



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**EFECTO DE LA RELACIÓN Cr/Mo EN LA FORMACIÓN
DE CARBUROS LEDEBURÍTICOS EN HIERROS
NODULARES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

HÉCTOR DANIEL RIVERO MARTÍNEZ



MÉXICO, D.F.

2014



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: José Alejandro García Hinojosa

Vocal: Sergio García Galán

Secretario: Arturo Alejandro Sánchez Santiago

1er. Suplente: Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

2° Suplente: Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

Sitio donde se desarrolló el tema:

Edificio "D"

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Facultad de Química

UNAM

Dr. José Alejandro García Hinojosa

Asesor del tema

I.Q.M Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

Supervisor técnico

Héctor Daniel Rivero Martínez

Sustentante

Índice

Introducción.....	I
Resumen	I
Justificación.....	II
Objetivos.....	III
Hipótesis.....	IV
Capítulo I Antecedentes	1
1. Hierros Colados.....	1
1.1Tipos de Hierros Colados.....	1
1.2 Hierros Nodulares.....	4
1.2.1 Características principales.....	4
1.2.2 Fabricación	4
1.2.3 Formación de carburos.....	5
1.3 Hierro CADI (Carbide Austempered Ductil Iron).....	6
1.3.1 Principales Ventajas y Desventajas.....	7
1.3.2 Disolución de Carburos.....	8
1.3.3 Mercado potencial de los hierro CADI	8
Capítulo II Fundamentos Teóricos.....	9
2. Introducción	9
2.1 Diagramas de fases.....	9
2.1.1 Diagrama de fases Fe-C _{grafito}	9
2.1.2 Diagrama de fases Fe-Fe ₃ C	11
2.2 Fases y Microconstituyentes de los Hierros Colados.....	13
2.2.1 Fases y Microconstituyentes del Diagrama Fe-C _{grafito}	13
2.2.2 Fases y Microconstituyentes del Diagrama Fe-Fe ₃ C.....	14
2.2.3 Estructuras de Hierros Formadas por Tratamiento Isotérmico.	14
2.3 Variables que afectan la microestructura del hierro nodular.....	15
2.3.1 Efecto del balance Carbono-Silicio.....	15
2.3.2 Velocidad de Enfriamiento.....	16

2.3.3 Elementos de aleación	17
2.4 Efecto de los aleantes en la solidificación.....	17
Capítulo III Desarrollo Experimental	23
3.1 Reconocimiento de las piezas	23
3.2 Composición Química	23
3.3 Caracterización metalográfica.	25
Capítulo IV Resultados y Discusión.....	27
4.1 Resultados de la aleación 1 (relación Cr/Mo = 1/1).....	27
4.1.1 Caracterización del hierro nodular	27
4.1.2 Conteo de carburos.	28
4.2 Resultados de la aleación 2 (relación Cr/Mo= 1/0.5)	34
4.2.1 Caracterización del hierro nodular	34
4.2.2 Conteo de carburos.	35
4.3 Resultados de la aleación 3 (relación Cr/Mo = 2/0).....	41
4.3.1 Caracterización del hierro nodular	41
4.3.2 Conteo de carburos.	42
4.4 Discusiones generales.....	49
Capitulo V Conclusiones	51
5.2 Sugerencias	52
Bibliografía	53

Introducción

Resumen

Al pasar los años se va creando la necesidad de nuevas tecnologías o de aumentar la eficiencia en las ya existentes, para ello es necesario el que se creen nuevos materiales y/o se mejore el desempeño de los ya existentes. Debido a su amplia gama de propiedades como su fácil y bajo costo de producción se opto por el mejoramiento de los hierros colados.

El hierro CADI (Carbodic Austempered Ductil Iron) siendo el último de los "nuevos" hierros tiene una gran cantidad de mercado debido a sus excelentes propiedades, por ello se tiene interés en su fabricación. En su primera etapa de producción se involucra a los hierros CDI (Carbodic Ductil Iron); estos deben de contener un alto contenido de carburos, distribuidos homogéneamente en la matriz y ser estables durante el austenizado.

Para la obtención de los hierros CDI se tienen en cuenta dos factores, la velocidad de enfriamiento y los elementos aleantes. El hierro CDI base para el hierro CADI es de gran importancia ya que de este dependen la calidad del hierro CADI final; los estudios reportados sobre ambos factores son escasos y es por ello que en este proyecto de tesis se tiene como finalidad evaluar el efecto de dos de los principales elementos aleantes que promueven la formación de carburos en tres relaciones diferentes para la obtención de un hierro CDI con potencial de ser utilizado como material base en la fabricación de hierro CADI.

Justificación

El hierro nodular es de gran relevancia en la industria debido a sus propiedades mecánicas. Actualmente se modifica su estructura convencional promoviendo la precipitación de carburos para aumentar su resistencia al desgaste. Con la adición de los carburos la propiedades mecánicas cambiaron dándole la posibilidad de sustituir algunas piezas de hierro blanco o acero, en el caso del último disminuyendo peso de la pieza y costo de producción.

Actualmente se investigan las formas de mejorar las propiedades de los nuevos hierros colados entre ellos uno de los que se tiene mayor interés es en los hierros CADI. Para mejorar las propiedades físicas se tiene que enfocar en la microestructura y esta última depende del proceso de manufactura, es por ello que se debe de mejorar el proceso. En este caso se trata de mejorar el hierro nodular base.

Objetivos

1. Determinar el efecto en la formación de carburos para diferentes relaciones de Cr y Mo en hierros nodulares.
2. Cuantificar y comparar el contenido de carburos en piezas con diferentes relaciones de Cr/Mo.
3. Generar mapas de la distribución de carburos en hierros nodulares con relaciones Cr/Mo de 2/0, 1/1 y 1/0.5.
4. Estudiar la variación de la fracción de carburos formados en zonas con diferente velocidad de enfriamiento local en la pieza tipo "Y".

Hipótesis

Tanto el Cr como el Mo son elementos blanqueadores en los hierros colados, al usar ambos elementos se producirá un incremento en la precipitación de carburos a diferencia de usarse individualmente. Se espera que los hierros colados con un contenido mayor de Cr y Mo presenten un mayor contenido de carburos. De igual manera ya que el Cr y Mo tienen diferentes potenciales de blanqueado ambos elementos tendrán un diferente efecto en la formación de carburos.

Capítulo I Antecedentes

1. Hierros Colados

Los hierros colados, también conocidos como fundiciones debido a que se fabrican mediante el proceso de fusión y colada, son aleaciones ferrosas aleadas principalmente con C y Si, el contenido de carbón está entre 2 y 4.5%.

Los hierros se puede dividir en dos grupos los obtenidos por fundición y con tratamiento térmico, los hierros obtenidos por fundición son: hierros blancos, grises, vermiculares y nodulares; los hierros de este grupo obtienen sus propiedades en condiciones de fusión y colada. Los obtenidos con tratamiento térmico son: hierro ADI (austempered ductil iron), el hierro CADi (carbídico austempered ductil iron) además de todos los ya mencionados en el grupo de obtención por fundición, a estos se les aplican tratamientos térmicos para mejorar sus propiedades como los hierros AGI y AVI (austempered gray iron y austempered vermicular iron, respectivamente).

El uso de estas aleaciones se debe principalmente a que la gama de propiedades es amplia y que en general su fabricación es menos costosa que las piezas de acero.

1.1 Tipos de Hierros Colados

- Hierros colados obtenidos directamente de colada [1]
 - Hierro blanco

Su nombre se debe a la apariencia que presenta la superficie al romperse. El carbono se presenta en forma de cementita y no de forma libre, es una aleación de alta dureza y por ello frágil. No requiere ningún tratamiento al metal líquido.

- Hierro gris

Su nombre se debe a la apariencia que presenta su superficie al fracturarse. Su estructura está formada por una matriz metálica de ferrita, perlita o ambos y grafito precipitado (grafito libre) en forma de hojuelas de diversos tamaños y grosores o formas variadas. Para fabricar este tipo de hierro es necesario efectuar un tratamiento al metal líquido, inoculación, el cual controla el tipo y tamaño del grafito.

- Hierro vermicular

Contiene en su estructura la precipitación de partículas de grafito irregulares, orientadas al azar e interconectadas, las cuales son cortas y relativamente delgadas con esquinas redondeadas, usualmente referidas como "worm shaped" o forma de gusano. Para su fabricación es necesario el realizar dos tratamientos al metal líquido, la inoculación y nodularización incompleta.

- Hierro nodular

También conocido como hierro dúctil o hierro con grafito esferoidal. En esta fundición ferrosa el grafito en lugar de precipitar en forma de hojuelas (Hierro gris) lo hace en forma de esferoides. Este tipo de hierro necesita dos tratamientos al metal líquido, la inoculación y la nodularización.

- Hierros obtenidos por tratamiento térmico [1]

- Hierro maleable

El hierro maleable es un hierro obtenido mediante el tratamiento térmico de un hierro blanco como base, el tratamiento térmico transforma el carbón combinado en un tipo de hierro nodular llamado carbón revenido. Los tratamientos que se le dan al hierro blanco para

convertirlo en maleable es un recocido en dos etapas. Todo depende de la composición química del hierro blanco, si tiene elementos grafitizantes y suficiente carbón. Un tratamiento promedio bajo buenas condiciones dura alrededor de 3.5hr a 940°C, esta etapa se lleva a cabo generalmente bajo atmosfera controlada para evitar la descarburización. Mientras más alta sea la temperatura del tratamiento aumenta el número de partículas de grafito.

En la segunda etapa las piezas son enfriadas a 740-760°C con una velocidad de 3-11°C/hr, esto permite que el grafito aun disuelto difunda hacia el grafito temper.

- Hierro ADI

Hierro nodular con tratamiento isotérmico en el cual se promueve la formación de Ausferrita (ferrita acicular y austenita estable con altos contenidos de carbono), lo cual impacta fuertemente en el incremento de sus propiedades mecánicas.

- Hierro CADI

En los últimos años se ha elaborado una nueva fundición nodular austemperizada (ADI), con carburos inmersos en la matriz ausferrítica, llamado CADI (Carbide Austempered Ductile Iron). En la bibliografía se encuentran ejemplos de la aplicación del hierro CADI y resultados de resistencia al desgaste, pero se cita muy poco sobre la fabricación del mismo. La fabricación del hierro CADI debe de tomar en consideración la materia prima del mismo, es decir el hierro nodular previo al tratamiento térmico de austemperizado, por lo que este hierro nodular base debe de tener en consideración lo siguiente: la densidad de nódulos, la matriz, la presencia de carburos y su estabilidad a la temperatura de austenización. El porcentaje de nodularidad debe de ser

de 100%, la matriz debe de presentar entre 10-40% de carburos y el resto de la matriz debe de ser perlítica.

1.2 Hierros Nodulares

1.2.1 Características principales

El hierro nodular en estado líquido tiene una muy buena fluidez y colabilidad; presenta un amplio rango de propiedades debido a la morfología del grafito, ya que al tener el grafito en forma de esferoides evita la acumulación de esfuerzos, a diferencia del hierro gris en el cual el grafito se presenta en forma de hojuelas las cuales acumulan esfuerzos en las puntas de las mismas provocando cierta fragilidad.

Desde el punto de vista de composición química tienen bajos contenido de O, S, P y un Mg residual de 0.04-0.08%.

1.2.2 Fabricación

Al fabricar cierto producto se necesitan materias primas, en el caso del hierro nodular se encuentra la chatarra de hierro, retornos y las ferroaleaciones; para la fabricación de aleaciones es necesario la realización de un balance de carga, este es el cálculo de las diferentes chatarras, retornos y ferroaleaciones para alcanzar la composición deseada, la ferroaleaciones son solo para el ajuste de carga.

Después de definir la secuencia de carga y definir las temperaturas de fusión, trabajo y colada; posteriormente se lleva a cabo la desulfuración que es el usar compuestos que contienen elementos altamente activos con el azufre, como el Ca, Mn, Mg y Na; algunos de estos son: CaCO_2 , CaC_2 y CaCO_3 . Este tratamiento se lleva a cabo para mantener el S por debajo de 0.015% ya que el S reacciona con el Mg en el tratamiento de nodularización, si se tienen elevados contenidos de S se debe de utilizar una mayor cantidad de Mg lo cual conlleva un mayor consumo de nodularizante y a su vez un mayor costo.

El tratamiento de nodularización consiste en modificar la morfología del grafito, de hojuelas a nódulos, este efecto se logra con la adición de algunos elementos como son Mg, Ce, Ca, Ba y Sr [2]. Existen diferentes maneras de llevar a cabo este tratamiento, los más conocidos son: proceso Pour Over, proceso sándwich, en el molde, campana de inmersión, método de inyección, cámara de presión, nodularización en cuchara sellada [2].

Posterior a la nodularización se lleva a cabo la inoculación, también es un tratamiento al metal líquido, este tratamiento al metal líquido tiene como finalidad la precipitación de carbono en grafito, esto sucede ya que el inoculante promueve centros de nucleación para el carbono, provocando que este se presente en forma de grafito y no en carburos. En el hierro nodular la inoculación tiene un propósito extra, el cual es aumentar la densidad de nódulos y que estos se encuentren de forma uniforme en toda la estructura. Al igual que en la nodularización existen diferentes maneras de realizar la inoculación como la inoculación en la olla de colada o inoculación temprana, la post-inoculación y la inoculación en el molde.

1.2.3 Formación de carburos

En el pasado se evitaba la formación de carburos en los hierros nodulares ya que los carburos fragilizan la estructura; hoy en día se busca la formación de carburos en la matriz para la elaboración de nuevos materiales (Hierro CADI), para esto es necesario tener en cuenta las medidas que se tenían o tienen para evitar la formación de carburos y aplicarlas de forma controlada para obtener los carburos deseados. En general las formas de obtener carburos son las siguientes: controlando la velocidad de enfriamiento, agregar elementos formadores de carburos como el Cr, Mo, B, Mn, Ti al baño líquido [3, 4] y disminuir el uso de elementos grafitizantes como el C y Si. Los carburos obtenidos al

controlar la velocidad de enfriamiento son poco estables por lo que no es recomendable el depender únicamente de este factor; se pueden eliminar la mayoría de los elementos grafitizantes pero el Si es indispensable en los hierros nodulares ya que este crea centros de nucleación para la precipitación de grafito por lo que se puede disminuir el contenido pero no eliminarlo de la fundición.

1.3 Hierro CADI (Carbide Austempered Ductil Iron)

Desde que el hierro nodular introdujo al mercado en los años 50's su aplicación se fue ampliando progresivamente, debido a sus buenas propiedades y su relativo bajo costo de producción, por ello fue altamente estudiado y se desarrollaron variantes. En los años 70's se llegó a una nueva variante de los hierros nodulares y este fue el hierro ADI (Austempered Ductil Iron), el hierro ADI es un hierro nodular con un tratamiento de austemperizado, este hierro se caracteriza por tener nódulos de grafito en una matriz de ausferrita (ferrita acicular y austenita estable con altos contenidos de carbono); este hierro tiene un buen balance en propiedades como resistencia al desgaste, resistencia a la tensión, resistencia al impacto, resistencia a la fatiga y tenacidad. Al tener una buena resistencia al desgaste se pensó en aumentarla para el uso en sistemas que necesitan esta propiedad, una manera es teniendo la presencia de partículas o fases duras en el material [5], de esta manera se promovió la formación carburos a la matriz del hierro ADI para aumentar la resistencia al desgaste, el resultado fue la obtención de un material con una elevada resistencia al desgaste y aceptable tenacidad; al ser un hierro ADI con carburos se le dio el nombre de hierro CADI, por sus siglas en inglés (Carbide Austempered Ductil Iron). La microestructura del hierro CADI es similar a la del hierro ADI, por los

nódulos y la matriz de ausferrita, la diferencia entre ambos es la presencia de carburos.

