	<u>214.56</u>	<u>215.97</u>	<u>230.463</u>
<i>Desviación Estándar</i>	4.66	5.79	3.226
<i>Intervalo de Confianza al 95%</i>	3.72476821	4.632460349	2.581550325

Figura 4.19. Huellas de dureza Brinell en las muestras de los diferentes métodos.



En la Tabla 4.6 podemos observar en primer lugar, que los métodos A y B presentan durezas muy parecidas, aunque la variabilidad de los datos en el método B es mayor que en el método A y C, lo que indica que la dureza de una pieza a otra puede ser muy diferente; debido principalmente a la no apropiada distribución de los elementos aleantes o a su disolución parcial, por lo que no es un método adecuado para la producción en masa de piezas. En la tabla 4.6 también se observa que el método C permite una reproducibilidad intermedia en las durezas obtenidas aunque cuenta con una dureza mayor.

Tabla 4.7. Durezas Brinell Producidas por el Método B a diferentes Temperaturas de Colada (T_c).

Temperatura de Colada (T_c).	1405	1365	1327	1275
Promedio de Huella de cada Probeta	4.228	4.289	4.422	4.500
Dureza	203.786	197.721	185.347	178.630
Desviación Estándar	0.0264	0.0546	0.0363	0.0354
Intervalo De Confianza	0.0172	0.0357	0.0237	0.0231

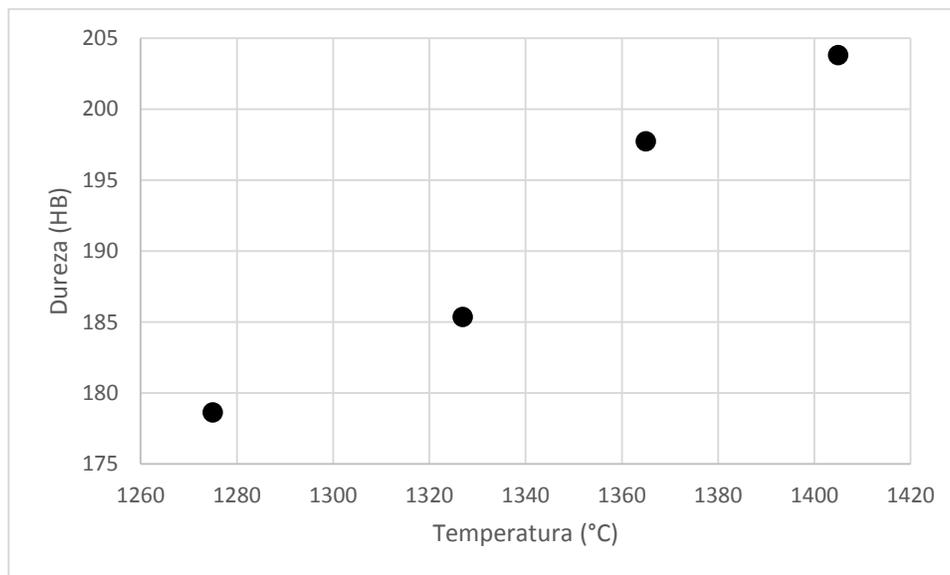


Figura 4.20. Incremento de la dureza en función de la Temperatura de colada (Método B).

En la tabla 4.7 se resumen los resultados obtenidos de dureza Brinell de las probetas coladas a partir del método B a cuatro diferentes temperaturas de colada. En la figura 4.20 se observa claramente el incremento de dureza de las muestras al incrementar la temperatura de colada (debido a la mayor disolución de las partículas aleantes). Como se puede apreciar, al igual que la composición química, la dureza es también muy sensible a la temperatura de colada, ya que se presenta una variación de cerca de 25 puntos de HB al incrementar la temperatura 130 °C, lo que implica un gasto energético mayor.

En el método C, se observa un aumento significativo en la dureza con respecto a los métodos A y B, así como una menor variabilidad en los resultados obtenidos, lo que sugiere que este método ofrece un mejor control y eficiencia de incorporación de aleantes en la producción de piezas de hierro colado.

