



**Universidad Nacional Autónoma de México**

---

---

**Facultad de Química**

**Efecto de la relación Mg/Ti en la morfología del grafito compacto en un CGI (Compacted Graphite Iron)**

**Tesis**

**Que para obtener el título de  
Ingeniero Químico Metalúrgico**

**Presenta**

**Juan Daniel Carabarin Rojas**

**Director de tesis**

**M. en M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco**



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx.**

**2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**                   **Profesor: Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco**

**VOCAL:**                           **Profesor: Arturo Alejandro Sánchez Santiago**

**SECRETARIO:**               **Profesor: Adrián Manuel Amaro Villeda**

**1er. SUPLENTE:**               **Profesor: Manuel Mariano Herrero Terán**

**2º SUPLENTE:**               **Profesor: Agustín Gerardo Ruiz Tamayo**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**Laboratorio de fundición y Laboratorio de arenas y moldeo,  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Edificio D, Facultad de  
Química, UNAM.**

**Asesor del tema:**

---

**EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO**

**Supervisor técnico:**

---

**AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO**

**Sustentante:**

---

**JUAN DANIEL CARABARIN ROJAS**

## Índice

Lista de figuras.....	vi
Lista de tablas.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPOTESIS.....	3
OBJETIVOS.....	3
CAPITULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
1.1. Clasificación de los hierros colados.....	4
1.2. Hierro Gris.....	5
1.2.1. Microestructura.....	6
1.2.2. Clasificación.....	8
1.2.3. Efecto de los elementos de aleación.....	9
1.3. Hierro Dúctil.....	9
1.3.1. Microestructura.....	10
1.3.2. Clasificación.....	11
1.3.3. Efecto de los elementos de aleación.....	12
1.4. Hierro Vermicular.....	14
1.4.1. Microestructura.....	14
1.4.2. Clasificación.....	15
1.4.3. Efecto de los elementos aleantes.....	15
1.5. Nodularidad.....	17
1.6. Propiedades mecánicas de los hierros colados.....	18
1.7. Tratamientos al metal líquido.....	19
1.7.1. Inoculación.....	20
1.7.2. Procesos de inoculación.....	21
1.7.3. Nodularización (Esferoidización).....	23
1.7.4. Procesos de nodularización.....	24
1.7.5. Antiesferoidización con Titanio.....	27

1.7.6. Métodos de antiesferoidización. ....	28
1.8. Solidificación.....	29
CAPITULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	35
2.1. Diseño de experimentos. ....	35
2.2. Moldeo.....	37
2.2.1. Elaboración de moldes de Silicato-CO <sub>2</sub> . ....	37
2.2.2. Elaboración de termopares. ....	39
2.2.3. Instrumentación de moldes.....	40
2.2.4. Balance teórico de carga. ....	40
2.2.5. Cálculo de cantidades para tratamientos al metal.....	40
2.3. Técnica de fusión.....	44
2.3.1. Secuencia de carga al horno. ....	44
2.3.2. Arreglo experimental de moldes. ....	44
2.3.3. Preparación de capsulas de antiesferoidizante. ....	45
2.3.4. Ajuste de carga y adición de antiesferoidizante.....	45
2.3.5. Precalentamiento de olla y temperatura de trabajo.....	47
2.3.6. Preparación de inoculante y nodularizante. ....	47
2.3.7. Tratamientos al metal líquido. ....	48
2.3.8. Colada de piezas y análisis térmico. ....	48
2.3.9. Obtención de muestras para análisis por espectrometría. ....	49
2.3.10. Desmoldeo. ....	49
2.4. Caracterización del material. ....	49
2.4.1. Corte de muestras obtenidas. ....	50
2.4.2. Desbaste de piezas y pulido. ....	50
2.4.3. Fotomicrografías con y sin ataque.....	51
2.4.4. Mediciones de dureza Brinell y Vickers.....	51
2.4.5. Determinación de nodularidad.....	52
CAPITULO III. RESULTADOS. ....	53
3.1. Primera fusión. ....	53
3.1.1. Composición química. ....	53

3.1.2. Dureza. ....	54
3.1.3. Curvas de enfriamiento. ....	56
3.1.4. Relación Mg/Ti. ....	58
3.1.5. Nodularidad. ....	59
3.1.7. Presentación de datos. ....	61
3.2. Segunda fusión. ....	61
3.2.1. Composición química. ....	61
3.2.2. Dureza. ....	62
3.2.3. Curvas de enfriamiento. ....	64
3.2.4. Relación Mg/Ti. ....	64
3.2.5. Nodularidad. ....	65
3.2.6. Metalografía. ....	65
3.2.7. Presentación de datos. ....	67
CAPITULO IV. ANALISIS DE RESULTADOS. ....	68
CAPITULO V. CONCLUSIONES ....	72
Bibliografía ....	73
Anexo I. Balance general. ....	76
Balance primera fusión. ....	76
Cantidades aportadas por chatarras. ....	77
Cantidades aportadas (kg) de cada elemento. ....	78
Balance para cada elemento. ....	78
Balance segunda fusión. ....	79
Cantidades aportadas por chatarras. ....	80
Cantidades aportadas (kg) de cada elemento. ....	81
Balance para cada elemento. ....	81
Anexo II. Determinación de nodularidad. ....	83
Anexo III. Análisis químicos de primera y segunda fusión. ....	87

## Lista de figuras

Figura 1. Relación % de nodularidad y % de Mg.....	5
Figura 2. Tipos de hojuelas de grafito en hierro gris (AFS-ASTM).....	6
Figura 3. Microestructuras de hierro dúctil. [1] .....	10
Figura 4. Siete morfologías del Carbono grafito. [1].....	11
Figura 5. Carbono grafito compacto.....	14
Figura 6. Rangos adecuados de Carbono y Silicio en un hierro vermicular. [1] .....	16
Figura 7. Subenfriamiento contra tipo de grafito. [13].....	21
Figura 8. Método de inoculación temprana. ....	22
Figura 9. Representación de post-inoculación con maquina neumática. [1].....	23
Figura 10. Método de olla abierta en donde d es el diámetro de parte superior de la olla. [11] .....	25
Figura 11. Esquema del convertidor Fischer. a) Embarcación en posición de llenado. b) Embarcación en la posición de tratamiento. [4] .....	26
Figura 12. Olla de tratamiento con tapa (Tundish).....	27
Figura 13. Rangos de Magnesio residual que producen grafito compacto. [13] .....	28
Figura 14. Diagrama de fases Fe-Cg(estable) y Fe-Fe <sub>3</sub> C(Metaestable). 30	
Figura 15. Descripción esquemática de (a) solidificación de grafito esferoidal, (b-c) de cáscaras de austenita alrededor de nódulos de grafito y dendritas de austenita no eutéctica, (d) la microestructura de hierro dúctil. [16] .....	31
Figura 16. Crecimiento de granos eutécticos en hierro dúctil, b Mecanismo de transformación de una forma esferoidal a grafito compacto. [17].....	33
Figura 17. Análisis de curva de enfriamiento de curvas de hierro gris, dúctil y vermicular, con la misma composición química. [17] .....	34
Figura 18. Diagrama de flujo, procedimiento experimental. ....	35

Figura 19. Representación de molde de Silicato-CO <sub>2</sub> .....	37
Figura 20. Caja bipartida y corazón empleados. ....	38
Figura 21. Esquema de elaboración de termopares, conectados en una clavija. ....	39
Figura 22. Esquema de instrumentación de termopares sobre los moldes de Silicato.....	40
Figura 23. Arreglo de sistema molde-adquisidor-computadora.....	44
Figura 24. Capsulas para anti-esferoidizante. En la parte superior, se muestra sellada una sección antes de ingresar anti-esferoidizante, en la parte inferior se muestra sellada completamente. ....	45
Figura 25. Tratamiento de nodularizacion.....	48
Figura 26. Esquema representativo de los cortes realizados a las muestras. ....	50
Figura 27. Durómetros empleados. ....	52
Figura 28. Gráfico de %Ti vs Dureza Brinell de primera fusión.....	55
Figura 29. Gráfico de curvas de enfriamiento primera fusión. ....	57
Figura 30. Gráfico de dureza Brinell contra %Ti.....	62
Figura 31. Curvas de enfriamiento registradas en la segunda fusión....	64
Figura 32. Set scale .....	83
Figura 33. Imagen binaria. ....	84
Figura 34. Selección de parámetros a analizar. ....	84
Figura 35. Analizando circularidad de las partículas totales. ....	85
Figura 36. Datos de áreas de las tres circularidades a analizar. ....	86
Figura 37. Análisis químico muestra 1 (0.00%Ti) .....	87
Figura 38. Análisis químico muestra 2 (0.05%Ti) .....	88
Figura 39. Análisis químico muestra 3 (0.10%Ti) .....	89
Figura 40. Análisis químico muestra 4 (0.15%Ti) .....	90
Figura 43. Análisis químico muestra 1 (0.05%Ti) .....	91
Figura 44. Análisis químico muestra 2 (0.08%Ti) .....	92
Figura 43. Análisis químico muestra 3 (0.13%Ti) .....	93

## Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación general de los hierros colados. [1] .....	4
Tabla 2. Niveles de elementos principales en un hierro gris. [1] .....	8
Tabla 3. Datos de resistencia a la tensión conforme.....	8
Tabla 4. Composición química de hierros dúctiles. [7], [8].....	12
Tabla 5. Clasificación de hierros vermiculares. [9], [10] .....	15
Tabla 6. Clasificación de partículas de grafito por factor de redondez. [10] .....	18
Tabla 7. Propiedades mecánicas de hierros colados con matriz perlítica a 25°C. [6], [8], [10].....	19
Tabla 8. Composición química hierro dúctil 100-70-03. ....	36
Tabla 9. Variables fijas, para cada fusión. ....	36
Tabla 10. %Ti empleados, en cada fusión.....	36
Tabla 11. Adiciones de FeTi para ajuste en horno, fusión 1. ....	41
Tabla 12. Adiciones de FeTi para ajuste en horno fusión 2. ....	42
Tabla 13. Niveles de inoculación. ....	43
Tabla 14. Cantidad de nodulizante. ....	44
Tabla 15. Composiciones químicas promedio de las muestras. Primera fusión.....	53
Tabla 16. Durezas de primera fusión. ....	54
Tabla 17. Valores de dureza Vickers (kg/mm <sup>2</sup> ).....	56
Tabla 18. Valores estadísticos de microdureza, primera fusión (kg/mm <sup>2</sup> ). .....	56
Tabla 19. Valores de temperatura eutéctica, obtenidos de las curvas de enfriamiento. ....	57
Tabla 20. Relaciones Magnesio Titanio. ....	58
Tabla 21. Nodularidad Primera Fusión.....	59
Tabla 22. Metalografías de primera fusión. ....	59
Tabla 23. Presentación de datos obtenidos. ....	61

Tabla 24. Composiciones químicas promedio de las muestras segunda fusión.....	61
Tabla 25. Durezas de segunda fusión. ....	62
Tabla 26. Valores de dureza Vickers (kg/mm <sup>2</sup> ).....	63
Tabla 27. Valores estadísticos de microdureza, segunda fusión (kg/mm <sup>2</sup> ). ....	63
Tabla 28. Valores de temperatura eutéctica, obtenidos de las curvas de enfriamiento. ....	64
Tabla 29. Relaciones Magnesio Titanio. ....	65
Tabla 30. Nodularidad segunda fusión ....	65
Tabla 31. Metalografías segunda fusión. ....	66
Tabla 32. Presentación de datos obtenidos. ....	67
Tabla 33. Composiciones químicas chatarras y metal base.....	77
Tabla 34. Composiciones químicas chatarras y metal base.....	80



## **INTRODUCCIÓN.**

El hierro vermicular o *Compacted Graphite Iron* (CGI por sus siglas en inglés), reúne unas cualidades de elasticidad, resistencia y conductividad térmica intermedias entre el hierro dúctil y el hierro gris. Estas propiedades favorecen su utilización en aplicaciones donde es imprescindible la disipación de calor junto con cierta resistencia y ductilidad, tales como monoblocks de motor, colectores de escape, discos de freno para aerogeneradores, etc.

En el inicio lograr hierro vermicular fue un defecto al producir hierro dúctil ya sea que se encontrará parcial o totalmente en la pieza. Sin embargo, con el paso de los años se logró consolidar como un nuevo material debido a los estudios realizados para la caracterización. La escasez de métodos adecuados de control de proceso, que garanticen una homogeneidad de estructura y propiedades físicas en las piezas fabricadas, ha provocado que se prefieran otro tipo de hierros colados.

La problemática se encuentra asociada a las variaciones particulares de los procesos productivos utilizados para la fabricación de hierro vermicular. Habitualmente su elaboración se realiza de manera similar a la obtención de hierro dúctil: se introduce Mg o Ce como elemento esferoidizante y se puede incorporar algún elemento degenerador de grafito, como Ti o S, pero debido a los efectos del Azufre de formar FeS que se segrega en las partes centrales de las piezas dando origen a la formación de fundición blanca provocando el defecto llamado temple invertido, por lo que se prefiere al Titanio.

La consecución de los diferentes grados de nodularidad (actualmente se trata de manejar el concepto de circularidad) depende del balance existente entre los diferentes elementos modificadores de la estructura



del Carbono grafito (Mg, Ce, S, Ti, Al, O, etc.), la velocidad de enfriamiento por las diferentes secciones de una pieza industrial y la habilidad para formar núcleos gráfiticos es decir la eficiencia y potencia de la inoculación y más específicamente con respecto a este trabajo la relación Mg/Ti.

Las propias oscilaciones de rendimientos en las adiciones efectuadas, junto con los estrechos márgenes admisibles en la combinación de estos elementos y la incertidumbre de los sistemas de análisis de los mismos provocan un rechazo importante debido al no cumplimiento de las especificaciones de las piezas de este material.

Este trabajo fue diseñado para obtener una relación molar optima de Mg/Ti, para la producción de hierro vermicular, la metodología empleada consiste en una primera fusión, en la cual se obtiene una primera relación, para posteriormente secundarla variando concentraciones cercanas a la relación obtenida en la primera fusión, para este trabajo en ambas fusiones se conservó la metodología empleada, es decir, adición de Ti en horno, inoculación temprana y una nodularización mediante método sándwich, elaborando moldes de silicato-CO<sub>2</sub> instrumentándose con termopares de tipo k colocando la punta a ¼ de altura a partir de la base, para la elaboración de curvas de enfriamiento, para realizar análisis térmico, dando como resultado muestras con un diámetro de 6cm y 12cm de altura, para posteriormente realizar cortes de la muestra dejándolas finalmente con una altura de 3cm y el diámetro original de 6cm, con las muestras finales se realizó un estudio metalográfico, identificando y cuantificando el tipo de Carbono grafito resultante, dando las condiciones para calcular las relaciones obtenidas de Mg/Ti, relacionándolas con el %Nodularidad, para así obtener una relación adecuada para la obtención de hierro vermicular.



## **HIPOTESIS.**



Hay un balance entre las cantidades de Mg (esferoidizante) y Ti (antiesferoidizante) que producirá el nivel adecuado (rango) del % de nodularidad (o circularidad) para producir grafito compacto.

## **OBJETIVOS.**

Determinar la relación molar entre el cociente Mg/Ti respecto al porcentaje de nodularización para obtener hierros vermiculares.



## CAPITULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Existen diferentes tipos de hierros colados con grafito precipitado, se caracterizan principalmente por la morfología o distribución del Carbono grafito. A continuación, se presenta la clasificación de los hierros colados, posterior a esto, se introducirán los tratamientos al metal líquido, para obtener cada uno de ellos.