El hierro CADI al ser un hierro nodular con un tratamiento térmico de austemperizado y con carburos en la matriz, es necesario que el hierro previo al tratamiento térmico tenga una alta fracción de carburos y que estos sean estables durante el tratamiento térmico de austemperizado para evitar su disolución.

1.3.1 Principales Ventajas y Desventajas

Las principales ventajas y desventajas de los hierros CADI son:

Ventajas [4]

- a. Excelente combinación de resistencia a la abrasión y una buena tenacidad.
- b. Más resistente al desgaste que un hierro ADI grado 5.
- c. Más barato y tenaz que un hierro blanco con 18%Cr.
- d. Puede remplazar al acero al Mn con menor o igual costo.
- e. Puede competir en desempeño y es más barato que los hierros blancos resistentes a la abrasión.

Desventajas

- a. Al agregar elementos aleantes caros puede incrementar su costo.
- b. En el tratamiento de austemperizado se debe de tener buen control del proceso para no disolver los carburos.
- c. Tiene poca maquinabilidad.

1.3.2 Disolución de Carburos

Ya se mencionó que los carburos pueden formarse de tres maneras: por velocidades de enfriamiento elevadas, disminuyendo la cantidad de elementos grafitizantes, C y Si, y mediante la adición de elementos formadores de carburos, como el Cr, Mo, Ti, etc.

Ha sido demostrado que los carburos ledeburíticos formados por altas velocidades de enfriamiento o disminuyendo los elementos grafitizantes (carburos de baja aleación) tienden a disolverse en la etapa de austenizado (etapa del tratamiento de austemperizado); los carburos aleados, formados por la adición de elementos formadores de carburos, son más estables durante este proceso [6], condición que le da una ventaja al uso de aleantes blanqueadores.

1.3.3 Mercado potencial de los hierros CADI

Actualmente la tendencia de los hierros CADI en aplicaciones comerciales es:

- Sustituye hierros blancos a menor costo
- Sustituye aceros al Mn con igual o menor costo
- Amplias aplicaciones en la agricultura, minería, maquinaria para la construcción, etc.

Capítulo II Fundamentos Teóricos

2. Introducción

Los hierros colados pueden ser fácilmente confundidos con los aceros debido que ambas son aleaciones Fe-C, la diferencia entre estas aleaciones es el contenido de C presente, en los hierros colados el contenido de C es entre 2% y 4.5%, además de los altos contenidos de Si.

2.1 Diagramas de fases.

Un Diagrama de fases es la representación gráfica de las fases presentes entre dos o más elementos, al ir incrementando los elementos incrementa la complejidad del diagrama; este está en función de concentración y temperatura. En este caso es de interés el diagrama Fe-C el cual tiene dos variantes el Fe-C_{grafito} (diagrama estable) y el Fe-Fe₃C (diagrama metaestable).

Los diagramas de fases son construidos al equilibrio termodinámico, es decir que los cambios de temperatura ocurren en un lapso de tiempo infinitamente grande.

2.1.1 Diagrama de fases Fe-C_{grafito}

El diagrama Fe-C_{grafito}, Figura 2.1.1, es necesario en el estudio de hierros colados ya que a diferencia de los aceros en los hierros colados grises y nodulares se tiene la presencia de grafito en su estructura, ya sea en forma de hojuelas, nódulos o vermículos. Para la utilización de este diagrama es necesario que la aleación tenga un alto contenido de silicio y que el enfriamiento sea relativamente lento.

Cuando nos situamos en la parte superior del diagrama Fe-C_{grafito} se tiene una solución líquida homogénea compuesta de C disuelto en Fe, pero en realidad no es solución homogénea, es más un coloide en el que se encuentran pequeños grupos de moléculas de carbono, estos grupos

de moléculas de carbono se pueden disolver por completo si se eleva la temperatura del baño líquido y se mantiene durante períodos de tiempo prolongados en este estado; cuando el carbón se mantiene en este sobrecalentamiento sufre diferentes cambios, de su estado de grupos de carbonos pasa solo moléculas de carbono (C_6) posteriormente a moléculas C_2 y finalmente a carbono atómico. En términos de producción de hierros colados esto no es factible ya que se elevarían los costos en esta etapa de sobrecalentamiento, por otra parte los átomos de carbono son difíciles de nuclear en grafito, formar Fe_3C y nuclear y crecer en austenita [7].

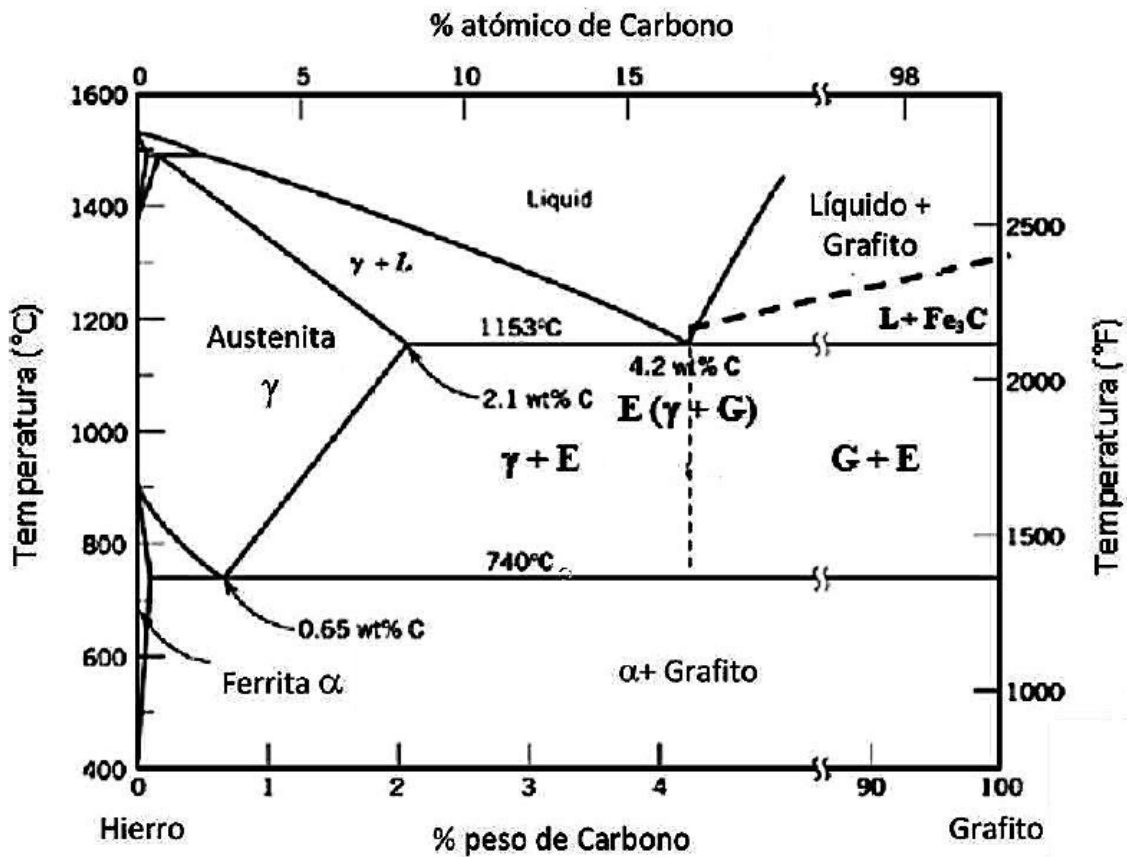


Figura 2.1.1 Diagrama de equilibrio Fe-C ó diagrama estable, en donde se aprecia gráficamente las fases a diferentes temperaturas y composición. [8]

2.1.2 Diagrama de fases Fe-Fe₃C

El diagrama Fe- Fe₃C ó metaestable, Figura 2.1.2 tiene un uso más frecuente en los aceros ya que estos no presentan C_{grafito} si no que el C se encuentra presente en forma de cementita. Este diagrama y el de Fe-C_{grafito} son muy similares, presentan las mismas líneas de transformación solo un poco desplazadas en composición y temperatura.

Ya que los hierros colados y los aceros no son simplemente aleaciones de Fe-C, sino que también presentan otros aleantes como el Si, Cr, Mn, Mg, etc. se debería de usar diagramas al menos ternarios, es decir diagramas que presentan más de dos aleantes. Una simplificación importante a este problema de los diagramas ternarios es el uso del término conocido como C_e o carbón equivalente que es un ajuste al diagrama Fe-Fe₃C cuando la aleación contiene Si; este término toma en cuenta el efecto que tiene la cantidad de Si en la aleación, es decir representar una aleación ternaria (Fe-C-Si) en un diagrama binario (Fe-C ó Fe-Fe₃C).

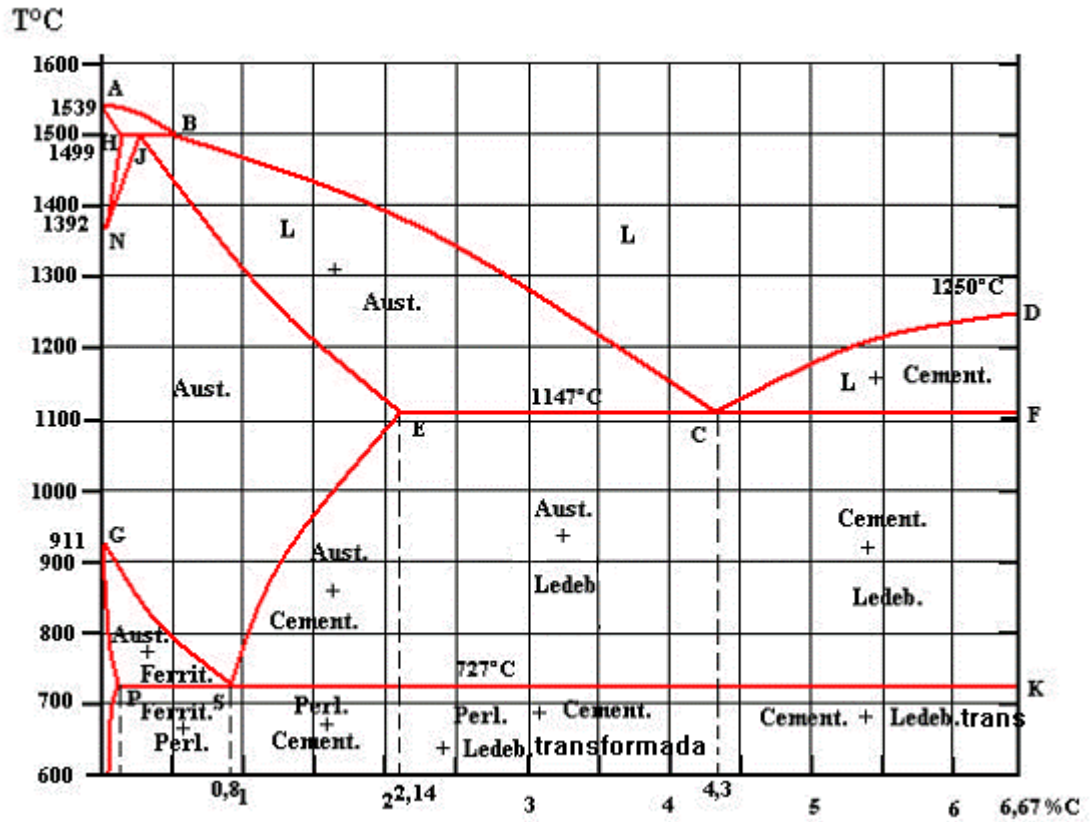


Figura 2.1.2 Diagrama Fe-Fe₃C ó diagrama metaestable, en donde se aprecia gráficamente las fases a diferentes temperaturas y composición. Donde el eutéctico se llama ledeburita y es una mezcla $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$. [9]

2.2 Fases y Microconstituyentes de los Hierros Colados

2.2.1 Fases y Microconstituyentes del Diagrama Fe-C_{grafito} [6, 10]

Las principales fases de los hierros colados son:

Grafito

Es una forma elemental de Carbono. Se presenta en estado libre y ejerce una influencia muy importante en las propiedades y características microestructurales, estas están ligadas a la morfología, tamaño y distribución del carbono. En fundiciones grises se presenta en forma de hojuelas, mientras que en las fundiciones nodulares o dúctiles se presenta en forma de nodulos.

Ferrita (α)

La ferrita es hierro alfa, es decir hierro casi puro, este puede tener en solución pequeñas cantidades de Si, P, S u otras impurezas. Es el más blando de los constituyentes de las aleaciones ferrosas. En las fundiciones la ferrita contiene disuelta una mayor cantidad de Si lo cual aumenta la dureza y resistencia de la ferrita.

Austenita (γ)

Es una solución sólida de carbono o carburo de hierro en hierro gama (γ). Su contenido de carbono es variable desde 0 a 1.7%. Esta fase se encuentra a temperaturas altas, superiores a A_{c3} ó A_{cm} ; por ello no se puede encontrar a temperatura ambiente a menos que el enfriamiento de aceros de alta aleación o alto contenido de carbono sea rápido.

2.2.2 Fases y Microconstituyentes del Diagrama Fe-Fe₃C [6, 10]

Ledeburita

Es el constituyente eutéctico que se forma durante el enfriamiento de las fundiciones 1145 °C. Está formada por 52% de cementita y 48% de austenita saturada. Esta no existe a temperatura ambiente debido a que durante el enfriamiento se transforma en ledeburita transformada.

Pseudoledeburita ó Ledeburita transformada

Esta es producto de la transformación de la ledeburita a la temperatura eutectoide (727°C). En general está formada por perlita y cementita.

Cementita

La cementita es carburo de hierro, Fe₃C, contiene 6.67% de C y 93.33% de Fe. Es el microconstituyente más duro de las aleaciones ferrosas.

Perlita

Es un constituyente eutectoide formado por capas alternadas de ferrita (hierro alfa) y cementita o carburo de hierro (Fe₃C); estas capas son en realidad láminas cuya distancia entre ellas varía dependiendo de la velocidad de enfriamiento. La perlita aparece en general en los enfriamientos lentos

2.2.3 Estructuras de Hierros Formadas por Tratamiento Isotérmico.

Ausferrita

Esta estructura se obtiene mediante un tratamiento térmico, el nombre de ausferrita se toma de su microestructura y define en primer lugar, a la matriz de austenita y en segundo lugar, a las finas agujas de ferrita

que están dispersas dentro de la matriz de austenita. Esta matriz de microestructura única, que poseen los hierros nodulares austemperizados, le confiere al material alta resistencia mecánica, alta tenacidad y alta resistencia al desgaste

2.3 Variables que afectan la microestructura del hierro nodular

2.3.1 Efecto del balance Carbono-Silicio [10]

La formación de los microconstituyentes en las fundiciones nodulares y grises son diferentes a las de los aceros. Esto es debido principalmente al alto contenido de silicio; cuando el contenido de silicio es mayor a 0.6% contribuye a la formación de grafito que modifica la microestructura y propiedades de las aleaciones hierro-carbono.