A continuación en la tabla 4.8 se presentan los resultados de las pruebas de tensión realizados a probetas maquinadas de los materiales obtenidos por los tres métodos ensayados. Las pruebas se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Para el método A y B se ensayaron cuatro probetas de tracción, en el caso del método A, una de ellas rompió fuera de la longitud calibrada de 2'' (figura 4.23), mientras que en el método B todas las probetas rompieron fuera de dicha calibración.

En el método C solo pudieron ser obtenidas dos probetas de tracción, éstas presentaban una gran cantidad de inclusiones de arena (figura 4.22) y se tuvieron problemas para maquinarlas. Además se presentaron ciertos problemas durante la realización de los ensayos mecánicos debido a éstos defectos de fundición (mala sujeción de la probeta por parte de las mordazas y fractura de la sección de agarre de la probeta, figura 4.22 y 4.23), sin embargo, las dos probetas ensayadas presentaron la fractura dentro de la distancia calibrada. En la figura 4.24 se puede observar la fractura, predominantemente frágil y de color gris. También se presenta en la figura 4.21, las curvas más representativas de los ensayos de tracción del método A, B y C, respectivamente.

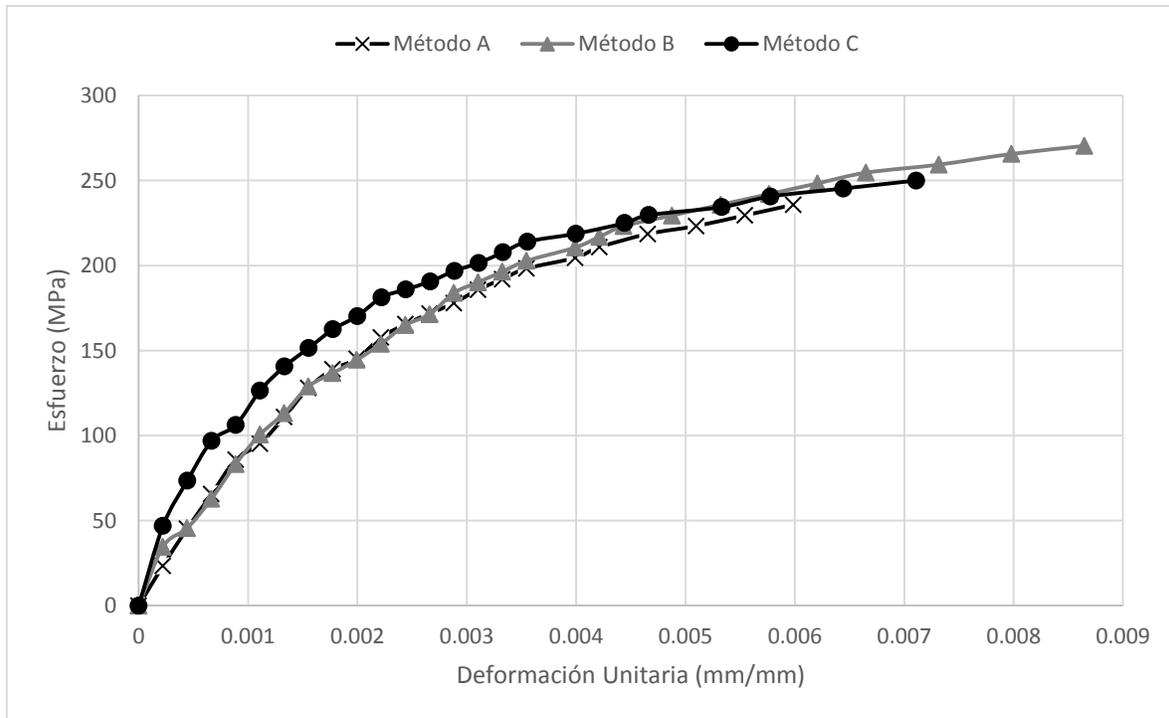


Figura 4.21. Curvas esfuerzo- deformación para los tres materiales producidos por los diferentes métodos de aleación.