### 1.1. Clasificación de los hierros colados.

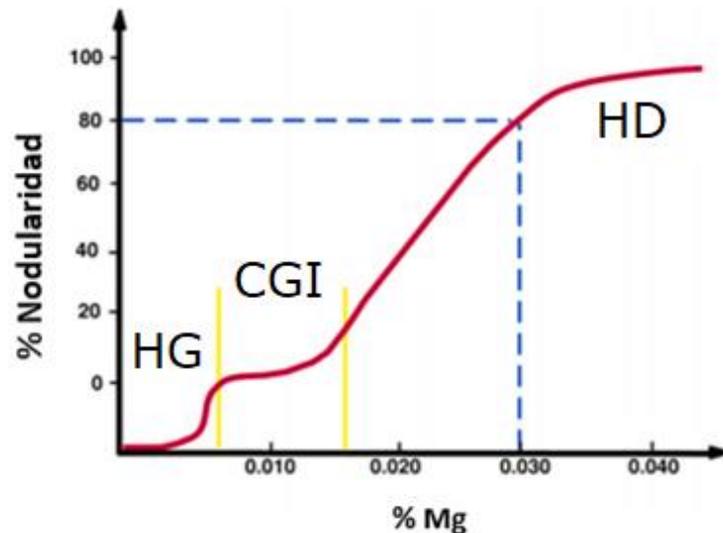
Históricamente la clasificación de los hierros colados comienza con el hierro gris y el hierro blanco, los cuales se distinguen por el color de la fractura, el hierro blanco presenta una fractura de coloración blanca, mientras que, al fracturar un hierro gris, esta será de color gris en su superficie, con el desarrollo de la metalografía y el crecimiento del conocimiento acerca de los hierros colados, se incluyen otras clasificaciones como lo es la forma del grafito: grafito en hojuela (Hierro gris); grafito esferoidal (nodular); grafito compacto (vermicular). Así mismo otras consideraciones como lo son el tipo de matriz: Ferrítica, Perlítica, Martensítica o Bainítica. Una clasificación general de los hierros colados comunes se presenta en la **Tabla 1**, que será la que se utilice en este trabajo.

<b>Tabla 1.</b> Clasificación general de los hierros colados. [1]			
Designación comercial	Morfología de Carbono	Matriz <sup>(a)</sup>	Fractura
Hierro Gris	Láminas de grafito	P	Gris
Hierro Dúctil	Esferoides de grafito	F, P, A	Gris-plata
Hierro Vermicular	Grafito compacto vermicular	F. P	Gris
Hierro Blanco	Cementita	P, M	Blanca

(a) F, ferrita; P, perlita; A, austenita; M, martensita.



SinterCast, destacada empresa especialista en producción de hierro vermicular (CGI) define que, para obtener hierro vermicular existe una relación estrecha entre la obtención de hierro gris (HG) y hierro dúctil (HD), como se muestra en la **Figura 1**, en donde los niveles de Magnesio para obtener un hierro vermicular, están entre 0.006-0.016%, y así mismo se refiere que para considerarse un hierro vermicular, la nodularidad debe de estar entre 0-20% de nodularidad, sin arriesgar el cambio de la morfología de vermiculos a hojuelas, dado que estas ocasionan pérdida de propiedades mecánicas esperadas en un CGI.



**Figura 1.** Relación % de nodularidad y % de Mg.

Se muestra la meseta estable de obtención del CGI La meseta CGI estable existe en un rango aproximado de 0.006%Mg separándose del hierro gris abruptamente. [2]

Se observa que en la **Figura 1**, el CGI es un material intermedio entre hierro gris y hierro dúctil, por lo cual se destacaran aspectos fundamentales de estos materiales de interés.

## 1.2. Hierro Gris.

Los hierros colados son aleaciones de hierro, Carbono y Silicio, en el que el Carbono se encuentra retenido en solución sólida en la austenita a

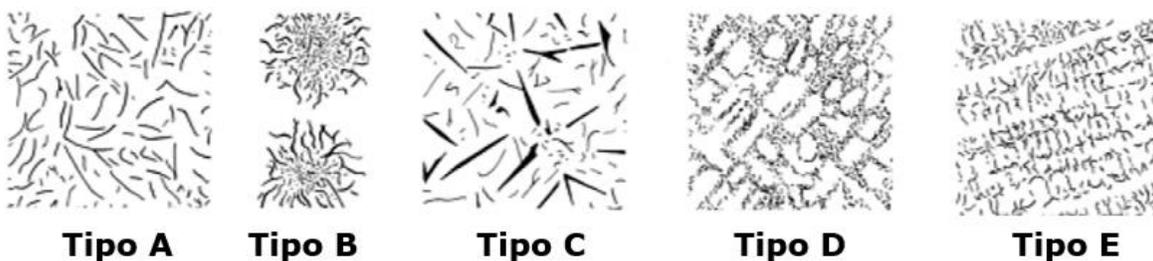


temperatura eutéctica. En el caso del hierro gris el Carbono excede la solubilidad en austenita precipitando como hojuela de grafito.

### 1.2.1. Microestructura.

La microestructura usual del hierro gris, es una matriz perlítica con hojuelas de grafito. El método de producción se puede variar para que la nucleación y el crecimiento de hojuelas de grafito se produzca en un patrón que incremente las propiedades deseadas. La cantidad, tamaño y distribución del grafito son importantes. Un enfriamiento demasiado rápido puede producir el llamado hierro blanco en el que el exceso de Carbono se encuentra en forma de carburos masivos. El enfriamiento intermedio puede producir hierro moteado, en el cual el Carbono presente se encuentra en forma de cementita primaria y grafito. El enfriamiento muy lento en los hierros que contienen grandes porcentajes de Silicio y Carbono probablemente produzca considerablemente ferrita y perlita a lo largo de toda la matriz, junto con hojuelas gruesas de grafito. Las hojuelas de grafito es uno de los siete tipos de forma del grafito establecidos en la norma ASTM A 247.

De acuerdo con la norma ASTM A 247, la hojuela de grafito se subdivide en cinco tipos (patrones) designados desde la letra A hasta E, como se muestra en la **Figura 2**.



**Figura 2.** Tipos de hojuelas de grafito en hierro gris (AFS-ASTM).  
En la práctica recomendada [3], estos graficos son mostrados a un aumento de 100x.  
Estos han sido reducidos a un tercio de su tamaño para mostrarse aquí. [4]



Para la mayoría de las aplicaciones se prefiere el grafito de tipo A (orientación aleatoria). En los tamaños de hojuelas intermedias, el grafito de hojuela de tipo A es superior a otros tipos en ciertas aplicaciones de desgaste tales como los cilindros de motores de combustión interna.

El grafito en forma de hojuela tipo B (patrón de roseta) es típico de un enfriamiento bastante rápido, tal como es común con secciones moderadamente delgadas (alrededor de 10mm) y a lo largo de las superficies de secciones más gruesas que veces resulta de una inoculación pobre.

Las grandes hojuelas de grafito de tipo C son típicas del grafito *kish* que se forma en hierros hipereutéticos. Estas grandes hojuelas aumentan la resistencia al choque térmico aumentando la conductividad térmica y disminuyendo el módulo de elasticidad. Por otro lado, las hojuelas grandes no conducen a buenos acabados superficiales en piezas mecanizadas o para resistencia a los golpes.

El grafito de hojuela tipo D, es una forma interdendrítica, que tiene orientación aleatoria, puede formarse cerca de superficies rápidamente enfriadas o en secciones delgadas. Con frecuencia, tal grafito está rodeado por una matriz de ferrita, dando como resultado puntos blandos en la colada.

El grafito de hojuela tipo E es una forma interdendrítica, que tiene una orientación preferida en lugar de una orientación aleatoria.

Existen, por supuesto, muchas aplicaciones en las que el tipo de hojuela no tiene importancia, siempre que se cumplan los requisitos de propiedades mecánicas.



### 1.2.2. Clasificación.

Como primer acercamiento a la clasificación de los hierros grises está presente la **Tabla 2** que muestra una clasificación general de los hierros grises, divididas en clases, estas clases, tienen subdivisiones las cuales implican el tipo de sección, es decir delgada, mediana o gruesa, además muestra el porcentaje en el que se encuentran los elementos principales en las clases, ya que estos están relacionados críticamente con la solidificación del hierro gris, afectando de manera directa en la microestructura y propiedades del material.

**Tabla 2.** Niveles de elementos principales en un hierro gris. [1]

Clase de hierro	%Carbono total	%Silicio
Clase 20	3.40-3.60	2.30-2.50
Clase 30	3.10-3.30	2.10-2.30
Clase 40	2.95-3.15	1.70-2.00
Clase 50	2.70-3.00	1.70-2.00
Clase 60	2.50-2.85	1.90-2.10

Esta clasificación también va de la mano con las propiedades mecánicas, más en específico con el esfuerzo de tensión, como se puede observar en la **Tabla 3**, en donde el nombre de la clase corresponde a la propiedad de resistencia a la tensión

**Tabla 3.** Datos de resistencia a la tensión conforme a la clase de hierro. [5], [6]

Clase	Resistencia a la tensión	
	MPa	ksi
20	138	20
25	172	25
30	207	30
35	241	35
40	276	40
50	345	50



### 1.2.3. Efecto de los elementos de aleación.

Se tienen tres elementos principales; Carbono, Silicio y el Hierro. El Carbono, después del Hierro, es un elemento fundamental, ya que este se puede encontrar combinado con el Hierro formando cementita o encontrarse de manera libre como grafito. Estas formas están relacionadas con la velocidad de enfriamiento, así como la presencia de elementos grafitizantes, como lo es el Silicio.

En los elementos menores del hierro gris, o secundarios, están el Fósforo, el Manganeso y el Azufre, el control de estos elementos es necesario para fabricación del hierro gris, el Fósforo en exceso, tiende a formar esteadita ( $Fe_3P$ ) por lo que se encuentra entre 0.02 a 0.1%P, en el caso del Azufre, este suele estar entre 0.05% a 0.12%, debido al impacto producido sobre la nucleación del grafito, finalmente el Manganeso favorecerá la formación de perlita si se encuentra en niveles superiores a 0.4%Mn.

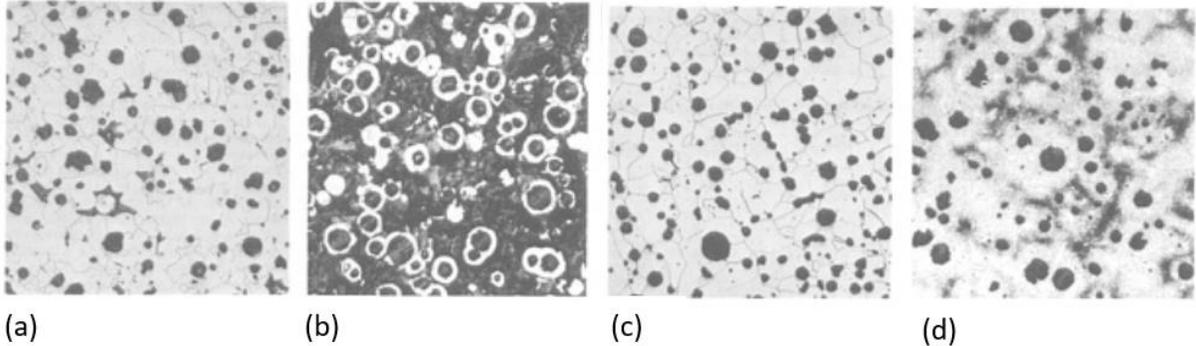
Finalmente se tienen a los elementos de seguimiento o terciarios, estos afectan la naturaleza y propiedades del hierro gris, dependiendo de una propiedad deseada estos se agregan intencionalmente, por ejemplo, el Estaño y el Cobre favorecen la formación y/o estabilización de la perlita.

### 1.3. Hierro Dúctil.

En el hierro dúctil o hierro esferoidal, el grafito se encuentra presente en pequeños esferoides, mostrados en la **Figura 3**, el grafito eutéctico se separa del hierro fundido durante la solidificación, de una manera similar a la que el grafito eutéctico se separa de la fundición gris. Sin embargo, debido al tratamiento en el metal líquido antes de colada, el grafito crece como esferoides, en vez de hojuelas de cualquier forma. Este hierro



colado contiene esferoides de grafito, que producen elongaciones significativas en comparación con el hierro gris.



**Figura 3.** Microestructuras de hierro dúctil. [1]  
(a) Ferrítica. (b) Perlítica (c) Ferrítica (Ferritizado) (d) Perlítica (Templado y enfriado).

### 1.3.1. Microestructura.

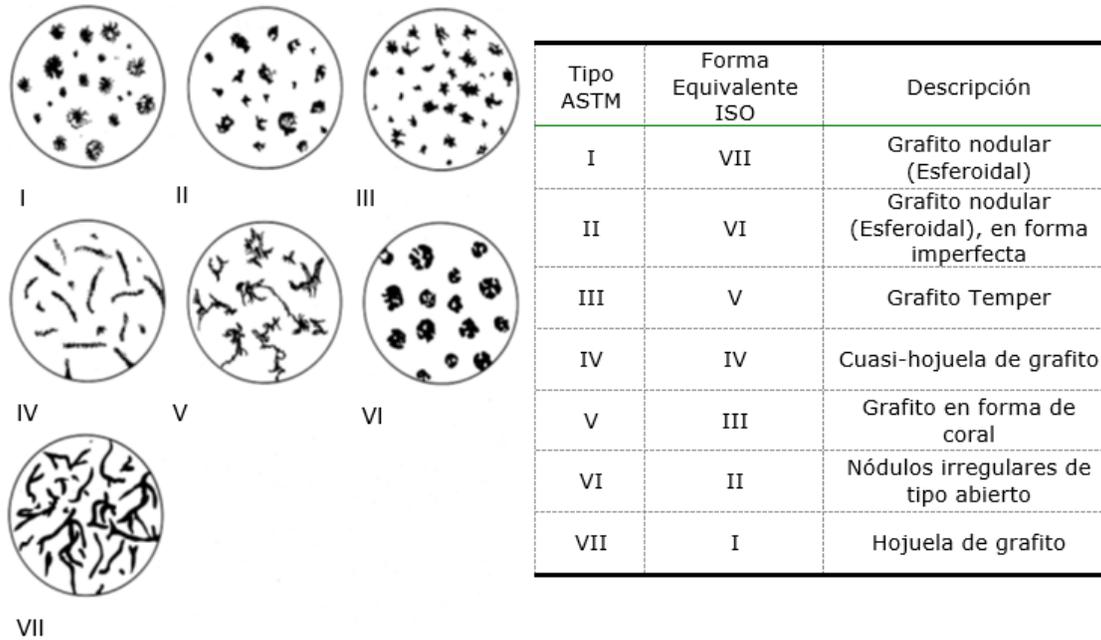
La presencia de grafito en hierro dúctil en forma de esferoides en lugar de hojuelas, es causada por la adición de Magnesio (o en forma conjunta de Magnesio y cerio) al metal líquido, resultando en una mayor resistencia del material, comparado con un hierro gris.

Las formas que son intermedias entre una forma esferoidal (tal como la ASTM tipo 1, en la **Figura 4**) y una forma en hojuelas (tal como la ASTM tipo VII, en la **Figura 4**) producen propiedades mecánicas inferiores a las de la estructura hierro dúctil. El tamaño y la uniformidad de distribución de los esferoides de grafito también influyen en las propiedades mecánicas, pero en menor grado que en la forma del grafito.

Los esferoides pequeños y numerosos suelen acompañarse de propiedades de alta resistencia a la tracción y tienden a reducir la probabilidad de formación de hierro enfriado en secciones delgadas o en los bordes. Existe una densidad óptima de esferoides. Los esferoides excesivos pueden debilitar una colada a tal punto que no pueda soportar



los rigores de su aplicación prevista. Cada material debe ser evaluado para su aplicación específica.



**Figura 4.** Siete morfologías del Carbono grafito. [1]

### 1.3.2. Clasificación.

La ASTM maneja la siguiente clasificación de los hierros colados, mostrados en la **Tabla 4**; Los nombres asignados por la ASTM corresponden a tres características principales de cada grado, por ejemplo, tenemos el hierro dúctil grado 100-70-03, el numero 100 corresponde a 100,000psi de resistencia a la tensión, el numero 70 corresponde a 70,000psi de resistencia a la fluencia, mientras que el numero 03 corresponde a 3% de elongación, es decir el nombre de cada grado en el hierro dúctil, define las propiedades mecánicas, así mismo la composición química da las condiciones para que la microestructura produzca las propiedades requeridas.



**Tabla 4.** Composición química de hierros dúctiles. [7], [8]

Grado ASTM	C %	Si %	Mn %
60-40-18	3.50 - 3.78	2.80 - 2.85	0.2-0.5
65-45-12	3.30 - 3.80	2.40 - 2.90	0.2-0.5
70-50-05	3.20 - 3.60	2.30 - 2.90	0.4-0.6
80-55-06	3.50 - 3.90	2.25 - 3.00	0.15-0.35
80-60-03	3.00 - 3.50	2.40 - 2.80	0.3-0.5
100-70-03	3.65 - 3.90	1.70 - 1.90	0.3-0.5

Continuación.