En el pasado se investigaron los efectos del carbono y silicio en las fundiciones, uno de los primeros en señalar este efecto conjunto fue Maurer quien construyó el diagrama de la figura 2.5.1, posteriormente otros investigadores estudiaron con mayor profundidad esta relación y se fueron haciendo correcciones al diagrama de Maurer, en la actualidad el diagrama más aceptado es el que fue elaborado por Norbury que se muestra en la figura 2.5.2. Cabe mencionar que estos diagramas son elaborados para un espesor determinado en este caso ambos diagramas mostrados, figura 2.5.1 y figura 2.5.2, fueron obtenidos para un espesor de 30mm y 25mm respectivamente.

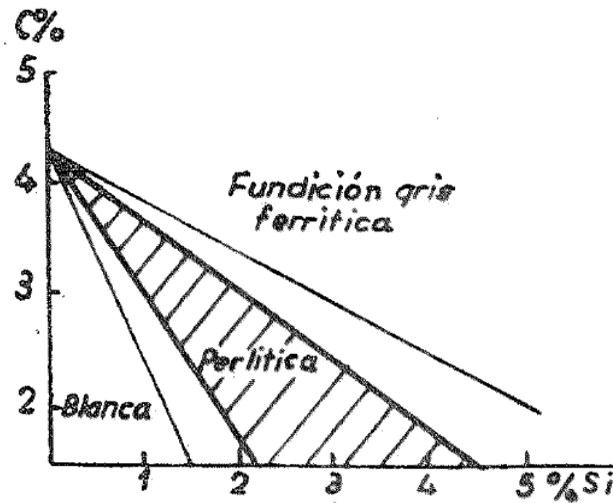


Figura 2.5.1. Diagrama de Maurer, predice el tipo de fundición que se obtendrá dependiendo del %C y %Si en la aleación con un espesor de 30mm [10].

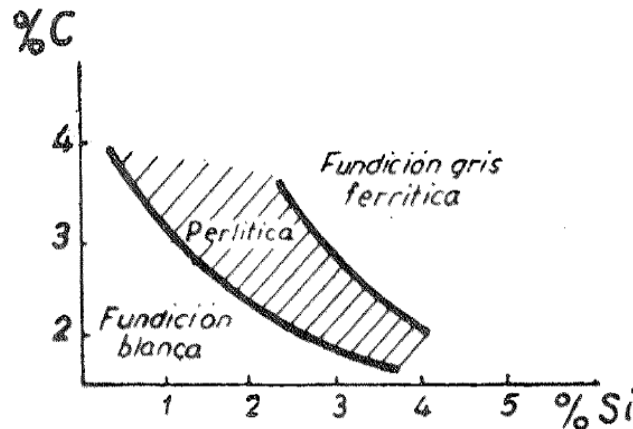


Figura 2.5.2. Diagrama de Norbury para espesores de 25mm, diagrama similar al de Maurer pero con una tendencia diferente, este diagrama es más aceptado debido a que se realizaron estudios más profundos en su elaboración[10].

2.3.2 Velocidad de Enfriamiento

La velocidad de enfriamiento es un factor importante que puede determinar el estado final en que se encontrará el carbono en el hierro colado. Existen dos formas de modificar la velocidad de enfriamiento, una es el espesor de la pieza, con grandes espesores se obtienen velocidades de enfriamiento lentas, el otro es el material del molde,

moldes metálicos provocan que la velocidad de enfriamiento sea más rápida.

Con altas velocidades de enfriamiento se produce una fundición blanca, es decir el carbono se encuentra formando cementita debido a que el carbono no tuvo el tiempo necesario para formar núcleos de carbono. Con bajas velocidades de enfriamiento el carbono se encuentra en forma de grafito debido a que el carbón disuelto en la fase líquida y el presente en la austenita tiene más tiempo de difundir hacia los centros de nucleación formados por el inoculante.

2.3.3 Elementos de aleación

Al igual que los aceros los hierros colados no son solo aleaciones Fe-C-Si, estas también contienen otros aleantes, estos aleantes son adicionados para mejorar alguna propiedad de las fundiciones, ya sea dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, etc.

La adición de elementos aleantes conlleva cambios en una aleación, básicamente son dos, cambio de la microestructura, lo cual provoca el cambio en las propiedades mecánicas, y el desplazamiento de los puntos críticos; en el caso de los hierros colados se presenta el fenómeno de la formación de carburos o la precipitación de grafito.

2.4 Efecto de los aleantes en la solidificación.

Como se mencionó anteriormente los elementos aleantes provocan la precipitación de carburos, usando esta premisa se puede agrupar algunos de los aleantes de los hierros colados en dos grupos los formadores de carburos o blanqueadores y a los grafitizantes. Los elementos que entran en estos dos grupos no tienen el mismo impacto dentro de la aleación, es decir no todos los elementos grafitizantes o blanqueadores tienen la misma facilidad de blanquear o promover la

formación de grafito; dicho de otra manera no todos tienen el mismo poder blanqueador o poder grafitizante, esto se muestra en la Figura 2.6.1.

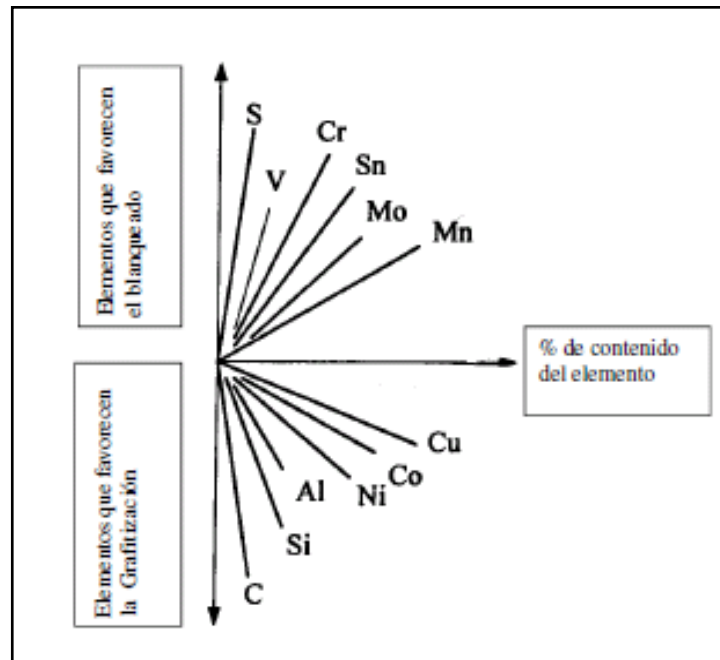


Figura 2.6.1. Poder blanqueador o grafitizante de diferentes elementos de aleación en hierros colado, donde se observa que los elementos con una pendiente más elevada son los que tienen un poder grafitizante o blanqueador mayor.

Los elementos grafitizantes o blanqueadores tienen un efecto en el diagrama Fe-C_{grafito} y Fe-Fe₃C, este efecto es desplazar las temperaturas eutécticas de ambos diagramas, sí la diferencia entre estas temperaturas disminuye se promueve el blanqueado mientras que sí se incrementa la diferencia entre las temperaturas se promueve la precipitación de grafito [9, 10]. En la figura 2.6.2 se muestra el efecto

que tienen los elementos aleantes en la temperatura eutéctica de ambos diagramas.

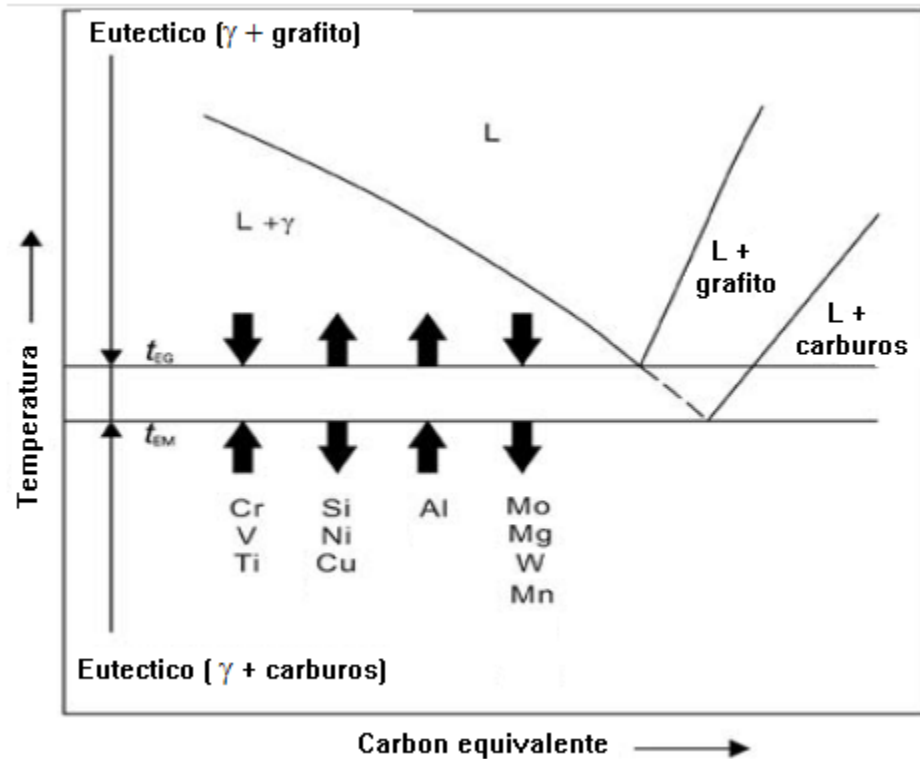


Figura 2.6.2. Efecto cualitativo de los elementos aleantes en las temperaturas eutécticas del diagrama Fe-C y Fe-Fe₃C [7]

Algunos elementos tienen un fuerte efecto sobre la temperatura eutéctica, en consecuencia la precipitación de grafito, por lo que pequeñas cantidades pueden provocar un cambio significativo en la microestructura de un hierro, por ello en 2005 se llevo a cabo un estudio que determina el efecto cuantitativo de estos aleantes en la temperatura eutéctica, mostrando como resultados una diferencia en las

temperaturas eutécticas dependiendo del contenido de un aleante esto se representa en la figura 2.6.3.

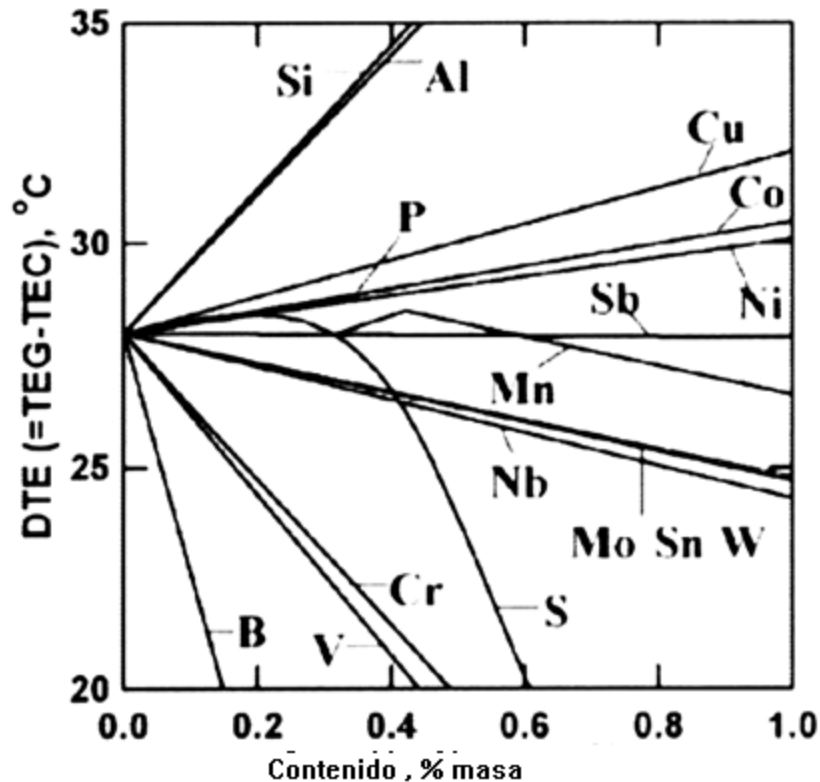


Figura 2.6.3. Efecto de los elementos aleantes en las temperaturas eutécticas del diagrama Fe-C y Fe₃C, este efecto se representa con una diferencia de temperaturas dependiendo del contenido del aleante, en donde los blanqueadores se encuentran en la parte inferior del gráfico y los grafitizantes en la parte superior [13].

- *DTE = Diferencia de temperaturas eutécticas
- *TEG= Temperatura eutéctica del diagrama Fe-C
- *TEC= Temperatura eutéctica del diagrama Fe-Fe₃C

Los elementos aleantes también tienen otros beneficios, a continuación se mencionan.

C.- El tamaño y número de nódulos de grafito formado durante la solidificación son influenciados por la cantidad de carbono, además del número de núcleos formados durante la práctica de la inoculación. El carbono tiene efecto en la fluidez y de las características de la contracción del metal fundido y debido que durante la solidificación no entra en solución pero si en suspensión, se reduce la fluidez.

Si.- Es un potente grafitizante, por ello se utiliza en el proceso de inoculación. Si se tiene en grandes cantidades es promotor de la ferrita, además, al ir incrementando el porcentaje en peso de Si en la aleación esta va aumentando su maquinabilidad. Reduce la solubilidad del carbón en el punto eutectico y en la austenita.

Cu.- El cobre tiene un ligero efecto favorable en la grafitización, no obstante ha esto es utilizado debido a que es un estabilizador de la perlita lo que produce un aumento en la dureza de la matriz.

Cr.- Aumenta la profundidad del endurecimiento, es decir de blanqueo o formación de carburos ledeburíticos. Así mismo, aumenta la resistencia a altas temperaturas y evita la corrosión, debido a su capacidad de formar carburos se utiliza en revestimientos o recubrimientos duros de gran resistencia al desgaste, como émbolos, ejes, etc.

Mo.- Es usado para incrementar la templabilidad en secciones pesadas, aumenta la austemperabilidad y forma carburos eutécticos en consecuencia reduce la ductilidad y maquinabilidad. Aumenta la temperatura de austenización.

Mg.- La nodularidad depende de la cantidad de magnesio residual presente en la composición química final.

El aporte de magnesio en el tratamiento consta de varias etapas:

1.- Cuando el magnesio es agregado al metal líquido, actúa como desoxidante y desulfurante del metal en combinación con el oxígeno y el azufre que se encuentra en solución, el resultado de la desoxidación y desulfuración es la producción de óxido de magnesio y sulfuro de magnesio, los cuales presenta baja solubilidad en el metal y baja densidad.

2.- El magnesio es altamente volátil (comparado con la temperatura del tratamiento), su punto de ebullición es de 1170°C, por lo que el contenido de magnesio disminuye con el aumento de la temperatura.