Tabla 4.8. Resultados de la Prueba de Tensión para las Probetas Producidas por los Métodos A, B y C.

	Método A			Método B			Método C		
	UTS	% R.A	% E	UTS	% R.A	% E	UTS	% R.A	% E
<i>Promedio</i>	246.79	0.37	2.94	256.27	0.17	2.71	247.24	0.78	3.03
<i>Desviación Estándar</i>	8.37	0.22	0.74	17.72	0.29	0.49	2.82	0.52	0.03
<i>Intervalo de Confianza al 95 %</i>	9.47	0.25	0.84	17.37	0.28	0.48	3.90	0.72	0.05

UTS (Ultimate Tensile Strength) reportado en MPa.

%R.A, porcentaje de reducción de área.

% E, porcentaje de elongación del material.

Como se puede apreciar en el resumen de resultados de la tabla 4.8, los métodos A y C ofrecen los mejores resultados tanto en UTS, %R.A y %E. Los resultados entre estos dos métodos se muestran muy cercanos, principalmente en la

resistencia a la tensión, lo que indica que el método C puede producir hierros colados aleados que presenten propiedades mecánicas muy similares a los fabricados por medio del método convencional. Además, al observar los parámetros estadísticos nos percatamos de que la variabilidad de resultados es casi tres veces menor en el método C, aunque se considera necesario realizar más experimentos y pruebas con el fin de obtener parámetros estadísticos más confiables y representativos de los métodos antes señalados.

En el caso del método B, aparentemente presenta una mayor UTS que los métodos A y C, pero sus parámetros estadísticos presentan una variabilidad casi seis veces mayor a la del método C y dos veces mayor a la del método A. Adicionalmente hay que subrayar que los resultados de este método son inválidos debido a que todas las probetas rompieron fuera de la longitud calibrada de 2'', pero se tomaron en cuenta con el fin de comparar con los demás resultados obtenidos. Por lo tanto, nuevamente observamos la falta de control de proceso en este método de fabricación de hierros grises aleados, además sus propiedades de %R.A y %E son las menores de los tres métodos, y aunque a pesar de que éstas propiedades no suelen ser relevantes en los hierros grises debido a que son considerados prácticamente indeformables, si pueden darnos un indicio de que la calidad del material es inferior al de los demás métodos.

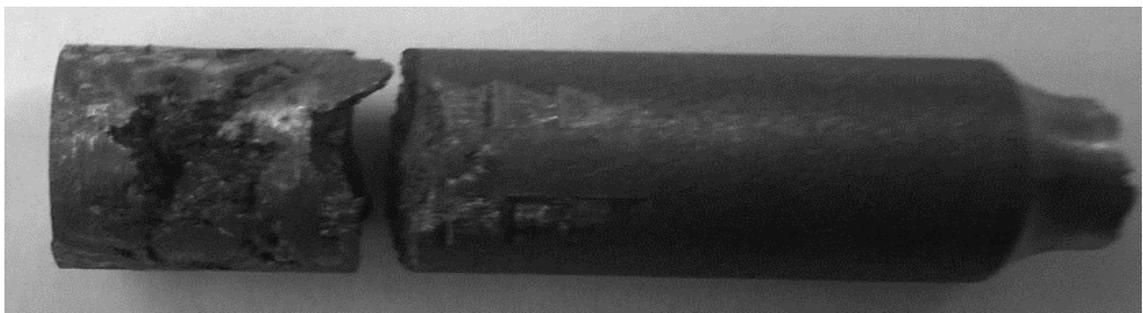


Figura 4.22. Incrustaciones de arena y porosidades en probetas.

