



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Cinética de la disolución de carburos  
en un hierro nodular aleado con 2.2%Cr**

**Tesis**

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

**PRESENTA**

**HIRAM JUÁREZ TAMAYO**

**MÉXICO, D.F.**

**2013**





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.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: I.Q.M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

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

**SECRETARIO:** Profesor I.Q.M. Sergio García Galan

**1er. SUPLENTE:** Profesor: I.Q.M. Balbina Ojeda Ramírez

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

Sitio donde se desarrolló el tema: Facultad de Química, Edificio "D", Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Asesor del tema: Dr. José Alejandro García Hinojosa**

---

**Supervisor Técnico: M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo**

---

**Sustentante: Hiram Juárez Tamayo**

---



## **Introducción**

Resumen.....	8
Hipótesis.....	8
Objetivos.....	9
Metas.....	9

## **Capítulo I Antecedentes**

<b>1.1 Hierros Colados.....</b>	<b>11</b>
1.1.1. Tipos de Hierros Fundidos.....	11
1.1.2. Características de los Hierros Fundidos.....	12
<b>1.2 Hierros Nodulares.....</b>	<b>14</b>
1.2.1. Características Principales.....	14
1.2.2. Fabricación.....	15
1.2.3. Clasificación y propiedades de los Hierros Nodulares.....	16
<b>1.3 Hierros Dúctiles Austemperizados con Carburos (CADI).....</b>	<b>17</b>
1.3.1. Formación de Carburos en el Material Base.....	18
1.3.2. Disolución de Carburos.....	18
1.3.3. Fabricación y Aplicaciones.....	19
1.3.4. Principales Ventajas y Desventajas.....	20

## **Capítulo II Fundamentos Teóricos**

<b>2.1 Introducción.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Diagramas de Fases.....</b>	<b>23</b>
2.2.1. Diagrama al equilibrio Fe-C (Grafito) .....	23
2.2.2. Diagrama Fe-Fe <sub>3</sub> C Metaestable.....	24
<b>2.3. Fases y Microconstituyentes de los Hierros Colados.....</b>	<b>25</b>

---

## Índice

---

2.3.1. Fases del Diagrama al Equilibrio (Fe-Grafito).....	25
2.3.2. Fases en el Diagrama Metaestable (Fe-Fe <sub>3</sub> C).....	27
<b>2.4. Estructuras Formadas por enfriamiento rápido y fuera del equilibrio.....</b>	<b>28</b>
<b>2.5 Variables que afectan la microestructura del Hierro Nodular.....</b>	<b>29</b>
2.5.1. Efecto del Balance Carbono-Silicio (Carbón equivalente).....	29
2.5.2. Velocidad de Enfriamiento.....	30
2.5.3. Elementos de Aleación.....	32
2.5.3.1. Efecto del Manganeso.....	37
2.5.3.2. Efecto del Molibdeno.....	37
2.5.3.3. Efecto del Cromo.....	38
2.5.3.4. Efecto de otros Aleantes.....	39
2.5.4. Campo de la línea A1 y el Efecto del Silicio.....	44
2.5.5. Efecto de la Temperatura de Austenización.....	45
2.5.5.1. Efecto sobre los Carburos.....	45
2.5.5.2. Efecto sobre la Microestructura.....	46
2.5.5.3. Efecto sobre las Propiedades Mecánicas.....	46
<b>2.6 Obtención del Hierro Nodular.....</b>	<b>47</b>
2.6.1. Inoculación y post-inoculación.....	47
2.6.2. Nodularización.....	48
<b>2.7 Caracterización Microestructural de los Hierros Nodulares.....</b>	<b>48</b>
2.7.1. Tipo de Grafito, Tamaño de Nódulos, %Nodularidad, Densidad de Nódulos.....	48

**Capítulo III Desarrollo Experimental**

3.1. Proceso de Fabricación.....	53
3.2. Condiciones de Moldeo.....	53
3.3. Caracterización de la Microestructura.....	53
3.3.1. Muestreo e Identificación de las piezas.....	53
3.3.2. Preparación Metalográfica.....	55
3.4. Tratamiento de Austenización.....	57

**Capítulo IV Resultados y Discusión.**

4.1. Características del Hierro Nodular Base.....	60
4.1.1. Composición Química del Hierro Nodular.....	60
4.1.2. Carbono Equivalente (C.E.).....	60
4.2. Evaluación del Hierro Nodular Base.....	60
4.2.1. Matriz del Hierro Nodular Base Experimental.....	63
4.2.2. Matriz después del Tratamiento Térmico de Austenizado.....	65
4.2.3. Fracción de Carburos antes y después del Tratamiento Térmico.....	66
4.3. Evaluación de la Disolución de Carburos .....	75
4.4. Discusión de Resultados.....	80

**Capítulo V. Conclusiones.**

V. Conclusiones.....	84
----------------------	----

---

## Índice

---

**Bibliografía**.....86

### **Anexos**

**Anexo 1**.....89

A.1. Balance de Carga.....89

A.1.1. Cálculo de la Cantidad de Nodulizante (FeSiMg).....91

A.1.2. Cálculo del balance de carga.....93

**Anexo 2**.....99

# *Introducción*

### **Cinética de la disolución de carburos en un hierro nodular aleado con 2.2%Cr**

#### **Resumen**

La industria actual exige piezas metálicas con propiedades específicas. Tal es el caso de componentes que demandan alta resistencia al desgaste como: implementos agrícolas, piezas para la industria minera, piezas para la industria automotriz y ferroviaria, entre otros. Uno de los recientes desarrollos en hierros nodulares, son los llamados hierros austemperizados con carburos o hierros CADI (Carbide Austempered Ductil Iron). Tienen elevada resistencia al desgaste y a la abrasión con una aceptable tenacidad que los hace muy competitivos contra los aceros templados-revenidos. Los carburos en el hierro nodular pueden formarse mediante 1) velocidades de enfriamiento rápidas o 2) por la adición de aleantes estabilizadores de carburos (Mn, Cr, Mo, V, Ti, etc.). En el primer caso se promueve la formación de carburo de hierro y en el segundo caso, además del carburo de hierro, se forman carburos aleados. Sin embargo este tiene un mayor costo asociado a los aleantes introducidos, pero con mayor grado de estabilidad durante la etapa de austenización del tratamiento isotérmico para transformarlo en hierro CADI.

En el presente trabajo se estudia el efecto que tienen la temperatura y el tiempo de austenización en los hierros nodulares con carburos ó CNI (Carbide Nodular Iron) formados por la adición de 2.2% Cr, en la primera etapa del tratamiento de austemperizado. Esta condición resulta muy importante ya que la disolución total evitaría la formación de hierros CADI disminuyendo las propiedades de desgaste y abrasión, así como la dureza.

#### **Hipótesis**

Los carburos formados en hierros nodulares por presencia de cromo durante la solidificación presentarán una alta estabilidad bajo las condiciones aplicadas del tratamiento térmico de austenización y servirán como material base para obtener hierros CADI.

**Objetivo:**

Evaluar el efecto de la temperatura y tiempo de austenización sobre la estabilidad de carburos obtenidos durante la solidificación de hierros nodulares aleados con 2.2 % Cr.

**Metas**

- Generar información sobre la estabilidad de los carburos en el hierro nodular bajo estudio.
- Construir graficas fracción de carburos residual vs temperatura-tiempo de austenización.
- Generar expresiones que describan la cinética de disolución en función de la temperatura y tiempo de austenización.
- Con base a los resultados argumentar sobre la factibilidad de utilizar el hierro nodular bajo estudio como material base para fabricar hierros CADI.

# *Capítulo 1*

## *Antecedentes*



### Antecedentes

#### 1.1. Hierros Colados

Son una familia de aleaciones ferrosas con amplia gama de propiedades, como su nombre lo indica, se fabrica por procesos de fusión y colada (fundición) para darles la forma final deseada.

Un hierro colado o fundición es el término usado para denominar a aquellas aleaciones de Hierro-Carbono-Silicio que contienen entre 2% y 6.5%C. El silicio es también un importante elemento presente en los hierros colados ya que ayuda a estabilizar el grafito [1].

Los hierros fundidos forman excelentes aleaciones para obtener piezas de fundición, ya que el hierro en estado líquido tiene elevada fluidez y no forman películas superficiales indeseables durante el vaciado. Los hierros fundidos se solidifican con una contracción entre 1 y 3.5% durante el enfriamiento [2].

El contenido de Si varía entre 1% y 4% en peso. Las fundiciones tienen distintas propiedades dependiendo de los constituyentes en la microestructura de la matriz metálica que pueden ser ferrita, perlita, martensita, ausferrita, ó austenita. La existencia de grafito y la forma que éste adquiere también son determinantes en las propiedades mecánicas [1].

Estas aleaciones tienen un amplio rango de resistencia a la tensión y dureza y, en la mayoría de los casos son fáciles de maquinar. Pueden alearse para obtener cualidades superiores en términos de desgaste, abrasión y resistencia a la corrosión.

Sin embargo, los hierros fundidos tienen valores de resistencia al impacto y ductilidad relativamente bajos, y esto limita su uso para algunas aplicaciones. La amplia aplicación industrial de los hierros fundidos se debe sobre todo a su costo relativamente bajo y sus versátiles propiedades de ingeniería [2].

### 1.1.1. Tipos de Hierros Fundidos

Se puede distinguir cuatro tipos diferentes de hierros fundidos con base a la forma en que se combina o precipita el carbono en sus microestructuras: hierro blanco, hierro gris, hierro maleable, vermicular y hierro dúctil o nodular [3].

En la tabla 1.1 se en listan los rangos de composición química de los cuatro hierros fundidos básicos y en la tabla 1.2 se presenta algunas de sus propiedades mecánicas típicas y sus aplicaciones.

**Tabla 1.1** Rangos de la composición química de algunos hierros fundidos no aleados.

Tipo de Hierro	Carbón	Silicio	Manganeso	Azufre	Fósforo
Gris	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.02-0.25	0.02-1.0
Dúctil (0.035%Mg)	3.0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
Compacto	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
Blanco	1.8-3.6	0-5-1.9	0.25-0.8	0.06-0.2	0.06-0.2

### 1.1.2 Características de los Hierros Fundidos

- **Hierro Gris.-** Excelente colabilidad, buena resistencia al desgaste, excelente respuesta a los tratamientos térmicos de endurecimiento superficial, precipitación del carbón en forma de hojuelas de grafito y poca resistencia mecánica.
- **Hierro Blanco.-** En este tipo de fundición, la mayor parte del carbón aparece como cementita en lugar de grafito, la superficie de una zona fracturada tiene un color blanco, es extremadamente dura y por lo tanto frágil por lo que es inmecanizable. Se utilizan hierros fundidos blancos por su dureza y resistencia al desgaste por abrasión.
- **Hierro Nodular.-** Fundición ferrosa en la cual el grafito en lugar de precipitar en forma de hojuelas (Hierro Gris) lo hace en forma de nódulos o esferoides. Los elementos que promueven esta modificación de la

## Antecedentes

microestructura son el magnesio, cerio y tierras raras. Esta fundición tiene muy buena fluidez y colabilidad.

- **Hierro Vermicular o Compacto.-** En esta fundición se realiza una transición morfológica del grafito en forma de hojuela y de nódulo llamado grafito compacto o vermicular. Estos hierros tienen mejores propiedades tensiles que los hierros grises o similares a los de alta resistencia y menores a los hierros nodulares. Tienen mayor capacidad térmica y de amortiguamiento, mejor maquinabilidad y facilidad para fabricar piezas delgadas y complejas.

Algunas aplicaciones típicas de los hierros colados se presentan en la tabla 1.2:

**Tabla 1.2.** Propiedades mecánicas típicas y aplicaciones comunes de algunos hierros fundidos [3]

Nombre y numero de la aleación	**C.Q.(% en peso)	Estado	Microestructura	** $\sigma_{Tensión}$ MPa	**E MPa	Elongación (%)	Aplicaciones típicas
<b>Hierros Fundidos Grises</b>							
Ferrítica (G2500)	3.4C, 2.2Si, 0.7Mn	Recocido	Matriz ferrítica	179	---	---	Bloques de cilindros pequeñas cabezas de cilindros
Perlítica (G3500)	3.2C, 2.0Si, 0.7Mn	Fundido tosco	Matriz perlítica	252	---	---	Bloques de cilindros de camiones y tractores
Perlítica (G4000)	3.3C, 2.2Si, 0.7Mn	Fundido tosco	Matriz perlítica	293	---	---	Forja de motores diesel
<b>Hierros fundidos dúctiles</b>							
Ferrítica	3.5C, 2.2 Si	Recocido	Ferrítica	414	276	18	Coladas a presión como cuerpos de válvulas y bombas
Perlítica	3.5C, 2.2 Si	Fundido tosco	Ferrítica-Perlítica	552	379	6	Cigüeñales engranes y rodillos
Martensítica	3.5C, 2.2 Si	Templada y Revenida	Martensítica	828	621	2	Piñones engranes rodillos y tapas correderizas

\*\*C.Q. = Composición Química;  $\sigma_{Tensión}$  = Esfuerzo a la Tensión; E = Límite elástico

## 1.2. HIERROS NODULARES

### 1.2.1. Características Principales

La fundición nodular o dúctil se caracteriza porque el grafito obtenido en la reacción eutéctica, solidifica en forma de nódulos o esferoides. Debido a esa forma del grafito, este tipo de fundición es mucho más resistente y con mayor capacidad de alargamiento que las fundiciones grises. En ocasiones puede considerarse incluso como un material compuesto en el que la matriz consiste en hierro y el refuerzo, son las partículas de grafito.

El hierro dúctil (llamado también hierro nodular o de grafito esferoidal) combina las siguientes propiedades de fundición: buena fluidez y moldeabilidad; y mecánicas: excelentes cualidades de maquinado, mayor resistencia que los hierros grises y buena resistencia al desgaste. Además, el hierro dúctil tiene varias propiedades similares a las del acero, como alta resistencia, tenacidad, ductilidad.

Las mejores propiedades de resistencia y tenacidad de la fundición dúctil le confieren unas especiales características ventajosas como material estructural, frente a las fundiciones maleables y las grises.

Los esferoides se forman durante la solidificación asociado a que los niveles de azufre y de oxígeno del hierro que se han reducido a niveles muy bajos mediante la adición de magnesio al metal inmediatamente antes de colarlo. El magnesio reacciona con el azufre y el oxígeno, por lo cual estos elementos no pueden interferir con la formación de los esferoides de grafito.

Para la formación del grafito esferoidal se debe tener generalmente entre 0.03 a 0.04% de Mg residual en el hierro; esta es la principal diferencia con la fundición gris. Bajo la presencia del magnesio, el grafito en el proceso de cristalización toma forma globular en vez de laminar. Estos niveles de magnesio elevan la capacidad del hierro al sobre enfriamiento y por tanto, al blanqueado. El grafito esferoidal debilita menos la masa metálica fundamental, lo que garantiza altas propiedades mecánicas de la fundición.

### 1.2.2. Fabricación.

Para su fabricación se requieren como materias primas distintos tipos de chatarras, se lleva a cabo un balance de carga con base a la composición química que se quiera obtener en el proceso, este balance se ajusta con ferroaleaciones, ya sea FeSi, FeMn, FeSiMg, FeMo, FeCr, etc., y carbono como recarburante.

Posterior a la técnica de fusión, la cual es la secuencia de cómo cargar al horno las materias primas y definir las temperaturas de trabajo, fusión y temperatura de colada, se lleva a cabo una desulfuración, en caso de que se tenga altos contenidos de azufre, ya que para formar los nódulos de grafito se necesita agregar un elemento nodularizante que por lo regular se utiliza FeSiMg, sin embargo el magnesio reacciona con el azufre para formar MgS, por lo que si se tiene la presencia de altas concentraciones de azufre la nodularización sería de muy baja calidad y para evitar esto se desulfura antes de agregar el Mg al metal fundido.

Posterior a esto se lleva a cabo la nodularización; esta se puede llevar a cabo por diferentes procesos.

Después de la nodularización se realiza la inoculación el cual es otro tratamiento al metal líquido, este se lleva a cabo para obtener una estructura homogénea y uniforme en toda la pieza en relación a la cantidad de nódulos/mm<sup>2</sup> (densidad ó conteo de nódulos) ya que con este tratamiento se generan centros de nucleación dentro del metal líquido lo cual hace que crezcan los nódulos de manera uniforme. Para esto existen también distintos métodos de inoculación entre los cuales están la inoculación en la olla de colada (inoculación temprana) inoculación a la hora de vaciar el metal líquido al molde (postinoculación) y dentro del molde. Finalmente se vacía el metal líquido al molde y se obtienen las piezas deseadas.

### 1.2.3. Clasificación y propiedades de los hierros nodulares.

Existen diferentes tipos de clases de hierros nodulares, estos se distinguen por su composición química y sus propiedades mecánicas que posee cada clase; en la tabla 1.3 se muestran las composiciones típicas de los hierros nodulares, con esta tabla se parte para la elaboración de cada clase ya que esta composición nominal esta regida por la norma ASTM 536.

**Tabla 1.3.-** Composición química nominal de las clases de los hierros nodulares.

CLASE	% en Peso de Elementos de Aleación							
	C	Si	Mn	P*	S	Cr	Ni	Cu
60 - 40 - 18	3.50	2.20	0.30	0.50	0.015	0.06	-----	-----
	3.90	3.00	Max	Max	Max	Max		
65 - 45 - 12	3.5	2.50	0.40	0.05	0.015	0.10	-----	-----
	3.90	2.80	Max	Max	Max	Max		
80 - 55 - 06	3.50	2.20	0.20	0.05	0.015	0.10	-----	0.20
	3.90	2.70	0.50	Max	Max	Max		0.40
100 - 70 - 03	3.50	2.20	0.60	0.05	0.015	0.10	**	0.20
	3.80	2.70	Max	Max	Max	Max		0.50
120 - 90 - 02	3.50	2.20	0.60	0.05	0.015	0.10	**	0.20
	3.80	2.70	Max	Max	Max	Max		0.50

\* Para una optima elongación y propiedades al impacto, el fósforo no debe exceder el 0.30% y el silicio debe mantenerse lo más bajo posible.

\*\* La adición de níquel por arriba de 1% puede provocar la mejora en las propiedades a la tracción.

En la tabla 1.4 se muestran las propiedades mecánicas de cada una de las clases de los hierros nodulares.

**Tabla 1.4.-** Propiedades Mecánicas de cada clase de hierro nodular

CLASE	Dureza (HB)	$\sigma$ Tensión (MPa)	$\sigma$ Tensión (ksi)	$\sigma$ Cedencia (MPa)	$\sigma$ Cedencia (ksi)	Elongación (%)	Modulo Young (GPa)	Poisson ( $\nu$ )
60 - 40 - 18	167	414	60	276	40	18	169	0.29
65 - 45 - 12	167	448	65	310	45	12	168	0.29
80 - 55 - 06	192	552	80	379	55	6	168	0.31
100 - 70 - 03	---	689	100	483	70	3	---	---
120 - 90 - 02	331	827	120	621	90	2	164	0.28

La densidad del hierro nodular varia de 6.8 a 7.1 g/cm<sup>3</sup>, dependiendo el contenido de carbono.

A partir del ensayo de tracción se ha concluido que el modulo de elasticidad de las fundiciones nodulares varía entre 162 y 170 GPa, la elongación en los hierros nodulares por lo general no es mayor al 25% mientras que la dureza se encuentra entre 150 y 250 HB.

El grafito presente en la matriz actúa como auto lubricante el cual previene el desgaste y la adhesión a las superficies, los hierros nodulares presentan una menor resistencia al desgaste que los hierros grises esto bajo condiciones de lubricación moderada.

### **1.3.Hierros Dúctiles Austemperizados con Carburos (CADI)**

Los hierros nodulares convencionales (NI nodular Iron) y los ADI permiten hasta un 1% de carburos en el material, ya que estos carburos provocan durezas elevadas y por ende una fragilidad considerable, también generan que su maquinabilidad sea muy difícil.

No obstante, la propia presencia de los carburos puede reducir marcadamente la resistencia mecánica y disminuir la tenacidad del material. Sin embargo, existe una alternativa que podría aprovechar las ventajas de la presencia de carburos sin producir un decaimiento en la resistencia a la tracción y la tenacidad.

Las fundiciones austemperizadas con carburos (CADI o Carbide Austempered Ductile Iron) son fundiciones de hierro con grafito esferoidal austemperizadas que contienen carburos libres dispersos en la matriz. La presencia de carburos debe promover un aumento en la resistencia a la abrasión, aunque también debe esperarse una disminución de la resistencia al impacto y muy bajo % de elongación. Por lo tanto, el desafío en el desarrollo de este material está relacionado con el control de la micro-estructura que permita obtener un balance óptimo entre resistencia a la abrasión y al impacto.

Los hierros nodulares CADI se obtienen mediante el tratamiento térmico de austemperizado de fundiciones de hierro con grafito esferoidal que contienen carburos dispersos en la matriz (CNI o Carbide Nodular Iron). Como resultado, se obtiene una microestructura final consistente con una fracción determinada de carburos inmersos en una matriz de ausferrita (AF).

Este material exhibe una adecuada tenacidad gracias a la matriz, así como una excelente resistencia al desgaste debido a la presencia de carburos. Se considera que tanto la fracción en volumen de carburos como la característica de la ausferrita, pueden controlarse para proveer un amplio rango de propiedades mecánicas.

### **1.3.1. Formación de Carburos en el Material Base**

Como se describió en párrafos anteriores, el hierro dúctil se obtiene a partir de hierro líquido bajo en azufre (0.015 % máx.) y ser tratado con magnesio y/o tierras raras para obtener grafito esferoidal. El control de la matriz se realiza mediante diversos métodos, como son la adición de aleantes y la velocidad de enfriamiento. Para el caso de la formación de carburos ambos métodos aplican, siendo de mayor efecto la adición de estabilizadores de carburos o elementos blanqueadores como lo son el cromo, molibdeno, titanio, vanadio, el propio manganeso, entre otros. El efecto de los elementos formadores de carburos y la velocidad de enfriamiento se explicaran con detalle en el capítulo 2 de éste trabajo.

En forma general para el caso de la velocidad de enfriamiento, cuando esta es lo suficientemente alta puede originar carburos incluso sin la presencia de elementos formadores de carburos, estos generalmente se presentan en piezas delgadas, y puede disminuir la fracción presente en la parte central de la pieza cuando esta es de sección más gruesa.

### **1.3.2. Disolución de Carburos.**

Los carburos producidos por cualquiera de estas dos formas, tienden a disolverse total o parcialmente en el tratamiento térmico posterior, por lo tanto, la obtención



de las propiedades mecánicas deseadas dependerá de un adecuado control de este fenómeno. El grado de disolución de los carburos dependerá de sus características (composición química, morfología) y de los parámetros de tratamiento térmico.

Se ha demostrado que los carburos ledeburíticos producidos, tanto por el control del carbono equivalente, como por una elevada velocidad de enfriamiento (carburos no aleados), son menos estables y, por lo tanto, se disuelven más fácilmente que los carburos aleados (habitualmente producidos por efectos de la microsegregación). [4]

El efecto de los elementos estabilizadores de carburos es reducir el intervalo de temperatura entre los eutécticos estable y metaestable, lo cual promueve la solidificación según el diagrama metaestable, fenómeno que será discutido más adelante.

### **1.3.3. Fabricación y Aplicaciones[6]**

Para la fabricación de los hierros CADI se requiere un hierro nodular base con un porcentaje mínimo de entre 45 y 65% de carburos para realizar el tratamiento isotérmico y mejorar las propiedades de resistencia al desgaste.

En los últimos años se ha dado un énfasis especial a desarrollar nuevas aplicaciones de los hierros nodulares, esto se ha logrado mediante los estudios con hierros ADI, del cual ya se tienen una elevada demanda de piezas de hierro nodular con tratamiento de austemperizado. La última etapa de evolución de los hierros nodulares son los hierros CADI, en el que sus propiedades de alta resistencia al desgaste combinadas con la tenacidad de la matriz ausferrítica, los hacen un material muy competitivo contra algunos aceros aleados con tratamiento térmico de temple – revenido.

Una característica fundamental antes de la fabricación del hierro CADI, es la obtención del hierro nodular con carburos (CNI Carbide Nodular Iron), los cuales deben de tener fracciones controladas en la matriz y además posean la suficiente

estabilidad para no disolverse durante el tratamiento de austemperizado.

Las aplicaciones recientes y potenciales de los hierros CADI incluyen para la agricultura: dientes, arados, placas de desgaste, recolectores, componentes de máquinas cosechadoras. En la construcción y la minería se incluye componentes de excavadoras, dientes escarificadores, cortadores, molino de martillos, cubiertas, rampas, platos, cajas, tubos de transporte, codos, trituradora de rodillos y rodillos. Aplicaciones industriales de carácter general son componentes de bombas, placas de desgaste de viviendas, patines y rodillos.