3.- También es excelente modificador de la forma del grafito (magnesio residual), conforme aumenta la cantidad de magnesio en el metal líquido la estructura o forma del grafito sufre cambios pasando primero desde el grafito en forma de hojuelas a la forma vermicular y finalmente a la forma esferoidal. El cambio en la morfología del grafito puede predecirse en función del Magnesio residual, si se tiene cantidades menores a 0.01% el grafito se presenta en forma de hojuelas, en caso de que el magnesio residual se encuentre entre 0.01% y 0.03% la forma de grafito es vermicular, más allá de 0.035% de magnesio residual se encuentra el grafito en forma de esferoides

Mn.- El manganeso es un elemento que estabiliza la perlita, es por ello que se usa para el control de la matriz que se quiere obtener pero si su contenido es muy grande (5-6%) tiene un efecto de promotor de carburos [3]. También disminuye la temperatura de austenización.

Capítulo III Desarrollo Experimental

3.1 Reconocimiento de las piezas

Se recibieron tres bloques tipo "Y" con diferentes composiciones. Por el acabado poroso de los bloques se sabe que son provenientes de colada y se utilizaron moldes de arena en verde.

Al medir las dimensiones de los bloques tipo "Y" y estas concuerdan con las especificaciones en la norma ASTM A897-M se concluye que esta norma fue utilizada para la fabricación de los bloques. En la figura 3.1 se muestran las dimensiones especificadas en la norma ya mencionada.

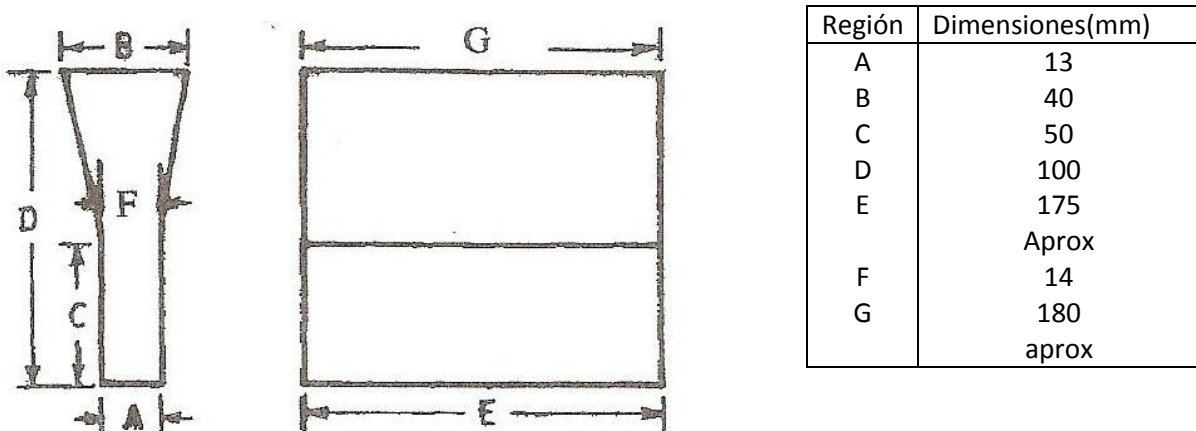


Figura 3.1. Geometría y dimensiones del bloque "Y". Siguiendo la norma ASTM A897-M, Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings.

3.2 Composición Química

En el trabajo que se presenta se utilizaron tres diferentes composiciones de hierro nodular, en estas tres diferentes aleaciones los únicos elementos diferentes en composición fueron el Cr y Mo; dicho esto se

llevaron a cabo tres diferentes fusiones para la obtención de cada una de las aleaciones. En la tabla 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran la composición química de las aleaciones obtenidas.

Tabla 3.1 Composición química de la aleación 1, relación Cr/Mo: 1/1

%C	%Si	%P	%S	%Mn	%Mg	%Cr	%Mo	%Fe
3.115	>4.320	0.0154	0.0229	0.4983	>0.144	0.914	0.905	Bal.

De la composición química puede obtenerse el carbón equivalente ($C_{eq} = \%C + 0.3\%Si$) es de 4.55.

Tabla 3.2 Composición química de la aleación 2, relación Cr/Mo: 1/0.5

%C	%Si	%P	%S	%Mn	%Mg	%Cr	%Mo	%Fe
2.914	>4.320	0.0102	0.0058	0.513	>0.144	0.896	0.426	Bal.

De la composición química puede obtenerse el carbón equivalente ($C_{eq} = \%C + 0.3\%Si$) es de 4.35.

Tabla 3.3 Composición química de la aleación 3, relación Cr/Mo: 2/0

%C	%Si	%P	%S	%Mn	%Mg	%Cr	%Mo	%Fe
3.30	2.81	<0.01	<0.002	0.47	0.07	2.20	<0.05	Bal.

De la composición química puede obtenerse el carbón equivalente ($C_{eq} = \%C + 0.3\%Si$) es de 4.24.

3.3 Caracterización metalográfica.

Una vez fabricados los bloques tipo "Y" se seccionaron en dos partes separando el alimentador de la base de la pieza, donde la base es la sección delimitada por la letra C en la figura 3.1. Posteriormente a la parte inferior se le realizaron cuatro cortes para obtener dos piezas o segmentos de trabajo, A ubicada en el centro y B ubicada en la orilla de la pieza. Los cortes se muestran en la *Figura 3.2*.

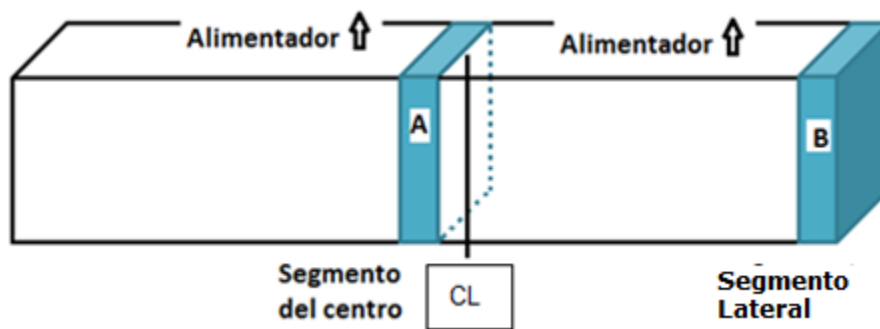


Figura 3.2 Cortes realizados a pieza tipo bloque "Y", la zona A (segmento del centro) y la zona B (segmento lateral), para evaluación de la fracción de carburos.

A las probetas de trabajo se les realizó una preparación metalográfica convencional, posteriormente se observaron y tomaron imágenes de las seis piezas de trabajo, dándole la siguiente nomenclatura Aleación 1A, Aleación 1B (siendo el numero el numero de aleación y la letra la probeta de trabajo), Aleación 2A, Aleación 2B, Aleación 3A y Aleación 3B, primero sin ataque para caracterizar el hierro nodular, posteriormente se ataco con nital 3 para revelar la matriz y finalmente se ataco con un reactivo preparado con: HNO_3 10mL, HF 4mL y $\text{H}_2\text{O}_{\text{dest}}$ 86mL para revelar los carburos y de esta manera cuantificar los mismos. Las zonas evaluadas se muestran en la Figura 3.3

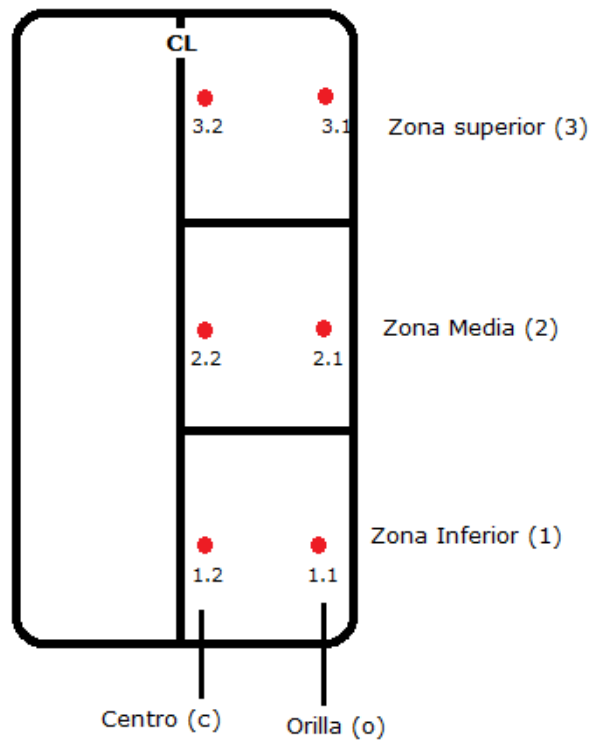


Figura 3.3 Segmentos cortados del lingote original (A segmento localizado en el centro del lingote y B segmento lateral). Identificación de las zonas analizadas (1-inferior, 2-media y 3-superior) para las posiciones orilla (X.1) y centro (X.2).

Capítulo IV Resultados y Discusión

4.1 Resultados de la aleación 1 (relación Cr/Mo = 1/1)

4.1.1 Caracterización del hierro nodular

En la tabla 4.1 se presenta el análisis microestructural de la aleación 1, aleación con una relación Cr/Mo de 1/1, en que se toman en cuenta ambas secciones A y B, de igual manera ya que este análisis se realizó con las probetas sin ataque y atacadas con nital por lo que se decidió ignorar en esta parte los carburos formados ya que no se aprecian ni se logran cuantificar con estos ataques.

Tabla 4.1. Características microestructurales promedio del hierro nodular para el bloque "Y" de la aleación 1 (relación de Cr/Mo= 1/1) obtenidas mediante la norma de la ASTM A247-67, Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings.

% Nodularidad	Tamaño de Nódulos	Densidad de Nódulos
95	7.5	200 nódulos/mm ²
%Ferrita	%Perlita	
0	100	

En la figura 4.1 se muestran imágenes representativas de la probeta analizada, correspondiente al hierro nodular aleado con una relación Cr/Mo de 1/1. Donde a) fue utilizada para determinar la nodularidad, densidad y tamaños de nódulos; b) para revelar la matriz y c) para revelar y cuantificar los carburos, zona clara.

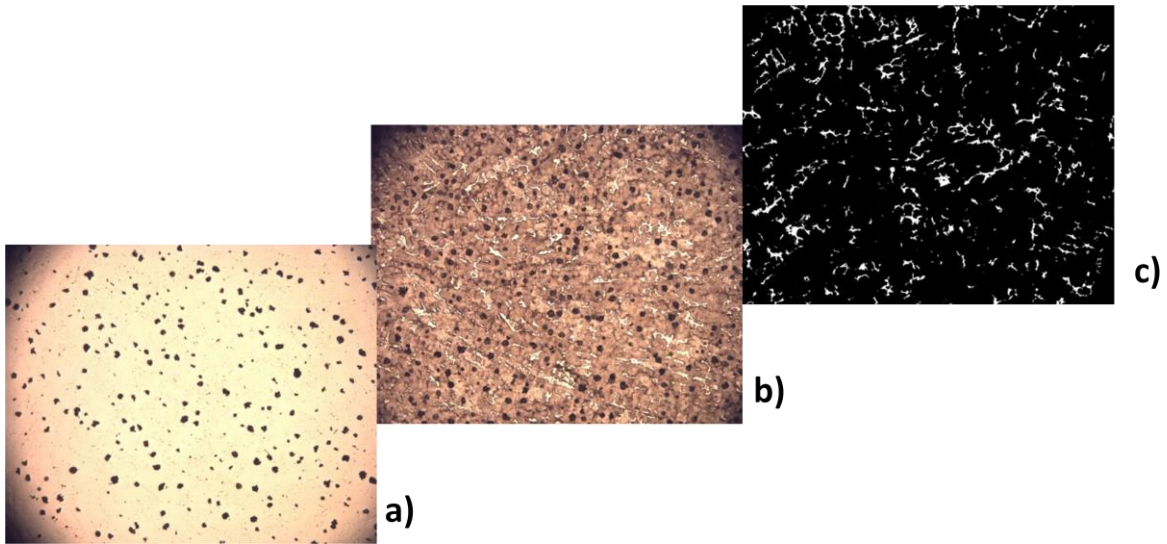


Figura 4.1. Hierro nodular aleado con una relación Cr/Mo de 1/1. a) sin ataque. b) atacado con nital3. c) obscurecida para evaluar la fracción de carburos.

4.1.2 Conteo de carburos.

En la figura 4.2 se muestra la distribución de los carburos del hierro nodular aleado con una relación de Cr/Mo: 1/1 en el segmento A del bloque tipo "Y" tomando como referencia los puntos ya mencionados en la figura 3.3, además en cada punto se hace mención al porcentaje de carburos locales.

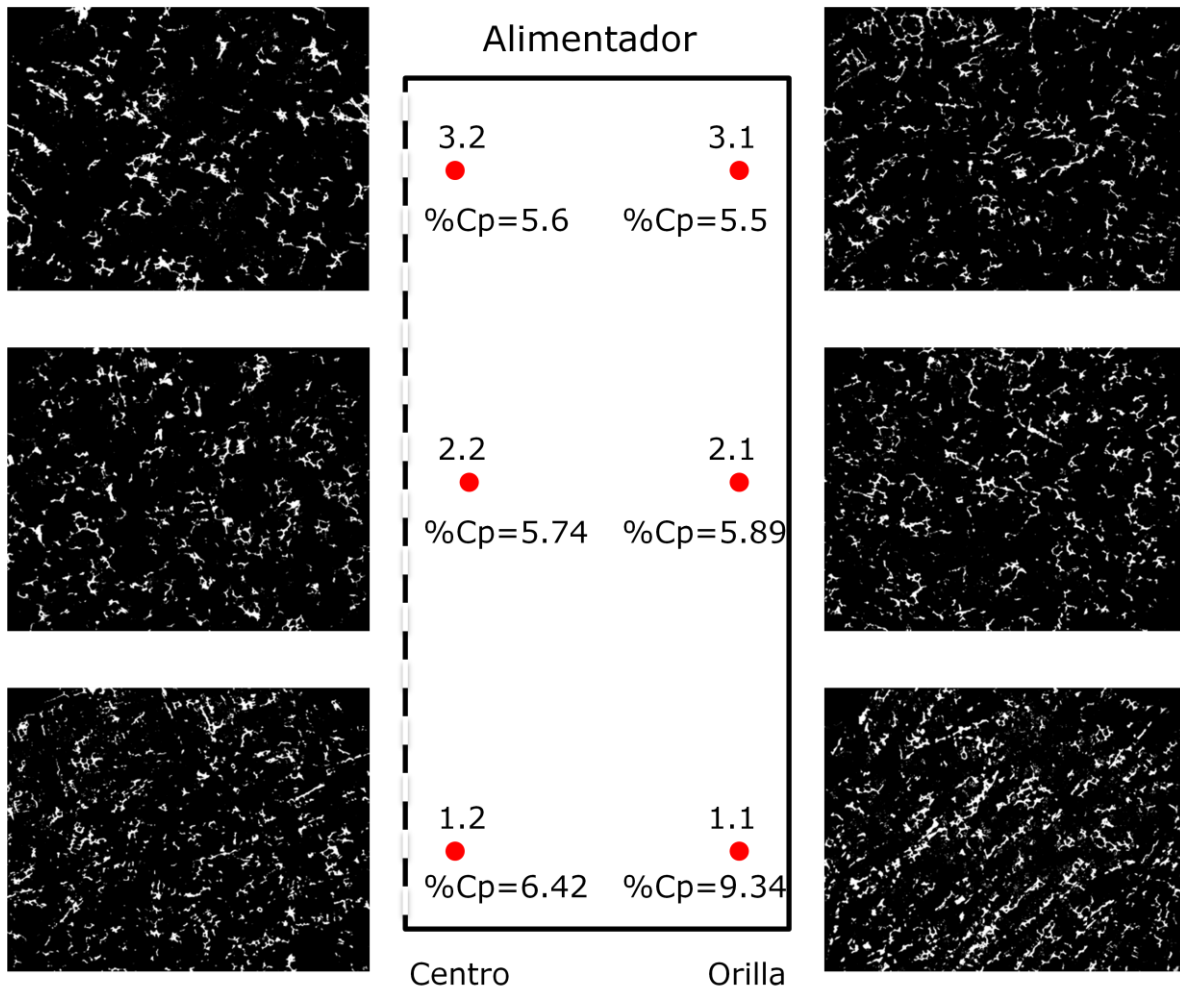


Figura 4.2. Microestructuras mostrando el mapeo de la distribución de carburos en las diferentes zonas del segmento del centro de la pieza, para la aleación con relación Cr/Mo= 1/1; el contenido promedio de carburos del segmento es de 6.41. %Cp= porcentaje de carburos promedio de las imágenes analizadas en ese punto.