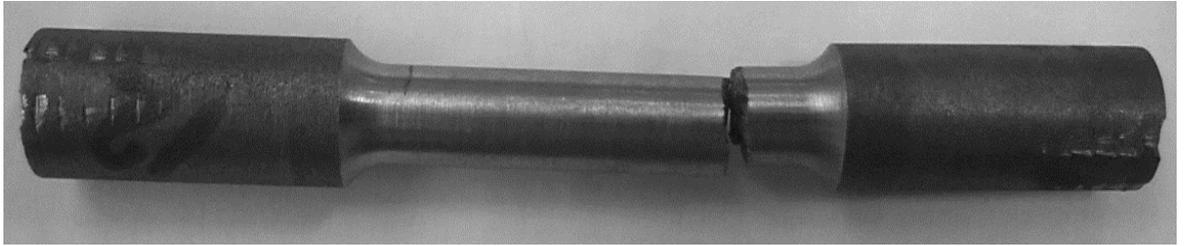


Figura 4.23. *Probeta de tracción rota fuera de la distancia calibrada.*

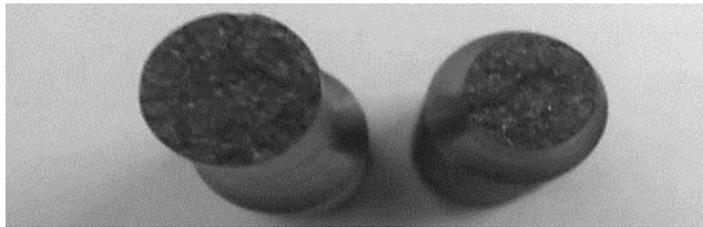
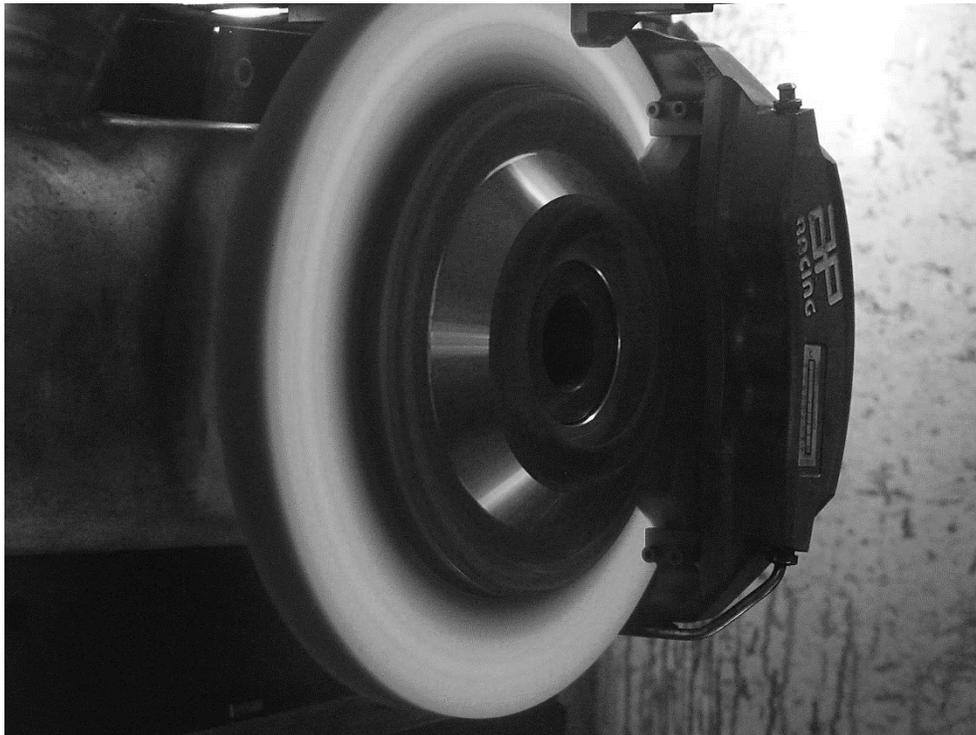