Grado ASTM	P %	S %	Mg %
60-40-18	0.03 - 0.06	0.02 - 0.035	0.020 - 0.060
65-45-12	0.03 - 0.06	0.02 - 0.040	0.020 - 0.060
70-50-05	0.03 - 0.06	0.02 - 0.040	0.030 - 0.055
80-55-06	0.05	0.025	0.030 - 0.055
80-60-03	0.03 - 0.06	0.02 - 0.040	0.035 - 0.050
100-70-03	<0.06	<0.03	0.035 - 0.050

### 1.3.3. Efecto de los elementos de aleación

Las propiedades del hierro dúctil dependen primero de la composición química. La composición debe ser uniforme dentro de cada pieza fundida. Muchos elementos influyen, pero los de mayor importancia son los elementos que ejercen una poderosa influencia sobre la estructura de la matriz o sobre la forma y distribución de los esferoides de grafito.

El Carbono: Influye en la fluidez del metal líquido y en las características de contracción del mismo. El exceso de Carbono no en solución, sino en suspensión, reduce la fluidez. El volumen de grafito es 3.5 veces el volumen del hierro. A medida que se solidifica el hierro dúctil, el Carbono en solución precipita como grafito y causa una expansión de la aleación, que puede compensar la contracción de la aleación cuando se solidifica.

El tamaño y el número de esferoides de grafito formados durante la solidificación están influenciados por la cantidad de Carbono, el número de núcleos de grafito y el porcentaje de inoculación.



El grafito también proporciona lubricidad para la fricción por deslizamiento y el bajo coeficiente de fricción, permite engranajes de funcionamiento más eficientes que, además, no se dañan si se experimenta una pérdida de lubricante durante el servicio.

La relación entre el contenido de Carbono y el contenido de Silicio en términos del Carbono equivalente, CE, es:

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

**Silicio:** Es un poderoso agente grafitizante. Dentro de los límites normales de composición, a mayor contenido de Silicio, mayor será el contenido de ferrita; Además, el Silicio contribuye al fortalecimiento de la solución y la dureza de la ferrita. El Silicio reduce la resistencia al impacto del hierro dúctil ferrítico. Para proporcionar la máxima resistencia a la fractura desde la temperatura ambiente hasta  $-40^{\circ}\text{C}$ , el Silicio debe mantenerse por debajo del 2.75%, si el contenido de Fósforo es inferior al 0.02%. Si el contenido de Fósforo es 0.05%, el contenido de Silicio debe limitarse al 2.55%. Aplicaciones de alta temperatura como turbocompresores, las carcasas requieren contenidos de Silicio de 3.75 a 4.25%. Esta combinación proporciona resistencia a la oxidación a alta temperatura.

**Manganeso:** Este actúa como un estabilizador de perlita y aumenta la resistencia, pero reduce la ductilidad y la maquinabilidad. También promueve la segregación en los bordes de grano.

**Níquel:** Se utiliza con frecuencia para aumentar la resistencia promoviendo la formación de perlita fina.

**Cobre:** Se utiliza como un estabilizador de la perlita de alta resistencia con buena tenacidad y maquinabilidad.



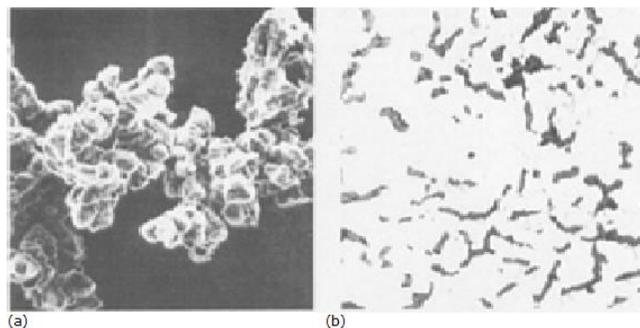
Molibdeno: Se utiliza para estabilizar la estructura a temperaturas elevadas. La cantidad debe ser controlada debido a la tendencia del molibdeno a segregar en los bordes de grano como carburos estables.

#### 1.4. Hierro Vermicular.

Hierro vermicular o conocido en inglés como, *Compacted Graphite Iron* (CGI). Se ha fabricado inadvertidamente en el pasado, en el proceso de producción de hierro dúctil, como resultado del subtratamiento con Magnesio o Cerio. Desde 1965, el hierro vermicular ha ocupado su lugar legítimo en la familia de hierros colados. [1]

##### 1.4.1. Microestructura.

La morfología del grafito del hierro vermicular es bastante compleja. Una micrografía de microscopio electrónico de barrido típico de una partícula de grafito compacta fuera de la matriz se muestra en la **Figura 5(a)**, se ve que el grafito compacto aparece en grupos que están interconectados dentro de las células eutécticas. La **Figura 5(b)** presenta grafito similar al grafito tipo IV ASTM A 247. El grafito compacto aparece como grafito más grueso y vermiculos cortos. En general, un hierro vermicular aceptable es aquel en el que al menos el 80% del grafito es grafito compacto, hay un máximo de 20% de grafito esferoidal (Hierro dúctil) y no hay grafito en hojuelas (Hierro gris).



**Figura 5.** Carbono grafito compacto.  
(a) Micrografía de SEM, con ataque profundo 200x. (b) Micrografía óptica. [1]



Esta morfología de grafito permite mejores propiedades del material, produciendo mayor resistencia y ductilidad que el hierro gris, también el grafito interconectado proporciona una mejor conductividad térmica y capacidad de amortiguación que el grafito esferoidal, teniendo así fuertes aplicaciones en componentes de motores, desplazando al hierro dúctil.

#### 1.4.2. Clasificación.

Con respecto a la clasificación de los hierros vermiculares la ASTM tiene mención de estos en la A 842, de igual manera el nombre de cada hierro tiene influencia en sus características mecánicas, como se puede observar en la **Tabla 5**.

<b>Tabla 5.</b> Clasificación de hierros vermiculares. [9], [10]					
Grado ASTM	250	300	350	400	450
ISO 16112	JV/250	JV/300	JV/350	JV400	JV/450
Resistencia a la tensión, (N/mm <sup>2</sup> )	250	300	350	400	450
Resistencia a la fluencia, (N/mm <sup>2</sup> )	175	210	245	280	315
Elongación, (%)	3%	1.5%	1%	1%	1%

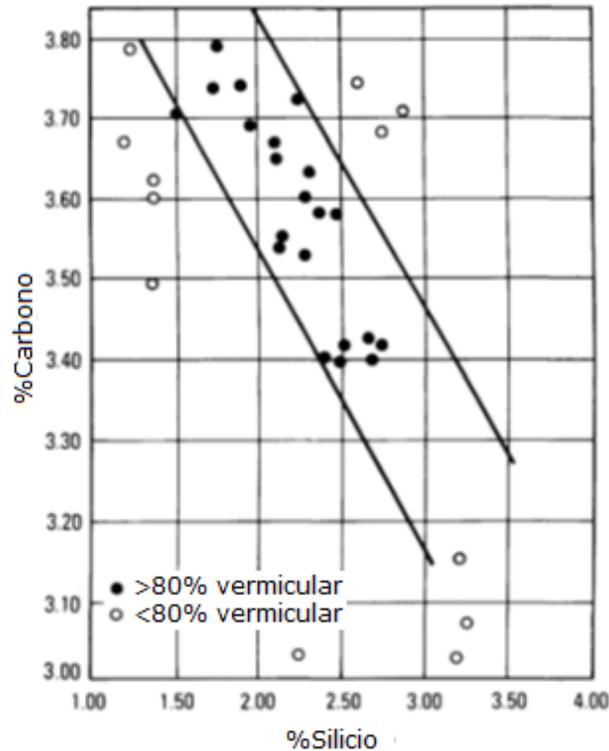
Esta norma junto con la ISO 16112 no tienen especificación de composición química, solo manejan propiedades mecánicas, en caso del grado 250, este necesita un tratamiento térmico de ferritización después de colada, mientras que el grado 450 necesita tener más porcentaje de Manganeso o Cobre, debido a su exigencia mecánica, y predominancia de perlita en su matriz.

#### 1.4.3. Efecto de los elementos aleantes.

Para obtener las propiedades mecánicas deseadas de los hierros vermiculares, el Carbono equivalente (CE), juega un papel fundamental, los niveles de Carbono equivalente se extienden desde composiciones hipoeutéctica (CE = 3.7%) a hipereutéctica (CE = 4.7%), con contenidos



de Carbono de 3.1 a 4.0% y Silicio en cantidades de 1.7 a 3.0%. El contenido adecuado de Carbono y Silicio puede seleccionarse de la **Figura 6**.



**Figura 6.** Rangos adecuados de Carbono y Silicio en un hierro vermicular. [1]

El CE adecuado debe seleccionarse en función del tamaño de la sección. Para un tamaño de sección dado, un CE demasiado alto resultará en flotación de grafito, como en el caso del hierro con grafito esferoidal, mientras que un CE demasiado bajo puede dar lugar a una mayor tendencia al enfriamiento, dando como consecuencia una baja nodularidad.

El contenido de Manganeso puede variar entre 0.1 y 0.6%, mientras que el contenido de Fósforo debe ser inferior al 0.06%. Los niveles de Azufre residual típicos después del tratamiento son 0.01 a 0.02%.



Para garantizar la forma de grafito vermicular es necesario utilizar algunos elementos de tratamiento, como en el caso del hierro dúctil. Estos elementos incluyen Magnesio, tierras raras (Cerio, Lantano, etc.), Calcio, Titanio y Aluminio.

Se pueden usar elementos de aleación, tales como Cobre, Estaño, Molibdeno e incluso Aluminio para cambiar la matriz de fundición desde la ferrita hasta la perlita. Los intervalos típicos son 0,48% de Cu o 0.033% de Sn, 0.5 a 1% de Mo y hasta 4.55% de Al. Independientemente de los elementos de aleación utilizados, se debe tener en cuenta la alta tendencia ferritizante del hierro vermicular. [1]

En el caso del hierro vermicular los tratamientos son semejantes a los empleados en el hierro dúctil, que es la inoculación y la nodularización, el proceso adicional a realizar es la antiesferoidización, con Titanio o Aluminio el propósito de este tratamiento adicional es modificar la tensión superficial al momento de la formación del esferoide, dando paso a dar una morfología del grafito en forma de coral o vermiculos.

### 1.5. Nodularidad.

Para la obtención de un hierro vermicular es necesario obtener una morfología del grafito ISO III, aunado a esto, para determinar si es un hierro vermicular, este debe de contener de 0 a 20% de nodularidad de acuerdo a la norma ISO 16112:2006 usando la siguiente ecuación.

$$\%Nodularidad = \frac{\# \text{Area esferoides} + 0.5(\# \text{Area intermedios})}{\# \text{Area total de todas las particulas}} * 100 \quad (2)$$

De acuerdo al criterio de la norma ISO 16112, para la determinación de hierro vermicular se tiene que distinguir entre tres tipos de partículas, expresadas en la **Tabla 6**.



**Tabla 6.** Clasificación de partículas de grafito por factor de redondez.  
[10]

Factor de redondez	Forma de grafito
0.625 a 1	Dúctil (ISO VI)
0.525 a 0.625	Intermedio (ISO IV y V)
<0.525	Compacto (ISO III)

Las partículas de grafito se clasifican por el factor de redondez en forma de grafito esferoidal (Dúctil) (Forma VI según ISO 945), formas intermedias (Forma V y forma IV según ISO 945) o grafito compacto (vermicular) (Forma III según ISO 945).

Como criterio adicional se excluyeron las partículas con tamaños menores a tamaño 8 de nódulo de acuerdo a la norma ISO 945, debido a que estas no pueden considerarse esferoides o pudieran ser inclusiones, poros, o algún defecto de colada.

Para la determinación del factor de forma, el *software ImageJ* realiza el proceso de forma automática, como se muestra en el **Anexo II**.

#### 1.6. Propiedades mecánicas de los hierros colados.

El uso de los hierros colados en ciertas aplicaciones depende íntegramente de sus propiedades mecánicas. Se presentan en la **Tabla 7** algunas propiedades mecánicas de los hierros gris, dúctil y vermicular; Se obtuvieron los datos de las normas ISO 185 (hierro gris), ISO 1083 (hierro dúctil) e ISO 16112 (hierro vermicular), tomando como hierros con matriz predominantemente perlítica (Superior al 85%), tomando únicamente una aleación de cada tipo de hierro colado.



**Tabla 7.** Propiedades mecánicas de hierros colados con matriz perlítica a 25°C. [6], [8], [10]

Propiedades mecánicas.	ASTM Grado 30(ISO 200)	ASTM Grado 100-70-03(ISO 700-2)	ISO/JV/450
Resistencia a la tensión (Rm).	200-300 MPa	650-700 MPa	450 MPa
Resistencia a la fluencia (Rp0.2).	130-195MPa	380-420 MPa	315 MPa
Elongación (A).	0.3-0.8%	1-2%	1%
Módulo de elasticidad (E).	88-113 GPa	180 GPa	150 GPa
Conductividad térmica.	46 $\frac{W}{K^{\circ}m}$	31 $\frac{W}{K^{\circ}m}$	37 $\frac{W}{K^{\circ}m}$
Dureza Brinell.	210 $\frac{kg}{mm^2}$	270 $\frac{kg}{mm^2}$	200-250 $\frac{kg}{mm^2}$

Para la selección del hierro vermicular, en la aplicación industrial, es necesario reconocer que este posee propiedades intermedias entre hierro gris y dúctil, el hierro vermicular puede sustituir al hierro gris en aplicaciones donde el hierro gris se ha hecho insuficiente, tener mejores propiedades como el hierro dúctil, en el caso de aplicaciones automotrices, ejemplos de cambios de hierro vermicular sobre el dúctil es en motores a Diesel de gran tamaño, usado en motores como AUDI V8 a Diesel o motores BMW V8 de inyección múltiple, así mismo en elaboraciones de cigüeñales, o engranes, siento el hierro vermicular un material altamente favorable en aplicaciones que requieran trabajar en temperaturas elevadas y/o condiciones de fatiga.

### 1.7. Tratamientos al metal líquido.

Para la fabricación de hierros colados, que presentan una morfología del Carbono precipitado, es necesario llevar a cabo ciertos tratamientos al metal líquido, por ejemplo, en el hierro gris, el tratamiento es la inoculación, mientras que en el hierro dúctil, es necesaria una nodularización o esferoidización, además de la inoculación, mientras que en el hierro vermicular es necesaria, inoculación, esferoidización y la

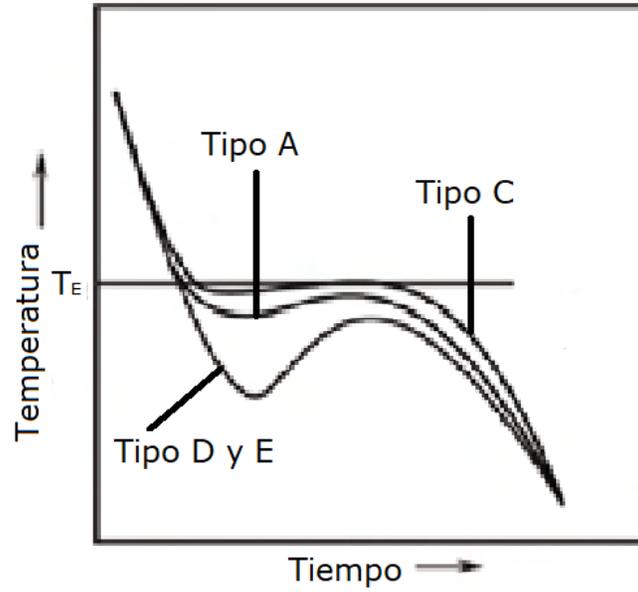


adición de elementos antiesferoidizantes, cada parte del proceso tiene un objetivo principal, que es definir la morfología del grafito, asimismo crear centros de nucleación para favorecer la precipitación del Carbono, detallando cada tratamiento a continuación.

### 1.7.1. Inoculación.

La inoculación se define como la adición ciertos elementos al metal líquido para producir cambios en el tamaño y distribución del grafito, así como generar sitios de nucleación para precipitar Carbono grafito. Estos elementos son Calcio, Aluminio, Bario, Cerio, tierras raras, etc. Generalmente estos elementos se adicionan en combinación de una ferroaleación con Silicio.