Con relación a la figura 4.2 cabe mencionar que en la posición 3.2 se esperaría un contenido menor con relación al punto 3.1 ya que el punto 3.2 tiene una velocidad de enfriamiento menor, el punto 3.2 tiene un contenido de carburos debido al efecto de la microsegregación.

En la tabla 4.2 se presentan los datos obtenidos del hierro nodular aleado con Cr/Mo con una relación 1/1 de la sección central del bloque tipo "Y".

Tabla 4.2. % de carburos en la aleación 1, segmento A (centro). Se analizaron tres imágenes (1,2,3) por posición X.1, X.2

	Posición	% de Carburos			%Carburos promedio	ΔV_{pp}	ΔV_p ←	ΔVis ↑
		1	2	3				
Zona inferior	1.1	10.32	9.35	8.37	9.34	1.95	2.92	$\Delta Vis_{centro} = 0.82$
	1.2	5.82	6.54	6.90	6.42	1.08		
Zona Media	2.1	6.13	6.82	4.72	5.89	2.1	0.15	$\Delta Vis_{orilla} = 3.84$
	2.2	6.07	5.51	5.63	5.74	0.56		
Zona Superior	3.1	5.12	6.00	5.37	5.50	0.36	-0.10	
	3.2	5.16	5.79	5.85	5.60	0.69		

ΔV_{pp} = es la variación entre el máximo y mínimo de carburos en las tres cuantificaciones puntuales (1, 2, 3). ΔV_p = variación de la orilla al centro de la pieza en las zonas inferior, media y superior. ΔVis es la variación de carburos de la parte inferior de la pieza a la superior que es la que está unida al alimentador y solidifica más lentamente

En la tabla 4.2 resalta el valor de ΔV_p de la zona superior ya que es negativo, este valor se presenta de esta manera ya que el cálculo se realizó teniendo en cuenta las velocidades de enfriamiento, mayores velocidades de enfriamiento mayor contenido de carburos, por lo que las zonas con valores negativos representan zonas con microsegregación.

En la figura 4.3 se muestra la distribución de los carburos del hierro nodular aleado con una relación de Cr/Mo: 1/1 en el segmento B del bloque tipo "Y" tomando como referencia los puntos ya mencionados en la figura 3.3, además en cada punto se hace mención al porcentaje de carburos locales.

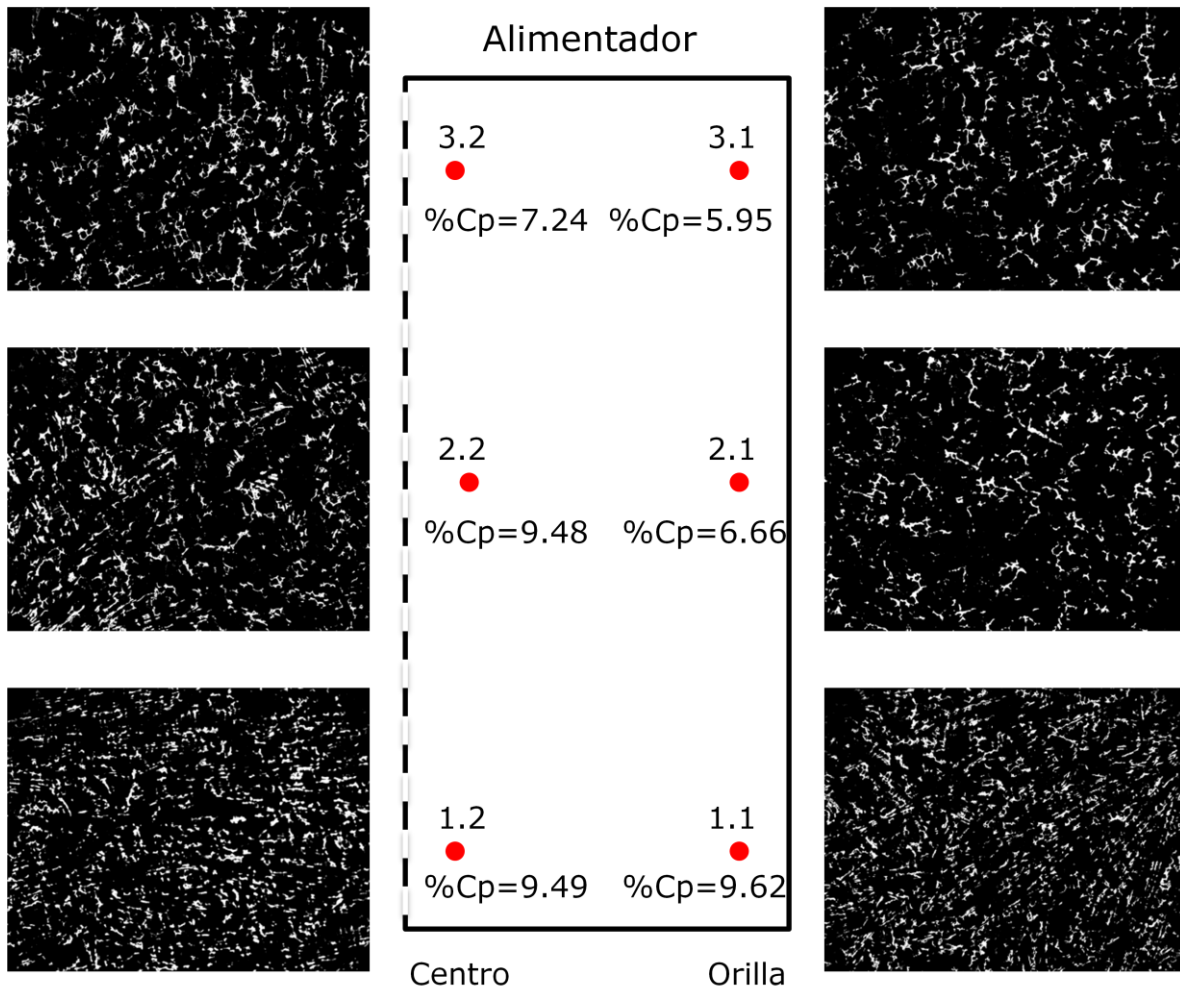


Figura 4.3. *Microestructuras mostrando el mapeo de la distribución de carburos en las diferentes zonas del segmento lateral de la pieza el cual presenta un contenido promedio de carburos de 8.07%, para la aleación con relación Cr/Mo= 1/1.*

En la figura 4.3 se observa nuevamente los efectos de la microsegregación teniendo una cantidad mayor de carburos en la zona 3.2 que es la que tiene la velocidad de enfriamiento más lenta debido a que esta en junto al alimentador de igual manera en el punto 2.2.

En la tabla 4.2 se presentan los datos obtenidos del hierro colado aleado con Cr/Mo con una relación 1/1 del segmento B del bloque tipo "Y".

Tabla 4.3. % de carburos en la aleación 1, segmento B (orilla). Se analizaron tres imágenes (1, 2, 3) por posición X.1, X.2

	Posición	% de Carburos			%Carburos promedio	ΔV_{pp}	ΔV_p ←	ΔVis ↑
		1	2	3				
Zona inferior	1.1	10.53	8.48	9.85	9.62	2.05	0.20	$\Delta Vis_{centro} = 2.25$
	1.2	8.23	10.13	10.1	9.42	1.90		
Zona Media	2.1	5.94	7.48	6.57	6.66	1.54	-	$\Delta Vis_{orilla} = 3.67$
	2.2	8.74	11.53	8.17	9.48	3.36	2.82	
Zona Superior	3.1	6.18	5.81	5.86	5.95	0.37	-	$\Delta Vis_{orilla} = 3.67$
	3.2	5.77	7.45	8.51	7.24	2.74	1.29	

En la Tabla 4.3 se presentan dos casos de valores negativos, nuevamente efectos de la microsegregación, el que se presenten más casos en esta sección de deben a que la microsegregación se ve afectada por la velocidad de enfriamiento, con velocidades de enfriamiento más elevadas la microsegregación se va incrementando.

Teniendo en cuenta ambos segmentos se cálculo un porcentaje de carburos total de la aleación el cual es de: 7.23.

En la figura 4.4 se presenta gráficamente la variación de los carburos de la aleación 1 de ambas secciones, únicamente se muestran los resultados de la zona inferior y superior. En la gráfica las zonas con una pendiente negativa son las zonas que presentan microsegregación.

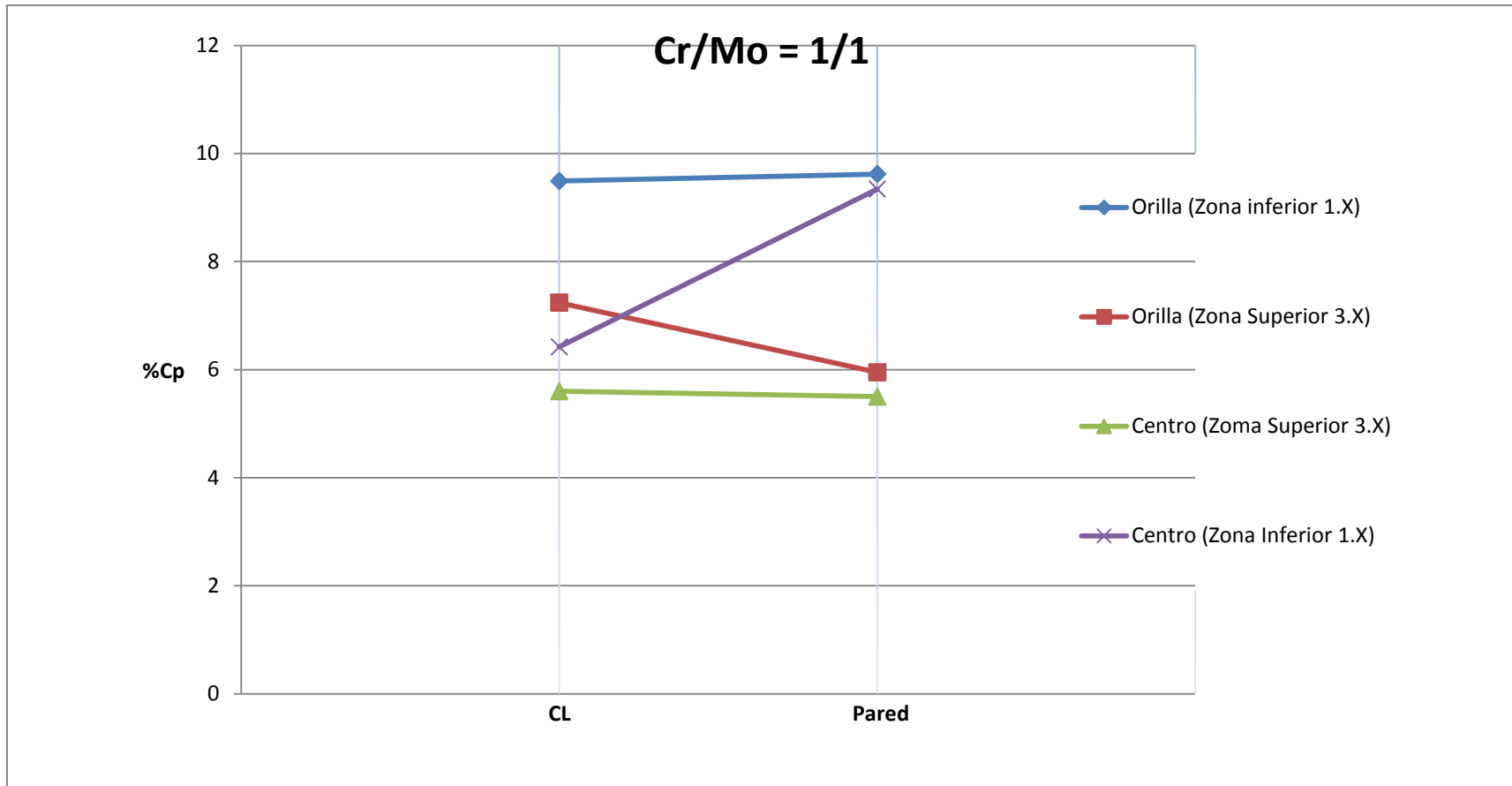


Figura 4.4 % de carburos contra el espesor de la pieza para la aleación con relación Cr/Mo= 1/1

4.2 Resultados de la aleación 2 (relación Cr/Mo= 1/0.5)

4.2.1 Caracterización del hierro nodular

En la tabla 4.4 se presenta el análisis microestructural de la aleación 2, aleación con una relación Cr/Mo de 1/0.5, en que se toman en cuenta ambos segmentos A y B, de igual manera ya que este análisis se realizó con las probetas sin ataque y atacadas con nital por lo que se decidió ignorar en esta parte los carburos formados ya que no se aprecian ni se logran cuantificar con estos ataques.

Tabla 4.4 Características microestructurales promedio del hierro nodular para el bloque "Y" de la aleación 2 (relación de Cr/Mo= 1/0.5) obtenidas mediante la norma ASTM A247-67.

%Nodularidad	Tamaño de Nódulos	Densidad de Nódulos
95	7.5	250 nodulos/mm ²
%Ferrita	%Perlita	
0	100	

En la figura 4.5 se muestran imágenes representativas de la probeta analizada, correspondiente al hierro nodular aleado con una relación Cr/Mo de 1/0.5. Donde a) fue utilizada para determinar la nodularidad, densidad y tamaños de nódulos; b) para revelar la matriz y c) para revelar y cuantificar los carburos, zona clara.