### **1.3.4. Principales Ventajas y Desventajas[7]**

Las principales ventajas del hierro CADI se describen a continuación:

- 1.- Es más resistente al desgaste que el Grado 5 ADI y que algunos aceros templados y revenidos.
- 2.- Es más económico en comparación con el hierro blanco con 18%Cr utilizado en componentes que demandan elevada resistencia al desgaste (Nihard).
- 3.- No se requiere gran inversión de capital para obtener el hierro nodular con carburos para posteriormente obtener el CADI.

Desventajas:

- 1.- Tienen limitada maquinabilidad.
- 2.- El costo puede incrementarse cuando el hierro base ADI se fabrica mediante la adición de aleantes caros, como el molibdeno.
- 3.- Control estricto del tratamiento de austemperizado para no disolver los carburos.

De lo anterior se observa que la publicación de trabajos de investigación enfocados a la producción de hierros nodulares con carburos como material base para la fabricación de CADI's es aún limitada, debido al reciente desarrollo de este material.

**El mercado potencial que tienen los hierros CADI es:**

- Sustituye aceros al Mn con igual o menor costo.
- Sustituye hierros blancos con 18 % Cr a menor costo.
- Puede comercializarse como una aleación “high premium” de larga vida.
- Crea nuevos mercados de aplicación para el hierro nodular.

# *Capítulo II*

## *Fundamentos Teóricos*

### 2.1. Introducción.

Los hierros colados se diferencian de los aceros por su composición química (contenido de carbono igual o mayor a 2% y contenidos de silicio mayores al 2%). Dependiendo del potencial de nucleación que este tiene en relación con el tratamiento que se realice al metal líquido, composición química y velocidad de enfriamiento, la solidificación en los hierros colados de acuerdo con la termodinámica, puede seguir dos sistemas de enfriamiento, el sistema metaestable que se refleja en el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C y el sistema estable en el cual la solidificación sigue el comportamiento del diagrama Fe-C<sub>grafito</sub>.

El potencial de nucleación del líquido y la composición química determinan el potencial de grafitización del hierro. Para esto tenemos que un alto potencial de grafitización nos da la formación del grafito (carbono libre) lo contrario favorece la formación de la ledeburita transformada.

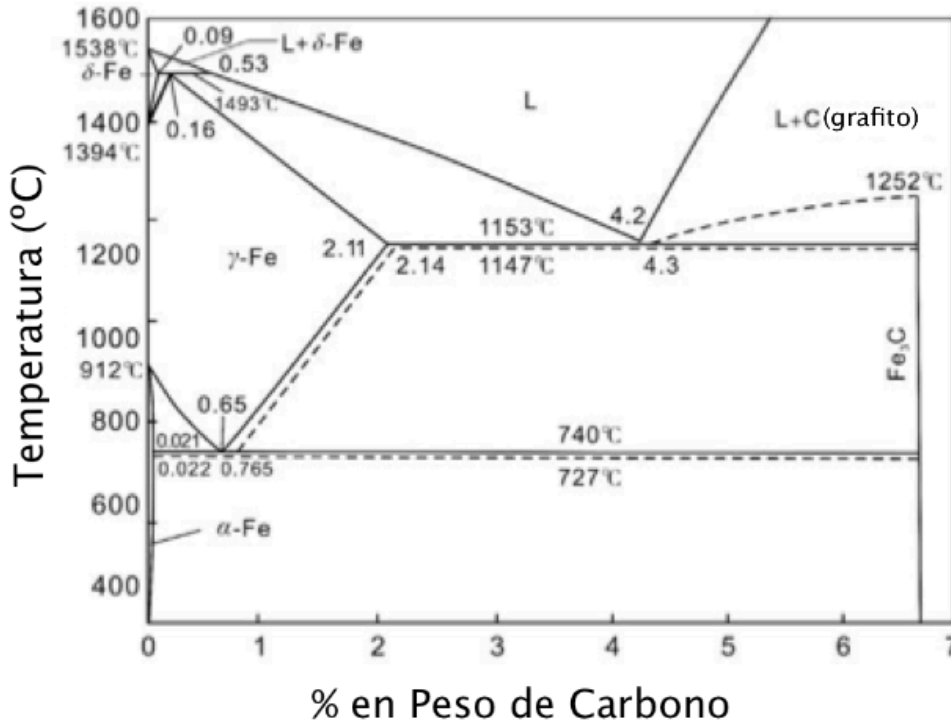
### 2.2. Diagramas de Fases

#### 2.2.1. Diagrama al Equilibrio Hierro-Carbono (grafito)

Las transformaciones que se producen en los calentamientos y enfriamientos de las fundiciones grises y nodulares deben estudiarse con ayuda de un diagrama hierro-carbono estable, este señala los fenómenos y transformaciones estables correspondientes a las aleaciones de alto contenido en silicio (1 a 4% generalmente). Una característica de este diagrama estable es que sus constituyentes principales son grafito y ferrita (hierro  $\alpha$ ) en lugar de cementita y ledeburita transformada, que son los constituyentes del diagrama metaestable.

En el diagrama estable las líneas de transformación están desplazadas hacia arriba y hacia la izquierda; los contenidos de las aleaciones eutécticas y eutectoides del diagrama estable, varían con el contenido de silicio y son inferiores a los que corresponden al diagrama metaestable. En las transformaciones del diagrama estable, para una temperatura determinada, la austenita es capaz de disolver menor cantidad de carbono que el que disuelve a la misma temperatura la

austenita cuando las transformaciones se hacen de acuerdo con el diagrama metaestable. El diagrama estable Fe-C (grafito) se muestra en la figura 2.1 sobrepuesto al diagrama metaestable Fe-Fe<sub>3</sub>C marcado con una línea punteada.



**Figura 2.1.-** Diagrama de fases estable Fe-C (grafito) y diagrama de fases metaestable Fe-Fe<sub>3</sub>C(- - -)

### 2.2.2. Diagrama metaestable Fe - Fe<sub>3</sub>C

El hierro sufre cambios estructurales en función de la temperatura antes de fundir. A temperatura ambiente la forma estable es la ferrita o Fe-α. A 912°C la ferrita sufre una transformación polimórfica a austenita o Fe(γ). La austenita se transforma a otra fase a 1394°C que se conoce como ferrita delta (hierro δ), la cual funde a 1538°C. Todos estos cambios se pueden observar en el eje vertical del diagrama de fases para el hierro puro. El otro eje de la figura, sólo llega al 6.70 % en peso de C, concentración que coincide con el compuesto intermetálico Fe<sub>3</sub>C conocido como carburo de hierro o cementita (Figura 2.1).

La ferrita es relativamente blanda y dúctil. Su estructura es cúbica centrada en el cuerpo, ferromagnética por debajo de 768°C, y de densidad 7.88g/cm<sup>3</sup>. La austenita es la más dúctil de las fases del diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C, su estructura es cúbica centrada en las caras. Esta fase permite un proceso de difusión con el carbono mucho más rápido, tiene una solubilidad máxima de carbono del 2.11 % a 1148°C. Solubilidad aproximadamente 100 veces superior a la de la ferrita. Las transformaciones de fase de la austenita son muy importantes en los tratamientos térmicos de los hierros colados, en la figura 2.1 se muestra el sistema Fe-Fe<sub>3</sub>C sobrepuesto al diagrama estable Fe-C (grafito). Cabe mencionar que la solubilidad del carbono en el hierro líquido es menor para el diagrama estable. La temperatura eutéctica del diagrama estable es de 1153°C y del metaestable es de 1147°C, lo que indica una diferencia de 6°C. Esta diferencia es afectada por el contenido de Si y de los elementos aleantes.

### 2.3. Fases y Microconstituyentes de los Hierros Colados

Las transformaciones de fase es un cambio en la naturaleza de la fase o en el número de fases, como el resultado de la variación de condiciones impuestas, tales como temperatura y composición química. Una fase es una entidad (lo que constituye la esencia de una cosa) de un sistema material que es uniforme en composición química y estado físico.

Como se dijo anteriormente en el diagrama estable las líneas de transformación están desplazadas hacia arriba y hacia la izquierda. En la figura 2.1 se muestran los dos diagramas tanto el estable como el metaestable. A continuación se describen algunas características de las fases principales de los hierros colados de acuerdo al diagrama estable Fe-Grafito y el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C metaestable.

#### 2.3.1. Fases del diagrama al Equilibrio (Fe-Grafito)

**Grafito.-** Es una forma elemental del carbono, es blando, untuoso, de color gris

oscuro. Se presenta en estado libre en algunas clases de fundiciones, ejerciendo una influencia muy importante en sus propiedades y características microestructurales. Estas dependen fundamentalmente de la forma del grafito, de su tamaño, cantidad y de la forma en que se encuentre distribuido. El grafito mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión, disminuye el desgaste por fricción por roce de componentes en piezas de maquinas y motores, ya que en cierto modo actúa como un lubricante. También mejora la maquinabilidad y reduce las contracciones durante la solidificación. Cuando se presenta en forma de nódulos, se incrementa la resistencia y de la tenacidad en comparación con los hierros grises. Por ello estas fundiciones tienen mayores resistencias y alargamientos que las fundiciones grises ordinarias.

**Ferrita.-** Este es el hierro alfa, o sea hierro casi puro, que puede contener en solución pequeñas cantidades de silicio, fósforo y otros elementos. Cristaliza en un sistema cúbico centrado en el cuerpo, estando el cubo formado por 8 átomos, situados en los vértices y uno en el centro. Tiene aproximadamente una resistencia de 28 Kg/mm<sup>2</sup>, 35% de alargamiento y una dureza de 90 hasta 110 HBN. Es el más blando de todos los constituyentes, muy dúctil y maleable.

La ferrita en los hierros suele contener en disolución cantidades muy importantes de silicio que elevan su dureza y resistencia. Así por ejemplo, desde los valores de 28 Kg/mm<sup>2</sup> y 90 HBN en fundiciones con 2.5% de silicio.

**Austenita.-** Es una solución sólida de carbono en el hierro gamma. Puede contener desde 0 a 1.7% de carbono y es, por lo tanto, un constituyente de composición variable. Todos los aceros y hierros se encuentran formados por cristales de austenita cuando se calientan a temperaturas superiores a las críticas ( $A_{c3}$  ó  $A_{cm}$ ). Es un constituyente inestable a la temperatura ambiente.

La austenita tiene una estructura cristalina FCC (cúbica centrada en las caras); la resistencia de este constituyente es de 88 a 105 Kg/mm<sup>2</sup> aproximadamente, su dureza de 300 HBN y su alargamiento de 30 a 60%. Es poco magnética, blanda, muy dúctil y tenaz, tienen gran resistencia al desgaste.



### 2.3.2. Fases en el diagrama metaestable (Fe-Fe<sub>3</sub>C)

**Ledeburita.-** Es el constituyente eutéctico que se forma en el enfriamiento de las fundiciones a 1147°C aproximadamente, en el momento que termina la solidificación. Está formada por 52% de cementita y 48% de austenita saturada. La ledeburita no existe a temperatura ambiente en las fundiciones ordinarias, debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita (ledeburita transformada o pseudoledeburita). Sin embargo, en las fundiciones se pueden conocer las zonas donde existió la ledeburita, por el aspecto eutéctico con que quedan esas agrupaciones de perlita y cementita.

**Pseudoledeburita ó Ledeburita Transformada:** Producto de la transformación de la ledeburita a la temperatura eutectoide. Está formado por cementita y perlita proveniente de la transformación de la austenita.

**Cementita.-** Es carburo de hierro, contiene 6.67% de carbono y 93.33% de hierro. Es el constituyente más duro y frágil de los hierros, su dureza es superior a 68 Rockwell C y cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño (4.5x5x6.7 Å).

**Perlita.-** Es un constituyente eutectoide formado por capas alternadas de hierro alfa y carburo de hierro, es decir, de ferrita y cementita. Es de composición química constante y definida y contiene aproximadamente seis partes de hierro y una de carburo, que corresponde a 13.5% de carburo y 86.5% de hierro, y que es referido al 0.9%C y 99.1%Fe. Tiene una resistencia promedio de 80 Km/mm<sup>2</sup> y un alargamiento de 15% aproximadamente. La perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la austenita o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de los 650° a 750°.

Debido a la presencia de silicio, el contenido en carbono de la perlita de las fundiciones es inferior al de los aceros. Al variar en las fundiciones el silicio de 0.5 a 3%, varía el porcentaje de carbono de la perlita de 0.8 a 0.5%.

### 2.4. Estructuras formadas por enfriamiento rápido y fuera del equilibrio

Las estructuras que se forman fuera del equilibrio durante el tratamiento térmico son:

**Martensita.-** Es el constituyente típico de un temple. Está formado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro alfa, y se obtiene por enfriamiento rápido de los hierros y aceros desde su temperatura de austenización. Después de los carburos y de la cementita, es el constituyente más duro. Sus propiedades varían con su composición química, aumentando su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido de carbono. Presenta un aspecto marcadamente acicular, formando agujas, con ángulos de  $60^\circ$ , cuando aparecen las agujas sobre un fondo blanco de austenita, la observación con grandes aumentos es bastante clara.

**Bainita.-** Se forma de un tratamiento isotérmico, que parte de la transformación de la austenita, cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de  $250^\circ\text{C}$  a  $600^\circ\text{C}$  aproximadamente. Desde el principio se diferencian dos tipos de bainita, tanto la superior de aspecto arborescente, formada a  $500^\circ\text{C}$  -  $550^\circ\text{C}$ , que difiere de la inferior, formada a más baja temperatura  $250^\circ$  -  $400^\circ$ , que tiene un aspecto acicular bastante parecido a la martensita.

La bainita superior está formada por una matriz ferrítica conteniendo carburos; las placas discontinuas de los carburos tienden a tener una orientación paralela a la dirección de las agujas de la propia bainita.

La bainita inferior está constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos. Estas pequeñas placas son paralelas entre si y su dirección forma un ángulo de  $60^\circ$  con el eje de las agujas de ferrita.

**Ausferrita.-** 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 (la

ausferrita), le confiere al material alta resistencia mecánica, alta tenacidad y alta resistencia al desgaste.

La microestructura de la fundición nodular austemperizada es conocida como ausferrita, la cual es una microestructura ferrítica acicular con austenita estabilizada, como consecuencia del enriquecimiento en carbono sufrido por la formación de ferrita durante el austemperizado, acompañado de cantidades variables de austenita.

La transformación del austenizado tiene dos etapas. En la primera reacción se produce una transformación de la austenita a placas de ferrita y austenita con alto contenido de carbono, donde tenemos la estructura ausferrítica. Para tiempos prolongados de tratamiento, ocurre la segunda reacción en la que se produce una descomposición de la austenita rica en carbono simultáneamente en ferrita y carburo, es decir a bainita.

### **2.5. Variables que afectan la microestructura del Hierro Nodular.**

La estructura del hierro dúctil ha mostrado ser extremadamente sensitiva a un gran número de variables, ya que determinados elementos en la composición base han mostrado ejercer una influencia controlante sobre la estructura de la matriz, la forma del grafito y sobre la formación masiva de carburos.

#### **2.5.1. Efecto del balance Carbono-Silicio (Carbono equivalente)**

Las cantidades combinadas de carbono y silicio son usualmente expresadas como carbono equivalente ( $\%C + 1/3\%Si$ ). La necesidad para mantener un carbono equivalente de alrededor de 4.3% como mínimo es extensamente reportado, como un prerrequisito para obtener un nódulo de buena calidad y previniendo significativamente la formación de carburos [8].

La presencia de una alta cantidad de nódulos ha sido usada como un criterio para evaluar la calidad del hierro. Un amplio grado de grafitización tiende a inhibir la formación de carburos. También el carbono equivalente sugiere no exceder

cualquier valor superior a 4.65% ya que esto incrementa la posibilidad de flotación de grafito, especialmente en piezas de sección gruesa.

A continuación se tratará más a fondo sobre las variables que afectan la microestructura de un hierro nodular, principalmente la velocidad de enfriamiento y la composición, ambos tienen un efecto significativo.

### **2.5.2. Velocidad de Enfriamiento**

La velocidad de enfriamiento depende del espesor de las piezas y del material del molde empleado, es un factor que influye decisivamente en la microestructura de las fundiciones. Los enfriamientos rápidos tienden a producir fundiciones blancas; los enfriamientos lentos favorecen la formación de grafito y por lo tanto la formación de hierros grises o nodulares sin carburos. Esta influencia es tan marcada, que con una misma composición al variarse la velocidad de enfriamiento se obtienen diferentes calidades con distintas durezas y microestructuras.

Los espesores delgados se enfrían mucho más rápidamente que los gruesos. Un molde metálico, enfría más rápidamente que un molde de arena.

En los hierros nodulares convencionales, al igual que todas las fundiciones de hierro, puede presentar al cabo de la solidificación, una microestructura que combine la presencia de grafito en una matriz de ferrítica, perlítica o ambas, e incluso con la presencia de carburos eutécticos. Esta microestructura se ve favorecida por las altas velocidades de extracción de calor, entre otros factores, y es comúnmente considerada un defecto microestructural, por lo que se realizan cuidadosos procedimientos de fabricación para evitar la presencia de carburos. Sin embargo, si pudiera obtenerse una dispersión fina y controlable de carburos, esta podría, lejos de constituir un defecto, aportar considerables mejoras en la resistencia al desgaste. En la figura 2.2 se muestran las curvas de enfriamiento para un hierro gris, un hierro moteado y un hierro blanco. Cuando el subenfriamiento y el final de la solidificación se produce por debajo de la temperatura eutéctica estable y por arriba de la temperatura eutéctica metaestable

## Fundamentos Teóricos

se forma un hierro gris, cuando el subenfriamiento se da por debajo de la temperatura eutéctica metaestable pero el final de la solidificación se lleva a cabo por arriba de la temperatura metaestable y debajo de la estable, se obtiene un hierro moteado y cuando tanto el subenfriamiento como el final de la solidificación están por debajo de la temperatura eutéctica metaestable se forma un hierro blanco. De esta manera se puede explicar porque las velocidades de enfriamiento siguen el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C metaestable. [9]

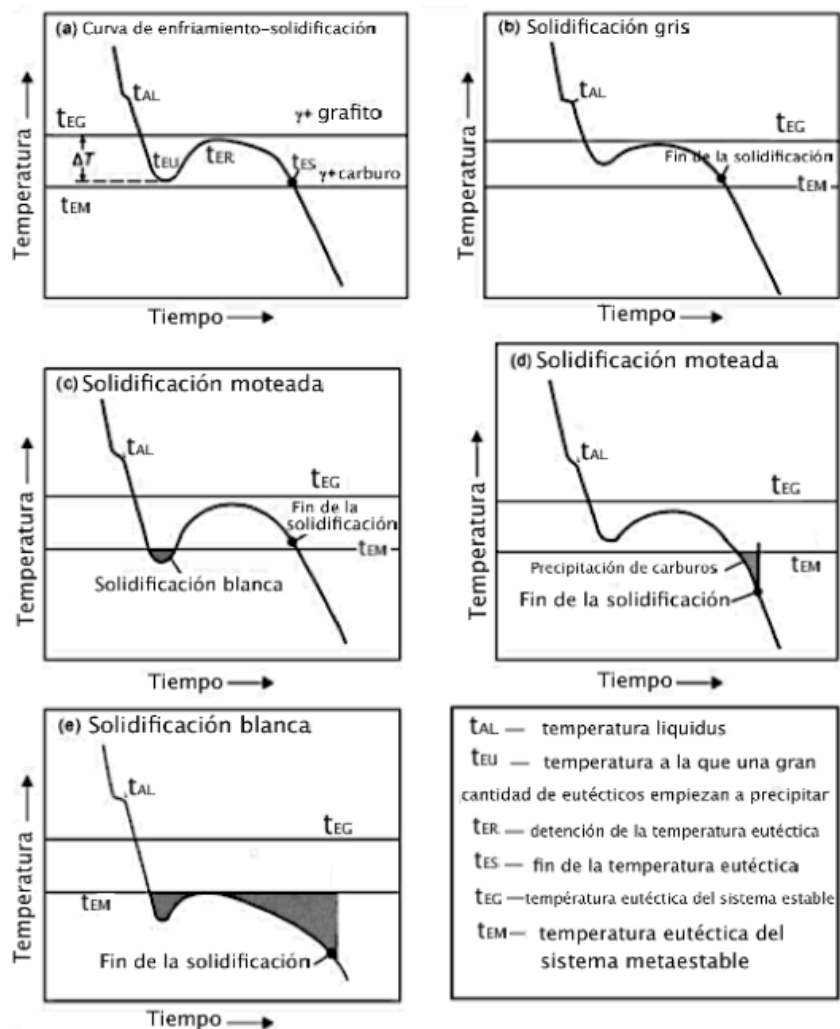


Fig.2.2.- Curvas de enfriamiento para diferentes condiciones de solidificación

### 2.5.3. Elementos de Aleación

Algunos de los elementos presentes en los hierros son estabilizadores de la austenita (como manganeso y níquel), otros son estabilizadores de la ferrita (como silicio, cromo y niobio) y algunos son fuertes formadores de carburos (como titanio, niobio, molibdeno y cromo). Los estabilizadores de ferrita y austenita expanden sus respectivos campos de fase. Los estabilizadores de austenita disminuyen la temperatura eutectoide, expandiendo con esto el campo de estabilidad de la austenita.

Un incremento grande en el contenido de Silicio ha demostrado el decremento en la estabilidad de los carburos, resultando un decremento del tiempo de tratamiento térmico necesario para completar la disolución. Sin embargo, es necesario incrementar el contenido de silicio sobre 3.5 % para obtener un tiempo favorable de disolución y una gran cantidad de silicio puede ser indeseable. Contenidos de Silicio por debajo de 2.0% puede resultar en un alto grado de formación de carburos. [8].

A continuación se profundizara en los elementos que promueven el blanqueado (promotor de carburos), estos elementos son importantes, ya que generan carburos y al momento de austenizar las piezas, los elementos también confieren cierta estabilidad a los carburos, lo cual impide que estos se disuelvan en la austenita (el carburo se descompone en grafito más austenita). En la Tabla 2.1, se presenta en forma resumida el efecto de los principales elementos aleantes en los hierros colados.

En la tabla 2.1 se muestran los principales elementos aleantes y su efecto en los hierros nodulares.

**Tabla 2.1.- Influencia de los Elementos de Aleación en los hierros nodulares. [19]**

Elemento	Fuente	% de Adición	Efectos positivos	Efectos negativos
C	Recarburante, chatarra de acero, arrabio	3.0-4.0 CGI 2.5-4.0	Elemento aleante primario de todos los hierros colados, esencial para la precipitación del grafito. Elemento con el mayor potencial de grafitización y con la mayor influencia en la colabilidad del hierro.	Niveles altos comparados con la sección y la calidad pueden causar problemas de grafito irregular y flotación de grafito, provocando menor resistencia mecánica.
Si	FeSi, chatarra de acero, arrabio	1.8-4.0 CGI 1.0-3.0 SiMo 4.0-6.0	Promueve grafito y ferrita, reduce la tendencia al subenfriamiento, efecto positivo en la colabilidad. Aumenta la resistencia y la ductibilidad de los grados ferríticos. Impacto positivo en las propiedades a altas temperaturas arriba del 3%, es comúnmente combinado con Mo, Ni y otros elementos.	A mayor cantidad la transición de temperatura de dúctil a frágil aumenta provocando menor resistencia al impacto. A elevadas cantidades el Si y C tienen que ser ajustados para prevenir la flotación del grafito incrementando la escoria y los problemas del llenado de moldes. Una mayor temperatura de fusión es necesaria.
Mg	Magnesio y aleaciones de magnesio (nodulizantes)	0.03-0.06	Es el elemento esencial para el hierro nodular. Desoxida y desulfura permitiendo que el grafito nodular crezca.	Muy volátil, el rendimiento del magnesio decrece a altas temperaturas. Niveles altos no balanceado con el azufre puede ocasionar la formación de carburos, microporosidades e incrementar la formación de escoria. Un llenado de moldes turbulento puede producir escoria.

Continuación tabla 2.1

Elemento	Fuente	% de Adición	Efectos positivos	Efectos negativos
Mn	Arrabio, chatarra de acero, FeMn	0.1-1.0 grados ferríticos, < 0.20	Promueve la formación de perlita y mejora la templabilidad.	Promueve la formación de carburos que segregan en los límites de grano reduciendo la resistencia mecánica. Este efecto negativo se puede reducir aumentando la cantidad de Si en las secciones delgadas pero es posible que la cantidad de Mn deba de ser dejada baja en la sección gruesa de la fundición y otros elementos deberán ser seleccionados para controlar la estructura de la matriz. Aumenta la temperatura de transición de dúctil a frágil. Puede promover la contracción.
P	Arrabio, chatarra de acero y FeP	Mayor a 0.03	Aumenta la fluidez, estabiliza la perlita, aumenta la dureza y la resistencia.	Se debe de mantener lo mas bajo posible, causando problemas en los hierros nodulares por arriba de 0.03%. Disminuye la ductilidad y da una matriz mas frágil formando micro porosidades.
S	Coque, carburizantes, arrabio, chatarra de acero, moldes de arena, FeS	Hasta 0.03 > a 0.03 con sulfurización	Es esencial para la nucleación de grafito es recomendado un mínimo de 0.005%	Si no es neutralizado se formaran hojuelas de grafito en lugar de nódulos de grafito. Niveles mayores a 0.020% aumenta el consumo de Mg y puede ocasionar problemas formando escoria y reduciendo la efectividad del tratamiento de magnesio. Daña la estructura y las propiedades a menos que esté balanceado con el magnesio.