Se reconoce que dos hierros con la misma composición química aparente pueden tener microestructuras y propiedades diferentes si uno es inoculado y el otro no. El propósito de un inoculante es aumentar el número de núcleos en el metal líquido de modo que la solidificación eutéctica, específicamente la precipitación de grafito, pueda comenzar con una cantidad mínima de subenfriamiento. Cuando se minimiza el subenfriamiento, hay una reducción correspondiente en la tendencia a formar carburos eutécticos o hierro blanco. En su lugar, se produce una microestructura más uniforme, consistente en hojuelas de grafito, como se muestra en la **Figura 7**, en donde se ven curvas de enfriamiento con un subenfriamiento diferente, dando como consecuencia la obtención de un tipo de grafito diferente.

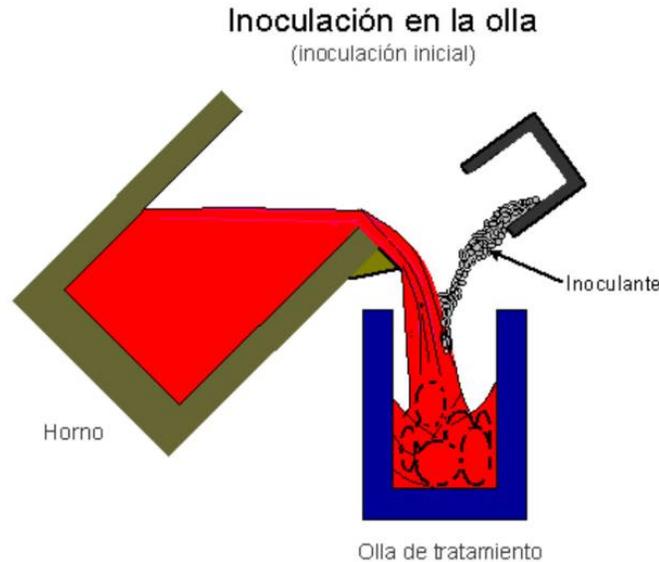


**Figura 7.** Subenfriamiento contra tipo de grafito. [13]

Un análisis teórico que menciona Hasse Fredriksson sobre la inoculación, muestra que la nucleación heterogénea de  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaS}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{ZrO}_2$  y la subsecuente nucleación heterogénea de silicatos, produce substratos para el crecimiento del grafito. Los resultados muestran que los embriones de  $\text{CaO}/\text{CaS}$  son más eficaces en la formación de centros de nucleación.

#### 1.7.2. Procesos de inoculación.

Inoculación en olla abierta (Inoculación temprana): En este método, él inoculante se añade a la corriente de metal a medida que fluye desde el horno hacia la olla de tratamiento. Se debe permitir una porción de metal se acumule en el fondo de la olla de tratamiento antes de la adición, como se observa en la **Figura 8**. Esto permite que el inoculante sea mezclado y uniformemente distribuido en el hierro. No se recomienda la adición de la aleación al fondo de una cuchara vacía, ya que esto puede causar sinterización y una reducción en la eficacia del inoculante.



**Figura 8.** Método de inoculación temprana.

También pueden surgir problemas si la aleación se añade completamente a la olla de tratamiento, debido a que el inoculante puede quedar atrapado en la capa de escoria que se forma sobre la superficie. La cantidad de inoculante necesaria en este tratamiento varía normalmente entre 0.15 y 0.4%, dependiendo de lo que se quiera producir. Deben evitarse las adiciones excesivas por las razones antes citadas.

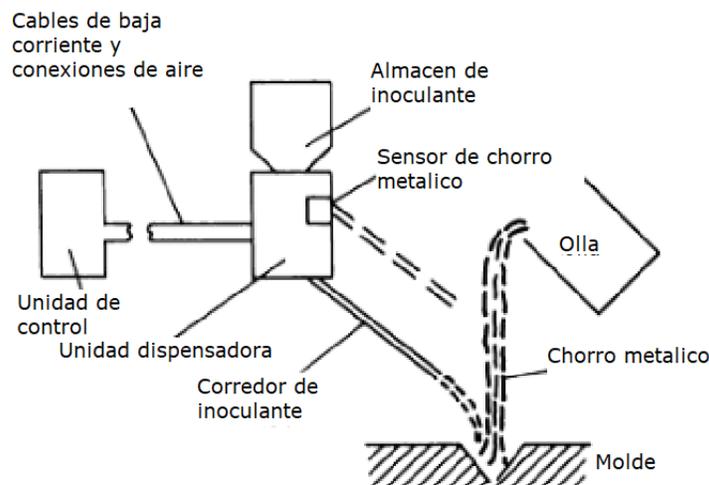
No se ha encontrado que el tamaño mínimo del inoculante sea tan crítico, aunque debe evitarse porque puede flotar en la superficie y perder su eficacia a través de la oxidación. Todas las adiciones deben ser pesadas o medidas con precisión, y el uso de temperaturas de metal adecuadas garantiza una buena disolución. Minimizar el tiempo entre el tratamiento y la colada ayuda a evitar la pérdida del efecto inoculante. El efecto máximo de un inoculante se realiza inmediatamente después de que la aleación se disuelva en el metal. Más de la mitad del efecto de la inoculación puede perderse, debido al decaimiento, en los primeros 5 min después de la adición. La pérdida completa puede ocurrir si la inoculación se mantiene durante 15 a 30 min.



Post-inoculación (Inoculación tardía): Esta consiste en la adición tardía del inoculante en el chorro metálico al momento de verterlo en los moldes.

Inoculación en el molde (Automatizado): Esta requiere que el inoculante sea añadido a la corriente de metal que fluye desde la olla de tratamiento al molde.

Este dispositivo, mostrado en la **Figura 9** asegura que la aleación se distribuya de tal manera que el último metal que entra en el molde es tratado de forma similar al primer metal vertido.



**Figura 9.** Representación de post-inoculación con máquina neumática. [1]

El tamaño del inoculante parece ser un factor muy importante en la inoculación en la corriente. Un tamaño demasiado grande puede causar taponamiento del equipo y disolución incompleta. Se recomienda un tamaño de partícula máximo de 8 a 30 mallas y un tamaño mínimo de aproximadamente 100 mallas.

### 1.7.3. Nodularización (Esferoidización).

Stephen Karsay (1975) [11] menciona: El propósito del tratamiento de esferoidización consiste en alterar la composición química y el estado de la masa fundida de manera que después de la inoculación el Carbono



precipite de manera esferoidal. Dando paso así que la nodularización precede a la inoculación, debido a que el Magnesio favorece la formación de esferoides, mientras que la inoculación generara sitios de nucleación heterogénea para la precipitación del grafito.

Los elementos como el Magnesio o Níquel, favorecen la modificación de la tensión superficial, favoreciendo que al momento de atravesar la línea liquidus, el Carbono grafito comience a precipitar en forma esferoidal, y con la inoculación, favorecer el aumento de la densidad de esferoides.

#### 1.7.4. Procesos de nodularización.

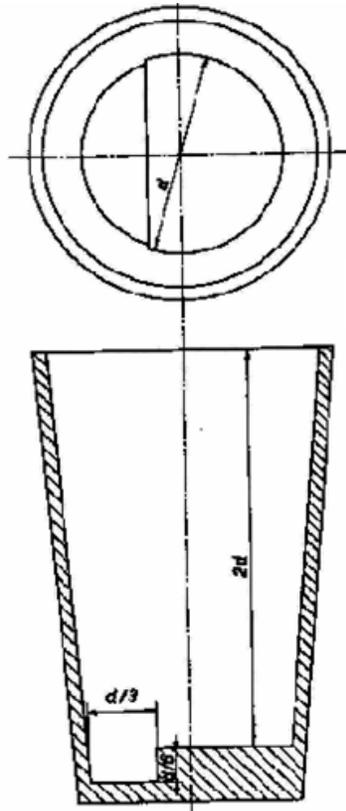
El tratamiento para producir hierro dúctil implica la adición de Magnesio generalmente, ya sea Magnesio puro, o como ferroaleación con Silicio, o algún otro modificador de la morfología del grafito como lo es el Níquel, seguido por la inoculación, para asegurar una estructura grafitica libre de carburos. Esta sección discutirá los métodos de tratamiento con Magnesio.

Para el tratamiento con Magnesio, el hierro estará normalmente a una temperatura de 1450 a 1510 ° C (temperatura de trabajo). La mayoría de las aleaciones utilizadas para introducir Magnesio en hierros colados se basan en ferrosilicio que contiene de 3 a 10% de Mg. La reacción varía de bastante violenta (con 10% de Mg), a una reacción menos violenta (con 3% de Mg). Actualmente se practican muchos métodos de tratamiento, mencionados a continuación. [1]

Método de olla abierta: Este método, mostrado en la **Figura 10** consiste en colocar alguna aleación maestra de Magnesio en el fondo de la olla de tratamiento, vaciando material fundido en la olla, cubriendo la aleación maestra, una variedad de este método es llamado el método sándwich, llamada así debido a que la aleación maestra es cubierta con piezas de



acero, ferrosilicio o algún otro material antes de vaciar el metal fundido en la olla de tratamiento, la cubierta de sándwich debería retrasar el inicio de la reacción de Magnesio, es decir, la reacción se realizara hasta que la olla este parcialmente llena, dando como resultado una mejor recuperación de Magnesio. [11]

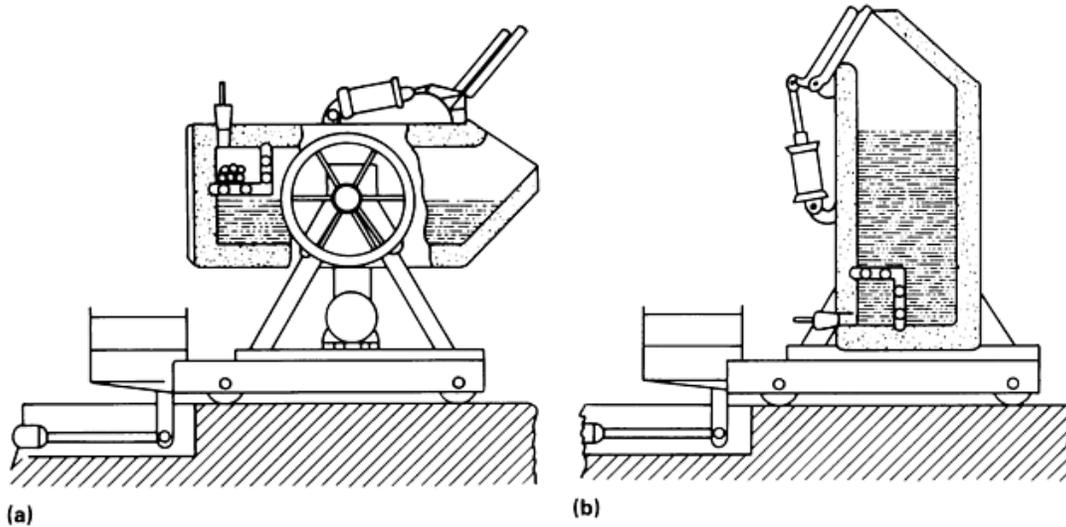


**Figura 10.** Método de olla abierta en donde  $d$  es el diámetro de parte superior de la olla. [11]

Convertidor: La reacción entre el Magnesio metálico y el hierro fundido es violenta. El Magnesio se vaporiza y reacciona vigorosamente en el aire. Se necesitan recipientes de reacción cerrados especiales y uno de los procesos mejor establecidos utiliza un convertidor, presente en la **Figura 11** en el que se introducen lingotes de Magnesio en el fondo del metal líquido en un recipiente inclinable a presión atmosférica. Otros métodos

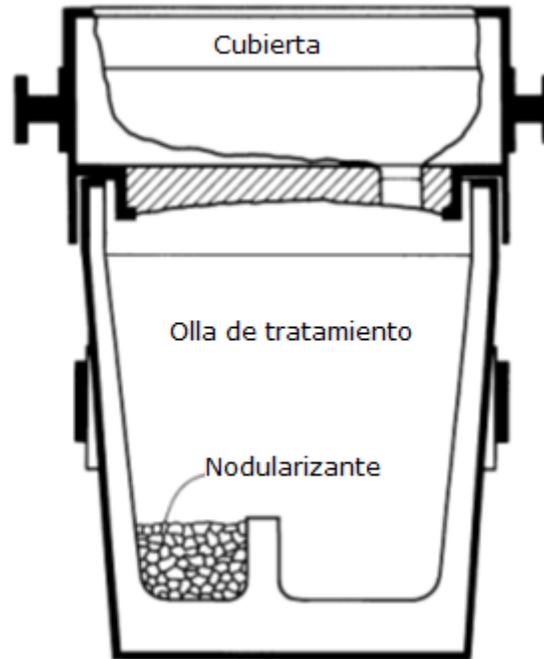


han implicado la introducción de polvo de Magnesio, varillas o alambre en el metal fundido con recipientes atmosféricos o presurizados diseñados para excluir el aire y evitar la expulsión de metal fundido y humos durante la solución del Magnesio.



**Figura 11.** Esquema del convertidor Fischer. a) Embarcación en posición de llenado. b) Embarcación en la posición de tratamiento. [4]

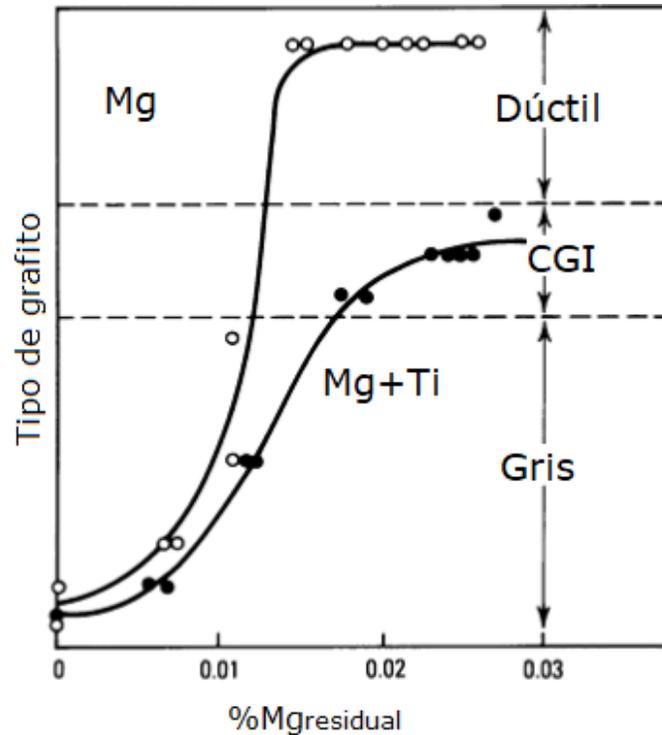
Método Tundish: Cuando se utiliza este método, la aleación se coloca a menudo en una cavidad especialmente diseñada y se cubre con una capa de virutas de acero (Método sándwich), representado con la **Figura 12**. El tratamiento se lleva a cabo generalmente en ollas de tratamiento que tienen una relación de altura a diámetro de aproximadamente 2:1 para contener cualquier salpicadura de metal, mientras que se usa una cubierta con una artesa a través de la cual se puede verter el hierro, reduciendo cualquier expulsión de metal, mejorando así el rendimiento de Magnesio.



**Figura 12.** Olla de tratamiento con tapa (Tundish).

#### 1.7.5. Antiesferoidización con Titanio.

Górny (2013) [12] define que la formación de grafito vermicular es un proceso difícil de controlar, ya que tiene un estrecho margen de Mg residual: demasiado Mg dará un exceso de nódulos, mientras que muy poco Mg conducirá a la formación de estructuras de hojuelas de grafito, como se ve representado en la **Figura 13**. También define que incluso a niveles de Magnesio tan bajos como 0.01% no es posible obtener hierro vermicular aceptable con espesores de pared de 4mm debido a la nodularidad excesiva. La adición de elementos antiesferoidizantes tiene una aplicación industrial mucho más amplia. El uso de Titanio como elemento de aleación clave, tiene el propósito de ampliar el rango de trabajo de Magnesio para lograr la producción exitosa de hierro vermicular. [12]



**Figura 13.** Rangos de Magnesio residual que producen grafito compacto. [13]

Yih-Hsun Shy (1999) [14] muestra que el Titanio es uno de los elementos anti-esferoidizantes, destacando otros elementos como lo son; el Aluminio, Bismuto y Zirconio, siendo el Titanio un elemento de aleación clave que ayudan a extender el rango de trabajo del Magnesio para lograr una exitosa producción de hierro vermicular. La tendencia anti-esferoidizante del Titanio favorece la formación de grafito compacto. Por otro lado, Górnny (2013) [12] obtiene que el Titanio tiene el efecto de promover el contenido de perlita en la matriz, aumentando la resistencia en el hierro vermicular.