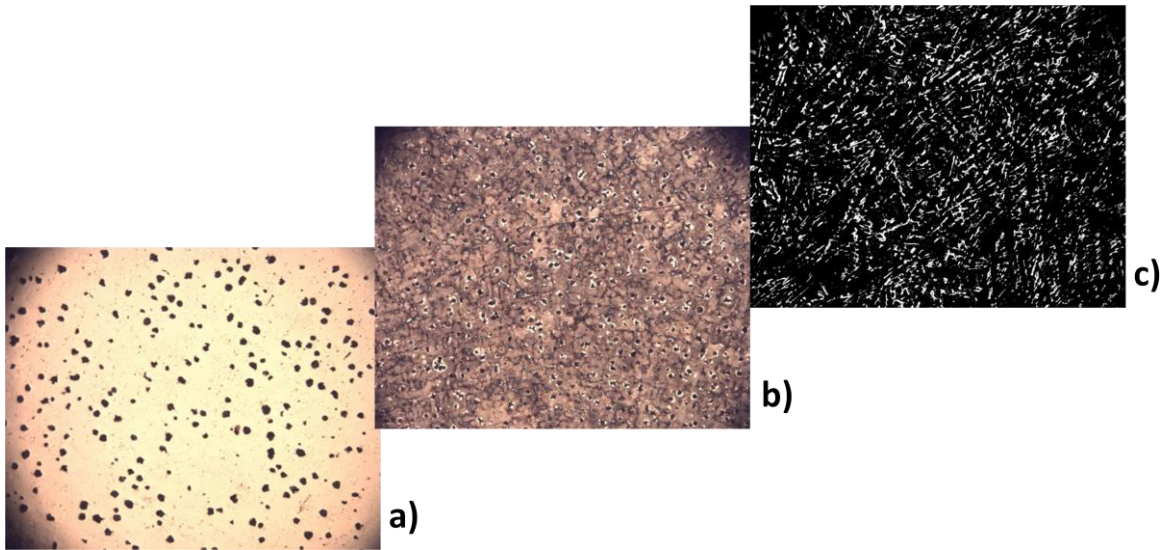


Figura 4.5 Hierro nodular aleado con una relación Cr/Mo de 1/0.5. a) sin ataque. b) atacado con nital3. c) obscurecida para evaluar la fracción de carburos.

4.2.2 Conteo de carburos.

En la figura 4.6 se muestra la distribución de los carburos del hierro nodular aleado con una relación de Cr/Mo: 1/0.5 en el segmento A del bloque tipo "Y" tomando como referencia los puntos ya mencionados en la figura 3.3, además en cada punto se hace mención al porcentaje de carburos locales.

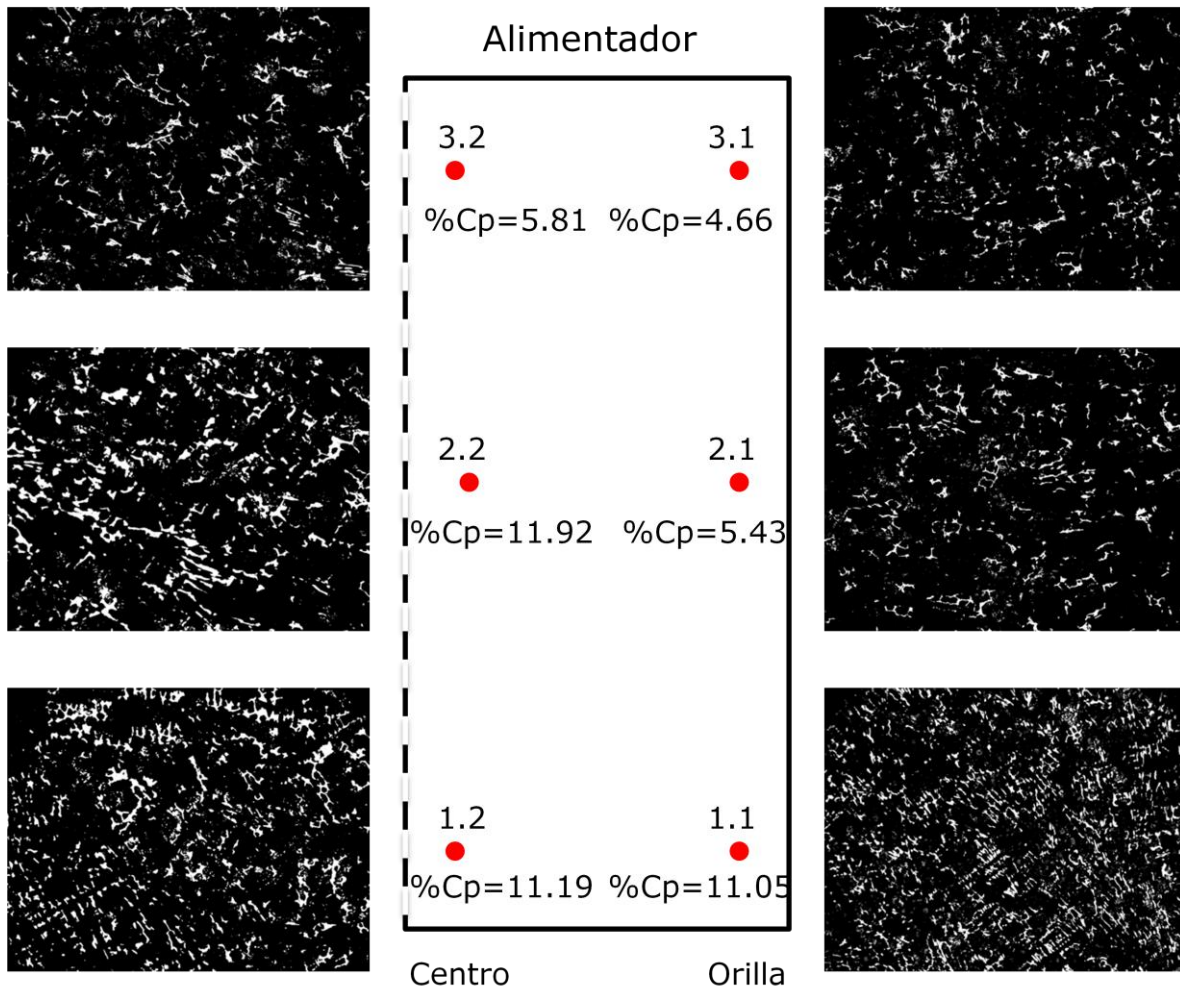


Figura 4.6 *Microestructuras mostrando el mapeo de la distribución de carburos en las diferentes zonas del segmento del centro de la pieza, para la aleación con relación Cr/Mo= 1/0.5. La cual presenta un contenido promedio de carburos de 8.34%.*

En la figura 4.6 podemos observar que la zona 1.2, 2.2 y 3.2 tienen un contenido de carburos más elevado que las zonas 1.1, 2.1 y 3.1 esto se debe nuevamente a la microsegregación pero en este caso el punto 2.2 presenta carburos gruesos probablemente debido a que esta aleación tiene un contenido menor de Mo que la aleación anterior, por ello un menor número de núcleos de carburos aleados se formaron permitiendo, únicamente crecer los carburos [7].

En la tabla 4.5 se presentan los datos obtenidos del hierro colado aleado con Cr/Mo con una relación 1/0.5 de la sección central del bloque tipo "Y".

Tabla 4.5 % de carburos en la aleación 2, segmento A (centro). Se analizaron tres imágenes (1, 2, 3) por posición X.1, X.2

	Posición	% de Carburos			%Carburos promedio	ΔV_{pp}	ΔV_p ←	ΔV_{is} ↑
		1	2	3				
Zona inferior	1.1	11.45	9.7	12.00	11.05	2.30	-	$\Delta V_{is_{centro}} = 5.38$
	1.2	8.94	10.92	13.70	11.19	4.76	0.14	
Zona Media	2.1	6.55	4.58	5.18	5.44	1.37	-	$\Delta V_{is_{orilla}} = 6.39$
	2.2	11.28	10.84	13.64	11.92	2.80	6.48	
Zona Superior	3.1	4.87	4.8	4.32	4.66	0.55	-	
	3.2	5.66	5.84	5.92	5.81	0.26	1.14	

ΔV_{pp} = es la variación entre el máximo y mínimo de carburos en las tres cuantificaciones puntuales (1, 2, 3). ΔV_p = variación de la orilla al centro de la pieza en las zonas inferior, media y superior. ΔV_{is} es la variación de carburos de la parte inferior de la pieza a la superior que es la que está unida al alimentador y solidifica más lentamente.

En la tabla 4.5 se presentan tres valores negativos, nuevamente debido a la microsegregación, en este caso resaltan otras diferencias como la gran variación de contenido de carburos por zonas al igual que los valores de ΔV_{is} lo que habla de la poca homogeneidad en la distribución de los carburos.

En la figura 4.4 se muestra la distribución de los carburos del hierro nodular aleado con una relación de Cr/Mo: 1/0.5 en el segmento B del bloque tipo "Y" tomando como referencia los puntos ya mencionados en la figura 3.3, además en cada punto se hace mención al porcentaje de carburos locales.

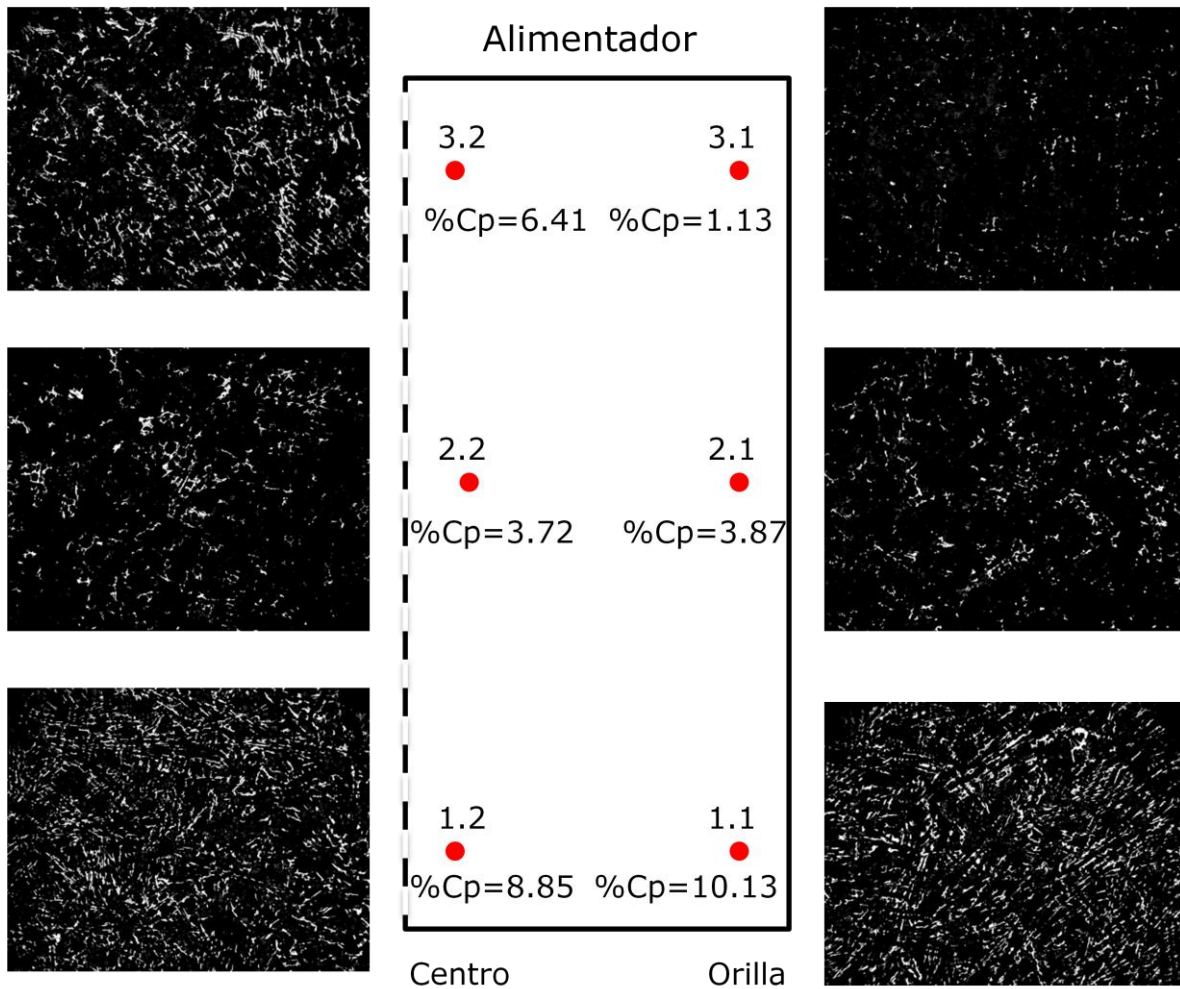


Figura 4.7 *Microestructuras mostrando el mapeo de la distribución de carburos en las diferentes zonas del segmento lateral de la pieza, para la aleación con relación Cr/Mo= 1/0.5. La cual presenta un contenido promedio de carburos de 5.68%.*

Se puede observar en la figura 4.7 nuevamente efecto de la microsegregación pero en este caso cabe resaltar el bajo contenido de carburos en algunas zonas en especial en la zona 3.1 que presenta un contenido de carburos de 1.13% cuando contenido menor que se había presentado era 4.66%.

En la tabla 4.2 se presentan los datos obtenidos del hierro colado aleado con Cr/Mo con una relación 1/0.5 de la sección lateral del bloque tipo “Y”.

Tabla 4.6 % de carburos en la aleación 2, segmento B (orilla). Se analizaron tres imágenes (1, 2, 3) por posición X.1, X.2

	Posición	% de Carburos			%Carburos promedio	ΔV_{pp}	ΔV_p ←	ΔVis ↑
		1	2	3				
Zona inferior	1.1	9.89	9.95	10.56	10.13	0.61	1.28	$\Delta Vis_{centro} = 2.39$
	1.2	9.59	8.73	8.25	8.86	1.34		
Zona Media	2.1	3.1	3.08	5.44	3.87	2.34	0.15	$\Delta Vis_{orilla} = 9.0$
	2.2	3.37	2.92	4.88	3.72	1.96		
Zona Superior	3.1	1.14	1.08	1.17	1.13	0.03	-5.34	
	3.2	7.48	3.05	8.88	6.47	5.83		

En la tabla 4.6 se observa un valor de 1.13% para la posición 3.1, y su ΔV_{pp} de 0.03 por lo que no es error ya que se muestran tres valores similares, lo mismo sucede con las demás posiciones ya que sus ΔV_{pp} 's no son muy elevadas. Otro punto interesante es ΔVis_{orilla} ya es un valor muy elevado que demuestra que en esa zona la formación de carburos es controlada muy probablemente por la velocidad de enfriamiento.

Teniendo en cuenta ambos segmentos se calculó un % de carburos total de la aleación el cual es de: 7.02.

En la figura 4.8 se presenta gráficamente la variación de los carburos de la aleación 2 de ambas secciones, únicamente mostrando los resultados de la zona inferior y superior. En la gráfica las zonas con una pendiente negativa son las zonas que presentan microsegregación.