Continuación tabla 2.1

Elemento	Fuente	% de Adición	Efectos positivos	Efectos negativos
Cu	Cu metálico, alambre de cobre, aleaciones de cobre, chatarra de acero	Hasta 1.5	Promueve la perlita sin formar carburos y aumenta la resistencia y la templabilidad.	Perjudica la formación de ferrita y puede ocasionar que la ferrita sea mas frágil. Concentraciones mayor a 1% pueden ocasionar la degeneración del grafito. La selección de la fuente de cobre es muy importante ya que puede contener trazas de elementos contaminantes como As, Pb, Te y Sb. En presencia de Cu el efecto negativo de estos elementos puede ser mejorado. Promueve la formación de una hojuela de grafito intracelular en combinación de titanio o plomo.
Cr	Aleaciones de acero, laminas de cromo, arrabio, FeCr	Hasta 0.1	Elemento estabilizador de la perlita, pero casi no se utiliza para eso. Aumenta la templabilidad y la resistencia a la abrasión. Es comúnmente usado en el hierro dúctil austenítico para mejorar las propiedades de oxidación y corrosión en aleaciones a altas temperaturas. Aumenta el número de nódulos.	Fuerte promotor de carburos, Aumenta la tendencia a formar subenfriamientos, promueve carburos estables y segrega fuertemente dentro de los límites de grano. Efecto sinérgico con el Mn.
Al	Chatarra de acero, inoculantes ferroaleaciones, componentes de aleaciones ligeras, aluminio metálico.	Hasta 0.2	Mejora la nucleación de grafito y promueve la formación de ferrita, neutraliza al nitrógeno y puede ser neutralizado por el Cerio.	Promueve agujeros H por arriba de 0.015%, da defectos parecidos a la escoria a niveles altos. Porcentajes mayores a 0.08 es perjudicial para el hierro nodular.

Continuación tabla 2.1

Elemento	Fuente	% de Adición	Efectos positivos	Efectos negativos
Ti	Arrabio, pinturas, esmaltes vítreos, retornos de CGI, titanio metálico, FeTi	Hasta 0.2	Promueve la formación de perlita	Para los hierros nodulares debe de ser mantenido lo mas bajo posible. Reduce el número de nódulos, perjudica la formación de grafito nodular a altas concentraciones de Ti. Promueve agujeros H especialmente combinado con Al. Puede ser neutralizado con tierras raras metálicas.
V	Chatarra de acero, acero deherramienta, arrabio, FeV	Hasta 0.02	Mejora la resistencia a la cedencia y la resistencia a la tracción en los hierros nodulares ferríticos con tratamiento térmico, con limitada reducción al impacto y elongación, promueve la perlita.	Forma carburos muy estables que pueden causar problemas para la maquinabilidad. Retarda el recocido, promueve subenfriamientos.
Ni	Láminas de níquel, chatarra de acero, hierros refinados, aleaciones de NiMg	Hasta 0.2	Promueve la formación de grafito, pero menor al Si. Estabiliza la austenita. Incrementa la resistencia sin hacer a la ferrita mas frágil, puede ser usado como sustituto del Si en grados ferríticos. Incrementa la templabilidad especialmente combinado con Mo y con Cu. Mejora la resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas si es aleado correctamente. Reduce levemente el tamaño de grano. Reduce el subenfriamiento.	Promueve la formación de grafito "chunky" a elevadas concentraciones y alto carbón equivalente.

Continuación tabla 2.1

Elemento	Fuente	% de Adición	Efectos positivos	Efectos negativos
Mo	Arrabios refinados, aceros aleados, FeMo	Hasta 0.1 SiMo: 1.0-2.0	Promueve la perlita, aumenta la templabilidad y la resistencia a la cedencia debido al endurecimiento por solución sólida. Se combina con níquel y cromo para mejorar las propiedades a altas temperaturas.	Provoca una fuerte segregación, es un promotor de carburos, forma carburos estables en los límites de grano.

### 2.5.3.1. Efecto del Manganeso

El Manganeso no tiene una influencia aparente sobre la nodularidad del grafito. Sin embargo este elemento tanto beneficia como perjudica a los hierros y al tratamiento de austemperizado, el Mn disminuye la temperatura crítica superior de austenización (A1), incrementa la solubilidad de carbono en la austenita; este elemento es conocido como el segundo más potente agente endurecedor. El manganeso es un elemento que también promueve la formación de perlita y a concentraciones bajas se promueve la formación de una matriz ferrítica, es efectivo para mover la nariz de la perlita en el diagrama enfriamiento continuo CCT (Continuous Cooling Transformation) a tiempos más largos.

La segregación de Mn causa mucha variación en la distribución y solubilidad del carbono, no obstante este elemento estabiliza a la austenita y retrasa la nucleación de la ferrita en la austenita. En áreas ricas en Mn la reacción de austemperizado es pospuesta; también decrece la difusión de carbono en la austenita.

### 2.5.3.2. Efecto del Molibdeno

El Molibdeno es uno de los elementos de aleación más utilizados, con el fin de aumentar la resistencia. Se añade en cantidades de 0,20 a 0,75%, aunque la más común es de 0,35 a 0,55%. Los mejores resultados se obtienen cuando el

contenido de P está por debajo de 0,10%, debido a la formación de un complejo de Mo eutéctico con P y, por tanto, reduce su efecto primario; el módulo de elasticidad se incrementa con la presencia del Mo.

Es un elemento formador de carburos que generalmente se agrega a los hierros nodulares, este elemento es el más importante como agente endurecedor, al igual que el manganeso. El Mo segrega en los límites de las celdas eutécticas y frecuentemente forma finos carburos eutécticos. El carburo causa, significativas pérdidas en la ductilidad, resistencia al impacto y la maquinabilidad.

La formación de carburos se lleva a cabo cuando la cantidad adicionada de Mo excede el 0.5 %, estos carburos son muy estables y difíciles de disolver, usualmente se recomienda adicionar como máximo un 0.35% de Mo. [10].

Desde el punto de vista de tratamiento térmico el molibdeno incrementa la temperatura de austenización y retrasa la reacción de austemperizado. Se considera como una alta concentración de Mo en un ADI a partir del 0.5%; además altas concentraciones de este elemento causa la presencia de grandes cantidades de austenita metaestable sin reaccionar. Su potencial de blanqueo se observa en la figura 2.5.

### **2.5.3.3. Efecto del Cromo**

El cromo (Cr) es un elemento alfégeno, que forma aleaciones sustitucionales en el hierro alfa y aumenta la temperatura A<sub>3</sub>, por lo que eleva la temperatura de austenización al incrementar su contenido, disminuye la región gama, por lo que la solubilidad del carbono es menor.

El cromo generalmente se presenta en cantidades inferiores a 0.10% como un elemento residual en los materiales de carga. Es a menudo añadido para mejorar la dureza y la resistencia del hierro nodular, y para ello, el nivel de Cr se adiciona entre 0.20 y 0.35%, más allá de este rango, es necesario añadir un grafitizador para evitar la formación de carburos.

El Cr es un elemento que no se agrega intencionalmente a un hierro base para fabricar ADI, sin embargo este disminuye la ductilidad y la resistencia a la fatiga en un hierro dúctil normal. Al igual que el manganeso y molibdeno, este segrega en los límites de las celdas eutécticas, como ya se mencionó, promueve la formación de carburos, también el cromo estabiliza los carburos ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) en el eutectoide.

Cuando una cantidad significativa de cromo es combinada con manganeso, se presenta perlita en el carburo, por lo cual la austenización requiere de un mayor tiempo. Carburo ó cementita usualmente se refiere al  $\text{Fe}_3\text{C}$ . En los hierros, los carburos (por ejemplo carburos de cromo) forman una fase con la cementita y reemplaza los átomos de hierro en la estructura cristalina, es decir forman  $(\text{Fe, Mn, Cr, V, Ti})_3\text{C}$ . Estos carburos formados tienen un enlace atómico muy fuerte con los átomos de carbono. A contenidos mayores a 1% promueve la formación de carburos muy estables difíciles de disolver. Su potencial de blanqueo se puede observar en la figura 2.5.

### 2.5.3.4. Efecto de otros Elementos Aleantes

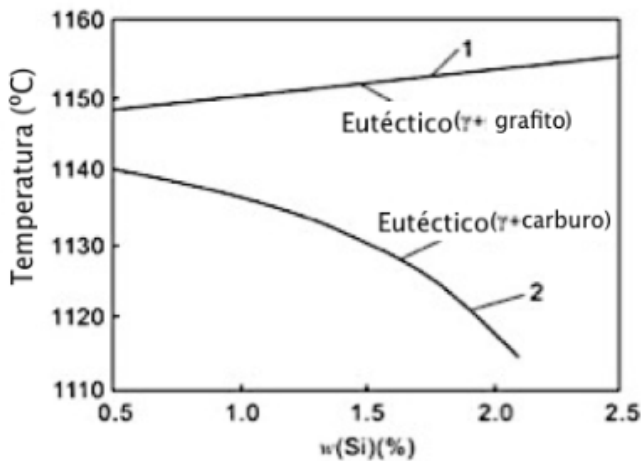
En el caso de los hierros CADI con elementos de aleación, cuanto menor sea la velocidad de enfriamiento, tanto mayor será el efecto de la micro segregación, la cual dará lugar al enriquecimiento en elementos formadores de carburos de las últimas regiones de líquido que solidifica y por ende, a la formación de carburos muy aleados, cuyo tamaño y morfología podrá variar, desde formas ledeburíticas a placas delgadas, según las características de la aleación, el tamaño de pieza y las condiciones del proceso de fabricación.

Las fundiciones dúctiles se pueden alear con cantidades pequeñas de Ni, Mo o Cu para mejorar su resistencia mecánica y capacidad de endurecimiento.

**Carbono.-** Este elemento es el responsable del tamaño y número de nódulos de grafito formados durante la solidificación; 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.

**Silicio.**- Es un agente grafitizador y promueve la formación de una matriz ferrítica, además disminuye el tamaño de las celdas eutécticas y como resultado se obtiene una disminución de formación de carburos el cual dependerá del tiempo de residencia y de una efectiva inoculación. Junto con el carbono determina el carbono equivalente así como las formas o estructuras del grafito.

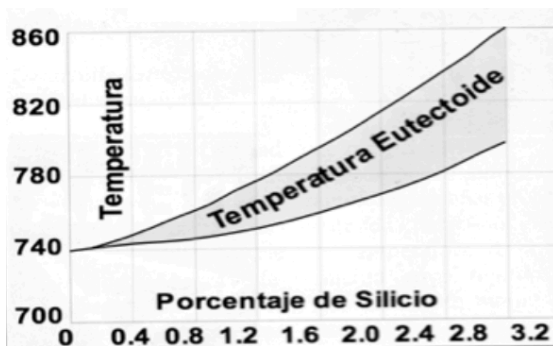
Los elementos de aleación, especialmente los elementos que son promotores de carburos, provocan que las líneas de transformación tanto eutectoide como eutéctica, no sea una sola temperatura, sino que sea un rango de temperaturas, es decir, generan un campo de temperaturas de transformación eutectoide y eutéctica. Como se puede apreciar en la figura 2.3 al aumentar la cantidad de silicio se produce un cambio notable en las temperaturas eutécticas de los diagramas estable y metaestable.



**Fig.2.3.-** Influencia del silicio en la temperatura eutéctica. 1.- Temperatura estable del sistema al equilibrio ( $\gamma$ + grafito), 2.- Temperatura metaestable del sistema al equilibrio ( $\gamma$ + carburo).

Como se observa en la figura 2.6 los elementos de aleación provocan que las temperaturas de transformación eutéctica en los diagramas de fase estable y metaestable ocurren a una temperatura más alta o baja dependiendo el caso, lo cual dificulta la manipulación en el tratamiento térmico de estos hierros.

El silicio es un elemento que como ya se mencionó cambia a la temperatura eutectoide, esta temperatura es la que nos interesa, ya que como se muestra en la figura 2.4; al tener un campo de temperaturas, provoca como consecuencia que dentro de este rango se tenga mezclas de ferrita, perlita sin transformar, austenita transformada, grafito y carburos.



**Fig. 2.4.-** Efecto del aumento del silicio en la temperatura eutectoide [11].

Cobre y Níquel se comportan de manera similar en los hierros. Ellos fortalecen la matriz y disminuyen la tendencia a formar los bordes duros de carburo en las piezas. Dado que son leves grafitizantes, que a menudo son sustituidas por algunos elementos como el Si en el hierro nodular.

Los efectos del cobre y níquel parecen ser benéficos en un sentido de abatimiento de la cantidad de carburos. Para contenidos en exceso del 2%, el cobre puede causar reducción en la nodularidad y el níquel puede causar la formación de martensita.

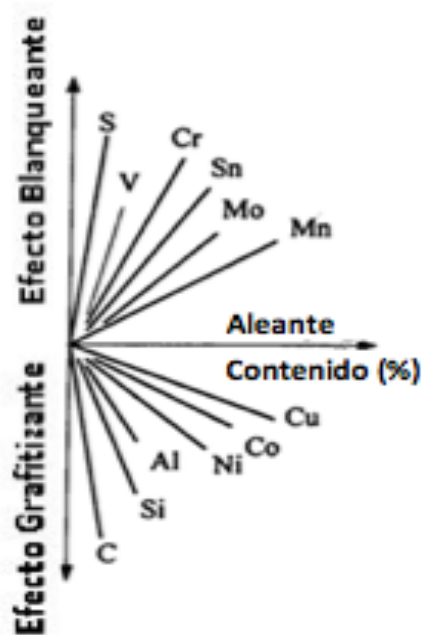
El uso de pequeñas cantidades de titanio promueve una matriz perlítica no teniendo un perjuicio aparente en el efecto a la tendencia sobre la formación de carburos en el hierro.

El Fósforo tiene un escaso efecto sobre la relación grafito/cementita, pero hace que el metal tenga mucha fluidez indirectamente esto debido al bajo punto de fusión de la producción del constituyente, que es fácilmente reconocida en la microestructura. En la producción de piezas de grandes secciones, el fósforo debe

reducirse a alrededor de 0,3% a fin de evitar la contracción por porosidad.

En los hierros nodulares el azufre debe mantenerse abajo de 0.015% debido a que este reacciona con el magnesio formando  $MgS$ , por lo que si se tiene un porcentaje de azufre mayor todo el magnesio reaccionaría con el azufre sin dejar nada de magnesio residual, en consecuencia no se formarían nódulos o una muy baja nodularidad.

El Vanadio tiene un efecto sobre el hierro nodular similar al Mo, pero la concentración debe ser limitada a menos de 0,15% si se quiere evitar la presencia de carburos. Incluso en pequeñas cantidades, el vanadio tiene un efecto beneficioso sobre la elevación de la temperatura de un hierro gris.



**Figura 2.5.-** Efecto de los elementos de aleación sobre la grafitización y el poder de blanqueo sobre un hierro colado.



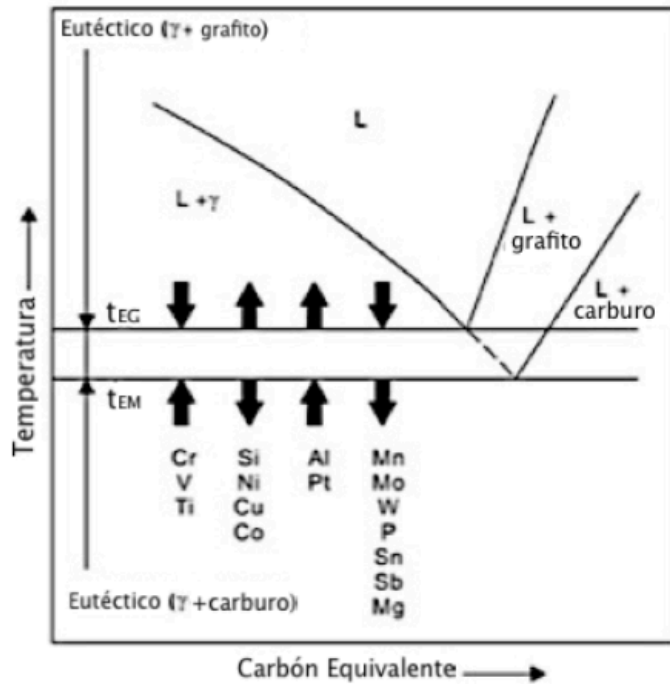


Fig. 2.6.- Efecto de los elementos de aleación en la temperatura eutéctica  $t_{EG}$ ,  $t_{EM}$  de los sistemas estable y metaestable respectivamente [9].

Tabla 2.2. Efecto del Cr, Cu, Mo, Ni, Sn y V en las siguientes propiedades [12].

Aleante	% Máximo utilizado	Tendencia al blanqueo	Efecto sobre el grafito	Efecto sobre la perlita
Cr	0.5	Fuerte	Refinador Mediana	La incrementa
Cu	1.5	Débil o negativo	Neutral	La incrementa poco
Mo	1.0	Mediano	Refina	Decrece Medianamente
Ni	3.0	Débil o negativo	Refinador Mediano	Decrece Medianamente
Mn	----	Mediano	Refinador Fuerte	Incrementa F= (%S)

### 2.5.4. Campo de la Línea A1 y el Efecto del Silicio

En los hierros nodulares el contenido de C se encuentra entre 3.5 % y 4.6 % en peso y de silicio entre 3% y 4%. Para lograr la formación de hierro dúctil se deben tomar en cuenta tres factores: potencial de nucleación del líquido, composición química del líquido y velocidad de enfriamiento.

Las dos primeras determinan el potencial de grafitización y para controlarlas se utilizan inoculantes y grafitizantes. La velocidad de enfriamiento es responsable (junto con el contenido de Si) de la solidificación metaestable o estable y de la microestructura resultante. El magnesio adicionado como Fe-Si-Mg se utiliza como nodulizante y hace posible la formación de nódulos de grafito.

También pueden usarse Ce como nodulizante, sin embargo es más costoso que el magnesio, pero ambos elementos producen el mismo resultado. El Magnesio también es responsable de provocar subenfriamiento durante la solidificación eutéctica (blanqueo) por lo que se requiere mayor cantidad de Si que el que se utilizaría para un hierro gris para evitar llegar a un eutéctico metaestable, es decir, la formación de carburos.

El P, Si, Al, Cu y Ni son elementos grafitizantes, el Silicio que es el segundo aleante principal después del carbono en los hierros nodulares modifica las líneas y puntos críticos del diagrama binario Fe-C separando las curvas del eutéctico estable y metaestable logrando alcanzar el eutéctico estable antes del metaestable. El Ni y Cu además de ser grafitizantes, reducen la tendencia a formar carburos y ferrita respectivamente. Ambos benefician la formación de perlita fina.

En el diagrama estable el resultado es la presencia de austenita y grafito en vez de ledeburita (austenita y  $Fe_3C$ ) en el eutéctico, para velocidades de enfriamiento moderadas. Los contenidos de azufre y fósforo deben ser mínimos para evitar que reaccionen con el magnesio.

Elementos como el Cr, Mo y Mn deben ser reducidos a fin de aminorar las consecuencias de su comportamiento antigrafitizante, el porcentaje en peso de estos elementos en un hierro dúctil suele ser para el Cr y Mo menor al 3% y Manganeso menor al 1%.

### **2.5.5. Efecto de la Temperatura de Austenización**

En la etapa de austenizado se eleva la temperatura de la fundición nodular, en un rango de 871 a 982 °C, por un tiempo suficiente para que todo el material se transforme en austenita y se sature de carbono.

Esta etapa es muy importante en el proceso, debido a que si no se logra transformar toda la matriz de perlita y/o perlita-ferrita en austenita las propiedades finales del ADI serán pobres. Tanto el tiempo como la temperatura de austenizado afectan las propiedades finales del ADI. El valor óptimo para ambos parámetros dependerá del tamaño de sección, la composición química y el grado de segregación de los elementos de aleación.

La selección de la temperatura de austenizado resulta fundamental cuando la temperatura de austemperizado es alta. Cuando ésta es baja no resulta tan importante, sin embargo, temperaturas altas de austenizado resultan en mejores propiedades mecánicas.

#### **2.5.5.1. Efecto sobre los Carburos**

Como ya se comentó en este capítulo, existen diferentes elementos que promueven la formación de carburos (especialmente Mn, Mo y Cr), estos elementos también provocan que los carburos generados sean muy estables a temperaturas de austenización (850° a 975 °C), es decir, que sea difícil la disolución de estos carburos. Sin embargo un problema que presenta el agregar estos elementos, es que la temperatura y tiempo de austenización son más elevados.

La generación de carburos es inaceptable en un hierro nodular convencional y

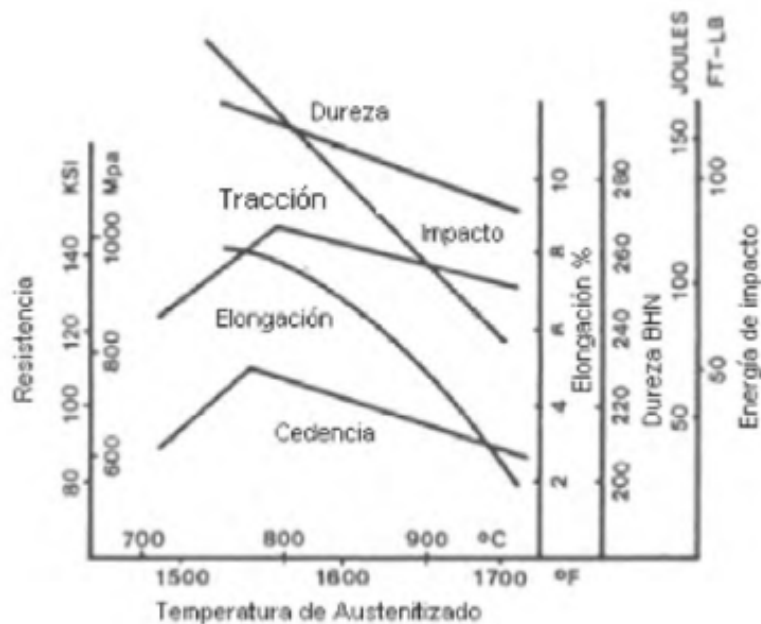
también en los ADI, en general solo aceptan alrededor del 1%; sin embargo actualmente hay nuevas aplicaciones para estos materiales, los CADi son materiales tratados térmicamente Austemperizados y los carburos le confieren propiedades únicas como resistencia al desgaste, las fracciones de carburos deseables son mayores al 15-20%.

### **2.5.5.2. Efecto sobre la Microestructura**

Temperaturas de austenización altas provocan que la austenita crezca, esto puede provocar problemas al momento de austemperizar la muestra ya que puede haber diferencias en la ausferrita (tamaño) o mezcla de constituyentes y también después de la descomposición de los carburos se genera austenita y grafito, este grafito tiende a difundirse hacia los nódulos por diferencia de concentración y provoca que la nodularidad de la pieza cambie.

### **2.5.5.3. Efecto sobre las Propiedades Mecánicas**

En las estructuras que se Austemperizaron, la dureza depende del contenido de carbono en la matriz, en general del contenido de elementos de aleación, de la microestructura original, y el tamaño de sección; determinan el tiempo necesario para la austenización. Como se muestra en la figura 2.5, la temperatura de austenización mas adecuada define las máximas propiedades mecánicas que pueden alcanzarse.



**Figura 2.5.-** Efecto de la Temperatura de Austenización en las Propiedades Mecánicas

## 2.6. Obtención del hierro nodular.

El hierro nodular es una aleación Fe-C-Si, en la que el grafito está presente en la forma de esferoides o nódulos.

Este carbono contenido dentro del hierro nodular se puede presentar de dos formas:

- 1.- Carbono combinado: precipita en la microestructura como cementita o carburo de hierro ( $Fe_3C$ ).
- 2.- Carbono libre: precipitado en forma de esferoides ó nódulos.

Para la obtención del hierro nodular se tiene que llevar a cabo cuatro tratamientos al metal líquido que consta de la desulfuración, (en caso de que sea necesario) la inoculación, nodularización y post inoculación.

### 2.6.1. Inoculación y post-inoculación.

Desde el punto de vista microscópico y metalúrgico la inoculación se considera como una nucleación heterogénea, es decir, es el proceso de agregar núcleos

artificiales con el fin de producir una solidificación eutéctica, precipitando grafito con un mínimo de subenfriamiento.

Los hierros son inoculados por varias razones, la primera es controlar el subenfriamiento de zonas de piezas que solidifican rápido, de paredes delgadas y puntas agudas, evitando así, la formación de carburos ledeburíticos.