#### 1.7.6. Métodos de antiesferoidización.

Cuando se añade Titanio al hierro dúctil, cambia la forma del grafito para que se vuelva menos esférica. A medida que aumenta el contenido de Ti, los nódulos gradualmente se rompen y se vuelven "semejantes a



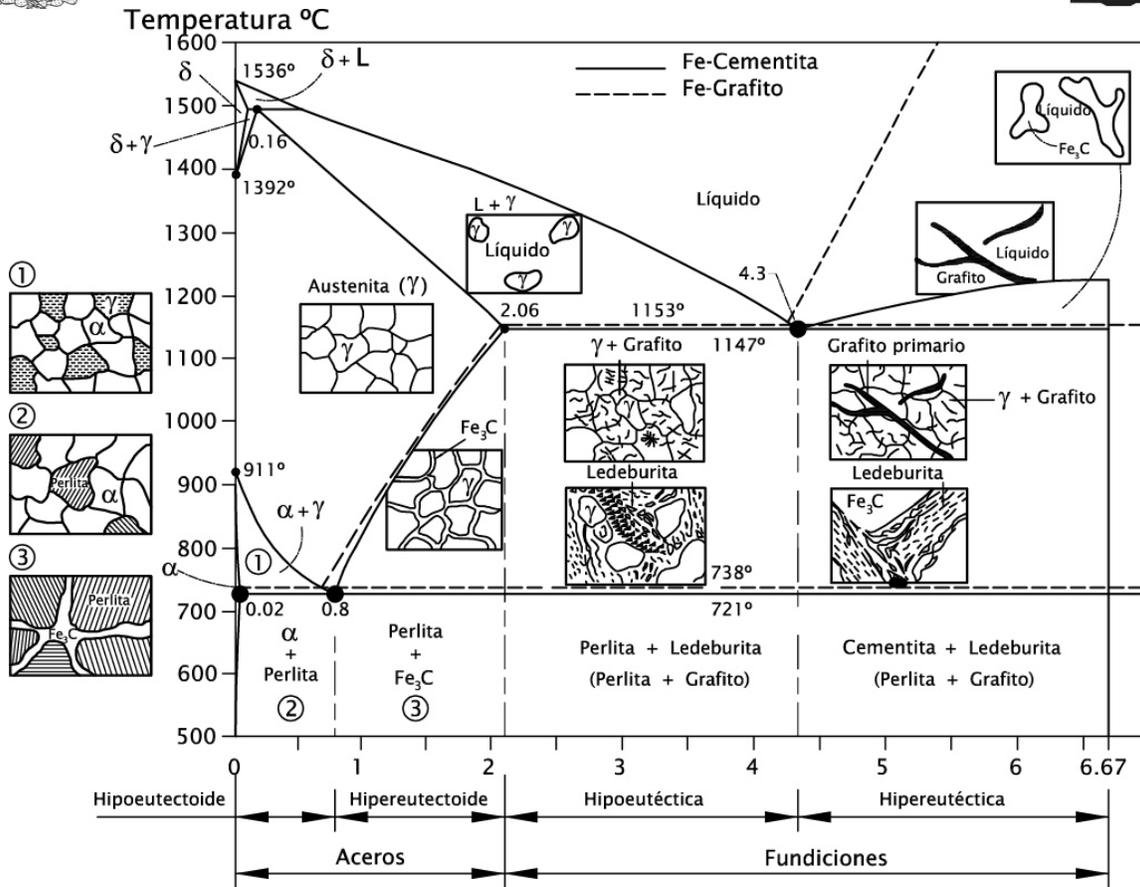
gusanos", vermiculares y compactos. De hecho, el uso equilibrado de Mg y Ti es un método preferido para producir hierro vermicular. [15]

Al adicionar Titanio, este se agrega en forma de ferroaleación, en granulometría en polvo, la adición en capsulas de acero en el horno, garantiza que el Titanio se encuentre en el baño metálico, dado que este no pierde eficiencia como lo es la inoculación o la nodularización, el encapsulamiento asegura de igual forma que se incorpore de manera eficiente, sin que el material quede atrapado en la escoria generada en el horno.

### 1.8. Solidificación.

La morfología del grafito en el hierro dúctil y hierro vermicular está influenciada por un gran número de factores durante la solidificación. Dependiendo de la composición líquida, la solidificación comienza con precipitación primaria, seguida por formación eutéctica; o directamente con una formación eutéctica. El grafito precipita durante una reacción eutéctica.

En el caso del hierro fundido con una composición hipo-eutéctica y eutéctica, la solidificación implica la nucleación y crecimiento de dendritas de austenita primaria, así como la nucleación y crecimiento de células eutécticas. La nucleación y el crecimiento de las dendritas de austenita primaria es posible (cuando el metal líquido se enfría por debajo de la línea de liquidus) aunque la composición es eutéctica o ligeramente hipereutéctica, a medida que los hierros colados se solidifican siguiendo un diagrama de fase, mostrado en la **Figura 14**.



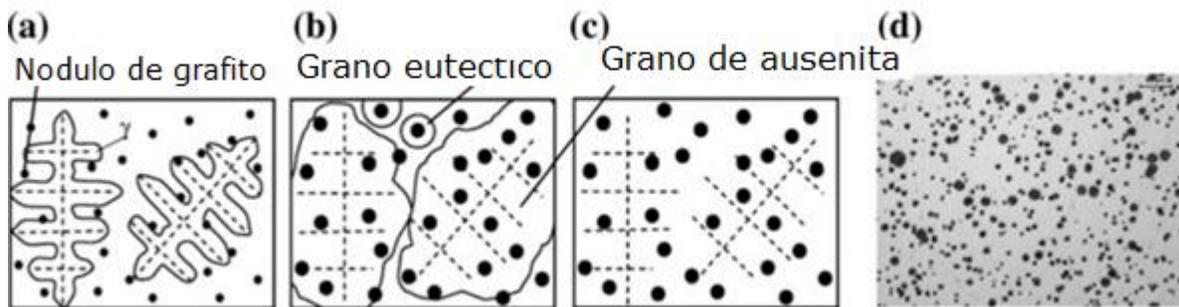
**Figura 14.** Diagrama de fases Fe-Cg(estable) y Fe-Fe<sub>3</sub>C(Metaestable).

De acuerdo con las teorías de solidificación convencionales, la austenita nuclea comúnmente en la pared del molde dando lugar a un crecimiento en columnas, y a una temperatura ligeramente inferior la austenita puede nuclearse en heterogeneidades en el metal líquido que conduce al crecimiento equiaxado. La austenita primaria crece como dendritas delgadas con una alta tasa de crecimiento hasta que inciden. Las dendritas delgadas crecen rápidamente y forman una red de dendritas. Cada dendrita forma un grano de austenita bastante grande. Después de la incidencia de las dendritas, el crecimiento continuará por el brazo de dendritas de engrosamiento. El subenfriamiento del metal líquido por debajo de la temperatura de transición de la fase de equilibrio eutéctica es seguido por la nucleación y el crecimiento de las células eutécticas (granos), que consisten en grafito y austenita. Por lo tanto, la célula



eutéctica (grano) es un producto de la creación espacial que comprende dos o más cristales Inter penetrantes que crecen a partir de un solo núcleo durante la transformación eutéctica. Por consiguiente, se espera que cada núcleo de grafito dé lugar a un solo esferoide de grafito en hierro dúctil o a un solo "gusano" de grafito en el hierro vermicular. Puesto que cada célula eutéctica es el producto de un evento de nucleación de grafito, se pueden usar mediciones de recuento de células eutécticas para establecer la susceptibilidad de nucleación de grafito de un hierro colado dado.

Hay que tomar en cuenta que mientras las partículas de grafito compacto parecen vermiculares cuando se ven en dos dimensiones, las micrografías de tres dimensiones (después de un ataque profundo) muestran que los "gusanos" individuales pueden ser independientes o conectados a sus vecinos más cercanos dentro de la célula eutéctica. Debido a las interacciones de grafito-partícula-austenita-dendrita, se pueden incorporar varias partículas de grafito en un grano de austenita, como se muestra en la **Figura 15**.

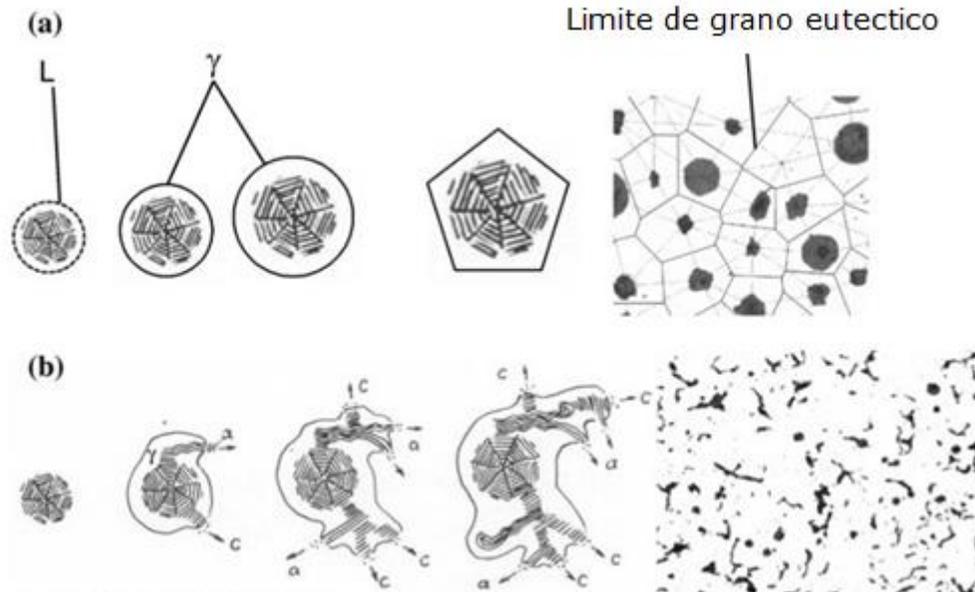


**Figura 15.** Descripción esquemática de (a) solidificación de grafito esferoidal, (b-c) de cáscaras de austenita alrededor de nódulos de grafito y dendritas de austenita no eutéctica, (d) la microestructura de hierro dúctil. [16]



Holtzer (2015) [17] menciona que las sustancias que forman los núcleos de grafito en los hierros vermicular y dúctil, no son fundamentalmente diferentes, pero las sustancias de nucleación del grafito compacto contienen compuestos más complicados y de mayor variedad, ya que los compactizantes contienen muchos elementos tales como: Mg, Ce, N, Ca, Al y Ti. También informó que el núcleo de grafito en un hierro vermicular contenía MgS y CaS similar a los núcleos encontrados en hierro dúctil, en este se nuclean esferoides de grafito que luego crecen libremente en el líquido, como se observa en la **Figura 16(a)**, durante un tiempo relativamente corto antes de ser envueltos por austenita. La capa de austenita nuclea directamente en los nódulos de grafito. El recubrimiento de austenita aumenta en el metal líquido en la forma esférica hasta que choque con los granos adyacentes. El efecto del impacto del grano es cambiar la forma de (deformación) de la capa de austenita sin cambiar la forma del grafito.

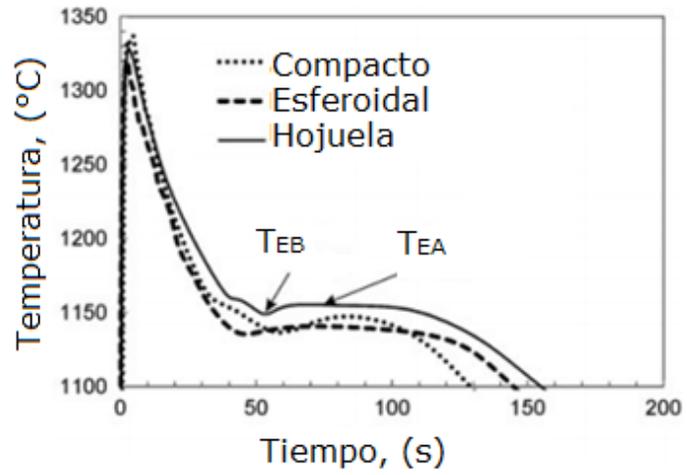
Según Holtzer [17], el grafito compacto, al contrario que el grafito esferoidal, no crece aisladamente del metal líquido. Durante el crecimiento del grafito compacto (CGI), existen canales de líquido que entran en contacto con los extremos del grafito compacto y su líquido restante, representado en la **Figura 16(b)**. Estos canales de líquido resultan del enriquecimiento de elementos activos superficiales, que cambian las condiciones de crecimiento del grafito entre el eje A y el eje C. El oxígeno y el Azufre son dos elementos tensioactivos, que disminuyen la tensión superficial entre el grafito y el líquido.



**Figura 16.** Crecimiento de granos eutécticos en hierro dúctil, b Mecanismo de transformación de una forma esferoidal a grafito compacto. [17]

La forma de una curva de enfriamiento de un análisis térmico refleja el proceso de solidificación de un metal líquido bajo una condición dada de solidificación. Por lo tanto, todos los tipos de factores que influyen en la calidad de la masa fundida, como composición química, inclusiones, inoculación y tratamientos de esferoidización o vermicularización y temperatura de trabajo, influirán en el proceso de solidificación de las masas fundidas y en la forma de su curva de enfriamiento, el subenfriamiento que inicializa la cristalización del grafito vermicular eutéctico con austenita es del mismo orden que en el caso de la fundición dúctil.

La **Figura 17** muestra que, para la misma composición química de hierro fundido, la temperatura eutéctica más baja (TEB), la temperatura eutéctica más alta (TEA) y el grado de recalentamiento ( $\Delta Tr = TEA - TEB$ ) de los hierros con morfología de grafito son significativamente diferentes.



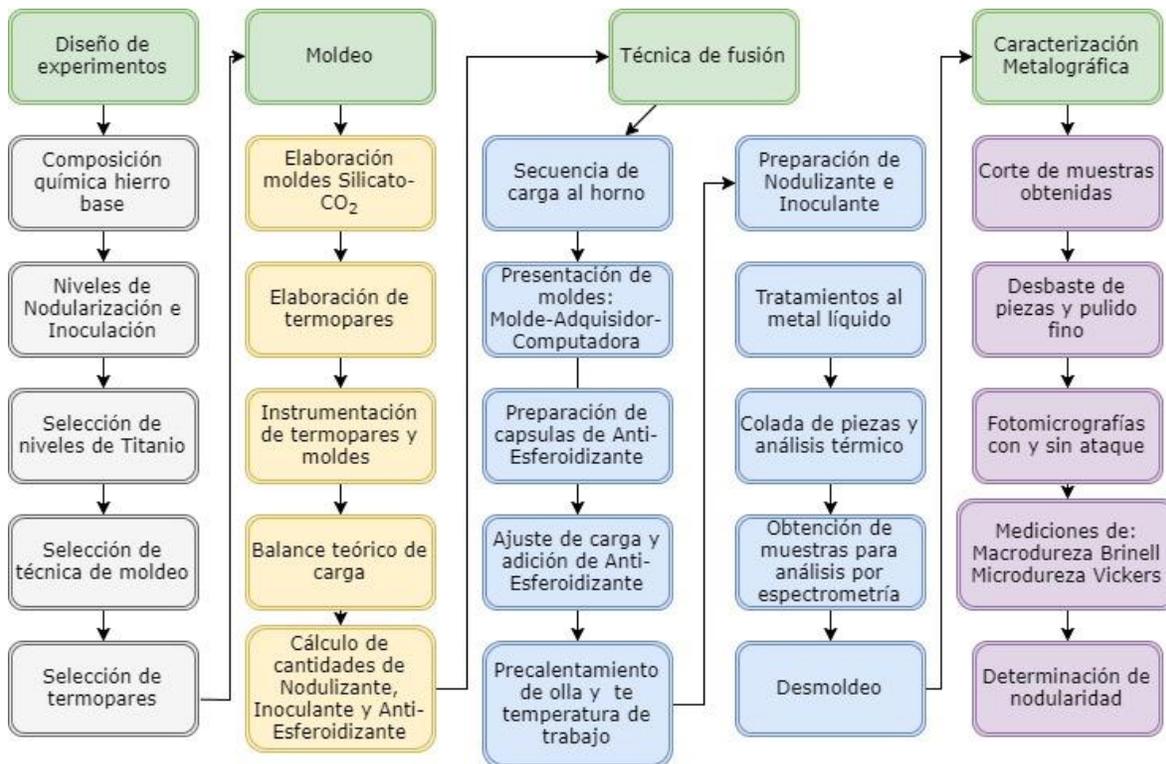
**Figura 17.** Análisis de curva de enfriamiento de curvas de hierro gris, dúctil y vermicular, con la misma composición química. [17]



## CAPITULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Para empezar con el procedimiento experimental, se introduce un diagrama de flujo del proceso en general, destacando con color verde las etapas fundamentales del proceso.