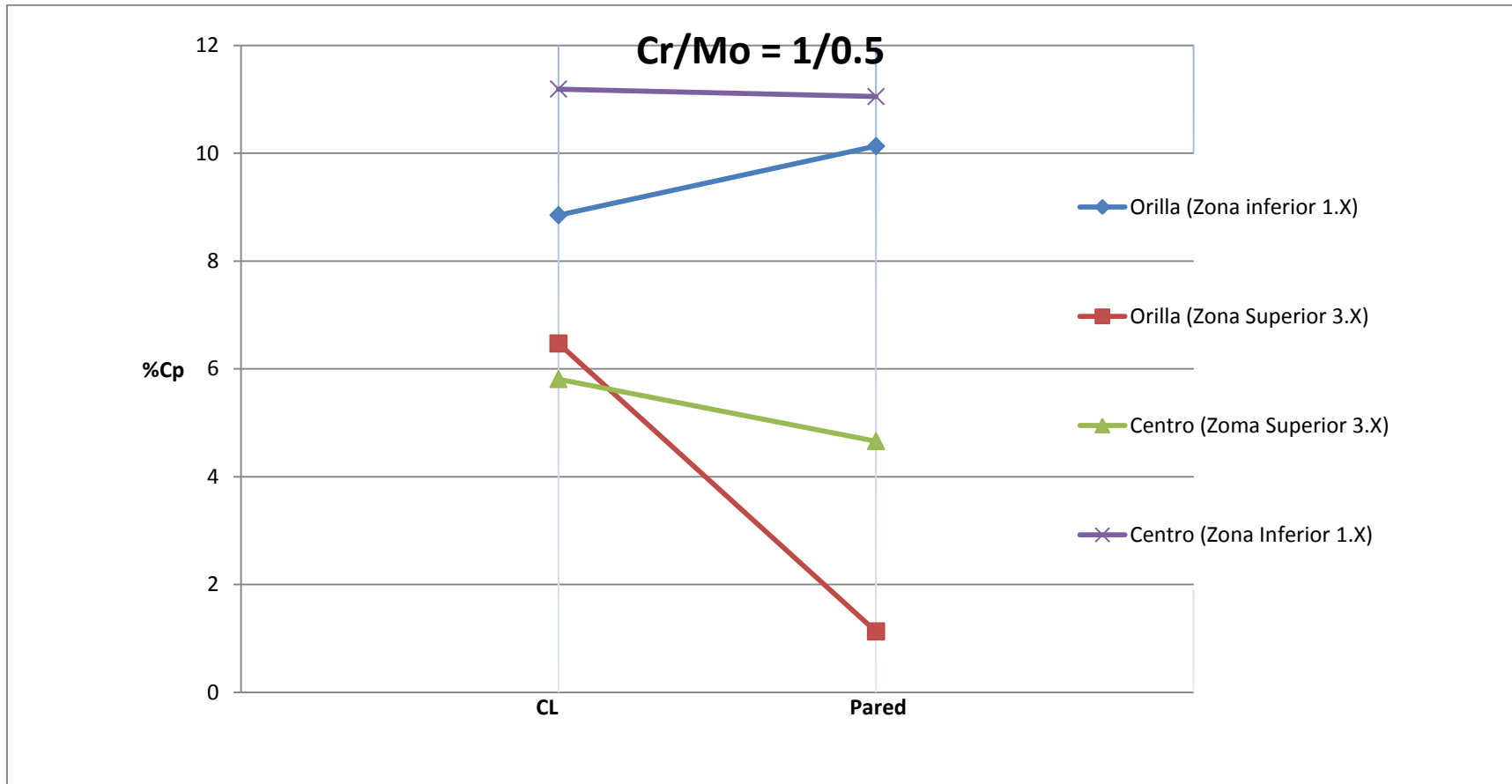


Figura 4.8 % de carburos contra el espesor de la pieza para la aleación con relación Cr/Mo=1/0.5

4.3 Resultados de la aleación 3 (relación Cr/Mo = 2/0)

4.3.1 Caracterización del hierro nodular

En la tabla 4.7 se presenta el análisis microestructural de la aleación 2, aleación con una relación Cr/Mo de 1/0.5, en que se toman en cuenta ambas secciones a y b, de igual manera ya que este análisis se realizó con las probetas sin ataque y atacadas con nital por lo que se decidió ignorar en esta parte los carburos formados ya que no se aprecian ni se logran cuantificar con estos ataques.

Tabla 4.7 Características microestructurales promedio del hierro nodular para el bloque "Y" de la aleación 3 (relación de Cr/Mo= 2/0) obtenidas mediante la norma de la AFS a 100X ó ASTM A247-67.

% Nodularidad	Tamaño de Nódulos	Densidad de Nódulos
90	7.5	200 nódulos/mm ²
%Ferrita	%Perlita	
0	100	

En la figura 4.9 se muestran imágenes representativas de la probeta analizada, correspondiente al hierro nodular aleado con una relación Cr/Mo de 2/0. Donde a) fue utilizada para determinar la nodularidad, densidad y tamaños de nódulos; b) para revelar la matriz y c) para revelar y cuantificar los carburos, zona clara.

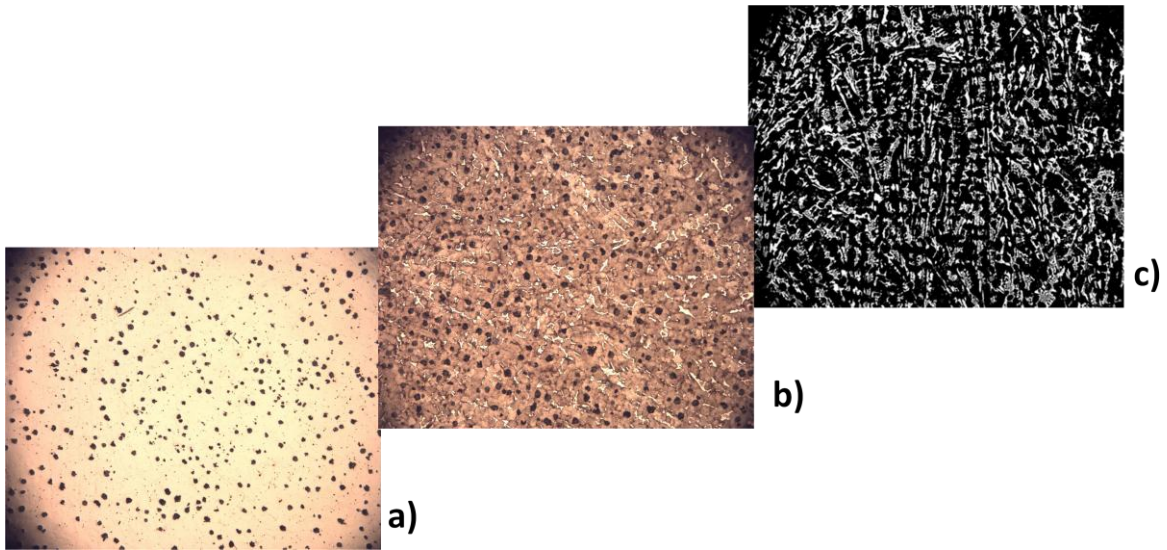


Figura 4.9 Hierro nodular aleado con una relación Cr/Mo de 2/0. a) sin ataque. b) atacado con nital3. c) oscurecida.

4.3.2 Conteo de carburos.

En la figura 4.10 se muestra la distribución de los carburos del hierro nodular aleado con una relación de Cr/Mo: 2/0 en el segmento A del bloque tipo "Y" tomando como referencia los puntos ya mencionados en la figura 3.3, además en cada punto se hace mención al porcentaje de carburos locales.

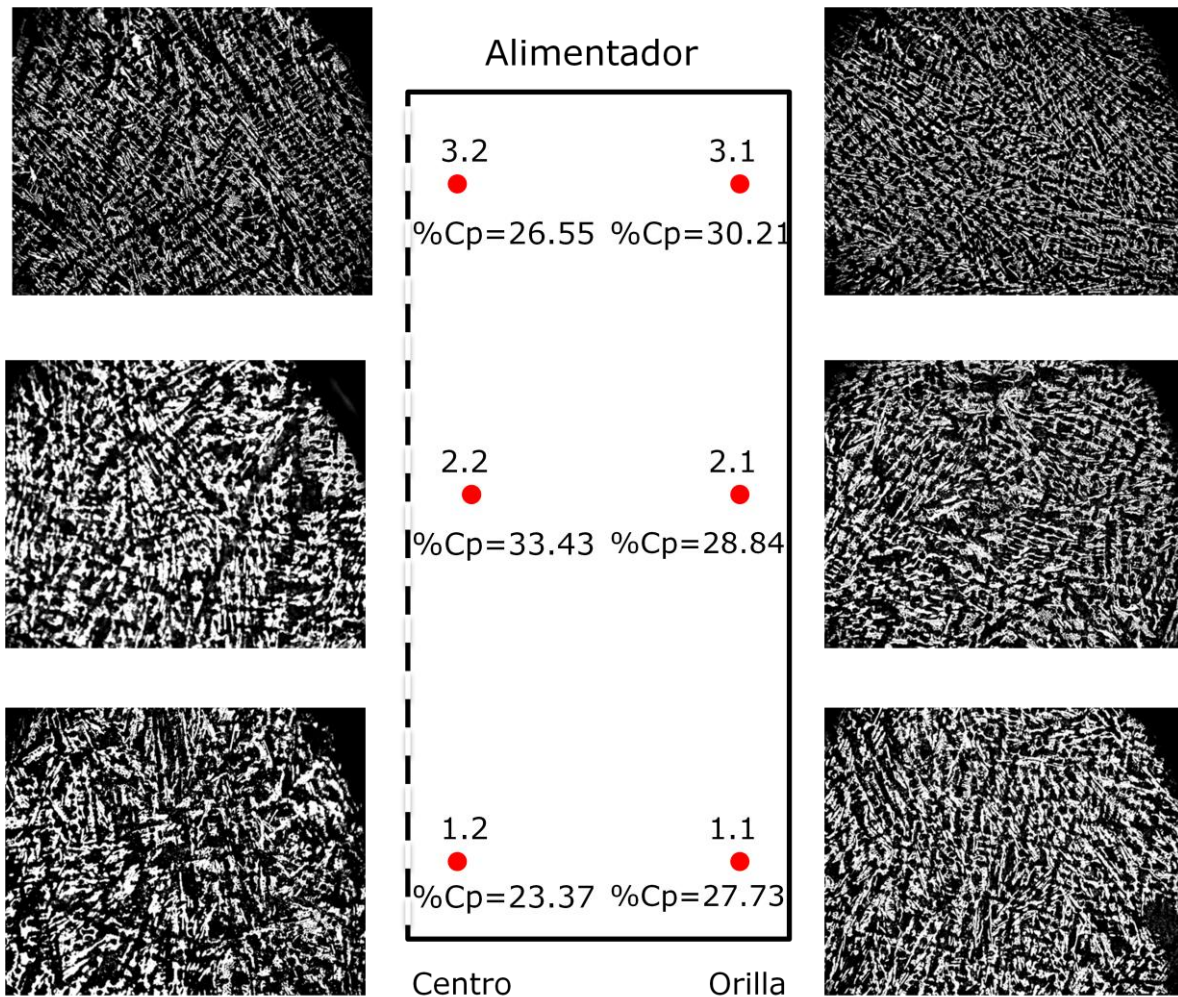


Figura 4.10 *Microestructuras mostrando el mapeo de la distribución de carburos en las diferentes zonas del segmento del centro de la pieza, para la aleación con relación Cr/Mo= 2/0. El segmento presenta un contenido promedio de carburos de 28.35%.*

En la figura 4.10 se puede observar un incremento significativo en el contenido de carburos a comparación de aleación 1 y 2, nuevamente esta aleación presenta microsegregación en el punto 2.2 con respecto al punto 2.1 y también se presenta en el punto 3.1 con respecto al punto 1.1.

En la tabla 4.8 se presentan los datos obtenidos del hierro colado aleado con Cr/Mo con una relación 2/0 de la sección central del bloque tipo "Y".

Tabla 4.8 % de carburos en la aleación 3, segmento A (centro). Se analizaron dos imágenes (1, 2) por posición X.1, X.2

	Posición	% de Carburos		%Carburos promedio	ΔV_{pp}	ΔV_p ←	ΔV_{is} ↑
		1	2				
Zona inferior	1.1	29.44	26.02	27.73	3.42	4.36	$\Delta V_{is_{centro}} = -3.18$
	1.2	24.04	22.71	23.38	1.33		
Zona Media	2.1	28.56	29.12	28.84	0.56	-4.59	$\Delta V_{is_{orilla}} = -2.48$
	2.2	33.12	33.73	33.43	0.61		
Zona Superior	3.1	28.69	31.72	30.21	3.03	3.66	
	3.2	27.17	25.93	26.55	1.24		

ΔV_{pp} = es la variación entre el máximo y mínimo de carburos en las tres cuantificaciones puntuales (1, 2, 3). ΔV_p = variación de la orilla al centro de la pieza en las zonas inferior, media y superior. ΔV_{is} es la variación de carburos de la parte inferior de la pieza a la superior que es la que está unida al alimentador y solidifica más lentamente.

En la tabla 4.8 pueden observar tres valores negativos, nuevamente zonas con microsegregación, pero por primera vez en dirección vertical. A pesar de que los valores de ΔV_{pp} , ΔV_p y ΔV_{is} son de valores similares son de menor impacto en este caso ya que si se habla de manera porcentual su valor sería menor al de las aleaciones anteriores permitiendo afirmar que en este caso la distribución es más uniforme.

En la figura 4.11 se muestra la distribución de los carburos del hierro nodular aleado con una relación de Cr/Mo: 2/0 en el segmento B del bloque tipo "Y" tomando como referencia los puntos ya mencionados en la figura 3.3, además en cada punto se hace mención al porcentaje de carburos locales.