Los tipos de inoculantes son de tipo grafito o ferrosilicio, el más empleado es el ferrosilicio, el FeSi70 y el FeSi50, además incluye elementos como aluminio, bario, calcio, cerio, tierras raras, estroncio, titanio y zirconio en porcentajes bajos.

En el caso del hierro nodular la inoculación sirve para obtener principalmente una alta densidad de esferoides y la post-inoculación se utiliza para el mismo objetivo.

### **2.6.2. Nodularización.**

En la producción del hierro nodular es importante el control de los agentes contaminantes perjudiciales, por otro lado cuando se efectuó el tratamiento de nodularización es necesario mantener el azufre por debajo del 0.02%, esto se requiere para no hacer costoso el proceso y además conlleva otras implicaciones entre ellas grandes formaciones de sulfuros que perjudican las propiedades mecánicas del metal al vaciarse (fluidez, inclusiones, etc.).

El tratamiento de nodularización consiste en agregar magnesio al metal líquido, en forma de ferroaleaciones como FeSi9Mg o FeSi5Mg y algunas veces contienen elementos de la familia de las tierras raras por ejemplo el cerio, de manera que el carbono libre precipite en forma de esferoides (nódulos).

## **2.7. Caracterización Microestructural de Hierros Nodulares**

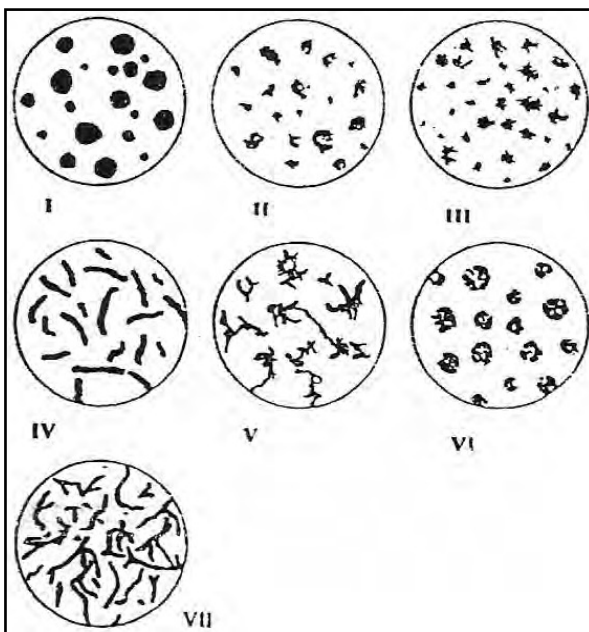
### **2.7.1. Tipo de Grafito, Tamaño de Nódulo, %Nodularidad, Densidad de Nódulos**

Una manera de clasificar el grafito es de acuerdo a su forma, estas formas que presenta el grafito son: grafito laminar u hojuela (FG), grafito esferoidal (SG), grafito compacto o vermicular (CG) y grafito maleabilizado (TG), la cual se observa

en la figura 2.6 y la tabla 2.3, de acuerdo a la norma ASTM A247 - 67.

**Tabla 2.3.** Clasificación de la morfología del grafito.

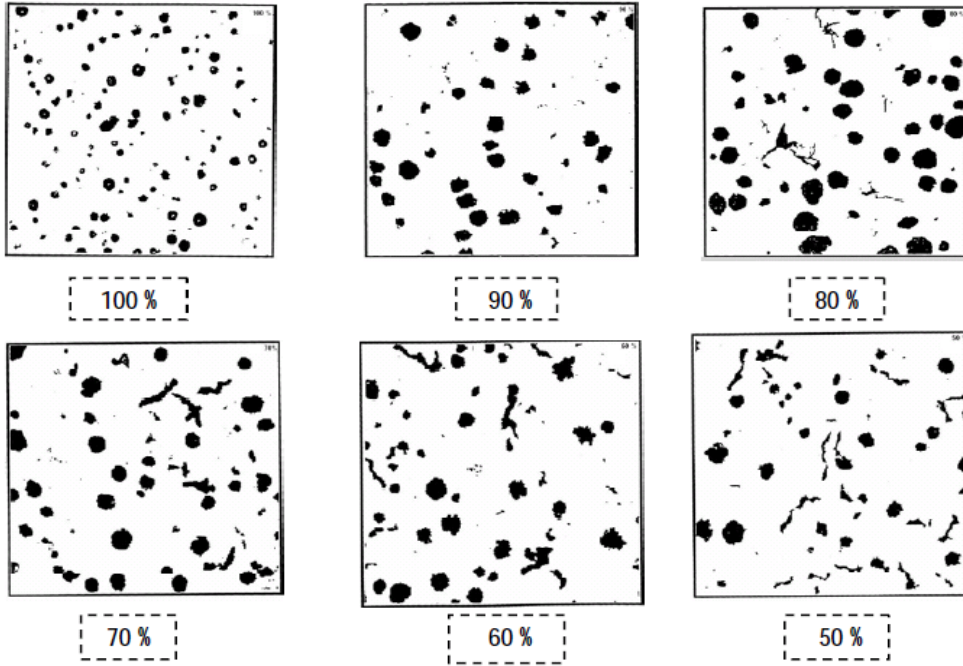
ASTM A 247 -67	ISO/R 945-1969 (Equiv.)	DESCRIPCIÓN
I	VI	Grafito esferoidal
II	VI	Grafito esferoidal imperfectamente formado
III	IV	Grafito Maleabilizado
IV	III	Grafito compacto
V	II	Grafito en forma de cangrejo
VI	V	Nódulos en forma irregular abierta
VII	I	Grafito en forma de hojuela



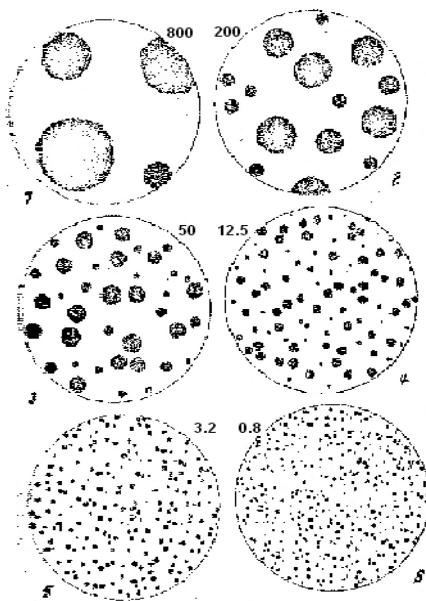
**Figura 2.6.-** Formas del grafito para clasificar a los hierros colados a 100x.

## Fundamentos Teóricos

Otras características que presentan los nódulos de grafito son: % de nodularidad, tamaño de nódulo y densidad de nódulos en nódulos/mm<sup>2</sup>, los patrones para evaluar estas características se presentan en las figuras 2.7, 2.8 y 2.9.



**Figura 2.7.-** Patrón para evaluar el % de Nodularidad.



Tamaño	Dimensión máxima (mm <sup>2</sup> ) 100x
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

\*\* La Dimensión máxima se refiere al diámetro de los nódulos

**Figura 2.8.-** Patrón para evaluar el tamaño de nódulo a 100X y tabla de tamaños.



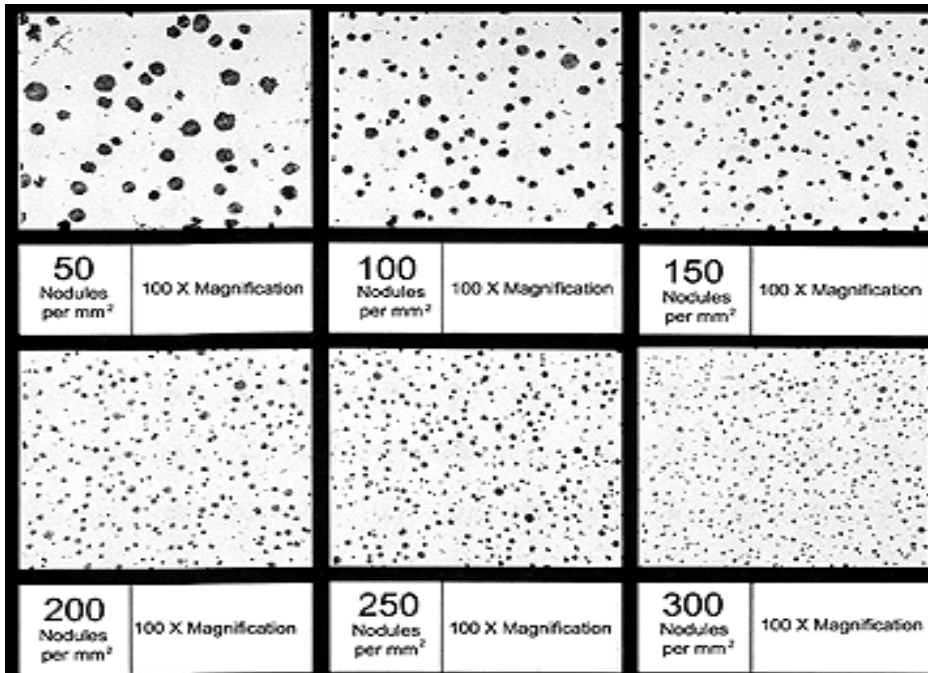


Figura 2.9.- Patrón para evaluar la densidad ó conteo de nódulos

# *Capítulo III*

## *Desarrollo Experimental*

El desarrollo experimental del presente trabajo se dividió en dos etapas:

1. Fabricación del hierro nodular aleado con 2.2%Cr.
2. Caracterización metalográfica del hierro nodular antes y después del tratamiento de disolución para establecer la cinética de disolución de carburos.

Es importante hacer mención que este trabajo se concentro en la segunda etapa que es el objetivo principal. El hierro nodular que se utilizó fue fabricado anteriormente para realizar investigación para otros proyectos. En los puntos 3.1 y 3.2 se dará una breve explicación del proceso de fabricación y de las condiciones de moldeo. Estos puntos no se realizaron en este trabajo.

### **3.1. Proceso de fabricación.**

Para la fusión del hierro nodular se utilizo un horno de inducción sin núcleo con capacidad de 100 kg. Las materias primas primarias, de ajuste y así como el balance de carga se encuentran localizados en el Anexo 1.

### **3.2. Condiciones de moldeo.**

Se fabricó el bloque "Y" (K block) de 3cm de espesor mediante el proceso de moldeo en verde. Las condiciones de la mezcla se muestra a continuación: Arena Sílice: No. AFS 50-60, %Bentonita Ca: 40, Bentonita Na 60%, % de humedad: 3.5, % Carbón Marino: 2

### **3.3. Caracterización de la Microestructura**

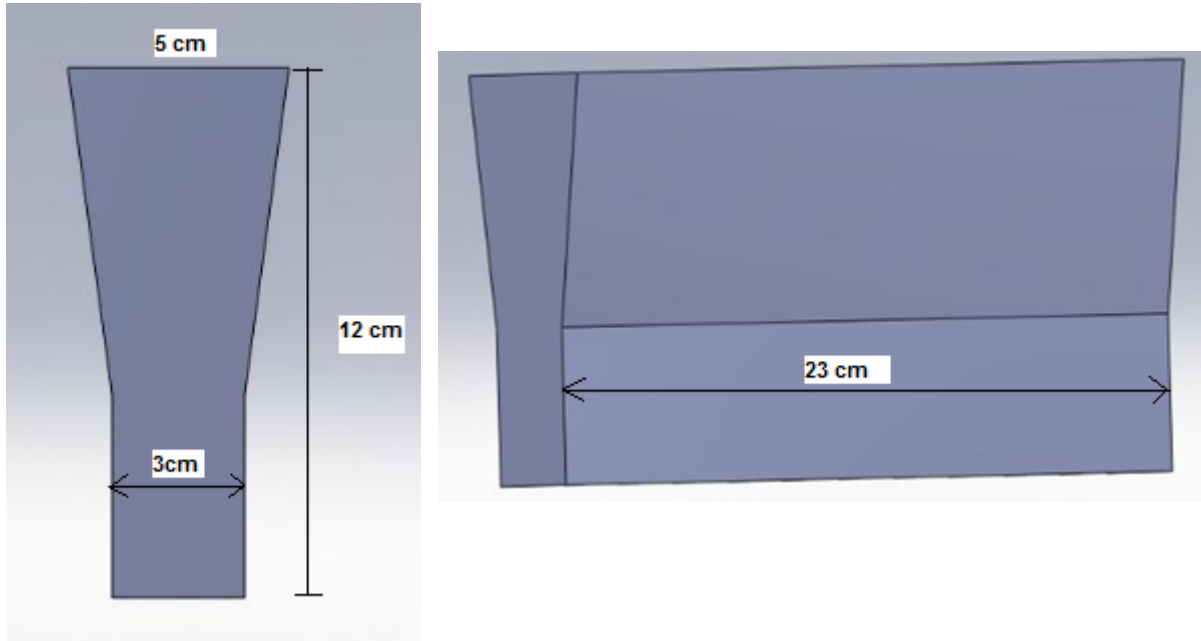
#### **3.3.1. Muestreo e Identificación de las piezas**

La preparación de cada una de las muestras antes y después del tratamiento de austenización se llevo a cabo de la siguiente forma:

Se cortó del bloque "Y" (figura 3.1) la zona de trabajo (eliminación del alimentador) figura 3.2. De esta sección se cortaron cuatro piezas en forma de rectángulos,

## Desarrollo Experimental

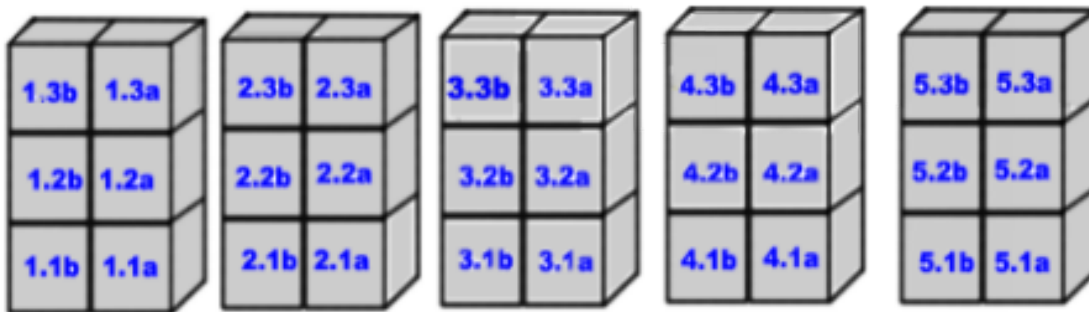
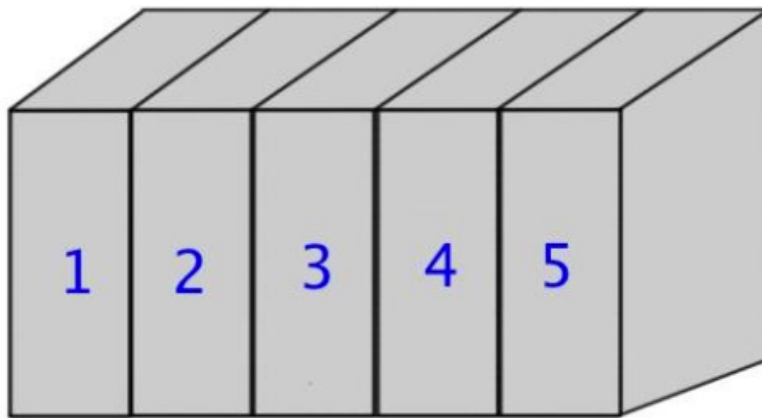
cada uno de ellos se cortó por la mitad y de cada mitad se obtuvieron tres muestras de aproximadamente  $1\text{cm}^2$  como se muestra en las figuras 3.3 y 3.4.



**Figura 3.1.-** Esquema del bloque "Y" y dimensiones.



**Fig.3.2.-** Imagen del bloque “Y” después de cortar la parte inferior de donde se obtuvieron las muestras.



**Fig.3.3.-** Esquema de la zona de trabajo del bloque “Y” una vez cortada, mostrando como se seccionó la pieza.

**Fig. 3.4.** Esquema de obtención de muestras e identificación.

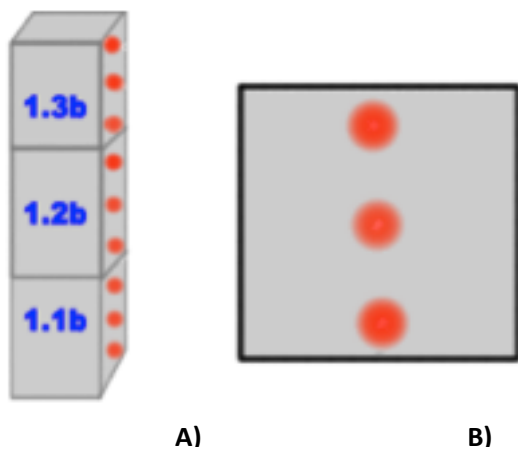
### 3.3.2.- Preparación Metalográfica

1.- Cada muestra se desbasta desde la lija numero 80 hasta la 600, en cada lija se gira la pieza 90° para que las rayas queden en una sola dirección.

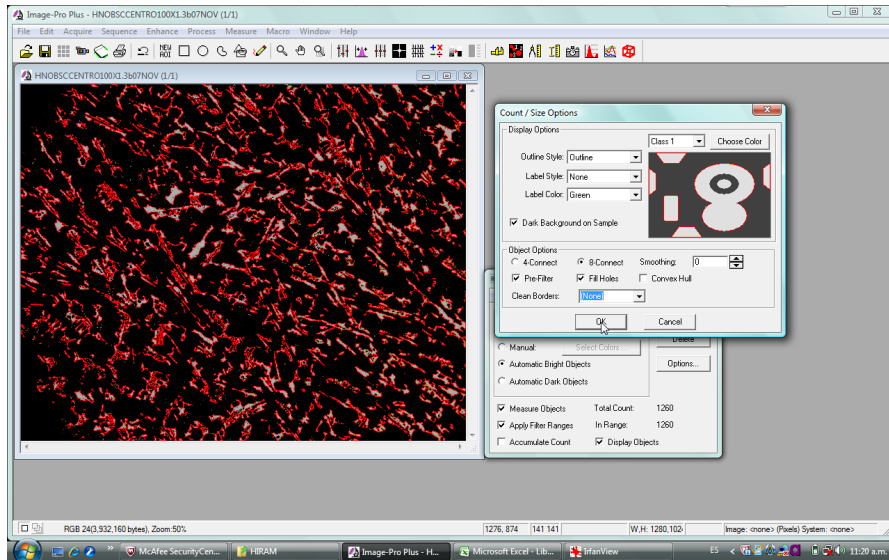
2.- Cada pieza se pule en un paño fino a 219 RPM moviendo la pieza lentamente en círculos hacia el lado contrario de las manecillas del reloj, esto con la finalidad de evitar el efecto de cola de cometa. Para esto se utiliza alúmina de 0.3 micras como abrasivo.

## Desarrollo Experimental

- 3.- Una vez que la pieza queda pulida a espejo, se enjuaga, se seca con aire y se observa en el microscopio a 100X, para corroborar que es un hierro nodular y se toma foto.
- 4.- Utilizando el patrón American Foundrymen's Society (AFS), se lleva a cabo la caracterización del grafito (tipo, tamaño, densidad y % de nodularidad)
- 5.- Cada muestra se ataco con Nital 3 (3% de  $\text{HNO}_3$  y 97% de alcohol etílico) para identificar los microconstituyentes de la matriz (ferrita, perlita y carburos) por 4 segundos pasándoles un algodón y secando.
- 6.- Se observa cada pieza en el microscopio óptico para ver que se haya atacado correctamente y se toman fotos en diferentes zonas a 100X, como se muestra en la figura 3.5.
- 7.- Para poder realizar el conteo de los carburos se oscureció la microestructura con una solución de 10 mL de  $\text{HNO}_{3\text{conc.}}$ , 4mL de  $\text{HF}_{\text{conc.}}$  y 87 mL  $\text{H}_2\text{O}_{\text{dest.}}$ , sumergiendolas y agitándolas de 3 a 4 minutos a temperatura ambiente.
- 8.- Con la finalidad de evaluar el porcentaje de carburos en cada una de las piezas (16 muestras) se capturan imágenes a 100X,utilizando el software Image Pro Plus (figura 3.6).



**Fig. 3.5.** Esquema de la sección y zona de donde se tomaron las fotos. A) vista lateral B) detalle de las zonas de evaluación.



**Fig. 3.6.-**Imagen obtenida por Image Pro Plus que se utilizó para cuantificar la fracción de carburos.

### 3.4. Tratamiento de Austenización

- 1) Primero se formaron grupos de muestras que tuvieran un % de carburos similar, identificando la zona de la que se cortó la muestra y la cara en la que se evalúa la fracción de carburos en condiciones de colada.
- 2) Se tomaron 4 muestras y se austenizaron a  $900^{\circ}\text{C}$  en una mufla, después de alcanzar la temperatura de tratamiento se dió una permanencia de 60, 90, 120, y 150 minutos retirando cada una de las piezas respectivamente y enfriándolas en agua a temperatura ambiente para detener la disolución de loa carburos.
- 3) Se repitió el procedimiento anterior para 12 muestras más, tomando grupos de 4 piezas a las temperaturas de tratamiento de  $925^{\circ}\text{C}$ ,  $950^{\circ}\text{C}$  y  $975^{\circ}\text{C}$ .

El diseño experimental se muestra en la tabla 3.2, los números debajo del tiempo de tratamiento indica la posición en el bloque “Y” de donde se cortó cada muestra.

## Desarrollo Experimental

**Tabla 3.2.-** Diseño experimental de las temperaturas y tiempos de austenización. Cada uno de los tratamientos se realizaron en una mufla ThermoScientific, modelo N° FB1315M.

GrupoNo. Muestra	T <sub>γ</sub> (°C)	Tiempo de Austenización t <sub>γ</sub> (min)			
		60	90	120	150
<b>1</b>	<b>900</b>	4.2a	4.1b	5.1b	5.2a
<b>2</b>	<b>925</b>	1.1b	1.2a	3.3b	3.3a
<b>3</b>	<b>950</b>	2.1a	1.1a	2.3a	2.1b
<b>4</b>	<b>975</b>	3.2a	3.2b	3.1a	3.1b

- 4) Se repite el procedimiento de preparación metalográfica para cada muestra. Con el porcentaje inicial de carburos y el porcentaje final (después del tratamiento) se evaluó la fracción disuelta.

El porcentaje de carburos disueltos se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de Carburos Disueltos} = \left( \frac{f_{co} - f_{cdt}}{f_{co}} \right) * 100$$

Donde:

**f<sub>co</sub>**= Fracción de carburos en condiciones de colada (antes del tratamiento).

**f<sub>cdt</sub>**= Fracción de carburos después del tratamiento de austenización.



# *Capítulo IV*

## *Resultados y Discusión*

## **IV. Resultados y Discusión**

### **4.1. Caracterización del Hierro Nodular Base.**

#### **4.1.1. Composición Química.**

La tabla 4.1 muestra la composición química del hierro nodular experimental, se obtuvo por medio de Espectrometría de Emisión Atómica (EEM).

**Tabla 4.1-** Composición química del hierro nodular base.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Mg
3.223	3.077	0.478	<0.01	0.0045	2.26	0.05	0.033	0.476	0.048

#### **4.1.2. Carbono Equivalente (C.E.)**

Indica que tan cercano de la composición eutéctica esta un hierro de composición particular (efecto del Si), se calculó de acuerdo a:

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

$$C.E = 3.223 + \frac{1}{3} ( 3.077 + 0.01 ) = 4.25$$

### **4.2. Evaluación del hierro nodular base.**

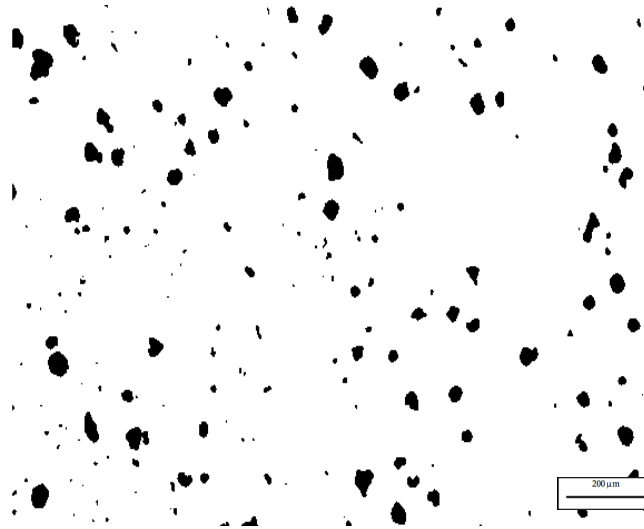
A partir del método de evaluación aplicado por la AFS utilizando la norma ASTM A- 247, se caracterizó el tipo de nódulo, el tamaño de nódulo, la densidad de nódulos de cada una de las probetas antes de ser atacadas. En la siguiente tabla 4.2 se muestran los resultados para cada una de las muestras obtenidas del bloque "Y".