1. Diseño de experimentos.
2. Moldeo.
3. Técnica de fusión.
4. Caracterización del material.



**Figura 18.** Diagrama de flujo, procedimiento experimental.

### 2.1. Diseño de experimentos.

Para la fabricación del hierro vermicular, se contempló emplear como base la composición química de un hierro dúctil 100-70-03 teniendo la siguiente composición mostrada en la **Tabla 8**.



**Tabla 8.** Composición química hierro dúctil 100-70-03.

Clase	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mg	%Cu	%Sn
100-70-03	3.65-3.90	1.70-1.90	0.3-0.5	<0.06	<0.03	0.035-0.050	0.30-0.40	0.03-0.06

En la **Tabla 9**, se muestran los niveles de inoculación y nodularización, los niveles de inoculación varían, debido a la realización simultanea de otros experimentos, dejando fija la nodularización, el método de nodularización empleado fue método sándwich y la inoculación se realizó una vez finalizada la reacción de nodularización, adicionándose de manera temprana en el chorro metálico al momento de vaciar a la olla de tratamiento.

**Tabla 9.** Variables fijas, para cada fusión.

	Inoculación	Nodularización
Primera fusión	0.10%Si	0.02%Mg <sub>residual</sub>
Segunda fusión	0.15%Si	0.02%Mg <sub>residual</sub>

Para la primera parte, se usan los niveles presentados en la **Tabla 10**, para la segunda fusión se muestran de igual forma en la tabla; los niveles en la segunda fusión se proponen a partir de los resultados obtenidos en la primera fusión.

**Tabla 10.** %Ti empleados, en cada fusión.

	Niveles usados			
Primera fusión	0.00%Ti	0.05%Ti	0.10%Ti	0.15%Ti
Segunda fusión	0.05%Ti	0.08%Ti	0.13%Ti	

Para la obtención de las muestras, se empleó como medio de moldeo el proceso de silicato-CO<sub>2</sub>, debido a las características de las muestras que se desearon obtener. En esta se empleó una caja bipartida y un corazón, teniendo que la pieza de interés presenta una geometría cilíndrica con 5cm de diámetro y 12cm de altura.

Para el análisis térmico se decidió emplear termopares de tipo k, debido al rango de temperaturas que este contempla (200 - 1370°C).

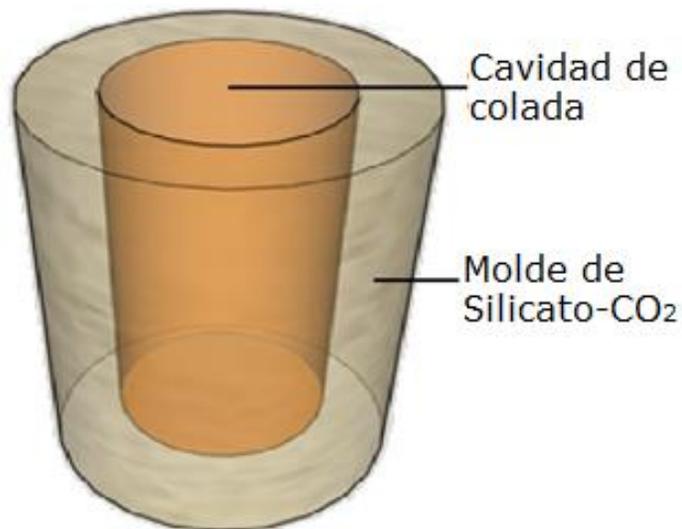


## 2.2. Moldeo.

Esta sección explicará el procedimiento de elaboración de moldes, como se realizaron e instrumentaron los termopares sobre los moldes, así como los cálculos para determinación de las cantidades a emplear, tanto en ajuste de carga como en tratamientos al metal líquido.

### 2.2.1. Elaboración de moldes de Silicato-CO<sub>2</sub>.

Usando esta técnica de moldeo representada en la **Figura 19**, se buscó la obtención de muestras cilíndricas de 5cm de diámetro con 12cm de altura, por lo cual se utilizó una caja bipartida con un corazón, con las características de la muestra a obtener, la metodología para la elaboración de los moldes, es la siguiente.

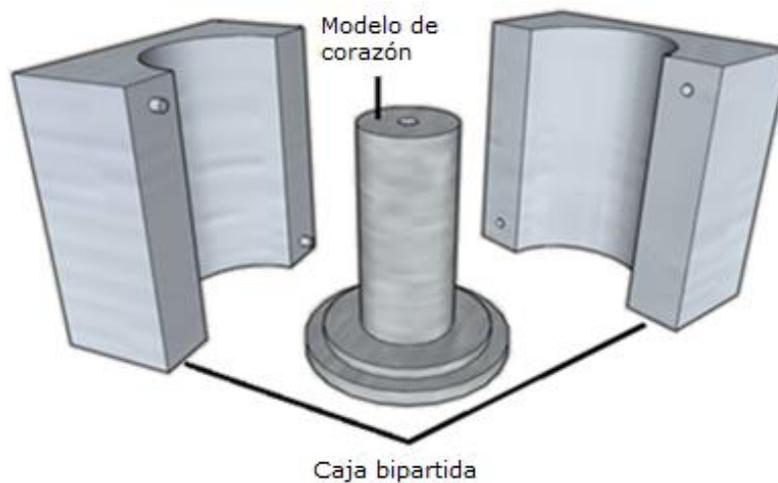


**Figura 19.** Representación de molde de Silicato-CO<sub>2</sub>

Preparación de mezcla: Se realizaron cargas de 2kg de arena Silice (SiO<sub>2</sub>) AFS 90-100 (Oklahoma), mezclándose con 125mL de resina de silicato de sodio, el tiempo de 5 minutos de mezclado, cada carga realizada produce 2 moldes de silicato.



Moldeo: Se realizó la elaboración de moldes, uniendo de manera adecuada, la caja bipartida, armando la base y el corazón de las muestras cilíndricas, representada en la **Figura 20**, una vez realizado esto, se procedió a la incorporación de la mezcla de silicato, apisonando de manera suave durante la adición, colocando, antes del llenado total, un bifilar sobre lo que será base del molde (orificio en la parte superior del modelo de corazón), esto para dejar una entrada para la colocación de termopares que involucra el estudio del enfriamiento de las muestras.



**Figura 20.** Caja bipartida y corazón empleados.

Una vez que se llenó la caja bipartida, se colocó una tapa de acrílico, sobre la parte de la caja de moldeo, que tiene mezcla, esta tiene un orificio, por el cual, mediante una boquilla, se inyectó gas de  $\text{CO}_2$  a un flujo de 5L/min, durante 35 segundos, realizado esto, se dio vuelta a la caja bipartida, dejando en la vista superior la base del corazón, retirándola suavemente, evitando que se rompa o sufra algún daño el molde suave de arena sílice, una vez retirada se procedió de igual manera a inyectar gas de  $\text{CO}_2$  durante el mismo tiempo, finalizando esto, se liberó el molde de silicato de la caja bipartida, ingresándolo a una estufa, para retirar de manera adecuada, toda humedad que pudiera conservar.

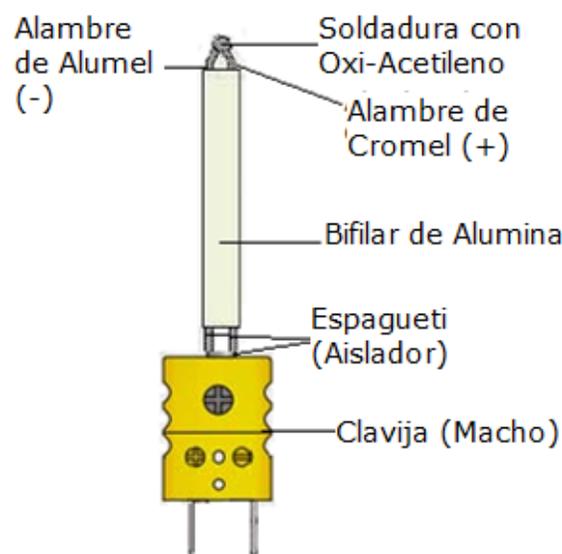


### 2.2.2. Elaboración de termopares.

Un termopar, es un sensor para medir la temperatura, en este caso se elaboraron los termopares de tipo K, con alambres de aleación cromel, alumel, instalados en un bifilar de alúmina y conectados a una clavija macho. Usando los siguientes materiales:

- Bifilar de alúmina (5cm).
- Alambre de cromel y alumel (15cm c/u).
- Aislador o "espagueti" (2 piezas de 8cm c/u).
- Clavija macho.
- Herramientas.

Consistió en insertar cada alambre en los orificios del bifilar, dejando 0.5cm de cable saliendo del bifilar, trenzando y soldando esa sección, colocando el aislador en el otro extremo del alambre, para posteriormente armar sobre la clavija macho el alambre de cromel sobre el polo negativo y el de alumel en el polo positivo, este esquema, se encuentra representado por la **Figura 21**.

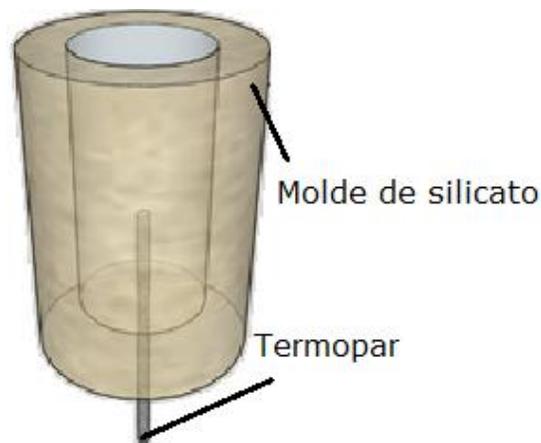


**Figura 21.** Esquema de elaboración de termopares, conectados en una clavija.



### 2.2.3. Instrumentación de moldes.

Una vez armados los termopares se marcó como referencia 3cm de la punta soldada hacia abajo, dado que el estudio de enfriamiento se contempló para  $\frac{1}{4}$  de la altura de la muestra, una vez marcados, se insertaron en el molde y para dejarlos fijos e inamovibles de los moldes de silicato, presentado en la **Figura 22**, se utilizó una variante de la técnica de caja caliente para corazones con arena Shell, empleándose sobre la base del molde de silicato.



**Figura 22.** Esquema de instrumentación de termopares sobre los moldes de Silicato.

### 2.2.4. Balance teórico de carga.

El balance teórico de carga (o balance general) se encuentra presente en el **Anexo I**.

### 2.2.5. Cálculo de cantidades para tratamientos al metal.

La primera fusión contempla 4 niveles de Titanio (**Tabla 10**, primera fusión), para esta primera parte, se empleó una carga inicial de 95kg en el horno de inducción, el método de adición de Titanio es en el horno, encapsulando FeTi (75%Ti) en tubos de acero bajo Carbono, ajustando el nivel de Titanio en el horno en cada colada de muestra, quedando los



ajustes de Titanio con una carga de: 85, 75 y 15kg de metal líquido en el horno.

Mientras que para la segunda fusión se usaron los niveles de 0.05, 0.08 y 0.13%Ti, empleándose 60kg de carga total en los cuales se adicionara FeTi, ajustando los niveles de Titanio en 60,50,20kg de metal líquido en el horno.

A continuación, se presenta el siguiente cálculo, para conocer la cantidad de gramos de FeTi teóricos, que se adicionaron al horno, usando como base de cálculo 75kg de metal líquido y una eficiencia de incorporación( $\eta$ ) de FeTi de 98%. teniendo como premisa que el metal líquido, posee 0.05%Ti, ajustándolo a 0.10%Ti.

$$g_{FeTi} = \frac{(\%Ti \text{ a adicionar})(g \text{ de carga})}{(\%Ti \text{ en FeTi})(\eta \text{ Ti})} = \frac{\left(\frac{0.05}{100}\right)(75000g)}{\left(\frac{70}{100}\right)\left(\frac{98}{100}\right)} = 54.664g_{FeTi} \quad (3)$$

Quedando las adiciones teóricas de la siguiente forma, presentadas en la **Tabla 11**.

<b>Tabla 11.</b> Adiciones de FeTi para ajuste en horno, fusión 1.		
Cantidad de carga en horno kg	Nivel de Titanio requerido %Ti	FeTi a adicionar g
85	0.05	61.9533
75	0.10	54.6647
15	0.15	18.9504

Esta eficiencia de Ti usada en la fusión 1, se modificó después de que en análisis químicos se mostró que se incorporaba menos del que se ingresaba, por lo que se recalculó la eficiencia para la segunda fusión, quedando de la siguiente forma; tomando los valores del análisis químico de la primera fusión con respecto a la muestra 2 tenemos lo siguiente:



- Gramos de FeTi adicionados: 61.6533
- %Ti en Composición Química Final: 0.0449
- %Ti calculado: 0.05

Teniendo la siguiente ecuación (4):

$$g_{FeTi\ requerido} = \frac{g_{FeTi\ adi}(\%Ti\ esperado)}{(\%Ti\ en\ probeta)} = \frac{(61.653)(0.05)}{(0.0449)} = 66.76g \quad (4)$$

Despejando  $\eta_{Ti}$  de la ecuación (3) tenemos que:

$$\eta_{Ti} = \frac{(\%Ti\ adi)(g\ de\ metal)}{(Pureza\ FeTi)(g\ req)} = \frac{\left(\frac{0.05}{100}\right)(8500)}{\left(\frac{70}{100}\right)(66.76)}(100) = 90.94\%$$

Por lo cual, empleando la ecuación (3) de nueva cuenta, con la eficiencia calculada tenemos los valores siguientes presentados en la **Tabla 12**.

<b>Tabla 12.</b> Adiciones de FeTi para ajuste en horno fusión 2.		
Cantidad de carga en horno /kg	Nivel de Titanio requerido / %Ti	FeTi a adicionar / g
60	0.05	24.706
50	0.08	15.48
20	0.13	8.3

El método empleado es inoculación temprana, es decir, se agregó el inoculante en el chorro metálico al momento de vaciar a olla de tratamiento, el nivel usado en la primera fusión fue de 0.1%Si, mientras que para la segunda fusión, se empleó, la relación óptima obtenida en un experimento simultáneo, que fue de 0.15%Si, dejando ahora el desarrollo teórico en la ecuación (5) para las cantidades de FeSi<sub>Inoc</sub> a adicionar, con una base de cálculo de 10kg de metal en la olla de tratamiento, así como el inoculante con 75%Si y la eficiencia( $\eta$ ) de incorporación al horno de 98%, para la inoculación de la primera fusión.



$$gFeSi_{inoc} = \frac{(\%Inoc)(g\ Metal\ en\ olla)}{(\%Si\ en\ Inoculante)(\eta)} = 13.6054g \quad (5)$$

Teniendo así los dos niveles de inoculación empleados, mostrados en la **Tabla 13**.

<b>Tabla 13.</b> Niveles de inoculación.		
Niveles de inoculación.	%Inoculante	Inoculante a adicionar, (g)
Primera fusión.	0.10%Si	13.6054
Segunda fusión.	0.15%Si	20.4081

La nodularización en ambas fusiones fue por método sándwich en olla abierta, cubriendo el nodulizante con una ligera capa de troquel de acero bajo Carbono, el nivel se dejó fijo en 0.02%Mg<sub>residual</sub>, las consideraciones que se tuvieron fueron las siguientes:

- Nodularizante (7.57%Mg,  $\eta_{Mg}=53\%$  y 45.73%Si,  $\eta_{Si}=96\%$ ).
- 10kg metal demandado en olla.
- 200g de troquel de acero bajo carbono

Obteniendo así, la ecuación (6) para determinación del porcentaje de Magnesio requerido para el tratamiento al metal líquido.

$$\%Mg_{Adicionar} = \frac{\%Mg_{deseado}}{\eta_{Mg} \cdot \%S_{Metal\ base}} + \%S_{Metal\ base} = 0.0527\%Mg_{Adicionar} \quad (6)$$

Para el porcentaje de nodularizante a adicionar se emplean los datos anteriores y se usa la ecuación (7).

$$\%nodularizante = \frac{\%Mg_{Adicionar}}{\%Mg_{Nodularizante}} = 0.6962 \quad (7)$$

Finalizando con la ecuación (8) para la cantidad de nodularizante.

$$gNodulizante = \%nodularizante * gOlla\ de\ tratamiento = 69.62g \quad (8)$$



Registrando los resultados en la **Tabla 14**.