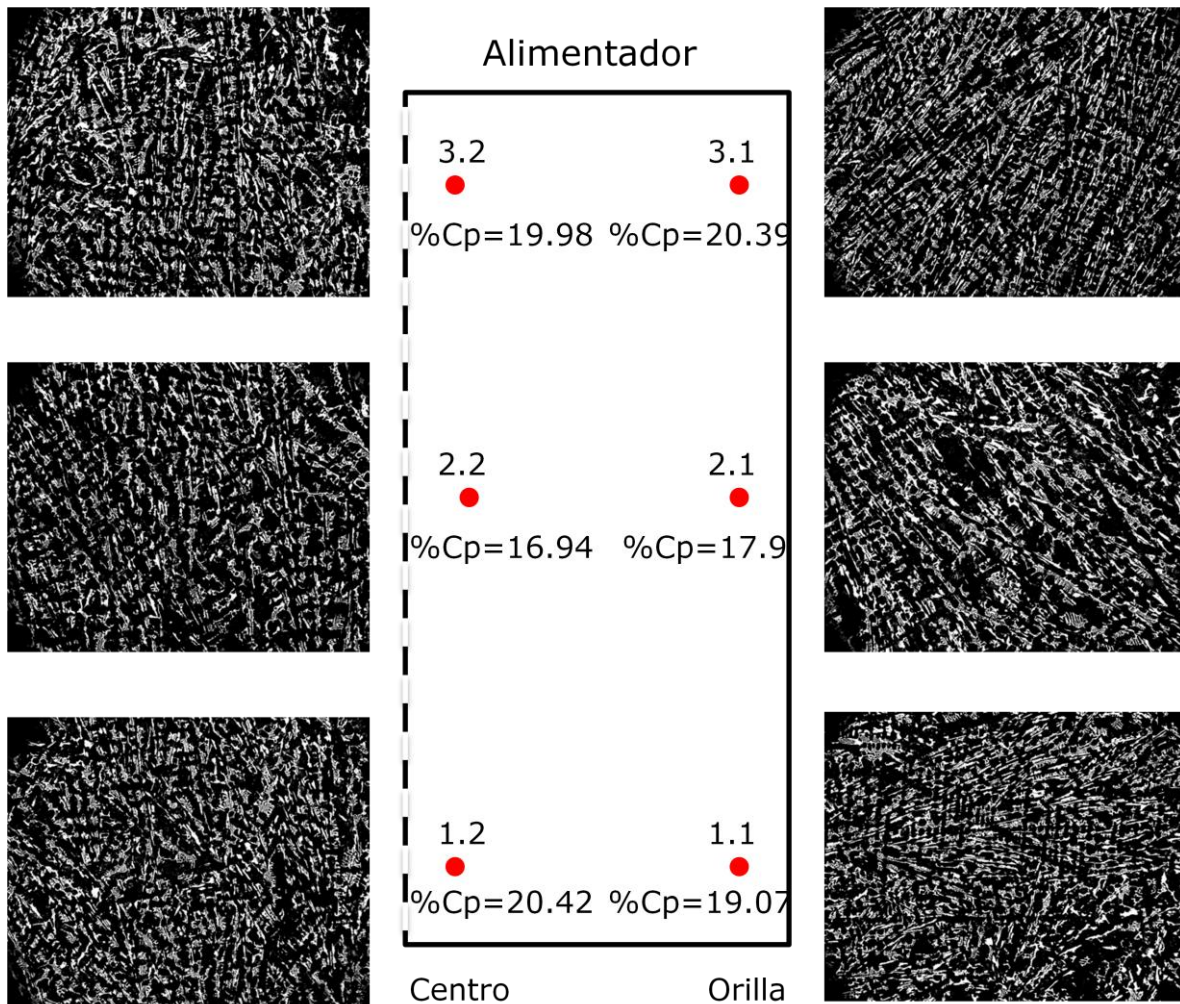


Figura 4.11 *Microestructuras mostrando el mapeo de la distribución de carburos en las diferentes zonas del segmento de la orilla de la pieza, para la aleación con relación Cr/Mo= 2/0. El segmento presenta un contenido de carburos promedio de 19.1%.*

En la figura 4.11 se puede observar un incremento en el contenido de carburos con respecto a la aleación 1 y 2, pero tiene contenido de carburos menor que la figura 4.10 con solo un punto de microsegregación, 3.1.

En la tabla 4.8 se presentan los datos obtenidos del hierro colado aleado con Cr/Mo con una relación 2/0 de la sección lateral del bloque tipo "Y".

Tabla 4.9 % de carburos en la aleación 3, segmento B (orilla). Se analizaron dos imágenes (1, 2) por posición X.1, X.2

	Posición	% de Carburos		%Carburos promedio	ΔV_{pp}	ΔV_p ←	ΔV_{is} ↑
		1	2				
Zona inferior	1.1	18.33	19.82	19.08	1.49	-1.35	$\Delta V_{is_{centro}} = 0.44$
	1.2	21.67	19.17	20.42	2.50		
Zona Media	2.1	15.72	20.08	17.90	4.36	0.95	
	2.2	17.01	16.88	16.95	0.13		
Zona Superior	3.1	21.24	19.54	20.39	1.70	0.41	$\Delta V_{is_{orilla}} = -1.32$
	3.2	19.34	20.62	19.98	1.28		

En la tabla 4.9 se observan valores de ΔV_{pp} , ΔV_p y ΔV_{is} menores que en la tabla 4.8, con esto se concluye una más elevada homogeneidad en la distribución de los carburos. A pesar de que se tenga una mejor distribución de tiene un contenido menor de carburos a pesar de tener una velocidad de enfriamiento más elevada.

Teniendo en cuenta ambos segmentos se calculo un % de carburos total de la aleación el cual es de: 23.74.

En la figura 4.12 se presenta gráficamente la variación de los carburos de la aleación 3 de ambas secciones, únicamente se muestran los resultados de la zona inferior y superior. En la gráfica las zonas con una pendiente negativa son las zonas que presentan microsegregación .

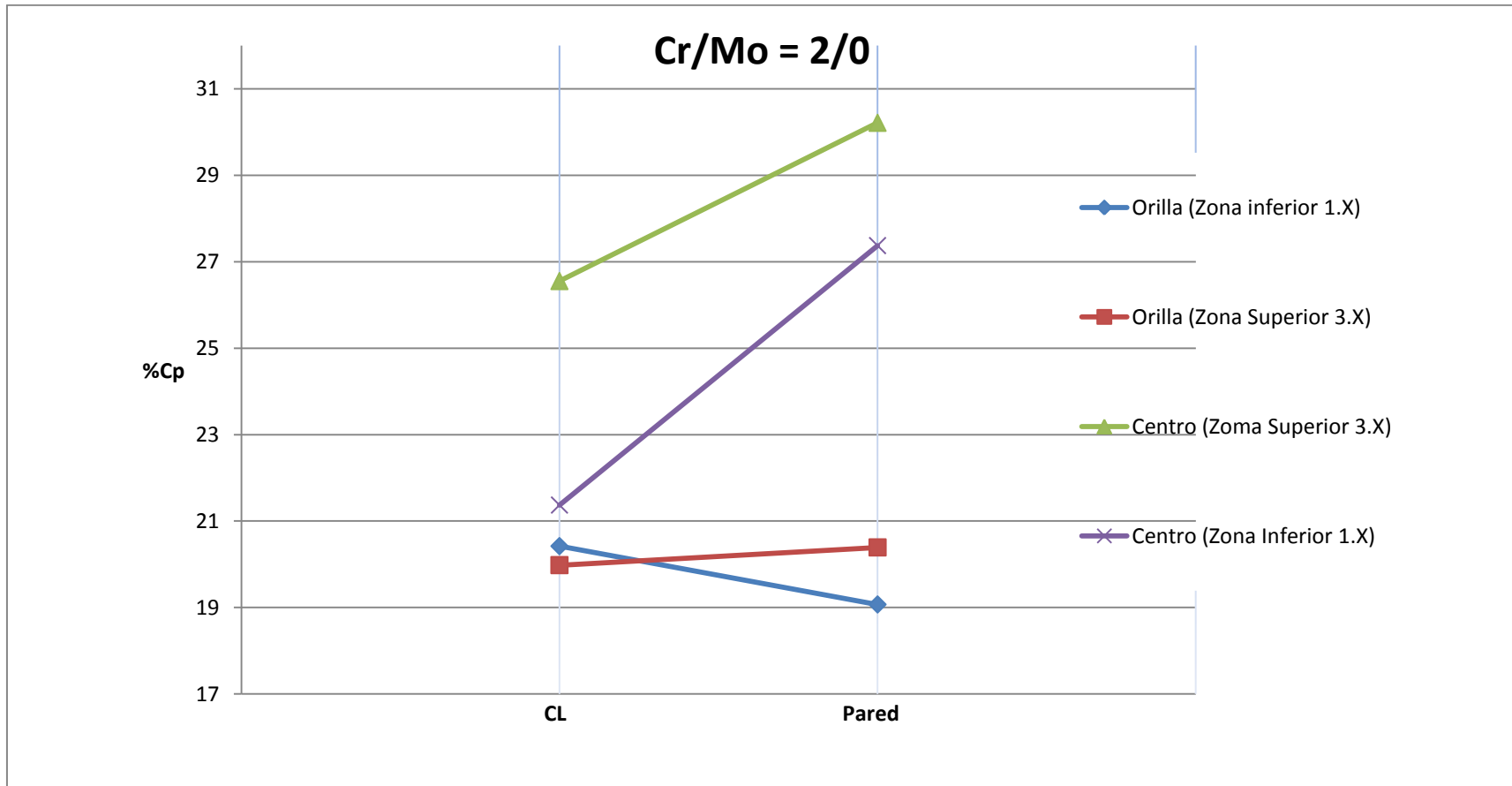


Figura 4.12 % de carburos contra el espesor de la pieza para la aleación con relación Cr/Mo=2/0

Tabla 4.10. Se resume el efecto global de la fracción promedio formada de los carburos por efecto del Cr y Mo.

Aleación	Fracción Promedio		Promedio total	Variación	Observaciones
	SC	SL			
Cr/Mo: 2/0	28.35	19.1	23.74	9.25	Alto % de carburos y elevada variación
Cr/Mo: 1/1	6.41	8.07	7.23	1.66	Bajo % de carburos y baja variación
Cr/Mo: 1/0.5	8.34	5.68	7.02	2.66	Bajo % de carburos y baja variación

SC= segmento del centro, SL= segmento lateral, Variación= ($\% \text{Carburos}_{\text{máximo}} - \% \text{Carburos}_{\text{mínimo}}$)

La tabla 4.10 es un indicativo del nivel de uniformidad de carburos y se aprecia que el hierro nodular con relación Cr/Mo de 1/1 tiene la menor variación entre el segmento evaluado del segmento lateral y del segmento del centro de la pieza original del bloque tipo "Y". El hierro nodular con 2% de Cr a pesar de que presenta un alto contenido de carburos estos son distribuidos más heterogéneamente.

4.4 Discusiones generales

La aleación 1 (relación Cr/Mo: 1/1) no presenta un alto contenido de carburos, en promedio 7.23% de carburos, este valor esta dentro del rango esperado en relacion al contenido de Cr; ya que S. Laino ha reportado concentraciones de carburos de 5-21% con contenidos de Cr entre 1-2.5% [14,15]. En los resultados de estos trabajos se presentan resultados de porcentajes de carburos de 5% para contenidos de Cr de 1% en hierro CADI. El hierro CADI tiene un proceso de austenizado y austemperizado, en el proceso de austenizado se disuelven los carburos, alrededor de 30%, por lo que el hierro nodular base tiene un contenido mayor de carburos que el hierro CADI; teniendo conocimiento de esto se puede llegar a la conclusión que un hierro nodular base de un hierro CADI con 5% de carburos tendría alrededor de 7.1% de carburos; sin embargo con la adición de Mo se esperaba un contenido mayor al 7.1% de carburos.

Por otra parte en la aleación 2 (relación Cr/Mo= 1/0.5) presenta un promedio de 7.01% de contenido de carburos al igual que la aleación 1 pero con la diferencia en que en este caso se presentan gradientes de concentración de carburos más elevados.

En las dos primeras aleaciones los bajos contenidos de carburos pueden deberse a dos razones, una es que el Mo además de ser un elemento promotor de carburos tiene un efecto en las líneas de transformación eutécticas del diagrama estable y metaestable diferente al del Cr, el Cr disminuye la temperatura eutéctica del diagrama estable y aumenta la temperatura del diagrama metaestable, es decir disminuye la diferencia entre estas temperaturas, mientras que el Mo disminuye ambas temperaturas pero de igual manera se disminuye la diferencia entre

ambas temperaturas como se muestra en la Figura 2.6.3 aunque en menor magnitud; por ello la adición del Mo en una aleación que ya contiene Cr no tiene el efecto de incrementar la fracción precipitada de carburos.

Referente a la aleación 3 (relación Cr/Mo = 2/0) presenta un contenido de carburos mayor, de 23.7%, debido a que este tiene un contenido más elevado de Cr (2%), haciendo mención nuevamente se esperaban contenidos de carburos entre 5-21% con contenidos de Cr de entre 1-2.5% por lo que es fácil deducir que mientras que se tenga un contenido de Cr más elevado en la aleación mayor es el contenido de carburos que se formarán. Este valor promedio concuerda con los valores reportados por Laino [14,15].

Haciendo referencia a la diferencia en las cantidades de Mo en las aleaciones 1 y 2 no se presenta un cambio muy apreciable en los promedios de concentración en ambas aleaciones debido a que como se observa en la Figura 2.6.3 el Cr tiene una pendiente más elevada que el Mo además de que el Mo no presenta una gran cambio en la diferencia de temperaturas eutécticas con concentraciones entre 0.5 y 1%.

Finalmente al comparar los resultados de las relaciones Cr/Mo de 1/1 con la de 2/0 observamos una gran diferencia en el contenido de carburos, esto se debe a que el Cr y el Mo no tienen el mismo potencial de blanqueado como se puede observar en la Figura 2.6.1. Por lo que 2% de Cr tiene un mayor efecto que 1% de Cr/1% de Mo.

Capitulo V Conclusiones

- Niveles de 2% de Cr promueve la formación de altas fracciones de carburos que son entre 19% y 28%.
- La distribución de carburos promovida por el Cr es más heterogénea.
- El hierro nodular con una relación de Cr/Mo: 1/1 presenta la distribución más homogénea de carburos.
- La presencia de ambos elementos, Cr y Mo, no presentan un efecto aditivo en la formación de carburos.

5.2 Sugerencias

- Realizar dos coladas adicionales con relaciones de Cr/Mo de 1/0 y de 0/1.
- Comparar el contenido de carburos de estas dos nuevas coladas con las ya existentes, de esta manera confirmar los resultados de publicaciones anteriores y tener una visión más amplia del efecto del Mo.

Bibliografía

1. ASM, Metal Handbook, "Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys", Vol.1, decimal edición, pp. 11, 12, 33, 37, 57, 58, 59, 60, 61.
2. <http://oa.upm.es/14450/> (30/05/2013).
3. Lu Zhen-Lin, Zhou Yung-Xing, "An Investigation of the Abrasive Wear Behavior of Ductile Cast Iron, Journal of Materials Processing Technology 116 (2001), pp. 176-181.
4. Peng Yun-Cheng, Jin Hui-Jin, "Effect of Boron on the Microstructure and Mechanical Properties of Carbide Austempered Ductile Iron", Materials Science and Engineering A 529 (2011), pp. 321-325.
5. Basso Alejandro, Laino Sebastian, "Wear Behavior of Carbide Ductile Iron with Different Matrices and Carbide Distribution", Tribology Transactions 56 (2013), pp. 33-40.
6. Apraiz B., J, "Tratamientos Térmicos de los Aceros", octava edición, editorial Dossat, 1984, Madrid España, pp. 46, 47, 48.
7. Zhou Jiyang, "Colour Metallography of Cast Iron", Dalian University of Technology, China, pp. 58-69, 470-475.

8. Ramses Zenil Hernández, "Efecto de la Velocidad de Enfriamiento en la Formacion y distribucion de Carburos en Hierros Nodulares Aleados con 2%Cr", Tesis de Licenciatura, Facultad de Química UNAM, 2013.
9. http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4910/html/6_diagrama_fec.html (6/agosto/2014)
10. Apraiz B., J, "Fundiciones", segunda edición, editorial Dossat, 1963, Madrid España, pp. 10, 11, 12, 13, 16, 17.
11. Dommarco Ricardo C., Sikora Jorge A., "Resistencia a la Abrasión y al Impacto de Fundición CADI en Composición Hipoeutéctica", Asociación Argentina de Materiales, 2do Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales, Mar de Plata Argentina, octubre 2008.
12. Bigge, Robert, "Tramp elements in grey and ductile iron", Iron Casting Research Institute, 2006.
13. Kanno, T., "Effects of Alloying Elements on the Eutectic Temperature in Cast Iron", AFS Transactions, 2005

14. Laino, S, Dommarco, R, "Development of Wear Resistant Carbide Austempered Ductile Iron (CADFI)", Wear 265, 2008.
15. Laino, S., Dommarco, R., "Resistencia a la Abrasion y al Impacto de Fundicion Nodular Austemperada con Carburos (CADFI)", Congreso CONAMET/SAT 2006.