## Resultados y Discusión

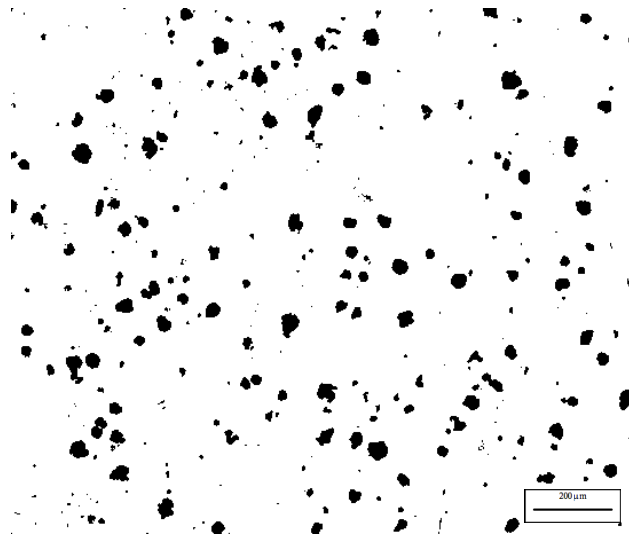
**Tabla 4.2.-** Características del grafito en las muestras antes del tratamiento, zona (1= izquierda, 2= centro, 3= derecha), tamaño y densidad de nódulos de las probetas antes del tratamiento de austenización y sin ataque.

Muestra	Zona	Tipo de Grafito	Tamaño de Nodulos	%Nodularidad	Nodulos/mm <sup>2</sup>
4.2a	1-3	1	5 y 6	90	100
4.1b	1-3	1 y 2	5 y 6	90	100
5.1b	1-3	1 y 2	5 y 6	90	100
5.2a	1-3	1 y 2	5 y 6	80	100
1.1b	1-3	1	5 y 6	90	120
1.2a	1	1 y 2	5	80	120
	2	1 y 4	5	90	120
	3	1 y 2	5 y 6	80	120
3.3b	1	1 y 2	5 y 6	90	100
	2	1 y 2	5 y 6	80	100
	3	1 y 2	5 y 6	80	120
3.3a	1-3	1 y 2	5 y 6	90	120
2.1a	1-3	1 y 2	5 y 6	80	100
1.1a	1-3	1 y 2	5 y 6	90	100
2.3a	1-3	1	5 y 6	90	120
2.1b	1-3	1 y 2	5 y 6	80	120
3.2a	1	1, 2 y 5	5 y 6	80	100
	2	1 y 2	5 y 6	80	100
	3	1 y 2	5 y 6	80	100
3.2b	1-3	1 y 2	5 y 6	90	100
3.1a	1-3	1 y 2	5 y 6	90	120
3.1b	1-3	1 y 2	5 y 6	90	100

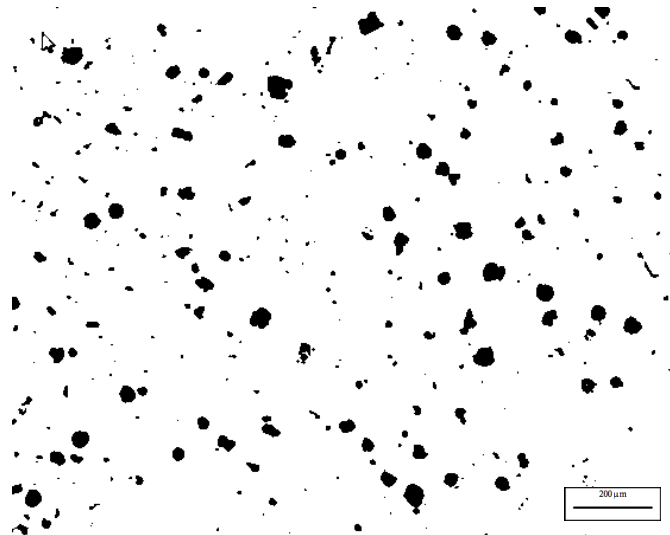
En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran las microestructuras de tres zonas de la probeta, sin ataque y tomada a 100x. En estas imágenes se puede ver la homogeneidad del grafito, principalmente del tipo 1 y en algunas partes del tipo 2, una densidad de nódulos en promedio de 110 nódulos /mm<sup>2</sup>, una nodularidad del 90% y un tamaño de nódulo entre 5 y 6.



**Fig.4.1.** Muestra de la parte central, tomada a 100x, sin ataque.



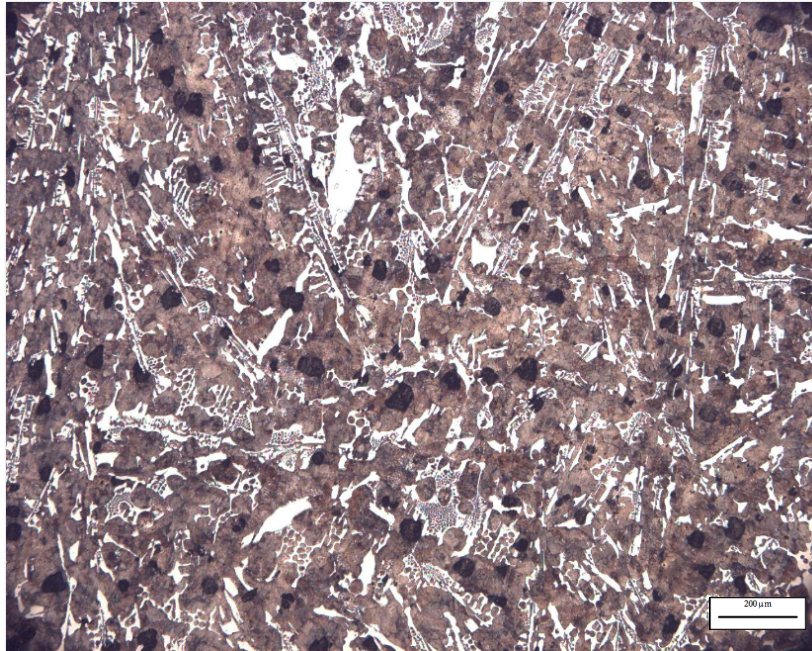
**Fig. 4.2.** Muestra de la zona derecha, tomada a 100x, sin ataque



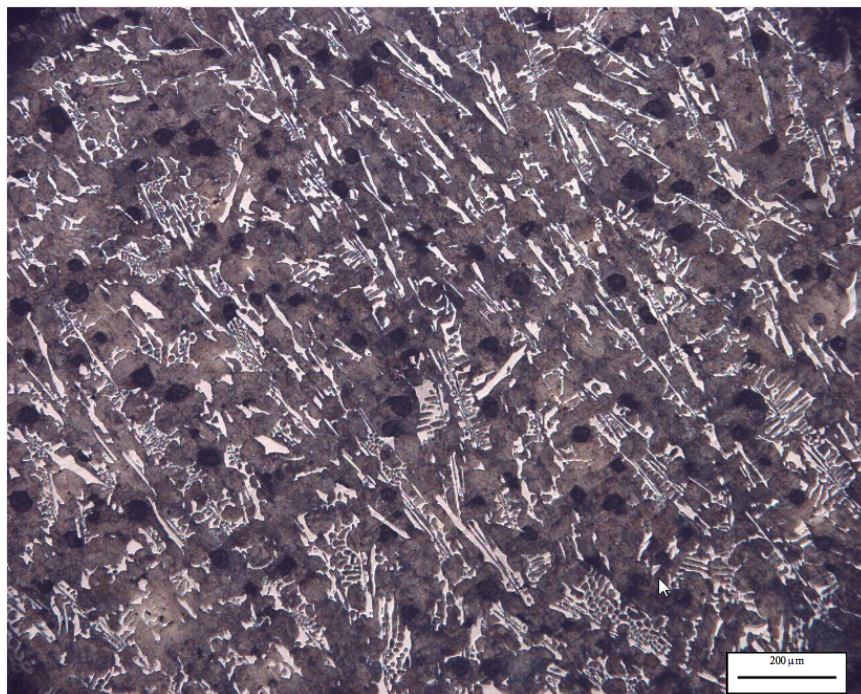
**Fig.4.3.** Muestra de la zona izquierda, tomada a 100x, sin ataque.

### **4.2.1. Matriz del Hierro Nodular Experimental**

En las figuras **4.4**, **4.5** y **4.6** se muestran las microestructuras del hierro nodular base en las tres zonas de las muestras evaluadas. Todas las muestras presentaron la misma microestructura en la que se observa perlita y carburos, con un contenido similar de estos dos microconstituyentes, presentando una matriz homogénea de estos. Estas imágenes fueron tomadas a 100x y se atacaron con Nital 3. En estas imágenes se pueden ver que las muestras tienen un alto contenido de carburos, principalmente en forma de ledeburita transformada, este es un microconstituyente que es estable a temperatura ambiente y está formado de perlita y cementita.

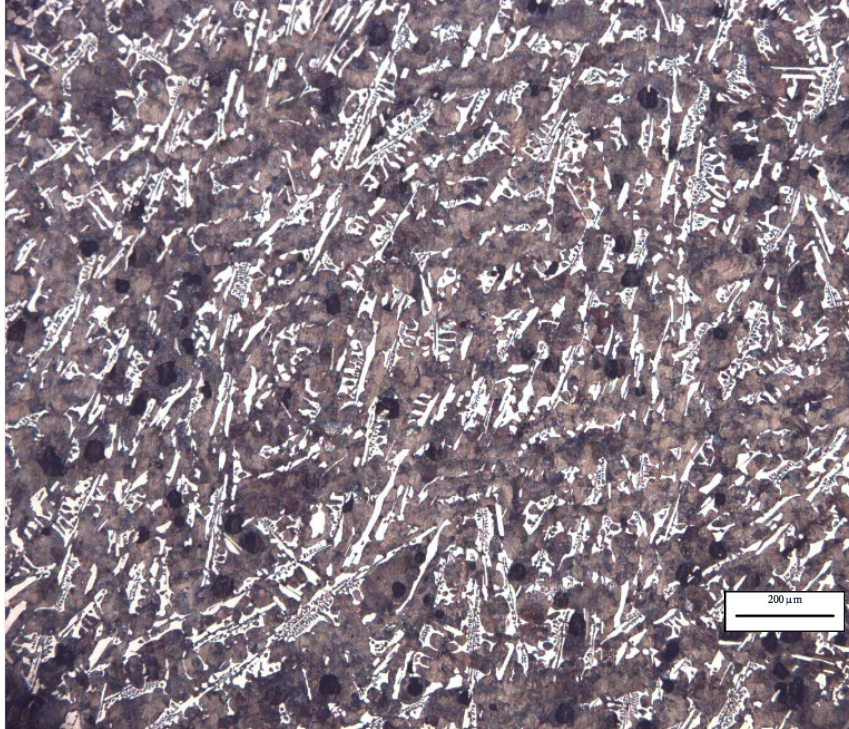


**Fig. 4.4.** Microestructura de la parte central de la muestra 3.2a tomada a 100 aumentos.



**Fig.4.5.-** Microestructura de la parte derecha de la muestra 3.2a, tomada a 100 aumentos.

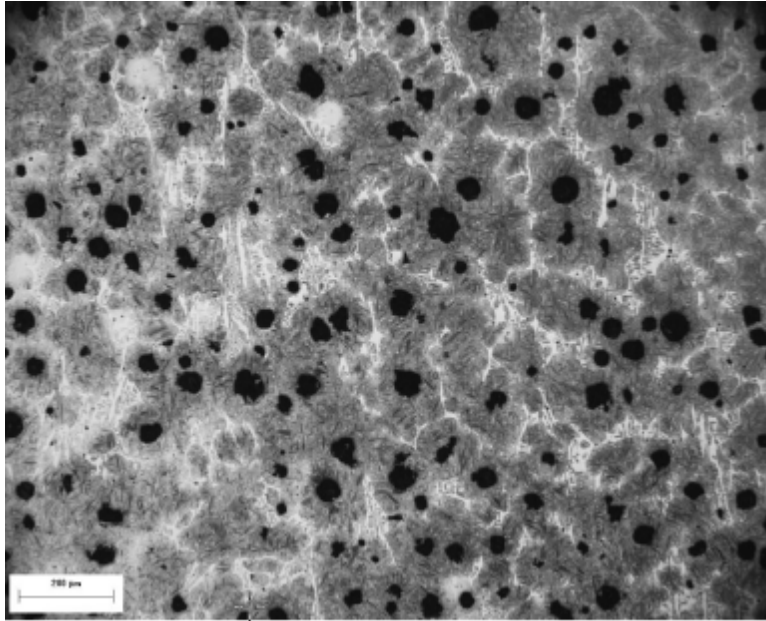




**Fig.4.6.-** Microestructura de la parte izquierda de la muestra 3.2a tomada a 100 aumentos.

#### **4.2.2. Matriz Después del Tratamiento Térmico de Austenización.**

Al realizar el tratamiento de austenización, lo que se pretende hacer es que se transforme toda la perlita a austenita, teniendo a esa temperatura únicamente carbono grafito, austenita y los carburos estables. Esta transformación se logra a una temperatura superior a la temperatura eutectoide, es muy importante tener el tiempo y temperatura adecuados ya que si no se cumplen con estas dos variables no se podrá completar la transformación de perlita en austenita. En la **figura 4.7** se muestra la microestructura en donde se observa las agujas de martensita, nódulos de grafito y los carburos estables, por lo que muestra que el tratamiento de austenizado se llevo a cabo correctamente.



**Fig.4.7.-** En esta imagen se muestra la microestructura de la figura 3.2a a 975°C y 90 minutos de austenizado.

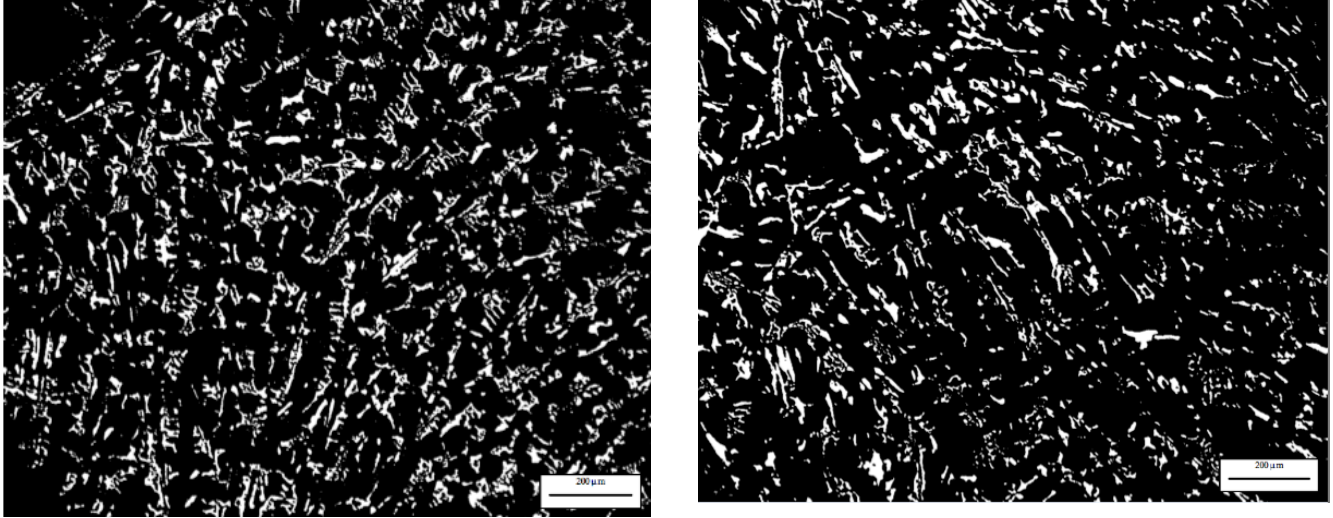
### **4.2.3. Fracción de carburos antes y después del Tratamiento Térmico.**

En las figuras 4.8 a 4.23 se muestran las imágenes de las piezas antes y después del tratamiento de austenización a diferentes tiempos y temperaturas. Estas piezas se sobreatacaron con una solución de 47mL de agua destilada, 3 mL de  $\text{HNO}_3(\text{conc})$  y 2 mL de HF. Este reactivo obscurece la matriz totalmente dejando visible únicamente los carburos de color blanco. Para cuantificar los carburos se utilizó el software Image Pro Plus, a partir del cual toma el área definida por la foto y hace un barrido contando las zonas de color blanco. Con base a la cantidad de carburos obtenidos antes y después del tratamiento, se obtuvo la cantidad de carburos disueltos y por lo tanto la cantidad de carburos estables.

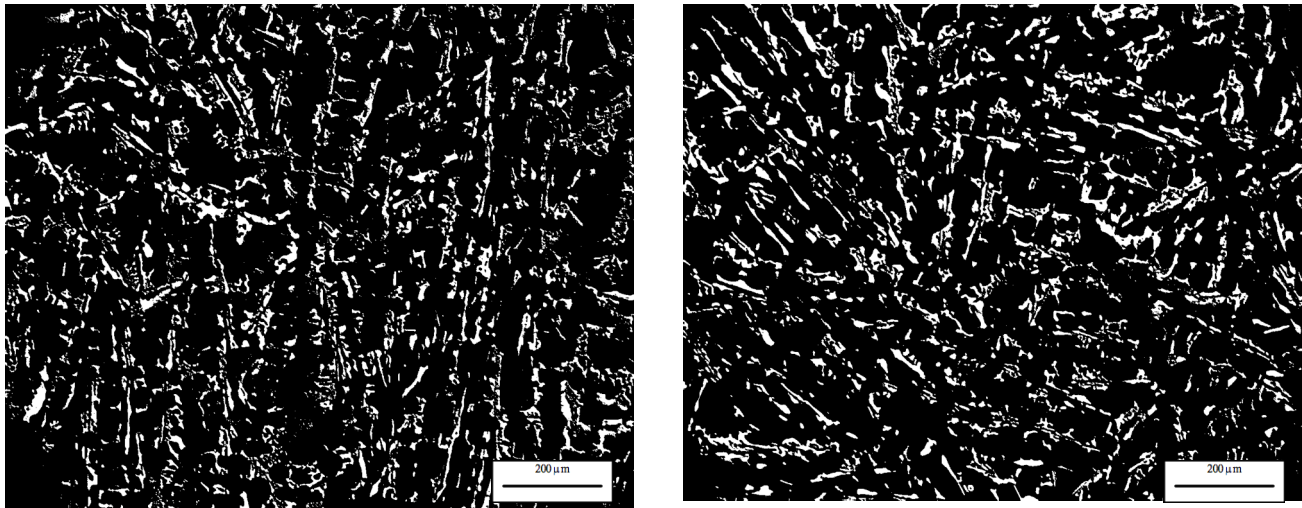
La tabla 4.3 muestra las fracciones de carburos antes y después del tratamiento de austenización, así como la fracción de carburos disueltos.

Las figuras 4.8 a 4.11 presentan las microestructuras con los carburos antes y después de ser tratados a 900°C, de la figuras 4.12 a la 4.15 a 925°C, de la 4.16 a 4.19 a 950°C y de la 4.20 a 4.23 a 975°C.

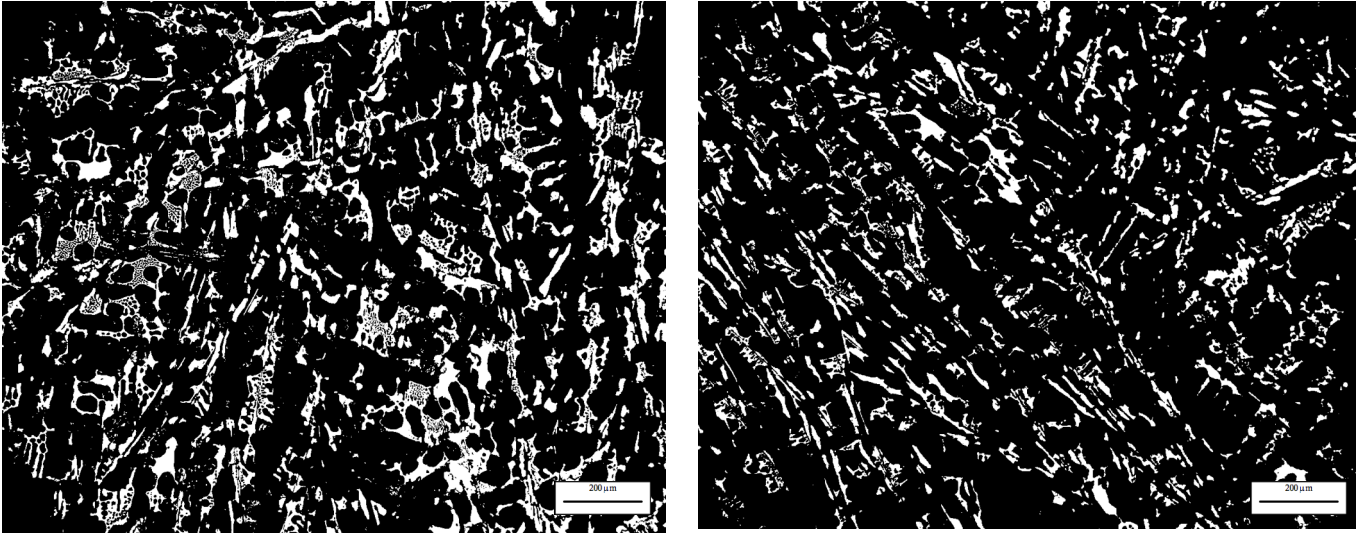




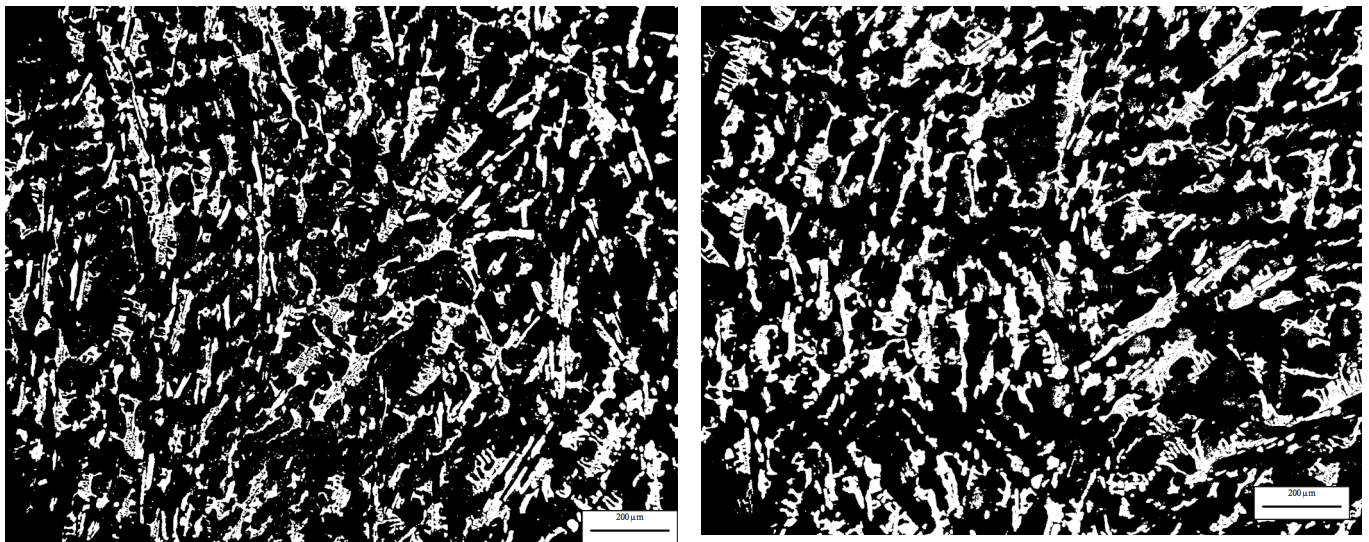
**Figura. 4.8.** Muestra 4.2a centro antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) a 900°C y 60 minutos de austenización.



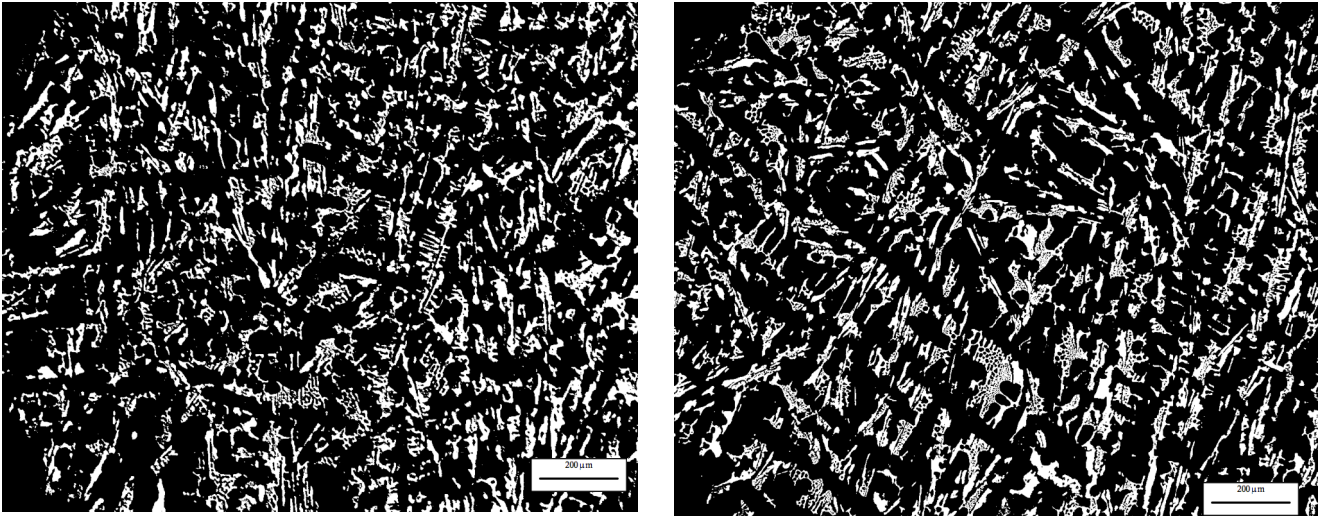
**Figura. 4.9.** Muestra 4.1b Centro antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) a 900°C y 90 minutos de austenización.