<b>Tabla 14.</b> Cantidad de nodulizante.		
Nivel de nodularización	%Nodularización	Nodularizante/g
Primera y segunda fusión	0.02%Mg <sub>residual</sub>	49.801

### 2.3. Técnica de fusión.

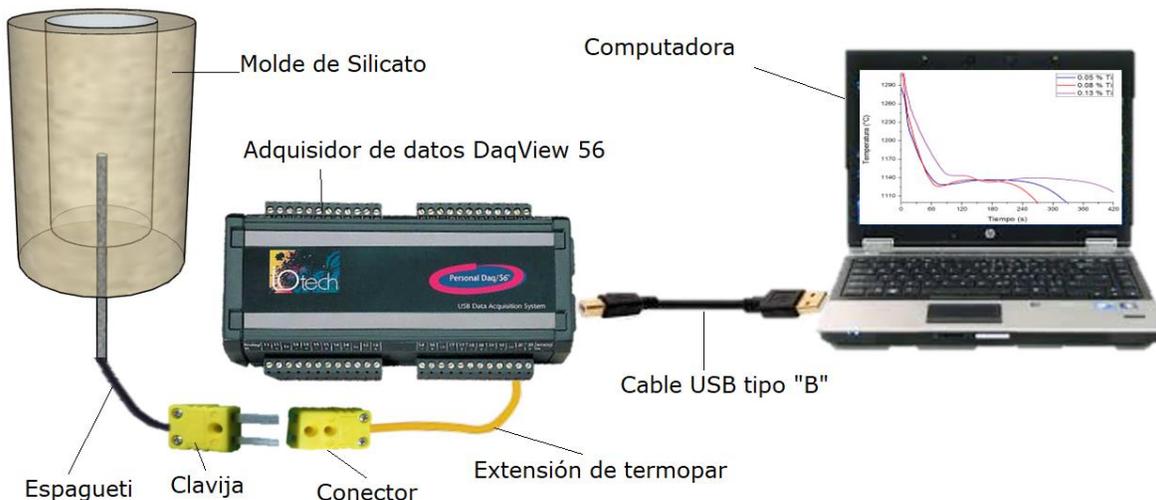
Esta sección muestra la técnica de fusión empleada, así como procedimiento usados para obtención de muestras cilíndricas.

#### 2.3.1. Secuencia de carga al horno.

La secuencia de carga de manera general fue la siguiente; hierro colado, después acero, recarburante, hierro colado, acero.

#### 2.3.2. Arreglo experimental de moldes.

Para la realización de las curvas de enfriamiento, se presentan los moldes instrumentados con termopares en la sección de colada, con adquisidor de datos Personal Daq/56™, conectadas a su vez a una computadora con sistema operativo Windows XP Service Pack 3, con el software Personal DaqView, mostrado en la **Figura 23**.



**Figura 23.** Arreglo de sistema molde-adquisidor-computadora



### 2.3.3. Preparación de capsulas de antiesferoidizante.

Se usaron tubos de acero bajo Carbono, el tamaño de estos es variable, dependiendo de la cantidad de antiesferoidizante, como primer paso se calientan los tubos, eliminando algún residuo de grasa y cepillándolos retirando algún tipo de arena o rebaba.

Antes de ingresar el antiesferoidizante, se cierran de un extremo, forjándolos con un mazo, impidiendo que este salga por el orificio, una vez agregado, se forja en frio la otra sección del tubo, sellándolos completamente, quedando como en la **Figura 24** y adicionándose al momento de ajustar la carga, después de obtener un análisis preliminar para saber que composición química posee el metal fundido después de la secuencia de carga.



**Figura 24.** Capsulas para anti-esferoidizante.

En la parte superior, se muestra sellada una sección antes de ingresar anti-esferoidizante, en la parte inferior se muestra sellada completamente.

### 2.3.4. Ajuste de carga y adición de antiesferoidizante.

Para esto se usaron los siguientes elementos:

- FeMn73%: Aleación de ferro-manganeso para ajuste de Mn en el horno, adicionándose con granulometría superior a 1 pulgada



- FeSi75%: Aleación de ferro-Silicio para ajuste de Silicio en el horno, adicionándose con granulometría superior a 1 pulgada
- Cu: Cobre cátodo usado en el horno, adicionándose con granulometría superior a 1 pulgada
- Recarburante (99.98%): Carbono usado para su ajuste, este se adiciono con granulometría de 1/8 de pulgada.
- Escorificador: Funciona como aglutinante de la escoria, formando una capa viscosa, que atrapa la escoria y facilita su retiro del horno.

La ecuación (9) rige la adición de Carbono y ferroaleaciones (FeAle), como se muestra a continuación:

$$gFeAle = \frac{(\%FeAle \text{ a adicionar})(g \text{ de carga})}{(\%Elemento \text{ a añadir de } FeAle)(\eta FeAle)} = \quad (9)$$

La adición de estos elementos aleantes, se agregan con granulometría superior a 1/4in, estos se incorporan agregándose al metal fundido de manera simple, es decir, sin encapsular o hacer una técnica para adicionarse, estos se incorporan con esa granulometría de manera adecuada sin flotar en la escoria.

La adición del antiesferoidizante se realiza antes de vaciar a la olla de tratamiento, es decir, este se adiciona en el horno, al momento de ajustar composición química, su comportamiento es como las ferroaleaciones o Carbono usadas, no tiene decaimiento, es decir, que con el tiempo este no se oxida de manera rápida, o que este pierda su efecto de antiesferoidizar.



El escorificador tiene la propiedad de aglutinar la escoria de la superficie del metal fundido, su adición se prefiere antes de vaciar a olla de tratamiento para eliminar residuos sólidos que afecten el material a colar.

#### 2.3.5. Precalentamiento de olla y temperatura de trabajo.

El precalentamiento de la olla de tratamiento se realiza de la siguiente forma, se coloca de forma horizontal sobre una base de acero de tal manera que la boca de la olla este en dirección hacia la salida de gas del quemador que genera una flama, la cual elevará la temperatura de la olla. El precalentamiento tiene como fin el de evitar que el metal líquido solidifique en dicha olla

Para la medición de la temperatura de trabajo se usa un pirómetro sumergible en forma de lanza, la cual emplea un bulbo con termopar tipo S (conectado a un adquisidor y computadora), para registrar la temperatura a la que se encuentra el metal fundido en el horno, teniendo un preliminar, la temperatura de trabajo deseada que fue de  $1450 \pm 10^{\circ}\text{C}$ .

#### 2.3.6. Preparación de inoculante y nodularizante.

Una vez calculadas las cantidades registradas en la **Tabla 12** y **13**, se procedió a pesarlas en una balanza analítica.

Para la nodularización, una vez presentada la olla de tratamiento sobre la zona de vaciado, y antes de vaciar se agrega el nodulizante, agregando posteriormente el troquel de acero bajo Carbono, cubriendo completamente el nodulizante, sobre la cavidad de la olla de tratamiento, y teniendo el inoculante sobre una cuchara recubierta de fibra cerámica moldeable para su posterior uso en la inoculación.



### 2.3.7. Tratamientos al metal líquido.

Una vez registrada una temperatura de  $1450 \pm 10^\circ\text{C}$  se procede al vaciado a la olla de tratamiento, vertiendo 10kg de metal fundido, antes de ingresar el metal líquido, se colocó el nodularizante en la olla, cubriéndolo con troquel de acero, vaciados un 50% de la capacidad de la olla aproximadamente y finalizada la reacción de nodularización, como se observa en la **Figura 25**, se procedió a agregar inoculante en el chorro metálico vaciando el metal restante, con la ayuda de la cuchara previamente preparada, para posteriormente vaciar a moldes, registrando el análisis térmico de las muestras.



**Figura 25.** Tratamiento de nodularización.

### 2.3.8. Colada de piezas y análisis térmico.

Finalizando los tratamientos al metal líquido, se procedió a vaciar el metal fundido sobre los moldes de silicato, vertiendo el material lo más cercano a la entrada del molde, evitando así un flujo que pudiera romper el bifilar del termopar, dando un experimento fallido. La adquisición de datos inicia unos minutos antes de que el metal fundido sea puesto en los moldes, cerciorándose de que las conexiones entre molde (Termopar), adquisidor



de datos y computadora sean las adecuadas y registren el enfriamiento del metal fundido de manera correcta.

#### 2.3.9. Obtención de muestras para análisis por espectrometría.

Una vez vaciado el metal en los moldes e iniciado la adquisición de datos, se procede a obtener una probeta para análisis químico para su posterior análisis mediante el equipo de marca "Spectro Analytical Instrument", modelo SpectroLab para determinar la composición química final de las muestras obtenidas, la obtención de esta es tomando una cuchara cubierta con fibra cerámica moldeable, y al momento de verter el resto de metal fundido sobre lingoteras, se toma una parte del chorro metálico, vaciándolo sobre un molde permanente partido con cavidad en forma de moneda, solidificando al momento, dejando que el resto del material se vacíe sobre las lingoteras para su posterior reuso en otros experimentos.

#### 2.3.10. Desmoldeo.

Una vez solidificado el material y enfriando a temperatura ambiente, se procede al desmoldeo de los moldes de silicato, y a la limpieza de las muestras mediante un cepillo con cerdas de alambre, retirando arena que quedo incrustada en la superficie de la muestra y cortando el exceso de bifilar y termopar al extremo de la muestra para un mejor manejo de estas.

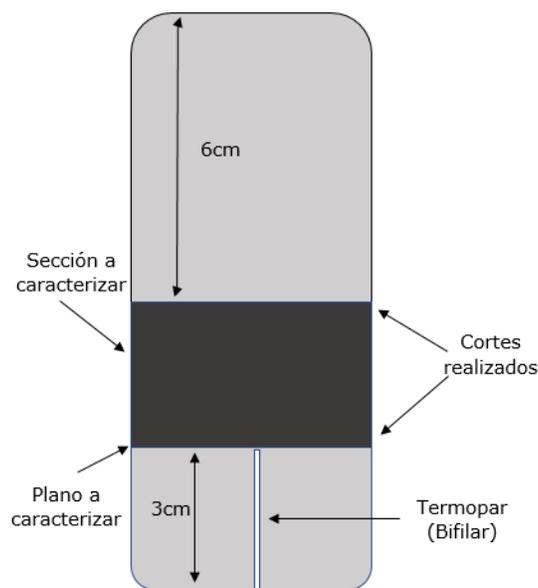
#### 2.4. Caracterización del material.

En esta sección se explica cuál fue el procedimiento desde la obtención de muestras de colada, hasta el estudio y registro de la nodularidad, verificando la obtención de hierro vermicular.



### 2.4.1. Corte de muestras obtenidas.

La muestra se secciono en una cortadora metalográfica, haciendo un primer corte en el centro (6cm), y tomando la sección que contiene el termopar, mostrado en la **Figura 26**, se volvió a cortar a la mitad, tomando como muestra a estudiar, la sección de color negro seleccionando la cara que está cerca del termopar, para hacer metalografía.



**Figura 26.** Esquema representativo de los cortes realizados a las muestras.

### 2.4.2. Desbaste de piezas y pulido.

Se partió de lija 240 para desbaste grueso, llegando a lija 1500 para desbaste fino, posteriormente se procedió a pulido fino usando paño microcloth (Buehler) junto con alúmina de 1 $\mu$ m, una vez obtenidas las micrografías directamente de pulido, se hizo un micro ataque, usando nital 2, teniendo la cara pulida hacia arriba, atacando de esta manera, se observó la coloración de oxidación y deteniendo con un lavado con agua, una vez alcanzando el nivel de ataque deseado.



### 2.4.3. Fotomicrografías con y sin ataque.

Estas se obtienen mediante la cámara LissCam 1000-1 la cual es colocada en la parte superior del microscopio Hinotek Modelo XJL-17BT, el uso de esta cámara se rige bajo el software LissView8 el cual obtiene las fotomicrografías, estas fueron tomadas a 100X, cerca de la punta del termopar.

### 2.4.4. Mediciones de dureza Brinell y Vickers.

Usando un durómetro Brinell Time Group Inc, modelo THB-3000E, (**Figura 27(a)**) se realizaron 3 mediciones de dureza para cada muestra, empleando un penetrador de bola de 10mm, con una carga de 3000kg durante un tiempo de aplicación de carga de 15 segundos, midiendo la huella generada con un microscopio de campo que tiene una reglilla calibrada en milímetros, y usando la ecuación (10) se obtiene la medición de dureza.

$$\text{Dureza Brinell} = \frac{2P}{(\pi * D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (10)$$

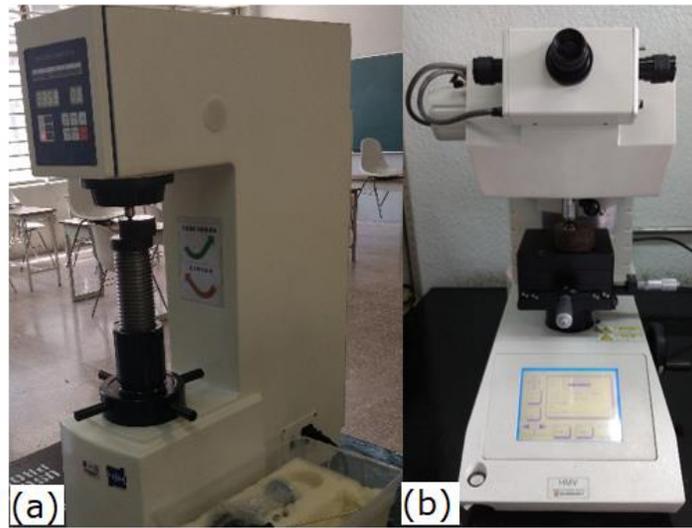
En donde:

- Dureza Brinell, (kg/mm<sup>2</sup>).
- P= Carga, (kg).
- D=Diámetro indentador, (mm).
- d=Diámetro promedio de la huella, (mm).

Ahora como segunda medición de dureza, se usó un micro durómetro Vickers Shimadzu modelo HMV-2 ASSY (**Figura 27b**). Se realizaron 15 mediciones con una carga de 1.954N, en un tiempo de 15 segundos, para



este estudio, el instrumento tiene un revolver, compuesto de 3 opciones, 2 son objetivos de 50 y 100X, los cuales permiten ver en donde se realizará la medición de dureza, y la tercera opción es el penetrador. Para este caso se penetra sobre el microconstituyente perlita, ya que como se muestra en la literatura el Titanio favorecerá el incremento de dureza de este microconstituyente, el instrumento arroja de manera inmediata el valor de dureza Vickers, así como su equivalente en dureza Rockwell C.



**Figura 27.** Durómetros empleados.

#### 2.4.5. Determinación de nodularidad.

Para determinar la nodularidad, se utilizó el criterio de usar la norma ISO 16112, este procedimiento se deja en el **Anexo II**.



## CAPITULO III. RESULTADOS.

Este capítulo se divide en dos partes, estas corresponden a los resultados registrados en dos experimentaciones, como primera instancia se presentan los resultados de la primera fusión.

### 3.1. Primera fusión.

La colada 1 corresponde a cuatro niveles de Titanio, estos niveles planteados se modificarán al nivel real registrado, es decir, el nivel 0.10%Ti se modificará a 0.075%Ti, así cada nivel planteado inicialmente tendrá su renombramiento real.

#### 3.1.1. Composición química.

Iniciando la presentación de resultados, se muestran en la **Tabla 15**, el porcentaje de los elementos principales de las muestras, dejando en el **Anexo II**, los análisis químicos realizados a cada muestra, en esta tabla en la primera columna se muestra el %Ti, entre paréntesis, que corresponde al nivel planteado, mientras que el CE se encuentra sombreado debido a que este no se obtiene directamente de análisis químico, sino que es calculado, con la ecuación (1).