Figura 4.24. *Fractura frágil de las probetas.*

*CAPÍTULO 5:
CONCLUSIONES.*

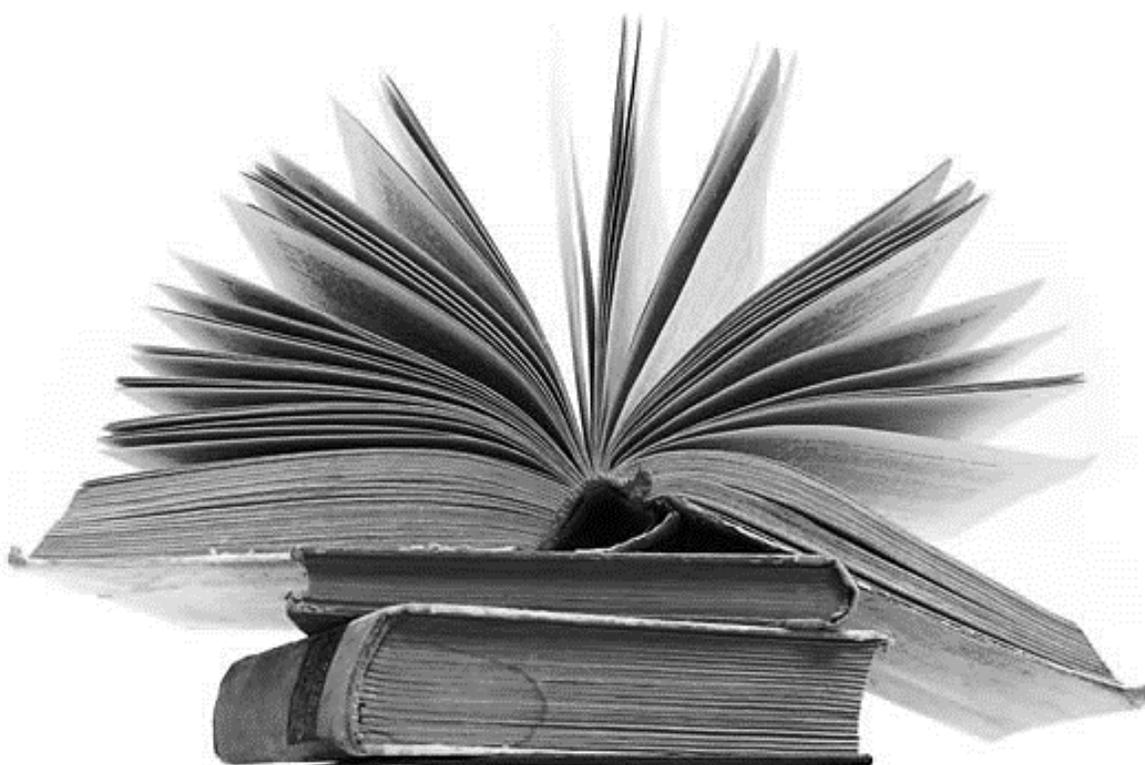


5. CONCLUSIONES.

- Es poco viable producir hierros aleados con Cr y Mo mediante la adición directa de partículas aleantes en el chorro metálico.
- Es posible producir hierros aleados con Cr y Mo de manera no convencional, mediante el uso del dispositivo empleado en este trabajo
- La adición directa de polvos aleantes al chorro metálico (Método B) antes del llenado de moldes sin el uso del dispositivo, provocan la incorporación parcial de los aleantes así como variaciones no despreciables en los contenidos de los mismos y la presencia de partículas aleantes no disueltas, lo cual lo descalifica como método de elaboración de hierros grises aleados.
- En vista de las similitudes encontradas en las composiciones químicas obtenidas por espectrometría de emisión y la microestructura observada en las probetas fabricadas por el método A y C, el nuevo dispositivo de aleación mostró ser apto para fabricar hierros grises aleados.
- El análisis micro estructural por sí solo, no es suficiente para comprobar la eficiencia de los métodos A y C, siendo la microestructura de estos dos materiales muy similares, por lo que es necesario realizar ensayos mecánicos y análisis químicos; sin embargo, la presencia de ferrita en la microestructura de las piezas fabricadas por el método B indica una mala incorporación de los elementos aleantes.
- El uso del nuevo dispositivo de aleación permite incorporar adecuadamente los polvos aleantes de Fe-Cr y Fe-Mo, observándose un ligero incremento de Cr y Mo en la aleación producida por el método C con respecto al método convencional, lo que indica que el nuevo dispositivo es más eficiente en la incorporación de partículas debido al menor tiempo que tienen las mismas para oxidarse, en comparación con la oxidación que podrían sufrir estos elementos mediante el proceso convencional de adición y ajustes finales de composición química en el metal líquido, llevado a cabo directamente en el horno de inducción.