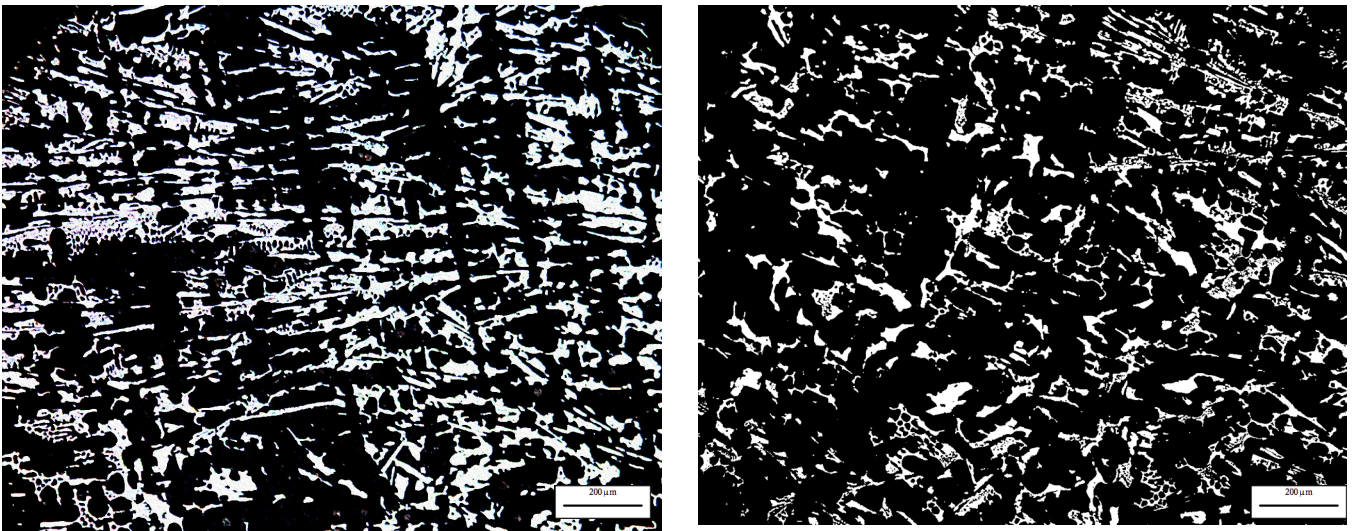
**Figura 4.10.** Pieza 5.1b centro antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) a 900°C y 120 minutos de austenización.



**Figura 4.11.** Pieza 5.2a centro antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) a 900°C y 150 minutos de austenización.

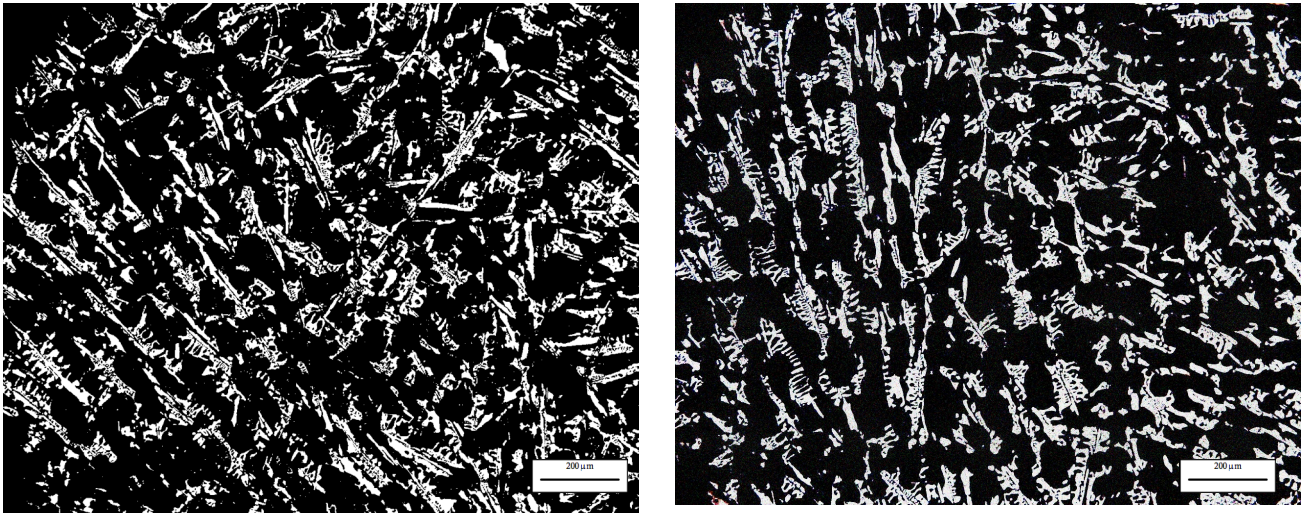


**Figura 4.12.** Pieza 1.1b antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) a 925°C y 60 minutos de austenización.

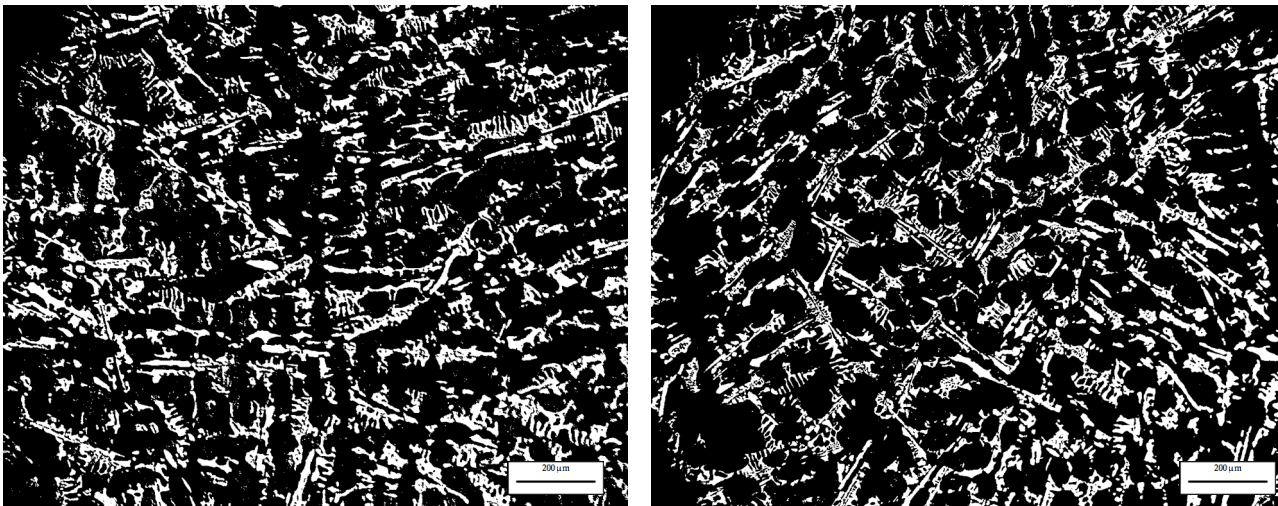


**Figura 4.13.** Pieza 1.2a antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) a 925°C y 90 minutos de austenización.

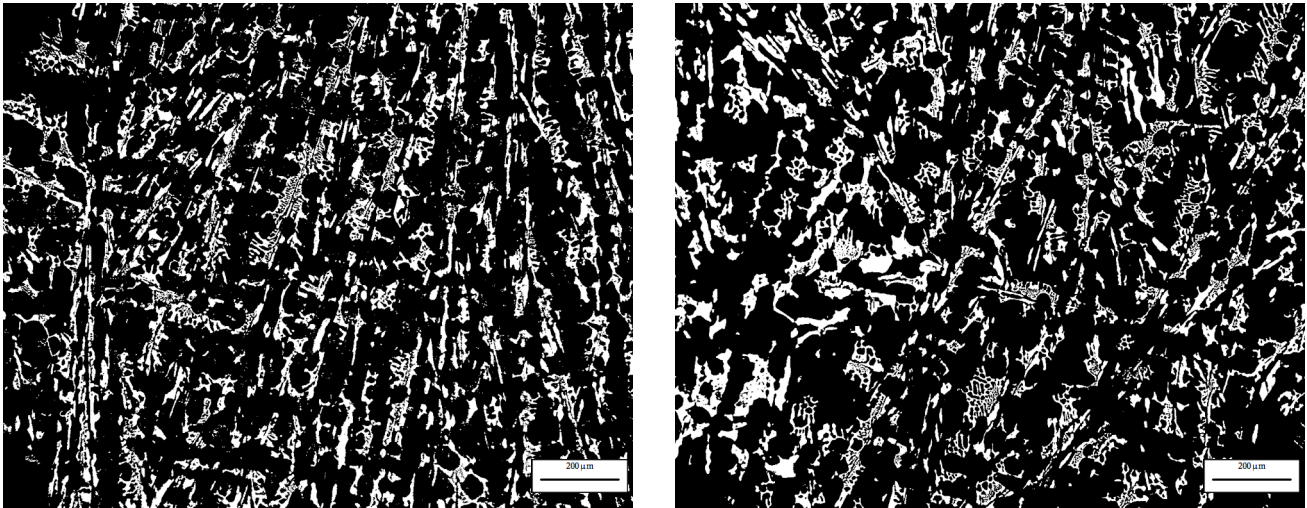




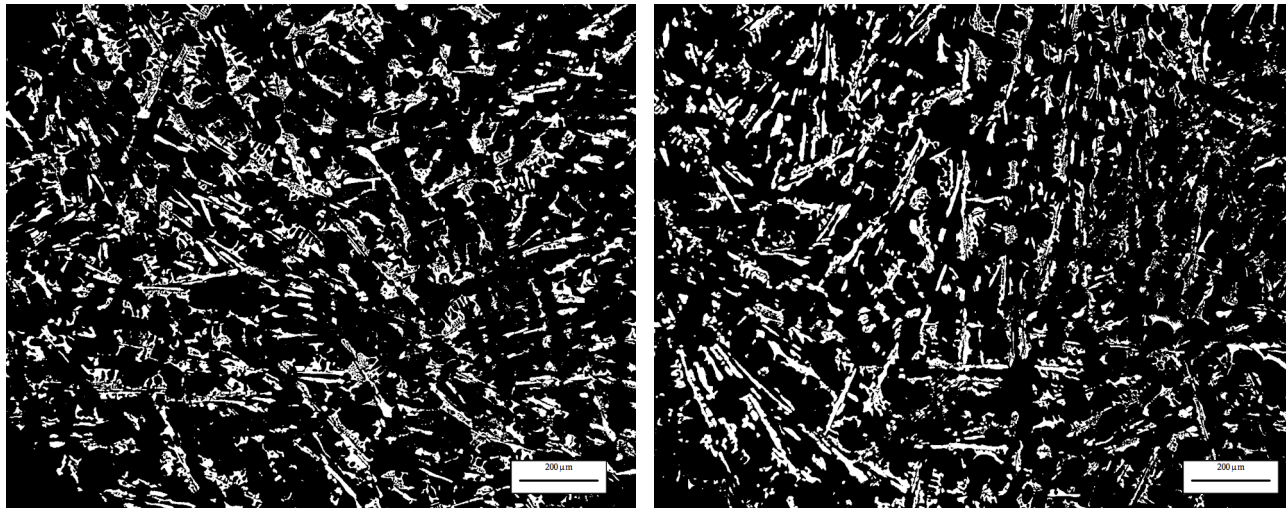
**Figura 4.14.** Pieza 3.3b antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) a 925°C y 120 minutos de austenización.



**Figura 4.15.** Pieza 3.3a antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) a 925°C y 150 minutos de austenización.

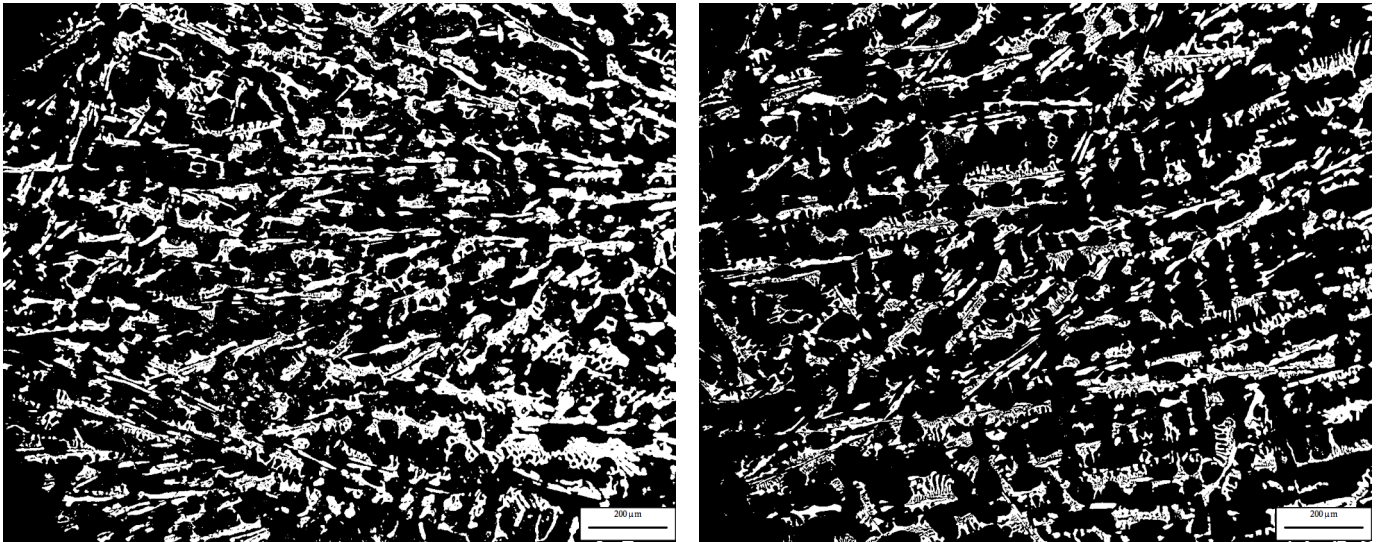


**Figura 4.16.** Pieza 2.1a antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) a 950°C y 60 minutos de austenización.

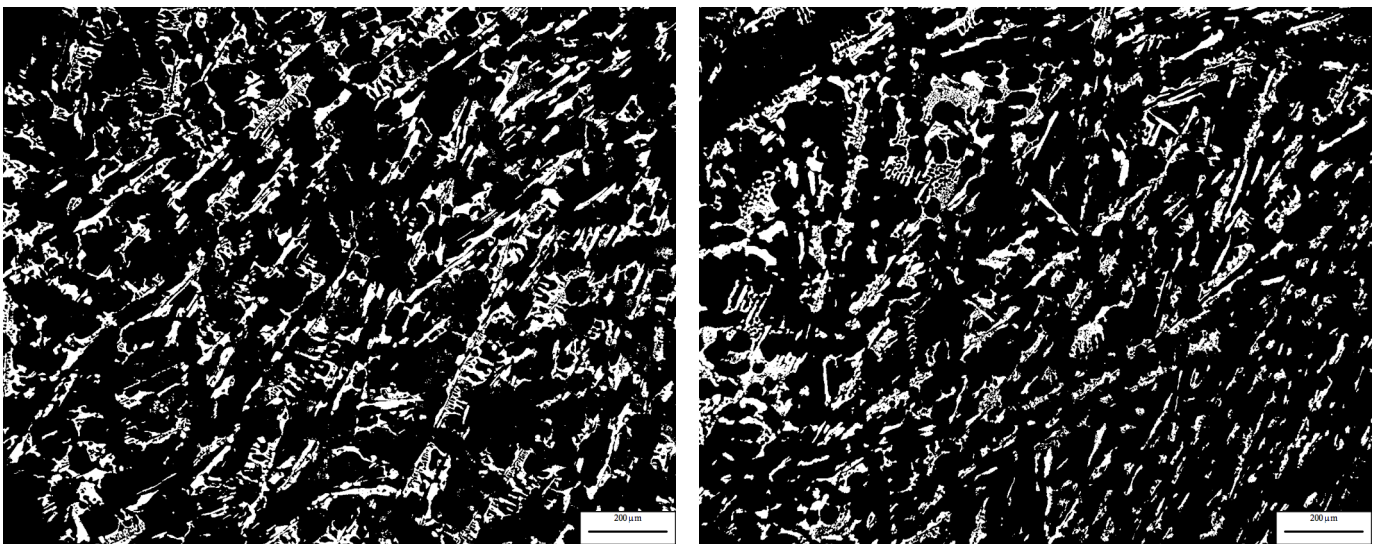


**Figura 4.17.** Pieza 1.1a antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) 950°C y 90 minutos de austenización.

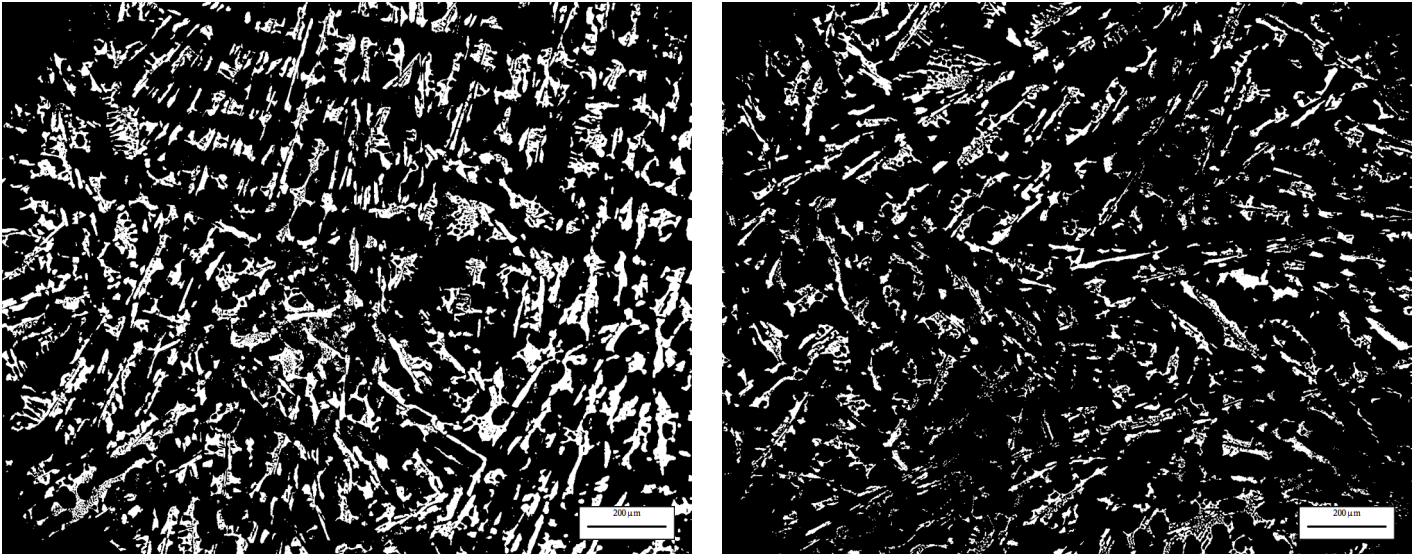




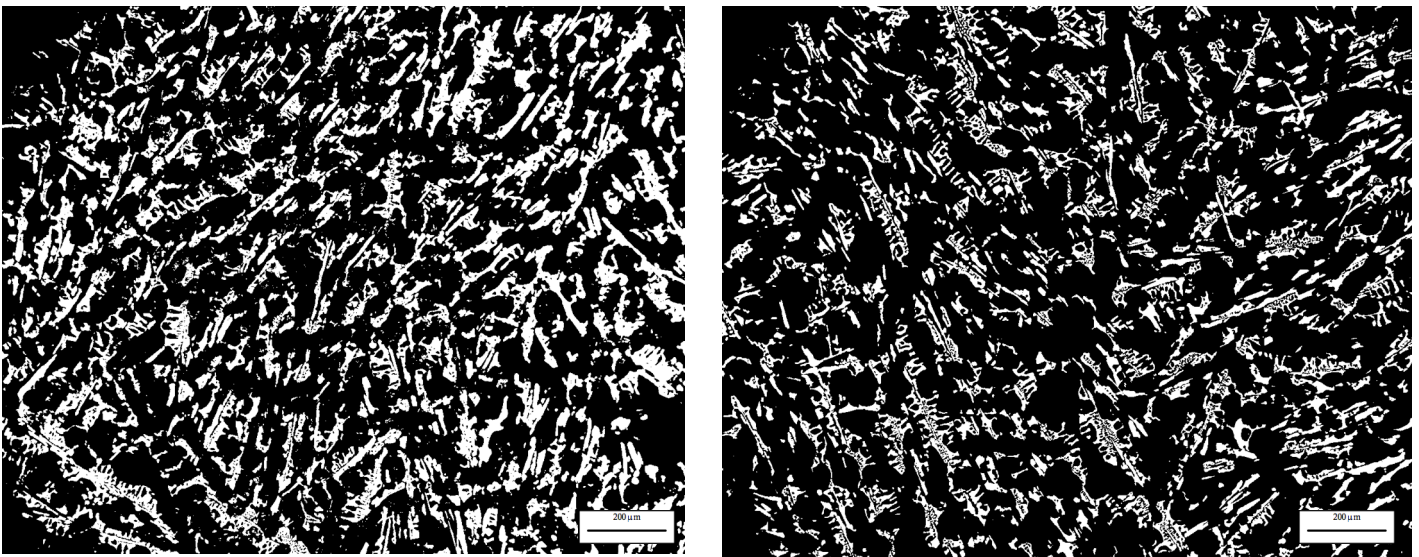
**Figura 4.18.** Pieza 2.3a antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) 950°C y 120 minutos de austenización.



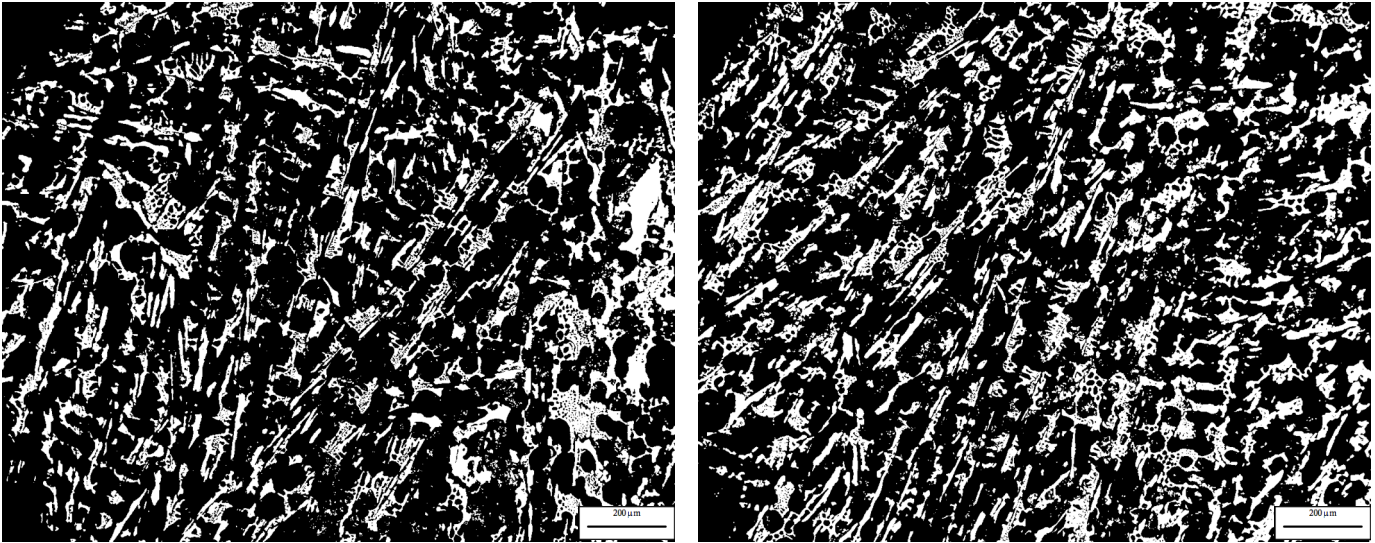
**Figura 4.19.** Pieza 2.1b antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) 950°C y 150 minutos de austenización.