- La dureza obtenida a partir de las piezas fabricadas con el método C, tienen un valor ligeramente mayor con respecto al convencional. Este hecho puede explicarse como un resultado de la mejor incorporación de los elementos aleantes Cr y Mo cuando se emplea el método C y a la presencia de carburos en la matriz del material.
- El método C, es capaz de reproducir las propiedades mecánicas (UTS, %E y %R.A) de los materiales fabricados por el método convencional A, además de presentar una menor variabilidad de los resultados. El método B queda descartado debido a que no es posible controlar y reproducir adecuadamente las propiedades mecánicas requeridas.
- El uso del dispositivo de aleación rápida permite incorporar adecuadamente los polvos aleantes de Fe-Cr y Fe-Mo, aunque se propone precalentar las partículas antes de entrar al sistema, con el objeto de mejorar la eficiencia de disolución de los aleantes de alto punto de fusión.

BIBLIOGRAFÍA.



BIBLIOGRAFÍA.

1. W.D. Callister, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, Department of Metallurgical Engineering, the University of Utah, 4th edition, 2012.
2. G. Castro, *Fundiciones*, Departamento de Ingeniería Mecánica, F.I.U.B.A., 2ª edición, México, 2009.
3. Walton F. Charles, *Gray and Ductile Iron Castings Handbook*, Iron Founders' Society Inc, Cleverland, 1971.
4. José Apraiz Berreiro, *Fundiciones*, 3ª edición, Editorial Dossat, España, 1981.
5. S.V. Subramanian, A.J. Genualdi (1996), *Optimization of Damping Capacity and Strength in Hypereutectic Gray Cast Iron*, Transactions of the American Foundrymen's Society, 96-138.
6. I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan, L. Riposan (2000), *Evaluation of Tin-Copper-Chromium Relationship in Gray Cast Irons*, AFS Transactions, American Foundry Society, Volume 108, 00-48, 71-82.
7. T. Kanno, T. Kikuchi, I.Kang (2005), *Effect of Alloying Elements on the Eutectic Temperatures in Cast Irons*, AFS Transactions, American Foundry Society, Schaumburg, Il, USA. Paper 05-203.pdf
8. M. Moonesan, A. Honarbakhsh Raouf, F. Madah, A. Habibollah Zadeh (2012), *Effect of alloying elements on thermal shock resistance of gray cast iron*, Journal of Alloys and Compounds 520, 226–231
9. W. Xu, M. Ferry, Y. Wang (2005), *Influence of alloying elements on as-cast microstructure and strength of gray iron*, Materials Science and Engineering, A 390, 326–333.
10. American Society for Metals, Metals Handbook, Vol. 15, *Castings*, USA, 9th, 1993.
11. American Society for Metals, Metals Handbook, Vol. 1, *Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys*, USA, 10th.

- 12.H.T. Angus, Cast Iron: Physical and Engineering Properties, 6th ed., Butterworths, 2001.
- 13.De la Cruz Quiroz, Tesis "Metalurgia físico-química y caracterización de las fundiciones de grafito laminar", Piura, 1998.
- 14.F. Díaz, Hierros Fundidos, Departamento de Ingeniería, FES Cuautitlán Izcalli, 2007.