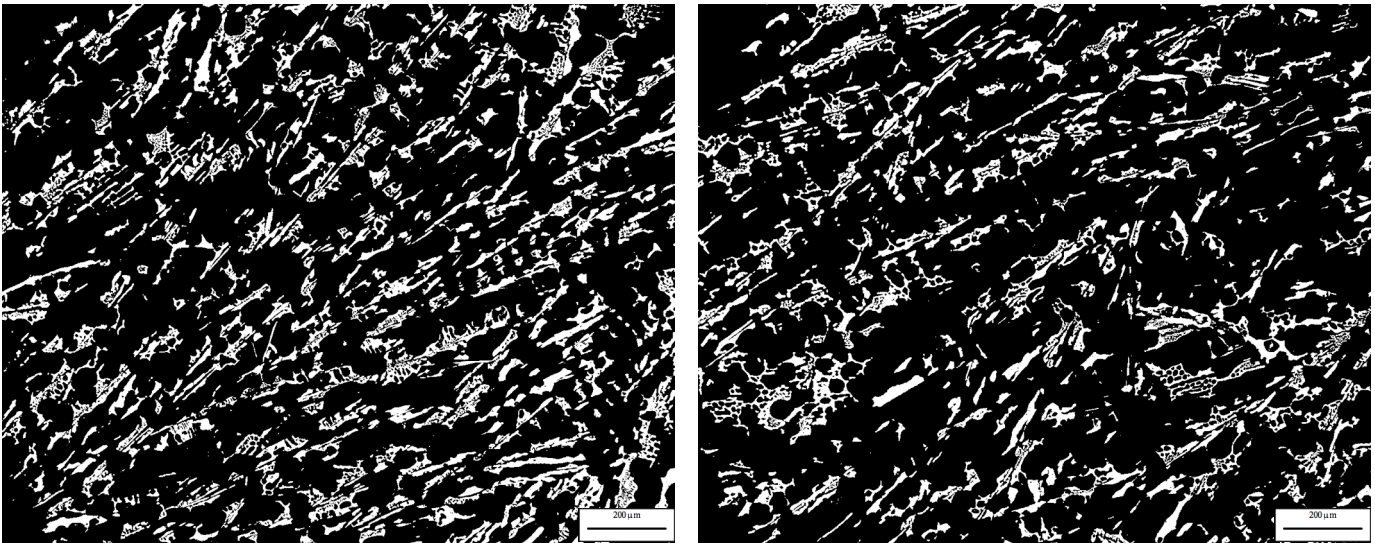
**Figura 4.20.** Pieza 3.2a antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) 975°C y 60 minutos de austenización.



**Figura 4.21.** Pieza 3.2b antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) 975°C y 90 minutos de austenización.



**Figura 4.22.** Pieza 3.1a antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) 975°C y 120 minutos de austenización.



**Figura 4.23.** Pieza 3.1b antes del tratamiento (izquierda) y después del tratamiento (derecha) 975°C y 150 minutos de austenización.



**Tabla 4.3.- Resultados de la fracción disuelta de carburos.**

Muestra	tiempo(min)	Temperatura (°C)	*fco (%)	**fcdt (%)	Fracción Disuelta	% de Carburos Disueltos
4.2A	60	900	19.81	18.62	1.19	6.01
4.1B	90	900	19.7	19.15	0.55	2.79
5.1B	120	900	19.89	19	0.89	4.47
5.2A	150	900	20.42	19.7	0.72	3.53
1.1B	60	925	24.68	23.19	1.49	6.04
1.2A	90	925	23.03	21	2.03	8.81
3.3B	120	925	23.74	21.27	2.47	10.40
3.3A	150	925	23.61	20.83	2.78	11.77
2.1A	60	950	24.24	20.11	4.13	17.04
1.1A	90	950	24.41	20	4.41	18.07
2.3A	120	950	25.63	17.79	7.84	30.59
2.1B	150	950	26	16.64	9.36	36.00
3.2A	60	975	25.58	20.92	4.66	18.22
3.2B	90	975	25.49	18.61	6.88	26.99
3.1A	120	975	26.96	16.75	10.21	37.87
3.1B	150	975	27	16.5	10.5	38.89

\*fco: Fracción de carburos iniciales.

\*\*fcdt: Fracción de carburos después del tratamiento de austenización.

### 4.3. Evaluación de la Disolución de los Carburos

A continuación se presentan los gráficos obtenidos a las diferentes temperaturas y tiempos de los tratamientos de austenización realizados. En estas figuras se muestran dos líneas, una línea que representa las piezas antes de realizarles el tratamiento térmico de austenizado y una línea que representa las piezas después de que se realizó el tratamiento se incluyen imágenes representativa antes y después del tratamiento, figuras 4.24 a la 4.27.

En la figura 4.28 se observa la gráfica de la fracción de carburos disuelta contra el tiempo a las temperaturas de 900, 925, 950 y 975°C.

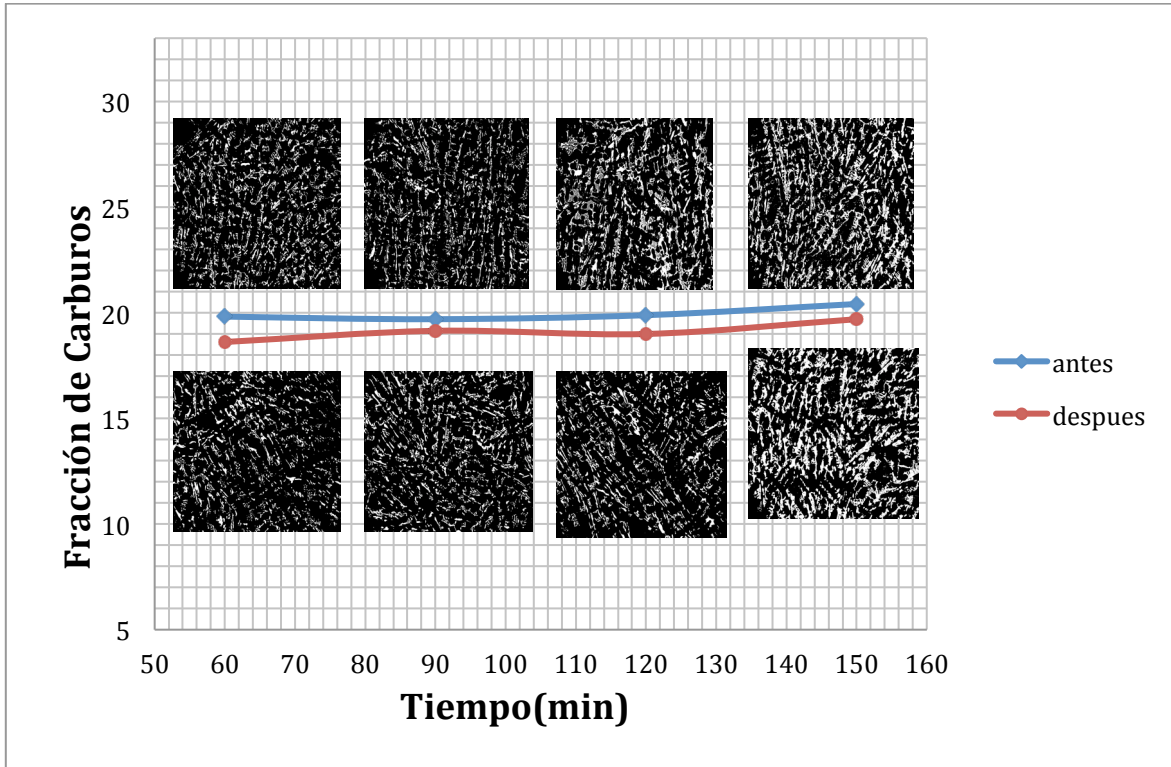


Figura 4.24.- Curva de disolución de carburos a 900°C.

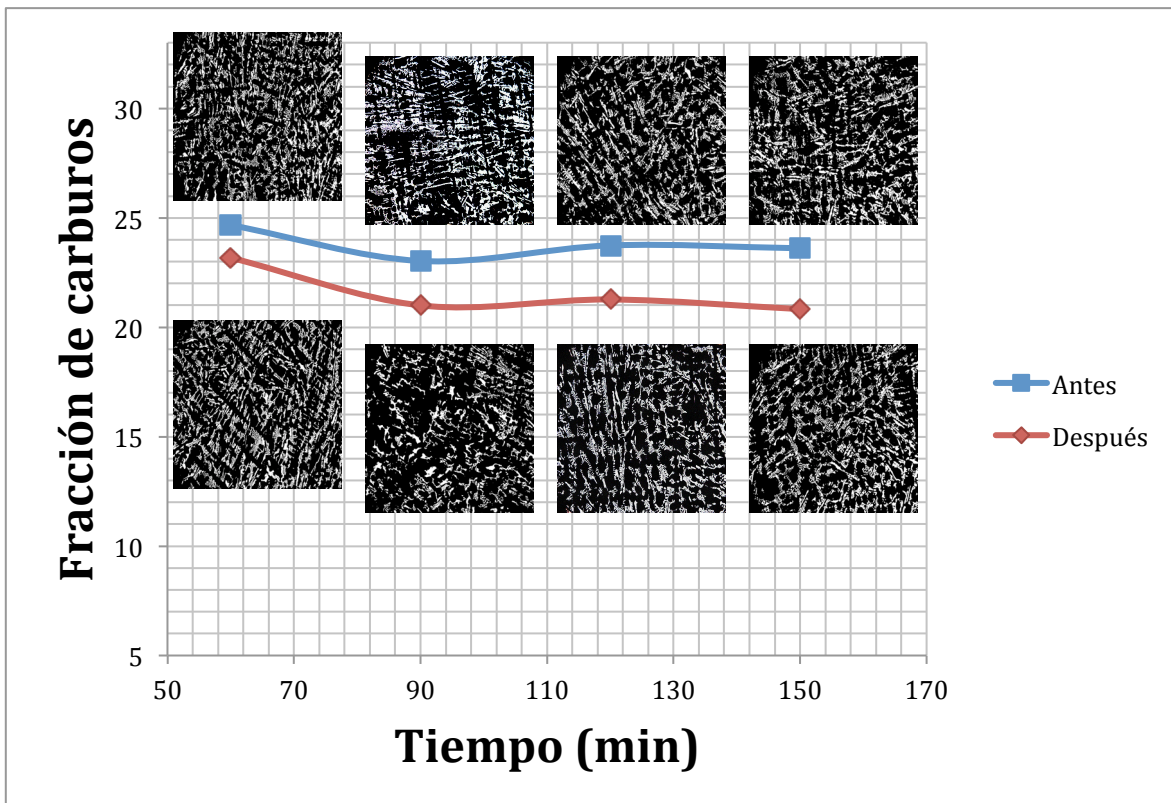


Figura 4.25.- Curva de disolución de carburos a 925°C.

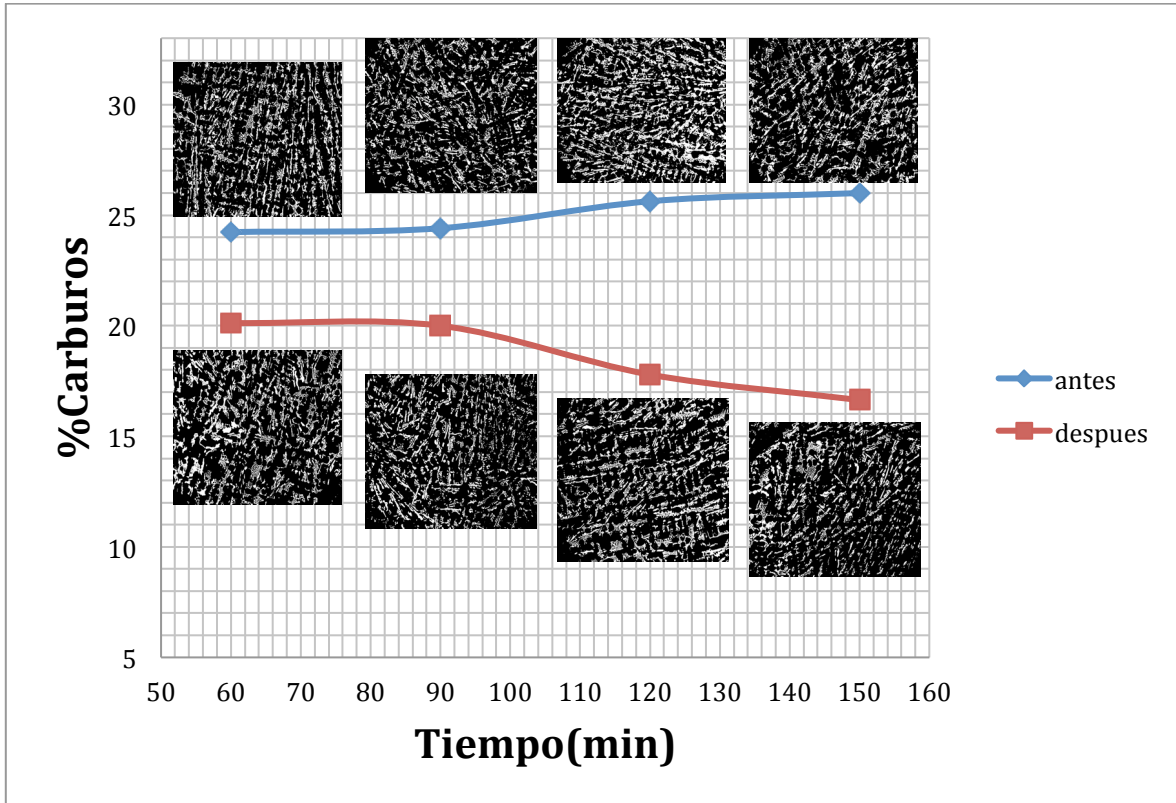


Figura 4.26.- Curva de disolución de carburos a 950°C.

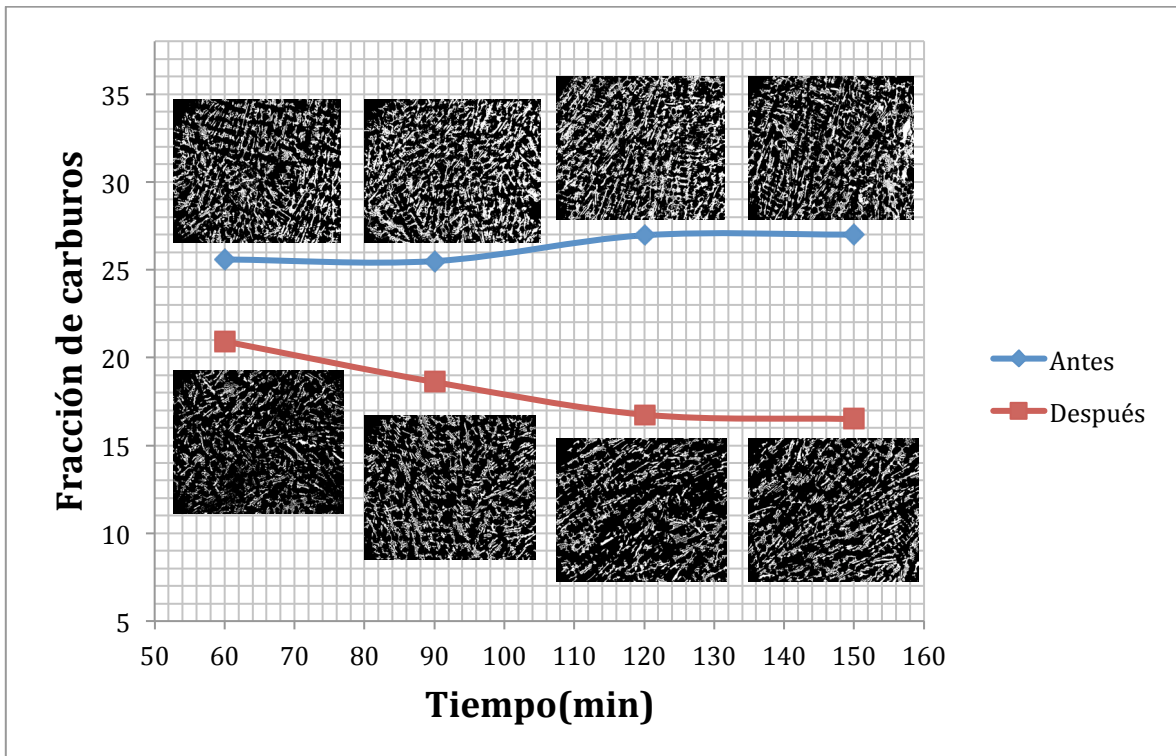


Figura 4.27.- Curva de disolución de carburos a 975°C.

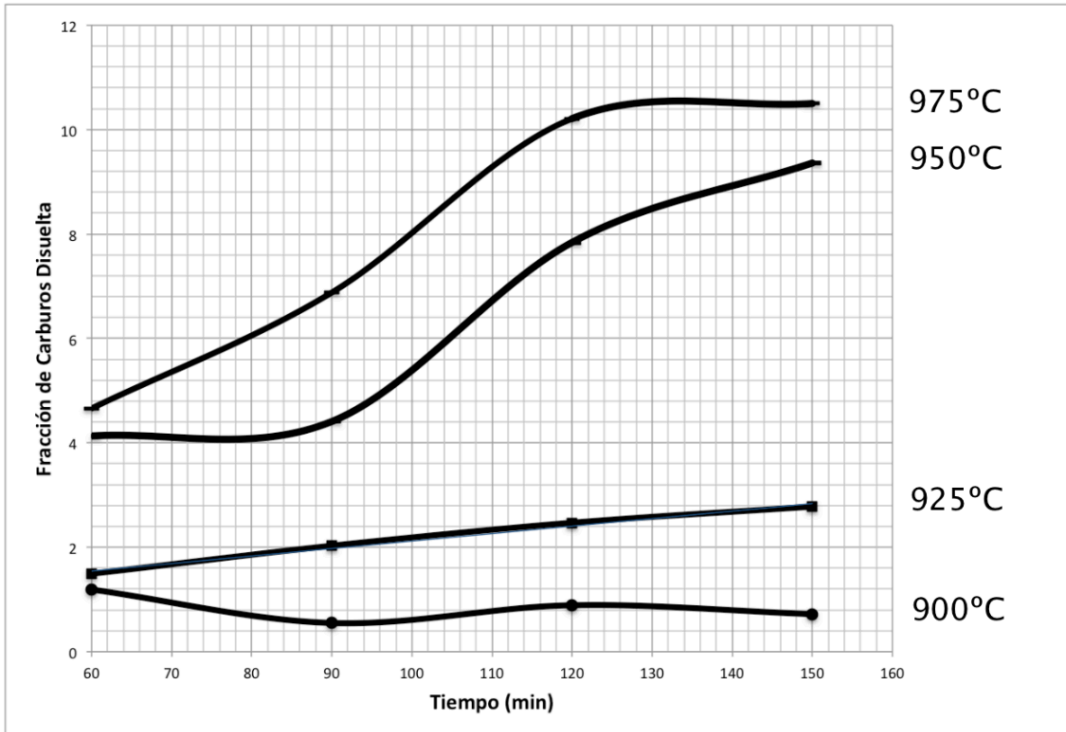


Figura 4.28.- Fracción de carburos disuelta en función de la temperatura y tiempo de austenización.

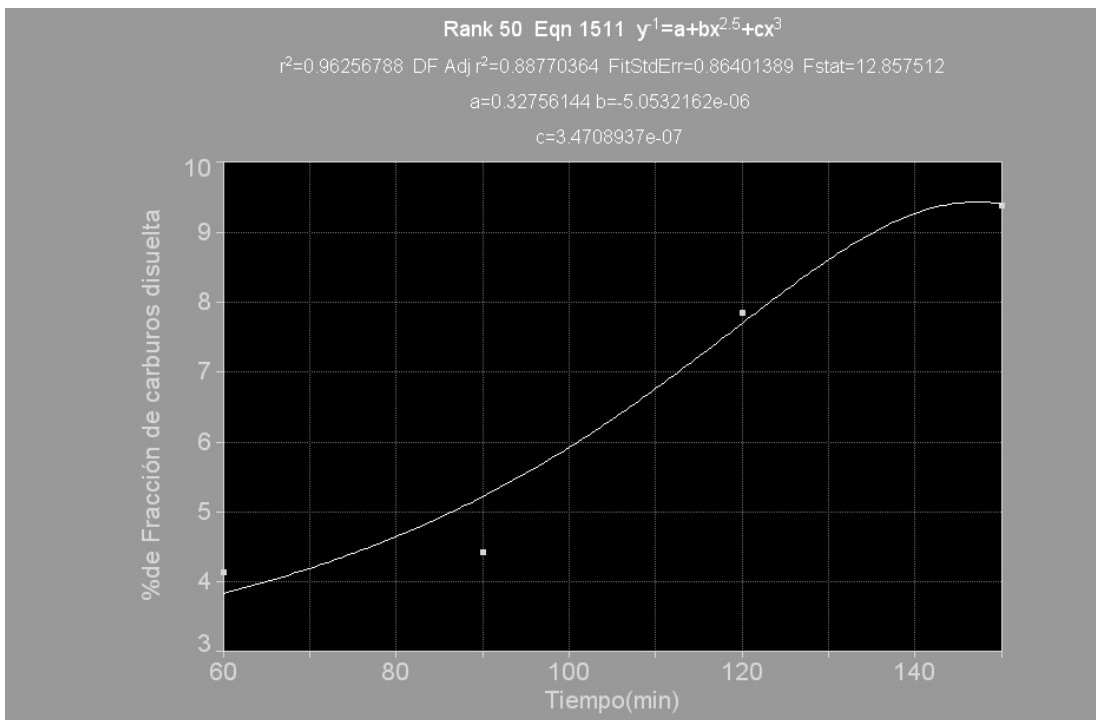
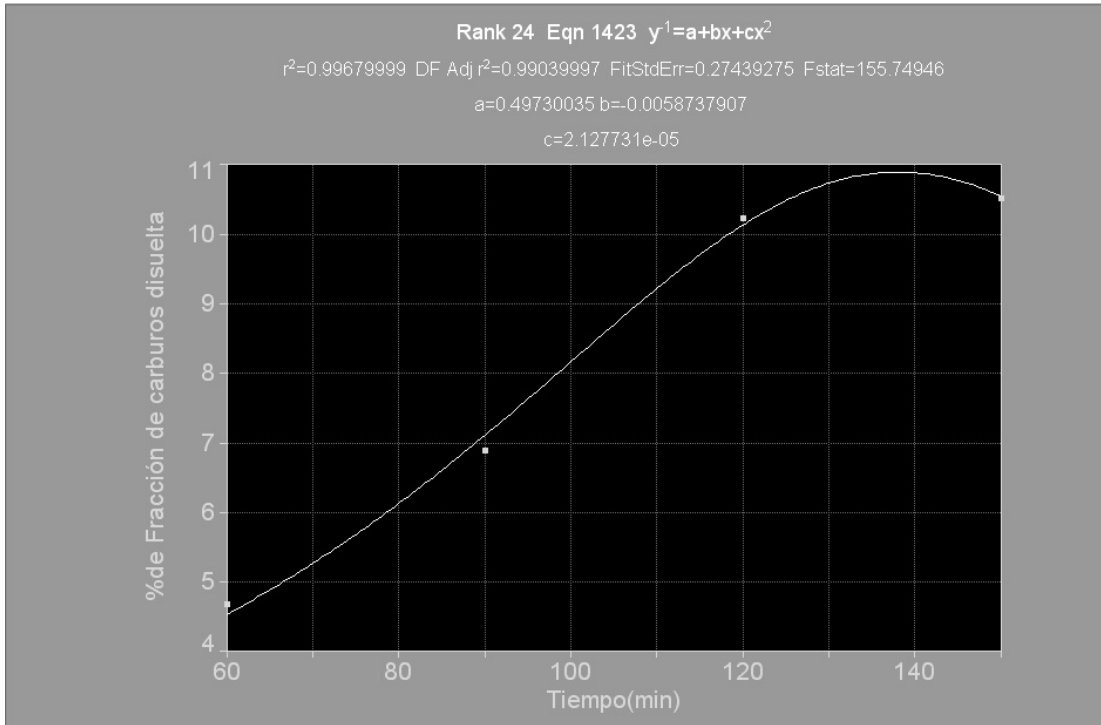


Figura 4.29.- Gráfico mostrando la línea de tendencia y expresión de la cinética de disolución del % de Fracción de carburos y tiempo de austenización a 950°C.

## Resultados y Discusión



**Figura 4.30.-** Gráfico mostrando la línea de tendencia y expresión de la cinética de disolución del % de Fracción de carburos y tiempo de austenización a 975°C.

En la tabla 4.4 se muestran las expresiones que definen la cinética de disolución para cada temperatura experimental y en cada etapa.

**Tabla 4.4.** Expresiones que definen la cinética de disolución para cada temperatura experimental.

Temperatura (°C)	Expresión	Coefficiente de Correlación (R <sup>2</sup> )
900°C	$y = -0.0036x + 1.212$	0.256
925°C	$y = 0.0144x + 0.684$	0.9859
950°C	$*y^{-1} = a + bx^{2.5} + cx^3$	0.9626
975°C	$**y^{-1} = a + bx + cx^2$	0.9968

y= fracción de carburos disuelta

x= tiempo de tratamiento

\* a= 0.32756, b=  $-5.0532e^{-06}$ , c=  $3.47089e^{-07}$

\*\* a=0.4973, b=  $-0.005874$ , c=  $2.12773e^{-05}$

### 4.4. Discusión de Resultados.

Se puede observar que el cromo es un buen promotor de carburos ya que en este caso con 2.2% de cromo se obtuvieron porcentajes de carburos mayores a 25%, un valor alto en comparación a una aleación que no contiene algún elemento de aleación estabilizador de carburos en donde los valores iniciales llegan a un 8%. [4]

Efecto del Tiempo de Austenización.

A partir de los resultados representados por los gráficos, donde se comparan las curvas de porcentaje de carburos antes y después del tratamiento de austenización, se puede observar que en todas las gráficas se presenta un incremento continuo en la disolución de carburos a medida que aumenta el tiempo de permanencia a una temperatura fija de austenización. Esto se debe a que al alcanzar la temperatura de austenización y entrar en el campo de austenita mas grafito, el carburo de hierro o cementita ( $Fe_3C$ ) presenta una reacción de descomposición de acuerdo con:



$\gamma_{sc}$  = Austenita saturada de carbono

La cinética de la disolución de los carburos depende de la temperatura de austenización, del tiempo de permanencia y del grado de estabilidad de los carburos (tipo de carburo).

Para un tiempo de 60 minutos se puede observar en los gráficos que a medida que aumenta la temperatura hay un aumento en la disolución de carburos. A partir de los 925°C empiezan a abrirse las curvas, este comportamiento se repite a 90, 120 y 150 minutos sin embargo para un tiempo de 150 minutos de 950°C a 975°C la disolución de carburos se mantiene constante.

Observando las graficas de porcentaje de carburos vs tiempo se puede observar que la mayor disolución de carburos se llevó acabo en un tiempo de 150 minutos,

---

## Resultados y Discusión

---

sin embargo antes de los 120 minutos es decir a 60 y 90 minutos se disuelve muy pocos carburos

Comparando los resultados de una aleación con 2.2% de Cr con otra sin ningún elemento aleante se tiene que para un tiempo optimo de 150 minutos y la temperatura mínima de 900°C el porcentaje de carburos disueltos para la aleación sin elementos estabilizadores es de 75.8% y para una aleación con 2.2% de Cr es de 18.22%. Lo que muestra que se disuelven mas de cuatro veces de carburos a una temperatura mínima de austenización de 900°C. Para la aleación sin elementos estabilizadores de carburos se disuelve el 100% de los carburos a una temperatura de 950°C y 120 minutos de austenización, para la aleación con 2.2% de cromo el porcentaje máximo de disolución fue 38.89% a una temperatura de 975°C y 150 minutos de austenización. [4]

En el gráfico de la figura 4.28 se observa que la fracción de carburos disuelta aumenta con el incremento del tiempo a una temperatura dada, menos a una temperatura de 900°C en donde la disolución de carburos es menor al 1%. De la misma forma para un tiempo fijo la fracción disuelta es mayor cuando mas alta es la temperatura de tratamiento. Lo anterior indica una clara dependencia de la estabilidad y la cinética de disolución de los carburos de la temperatura y tiempo de tratamiento.

Analizando la figura 4.28 se observa que para las temperaturas de austenización de 900°C y 925°C la disolución de carburos es de forma lenta y constante, casi de forma lineal. La disolución máxima de carburos a 900°C fue de 6.01%, y a 925°C de 11.77%.

Para una temperatura de 950°C se presentan 3 etapas.

Etapa I. Disolución primaria muy lenta a tiempos menores de 90 min.

Etapa II. Disolución muy rápida y continua de carburos.

Etapa III. Disolución de carburos mas lenta que la etapa II pero constante.



---

## Resultados y Discusión

---

Para esta temperatura de tratamiento la etapa II presenta una cinética rápida de disolución continua. En esta etapa la alta temperatura acelera la rapidez de descomposición de los carburos de hierro, independientemente del tipo de carburos presentes ledeburíticos o aleados.

Para la temperatura mas alta de tratamiento, 975°C, la cinética de disolución tiene un cambio significativo, la curva de disolución presenta dos etapas:

Etapa I. Disolución muy rápida

Etapa II. Disolución lenta

Esta elevada temperatura de tratamiento activa fuertemente la cinética de descomposición siguiendo un comportamiento lineal en la primera etapa. La segunda etapa se torna muy lenta debido a que posiblemente la mayor parte de carburos no aleados se han disuelto y únicamente quedan los carburos aleados con cromo.



# *Capítulo V*

## *Conclusiones*

### V. Conclusiones.

Las conclusiones de la cinética de disolución de carburos en hierros nodulares aleados con 2.2%Cr son las siguientes:

Los carburos formados por adición de cromo en el hierro nodular bajo estudio en condiciones de colada oscila entre 27 y 19%, lo que indica una precipitación heterogénea durante la solidificación. Los porcentajes más altos se localizan en las orillas de la pieza y los porcentajes mas bajos se encuentran en el centro de la pieza, estos probablemente son carburos aleados con cromo.

Para la temperatura de 900°C se presento una sola etapa de disolución muy lenta en la que casi no se disolvieron carburos.

Para la temperatura de 925°C se presento una etapa de disolución lenta y constante siguiendo casi un comportamiento lineal.

Para la temperatura de 950°C se presentaron 3 etapas de disolución, la primera lenta hasta los 90 minutos en donde empieza la etapa dos aumentando rápidamente la disolución de los carburos hasta los 120 minutos. Finalmente la etapa tres en la que sigue habiendo una disolución constante de carburos pero mas lenta que la etapa II.

A temperaturas de austenización inferiores a 950°C los carburos presentan una gran estabilidad alcanzando una máxima disolución de 11.77% y presenta tres etapas en la cinética de disolución

Para la temperatura de 975°C se presentaron dos etapas de disolución, la primera muy rápida llegando a un máximo en donde se disolvieron casi el 40% de los carburos. La etapa dos presenta una disolución lenta y constante.

# *Bibliografía*

### Bibliografía.

- 1.- Martínez Flores Mónica, “Desarrollo y Caracterización de Fundiciones Nodulares Austemperizadas recubiertas con Zn mediante Proyección Térmica,” Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería UNAM, 2007.
- 2.- William F. Smith “Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales”, editorial Mc Graw Hill, 4 edición, México, pp. 363 -366, 430 - 458, 2006.
- 3.-Walton C. F y Opar T. J., “Iron Casting Handbook covering data on Grey, Malleable and Ductile Iron,” Iron Casting Society Inc., New York, pp. 378, 401, 1981.
- 4.-Franco Arguelles Aldo Daniel, “Estudio de la disolución de carburos en hierro nodular no aleado (Efecto del tiempo y temperatura de austenización)”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química U.N.A.M., México D.F., 2012.
- 5.- Aranda Villada Víctor Antonio, “Efecto de la Temperatura y Tiempo de Austenización en la Disolución de Carburos en un Hierro Nodular Blanqueado (D 120/90/02 Modificado)”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química UNAM, México D.F., 2010.
- 6.-Catalán Calderón Jonathan, “Fabricación de un Hierro Nodular con Fracción controlada de Carburos,” Tesis de Licenciatura, Facultad de Química UNAM, 2010.
- 7.-Keough J. R., Hayrynen K. L., “CarbideAustempered Ductile Iron (CAD),” Ductile Iron News, Issue 3, pp. 1 – 9, 2000.
- 8.-Camacho Hernández Francisco Maximino, “Tesis de Obtención de Piezas Coladas de Fe Dúctil en Moldes de Arena mediante Método de Alimentación Aplicadas,” Tesis de Licenciatura, Facultad de Química UNAM, 2009.
- 9.-ZhouJiyang, ColourMetallography of CastIron, Capitulo 1, Tomo 1, Febrero 2009, China.
- 10.-Yan Mi, “Effect of Cu, Mo, Si on the content of Retained Austenite of Austempered Ductile Iron,” ScriptaMetallurgica et Materialia, Vol. 32, Num. 9, pp 1313 - 1317, 1995.
- 11.- Arias M. J., Hirschvogel J., “Influencia del Silicio en la Temperatura de

---

## Bibliografía

---

Transformación Eutectoide,” El Fundidor, de la Cámara de Industriales Fundidores de la República Argentina, No. 126, pp. 36 – 50, Noviembre Diciembre 2008.

**12.**-Apraiz B.J. “Fundiciones”, 3ra edición, Editorial Dossat S.A., Madrid España, pp. 12, 13, 143-164. 1977.

**13.**-American Foundrymen’s Society (AFS), Inc. “Ductile Iron Handbook” Des Plaines Illinois, pp. 21, 210, 211-214, 1993.

**14.**-American Foundrymen’s Society (AFS), Inc. “Foundrymen’s guide to ductile iron microstructures” Des Plaines Illinois, pp.1-19, 24-26, 28-31, 36-39, 41-48, 1984.

**15.**-American Society Metallurgical (ASM), “Casting”, Vol. 15, 9<sup>th</sup> Edition, Metals Handbook, Editorial ASM Internacional, pp. 1485-1494, 1500-1506, 1992.

**16.**-García H. J. A., Atlatenco C., González C., Huerta A., Amaro A., “Respuesta al Tratamiento de Austemperizado (ADI) de un Hierro Nodular con diferentes Matrices”, Moldeo y Fundición, No. 175, pp. 12-16, ISSN 0188-9117, Febrero 2007

**17.**-Apraiz B.J., “Tratamientos Térmicos de los Aceros”, Tomo 1, DOSSAT 2000, Ediciones, 10 Edición, pp. 107-124, 2002.

**18.**-Lee S., Dommarco R., Sikora J., “Fundición Nodular Austemperadas con Carburos (CADl)”, El Fundidor de la Cámara de Industriales Fundidores de la República de Argentina, No. 123, pp. 4-16, Mayo- Junio 2007.

**19.**-ElkemFoundryProducts, Overview of AlloyingElements and theirEffects in DuctileIron, technicalinformation 12B.

**20.**-ZhouJiyang, ColourMetallography of CastIron, Capítulo 3, Tomo IV, Volumen 7, Noviembre 2010, China.

**21.**-Acosta M., Martínez M., “El tratamiento de los Hierros Nodulares en el Mejoramiento de los Materiales en la Industria Automotriz,” publicación Técnica No. 148 del Instituto Mexicano del Transporte, pp. 1 - 57, 2000.

# *Anexos*

**Anexo 1.**

**A.1. Balance de carga.**

El hierro nodular con carburos que se fabricó fue el grado 120-90-02, modificado con 2.25% de Cr. La composición química de este hierro se muestra en la tabla A1 y en la tabla A2 se muestra la composición química requerida que se trabajo en el balance de carga

Tabla A1. Composición química del hierro nodular grado 120-90-02.

	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Cr*
120-90-02	3.5-3.8	2.2-2.7	0.6 max	0.015 max	0.05 max	0.2-0.5	0.1 max

\*La composición química de este hierro nodular tiene 0.1% máximo de cromo sin embargo para el estudio de esta tesis se trabajará con un porcentaje de cromo de 2.0-2.5%

Tabla A2. Composición química requerida para el calculo del balance de carga.

	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Cr
120-90-02	3.65	2.45	0.6 max.	0.015 max.	0.05 max.	0.5	2.25

Para el balance de carga se utilizo chatarra de acero y chatarra de hierro colado. En la tabla A3, se muestran las composiciones químicas de éstas chatarras.

Tabla A3. Composiciones químicas de las chatarras.

	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Cr	%Mo
Acero troquel (CH1)	0.1057	0.03	0.2736	0.0063	0.0192	0.0221	0.0212	0.05
Hierro colado (CH2)	3.52	2.305	0.509	0.031	0.0352	0.2112	0.157	0.05

Las materias primas de ajuste o secundarias que se emplearon se muestran en la tabla A4.

Tabla A4. Composiciones químicas del elemento base de las materias primas de ajuste.

	% Si	% Mn	% C	% Cu	%Cr
<b>FeSi</b>	75				
<b>FeMn</b>		74			
<b>Recarburante</b>			99.8		
<b>Cu</b>					
<b>FeCr</b>					65
<b>Eficiencias</b>	98	98	85	97	98



Para los tratamientos al metal líquido se emplearon las ferroaleaciones que se muestran en la tabla A5

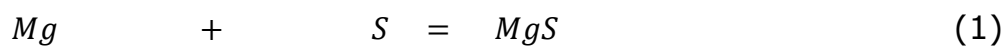
Tabla A5. Ferroaleaciones empleadas para los tratamientos al metal líquido.

	% Si	% Mg
FeSi (inoculante)	75	
FeSiMg	44-48	4.75-6.25

#### **A.1.1. Cálculo de la Cantidad de Nodulizante (FeSiMg).**

Antes del cálculo del balance de carga, es necesario realizar primeramente el cálculo de la cantidad de nodulizante, ya que es indispensable considerar la cantidad de silicio que aportara éste, y por ende, saber el % de silicio que se va a trabajar en el horno de inducción:

1. Cantidad de magnesio que demanda el azufre en el metal líquido.  
Considerando la reacción (1), la cantidad de azufre disuelto y la capacidad de olla de tratamiento (35 kg), se procede a calcular la cantidad de magnesio ( $Mg_s$ ) que se requiere para neutralizar el azufre:



---

## Bibliografía

---

Cantidad de azufre en el metal líquido:

$$S = 35 \text{ kg} \left( \frac{0.015}{100} \right) = 0.00525 \text{ kg} = 5.25 \text{ gramos}$$

Cantidad de Mg requerido por la reacción:

$$Mg_S = 0.76 (5.25 \text{ gramos}) = 3.99 \text{ gramos.}$$

2. Cantidad de magnesio residual requerido.

El porcentaje de magnesio requerido es de 0.03, por lo que:

$$Mg_R = 35 \text{ kg} \left( \frac{0.03}{100} \right) = 0.0105 \text{ kg} = 10.5 \text{ gramos}$$

3. Cantidad de magnesio total requerido

$$Mg_T = Mg_S + Mg_R$$

$$Mg_T = 3.99 \text{ (g)} + 10.5 \text{ (g)} = 14.49 \text{ gramos.}$$

4. Calculo de la cantidad de FeSiMg (%Mg = 5.5, %Si = 46): se emplea el Proceso Sándwich con una eficiencia del 45% con respecto al magnesio residual.

$$FeSiMg = 14.49 \text{ g} Mg_T \left( \frac{100}{5.5} \right) = 263.45 \text{ gramos.}$$

Considerando la eficiencia del proceso:

$$FeSiMg = 263.45 \text{ g} \left( \frac{100}{45} \right) = 585.45 \text{ gramos,}$$
 es la cantidad de FeSiMg a introducir a la olla de tratamiento.

5. Cantidad en kilogramos, aportada por el silicio en el FeSiMg.

$$\text{Si en FeSiMg} = 0.58545 \text{ kg} \left( \frac{46}{100} \right) = 0.269 \text{ kg}$$

6. Cantidad en porcentaje, aportada por el Si en FeSiMg.

$$\% \text{Si} = 0.269 \text{ kg} \left( \frac{100}{35} \right) = 0.76$$

### A.1.2. Cálculo del balance de carga.

1. Cantidad requerida en kilogramos de la composición química promedio:

$$C = \frac{80 \text{ kg} \times \left( \frac{3.65}{100} \right)}{\left( \frac{98}{100} \right)} = 2.979 \text{ kg}$$

$$* \text{Si} = \frac{80 \text{ kg} \times \left( \frac{2.45 - 0.2 - 0.76}{100} \right)}{\left( \frac{99}{100} \right)} = 1.204 \text{ kg}$$

$$\text{Mn} = \frac{80 \text{ kg} \times \left( \frac{0.6}{100} \right)}{\left( \frac{98}{100} \right)} = 0.489 \text{ kg}$$

$$P = \frac{80 \text{ kg} \times \left( \frac{0.05}{100} \right)}{\left( \frac{100}{100} \right)} = 0.04 \text{ kg}$$

$$S = \frac{80 \text{ kg} \times \left( \frac{0.015}{100} \right)}{\left( \frac{100}{100} \right)} = 0.012 \text{ kg}$$

$$Cu = \frac{80 \text{ kg} \times \left(\frac{0.5}{100}\right)}{\left(\frac{99}{100}\right)} = 0.404 \text{ kg}$$

$$Cr = \frac{80 \text{ kg} \times \left(\frac{2.25}{100}\right)}{\left(\frac{98}{100}\right)} = 1.837 \text{ kg}$$

\* Observación: se le resta el % de silicio que aportará la inoculación (0.2%) y el que aportará el nodulizante (0.76%). Por lo tanto, el % de silicio a trabajar en el horno de inducción será de

2. Elemento crítico: Azufre.

- Partiendo de la cantidad a cargar al horno de inducción:

- $CH1 + CH2 = 80 \text{ kg}$  Ec. (1)

- $CH1 = (80 \text{ kg} - CH2)$  Ec. (2)

- $Requerido = AportadoCH1 \left(\frac{0.0063}{100}\right) + AportadoCH2 \left(\frac{0.031}{100}\right)$

- $0.012 \text{ kg} = CH1 \left(\frac{0.0063}{100}\right) + CH2 \left(\frac{0.031}{100}\right)$

- Empleando la ecuación (2)

- $0.012 \text{ kg} = (80 \text{ kg} - CH2) \left(\frac{0.0063}{100}\right) + CH2 \left(\frac{0.031}{100}\right)$

- $(0.012 \text{ kg} - 0.00502 \text{ kg}) = -CH2 \left(\frac{0.0063}{100}\right) + CH2 \left(\frac{0.031}{100}\right)$

- $0.00689 \text{ kg} = CH2 \left(\frac{0.0247}{100}\right)$

- $\frac{0.00698 \times 100}{0.0247} = CH2$
- $CH2 = 28.25 \text{ kg}$  Ec. (3)
- Sustituyendo la ecuación (3) en la (2).
- $CH1 = (80 - 28.25) \text{ kg} = 51.75 \text{ kg}$ .

### 3. Cantidad de elementos aportados por la CH1

$$C = 51.75 \text{ kg} \left( \frac{0.1057}{100} \right) = 0.0546 \text{ kg}$$

$$Si = 51.75 \text{ kg} \left( \frac{0.03}{100} \right) = 0.0155 \text{ kg}$$

$$Mn = 51.75 \text{ kg} \left( \frac{0.2736}{100} \right) = 0.1415 \text{ kg}$$

$$S = 51.75 \text{ kg} \left( \frac{0.0063}{100} \right) = 0.00326 \text{ kg}$$

$$P = 51.75 \text{ kg} \left( \frac{0.0192}{100} \right) = 0.0099 \text{ kg}$$

$$Cu = 51.75 \text{ kg} \left( \frac{0.0221}{100} \right) = 0.0114 \text{ kg}$$

$$Cr = 51.75 \text{ kg} \left( \frac{0.0212}{100} \right) = 0.01097 \text{ kg}$$

4. Cantidad de elementos aportados por la CH2.

$$C = 28.25 \text{ kg} \left( \frac{3.52}{100} \right) = 0.9944 \text{ kg}$$

$$Si = 28.25 \text{ kg} \left( \frac{2.305}{100} \right) = 0.6511 \text{ kg}$$

$$Mn = 28.25 \text{ kg} \left( \frac{0.509}{100} \right) = 0.1437 \text{ kg}$$

$$S = 28.25 \text{ kg} \left( \frac{0.031}{100} \right) = 0.00874 \text{ kg}$$

$$P = 28.25 \text{ kg} \left( \frac{0.0352}{100} \right) = 0.0099 \text{ kg}$$

$$Cu = 28.25 \text{ kg} \left( \frac{0.2112}{100} \right) = 0.0596 \text{ kg}$$

$$Cr = 28.25 \text{ kg} \left( \frac{0.157}{100} \right) = 0.04435 \text{ kg}$$

5. Balance por elemento:

- Para el azufre:

$$\text{Requerido} = \text{Aportado CH1} + \text{Aportado CH2}$$

$$0.012 \text{ kg} = (0.00326 + 0.00874) \text{ Kg.}$$

$$0.012 \text{ kg} = 0.012 \text{ kg}$$

---

## Bibliografía

---

Por lo que queda automáticamente ajustado.

- Para el carbono:

$$\text{Requerido} = \text{Aportado CH1} + \text{Aportado CH2}$$

$$2.979 \text{ kg} = 0.0546 \text{ kg} + 0.9944 \text{ kg} + \text{REC} \left(\frac{99.8}{100}\right) \left(\frac{95}{100}\right)$$

$$(2.979 - 1.049) \text{ kg} = \text{REC} \left(\frac{99.8}{100}\right) \left(\frac{95}{100}\right)$$

$$1.93 \text{ kg} \left(\frac{100}{99.8}\right) \left(\frac{100}{95}\right) = \text{REC}$$

REC = 2.035 kg

- Para el silicio:

$$\text{Requerido} = \text{Aportado CH1} + \text{Aportado CH2}$$

$$1.204 \text{ kg} = 0.0155 \text{ kg} + 0.6511 \text{ kg} + \text{FeSi} \left(\frac{75}{100}\right) \left(\frac{98}{100}\right)$$

$$(1.204 - 0.6666) \text{ kg} = \text{FeSi} \left(\frac{75}{100}\right) \left(\frac{98}{100}\right)$$

$$0.5374 \text{ kg} \left(\frac{100}{75}\right) \left(\frac{100}{98}\right) = \text{FeSi}$$

FeSi = 0.7311 kg.

- Para el manganeso:

$$\text{Requerido} = \text{Aportado CH1} + \text{Aportado CH2}$$

$$0.489 \text{ kg} = 0.1415 \text{ kg} + 0.1437 \text{ kg} + \text{FeMn} \left(\frac{74}{100}\right) \left(\frac{98}{100}\right)$$

$$(0.489 - 0.2852) \text{ kg} = \text{FeMn} \left(\frac{74}{100}\right) \left(\frac{98}{100}\right)$$

$$0.2038 \text{ kg} \left(\frac{100}{74}\right) \left(\frac{100}{98}\right) = \text{FeMn}$$

FeMn = 0.2810 kg.

- Para el fósforo:

---

## Bibliografía

---

$$\text{Requerido} = \text{Aportado CH1} + \text{Aportado CH2}$$

$$0.04 \text{ kg} = 0.0099 \text{ kg} + 0.0099 \text{ kg}$$

$$0.04 \text{ kg} = 0.0198 \text{ kg}$$

Como los kilogramos del requerido se encuentra por arriba de lo que aportan las chatarras, entonces, no hay necesidad de agregar fósforo.

- Para el cobre:

$$\text{Requerido} = \text{Aportado CH1} + \text{Aportado CH2}$$

$$0.404 \text{ kg} = 0.0114 \text{ kg} + 0.0596 \text{ kg} + \text{Cu} \left(\frac{100}{100}\right) \left(\frac{97}{100}\right)$$

$$(0.404 - 0.074) \text{ kg} = \text{Cu} \left(\frac{100}{100}\right) \left(\frac{97}{100}\right)$$

$$0.33 \text{ kg} \left(\frac{100}{100}\right) \left(\frac{100}{97}\right) = \text{Cu}$$

$$\text{Cu} = 0.3402 \text{ kg}$$

- Para el cromo:

$$\text{Requerido} = \text{Aportado CH1} + \text{Aportado CH2}$$

$$1.837 \text{ kg} = 0.01097 \text{ kg} + 0.04435 \text{ kg} + \text{Cr} \left(\frac{65}{100}\right) \left(\frac{98}{100}\right)$$

$$(1.837 - 0.05532) \text{ kg} = \text{Cr} \left(\frac{65}{100}\right) \left(\frac{98}{100}\right)$$

$$1.782 \text{ kg} \left(\frac{100}{65}\right) \left(\frac{100}{98}\right) = \text{Cr}$$

$$\text{Cr} = 2.7975 \text{ kg}$$



## Anexo 2

Para obtener las expresiones de la cinética de la disolución de carburos se utilizó el software TCWIN.

- 1) En el block de notas se introducen los datos correspondientes para realizar la grafica y se guarda con el nombre deseado.
- 2) Se abre el software TCWIN.
- 3) Se presiona la pestaña llamada File, se selecciona la opción import y se escoge el archivo que se desea que importe del block de notas con los datos para realizar la grafica.
- 4) Se introducen los nombres de cada eje y se presiona el botón de aceptar para que el software realice la grafica.
- 5) Para realizar la regresión lineal se presiona la pestaña Process y se selecciona la opción view all equations, esto desplegará una ventana en donde muestra todas las ecuaciones representando la regresión lineal de cada una como se muestra en la figura A.2.