**Tabla 15.** Composiciones químicas promedio de las muestras. Primera fusión.

Muestra	%C	%Si	%Mn	%P	%S
1 (0.00%Ti)	3.654	2.472	0.610	0.0201	0.0171
2 (0.05%Ti)	3.159	2.674	0.626	0.0184	0.0160
3 (0.10%Ti)	3.674	2.513	0.628	0.0209	0.0192
4 (0.15%Ti)	3.483	2.605	0.604	0.0211	0.0655

Continuación.					
Muestra	%Cu	%Ti	%Mg	%Fe	CE
1	0.3029	0.0066	0.0250	92.6	4.485
2	0.3054	0.0449	0.0261	92.9	4.056
3	0.3159	0.0750	0.0208	92.5	4.519
4	0.2918	0.1538	0.1031	92.4	4.358



### 3.1.2. Dureza.

A continuación, se muestran los valores registrados de dureza Brinell (HB) con respecto al %Ti, así como sus valores graficados, para obtener los valores de dureza, se utilizó una carga de 3000 kg, un indentador de bola de 10mm y un tiempo de penetración de 15s. teniendo ahora la siguiente ecuación (10) para obtención del valor de dureza, dando posteriormente un ejemplo de cálculo con los valores de la muestra 1 (0.0066%Ti).

Ahora bien, se tiene el siguiente ejemplo:

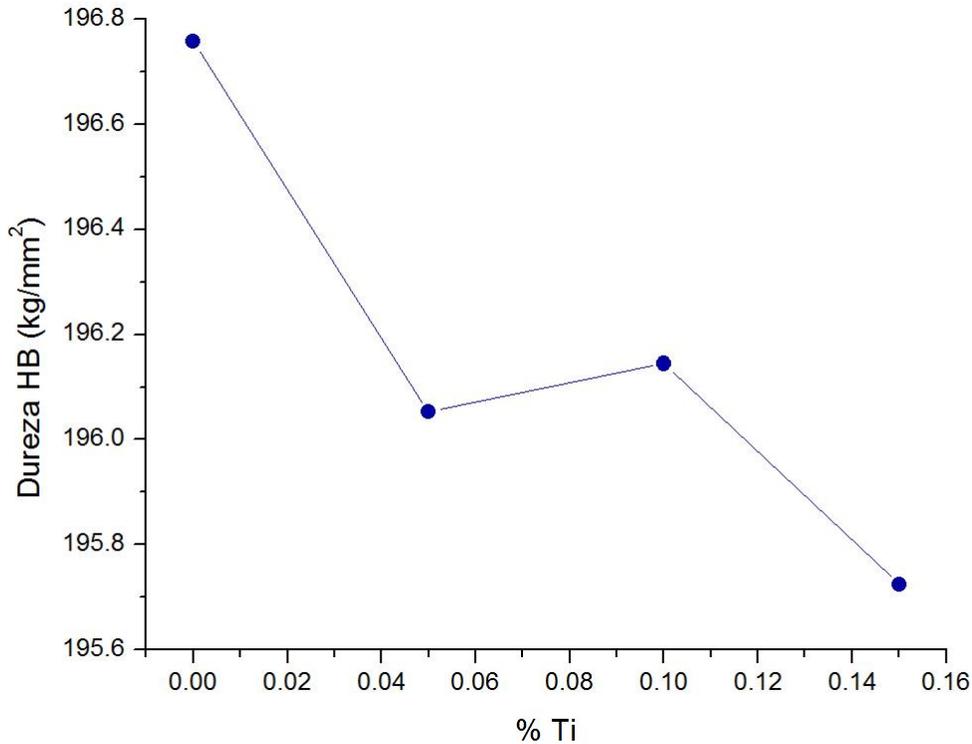
$$HB = \frac{2(3000kg)}{\pi(10mm)((10mm) - \sqrt{(10mm)^2 - (4.158mm)^2})} = 196.75 \frac{kg}{mm^2}$$

Mostrándose como resultados en la **Tabla 16**.

<b>Tabla 16. Durezas de primera fusión.</b>					
Muestra %Ti	Diámetro huella, (mm)				Dureza Brinell, (kg/mm <sup>2</sup> )
	Huella 1	Huella 2	Huella 3	Promedio	
0.0066	4.15	4.175	4.15	4.158	196.75
0.0449	3.85	3.88	4.00	3.91	196.05
0.0750	4.00	4.09	3.74	3.943	196.14
0.1538	3.82	3.82	3.72	3.786	195.72



Y graficando el promedio de dureza Brinell contra %Ti, nos muestra la **Figura 28**.



**Figura 28.** Gráfico de %Ti vs Dureza Brinell de primera fusión.

Como siguiente análisis de dureza se obtuvieron los siguientes valores de microdureza Vickers (HV) presentados en la **Tabla 17**, la indentación se realizó en el microconstituyente perlita, ya que este al estar presente en su mayoría en la microestructura de las muestras, dará más significancia en los valores obtenidos.

Para obtención de los valores, se usó un micro durómetro Shimadzu, usando una carga de 1.954N, duración de 15s, así como la realización de 15 pruebas sobre la superficie de la muestra, para este ensayo, se requiere el uso de las muestras, previamente pulidas hasta microcloth con alúmina de 1 $\mu$ m, así como ataque químico con Nital 3.



**Tabla 17.** Valores de dureza Vickers (kg/mm<sup>2</sup>)

Prueba / %Ti	0.0066%Ti	0.0449%Ti	0.0750%Ti	0.1538%Ti
1	219	235	250	289
2	257	248	261	296
3	263	260	278	323
4	264	276	289	327
5	269	277	291	327
6	278	284	293	343
7	285	285	294	353
8	290	290	308	356
9	292	292	310	363
10	294	298	327	365
11	302	305	329	371
12	307	311	342	382
13	314	326	399	388
14	316	330	404	405
15	343	358	479	421

El instrumento de microdureza arroja inmediatamente al finalizar las 15 pruebas, los siguientes valores registrados en la **Tabla 18**.

**Tabla 18.** Valores estadísticos de microdureza, primera fusión (kg/mm<sup>2</sup>).

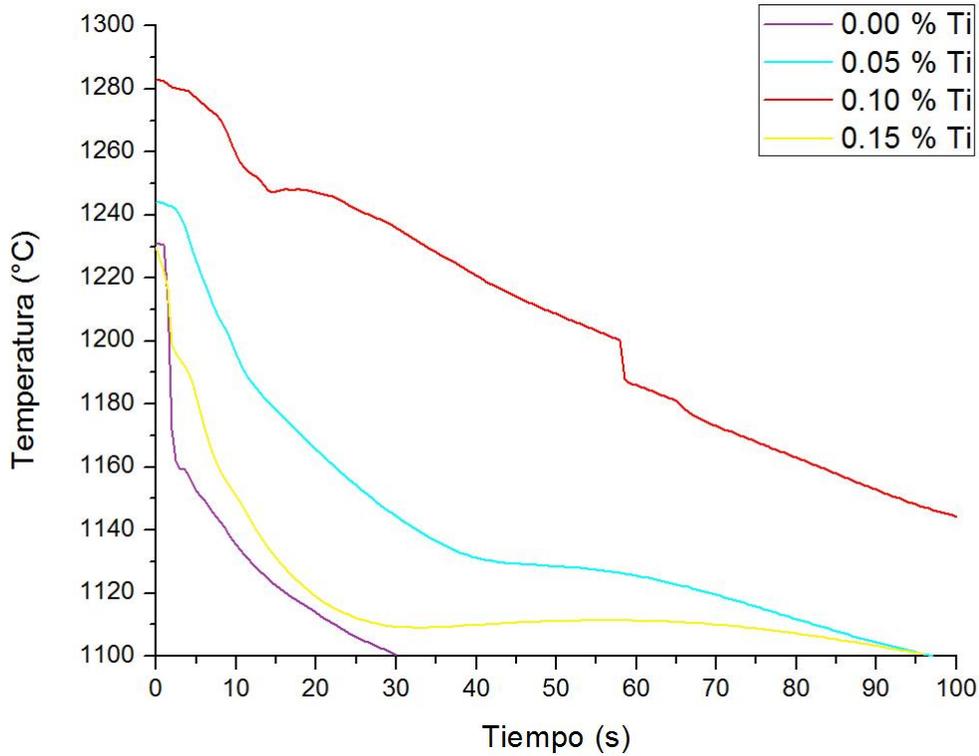
Muestras %Ti	0.0066	0.0449	0.0750	0.1538
Valor Medio	286	292	324	354
Desviación Estándar	29.81	31.99	61.29	37.47
Coefficiente de variación	10.42	10.97	18.94	10.59
Valor máximo	343	358	479	421
Valor mínimo	219	235	250	289

### 3.1.3. Curvas de enfriamiento.

Se presenta a continuación, en la **Figura 29** las cuatro curvas de enfriamiento obtenidas durante la primera fusión, ahora bien, como dato teórico tenemos el valor de 1153°C en temperatura eutéctica, basándonos en el diagrama Fe-Cg y el valor de 1147°C en el diagrama de



fases Fe-Fe<sub>3</sub>C, con estos valores, se tienen las siguientes consideraciones al mostrar las curvas de enfriamiento, analizando los datos, se toma como punto inicial, el dato más alto de temperatura que registra el termopar, y como valor mínimo, se registra la temperatura de 1100°C.



**Figura 29.** Gráfico de curvas de enfriamiento primera fusión.

Analizando los datos, obtenemos los siguientes valores de temperatura eutéctica, registrados en la **Tabla 19**.

**Tabla 19.** Valores de temperatura eutéctica, obtenidos de las curvas de enfriamiento.

%Ti	Temp Eutéctica, (°C)	Intervalo	ΔT
0.0066	1159	1159	0
0.0449	1129	1129	0
0.0750	----	----	-
0.1538	1111	1109-1111	3



### 3.1.4. Relación Mg/Ti.

Como siguiente resultado, se muestra la relación %Ti con respecto al %Mg, realizando su conversión de porcentaje a moles. Mostrándose a continuación el método para la obtención de estos valores, tomando como ejemplo los valores registrados de la muestra 1 (0.00%Ti deseado)

Ahora bien, teniendo en cuenta los porcentajes de Mg y Ti usando una base de cálculo de 100g, se obtienen los valores de 0.025g de Mg y de 0.0066g de Ti de análisis químico, mostrándose la relación Mg/Ti en peso en la ecuación (11).

$$\frac{Mg}{Ti} = \frac{0.025g Mg}{0.0066g Ti} = 3.7878 \quad (11)$$

Posteriormente usando los valores anteriores de Mg, Ti y realizando el cambio de gramos a moles, tenemos la ecuación (12).

$$\frac{Mg}{Ti} = \frac{0.025g Mg \frac{1mol Mg}{24.3050g Mg}}{0.0066g Ti \frac{1mol Ti}{47.8670g Ti}} = \frac{0.001028 mol Mg}{0.0001378 mol Ti} = 7.4599 \quad (12)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, tenemos una relación de 7.5 moles de Mg sobre 1 mol de Ti, registrando las demás relaciones en la **Tabla 20**.

<b>Tabla 20.</b> Relaciones Magnesio Titanio.						
%Ti	Primera fusión			Relaciones		
	%Mg	P.A. Mg	P.A. Ti	Peso	Molar	Mg:Ti
0.0066	0.025			3.788	7.460	7.45 1
0.0449	0.0261	24.305	47.867	0.581	1.145	1.14 1
0.075	0.0208			0.277	0.546	0.546 1
0.1538	0.1031			0.670	1.320	1.32 1



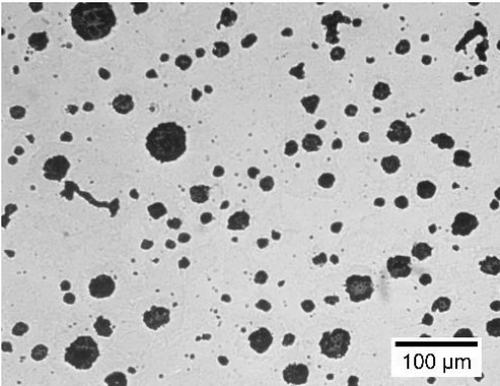
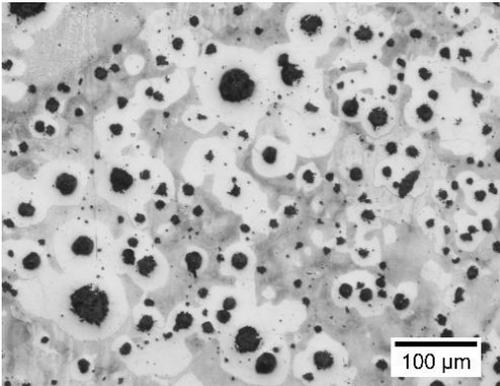
### 3.1.5. Nodularidad.

Ahora analizando las imágenes con *software*, en este caso *ImageJ*, obtenemos los siguientes valores de nodularidad, con respecto al análisis realizado sobre las metalografías presentadas en la **Tabla 21**.

<b>Tabla 21.</b> Nodularidad Primera Fusión.				
%Ti	Áreas ( $\mu\text{m}^2$ )			%Nodularidad
	Total	Esferoides	Intermedios	
0.0066	36069.24	31841.942	717.843	89.275
0.0449	29963.128	21229.16	3402.805	76.529
0.075	31931.108	2937.22	1796.837	12.012
0.1538	20620.754	8939.473	2649.824	49.776

### 3.1.6. Metalografía.

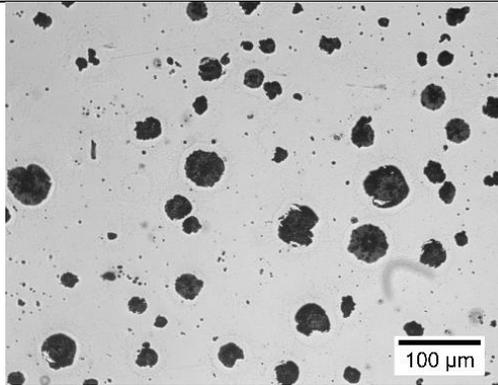
Se presentan a continuación en la **Tabla 22** las metalografías de la primera fusión.

<b>Tabla 22.</b> Metalografías de primera fusión.		
%Ti	Sin ataque	Con ataque
0.00		
	Muestra 1, sin ataque, Mg/Ti 7.46, 89.275%Nodularidad, se observan esferoides de grafito, 100X	Muestra 1, ataque nital 3, Mg/Ti 7.46, 89.275%Nodularidad matriz perlítico(zona gris)-ferrítica(zona blanca), 100X

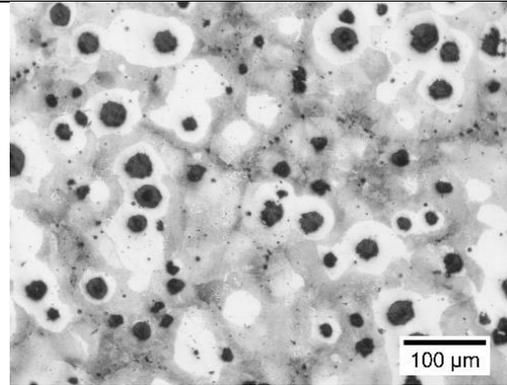


**Tabla 22.**(continuacion) metalografías de primera fusión.

0.04

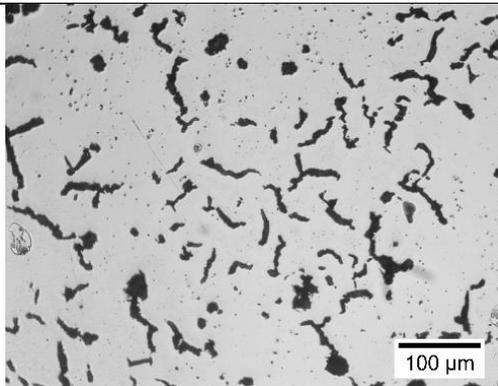


Muestra 2. sin ataque, Mg/Ti 1.145, se observan esferoides de grafito, 76.529%Nodularidad, 100X

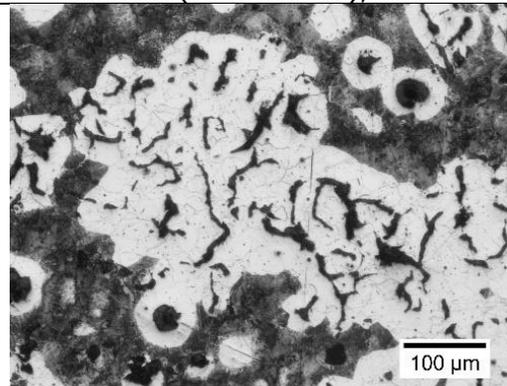


Muestra 2. Ataque nital 3, Mg/Ti 1.145, 76.529%Nodularidad, matriz perlítica(zona gris)-ferrítica(zona blanca), 100X

0.07

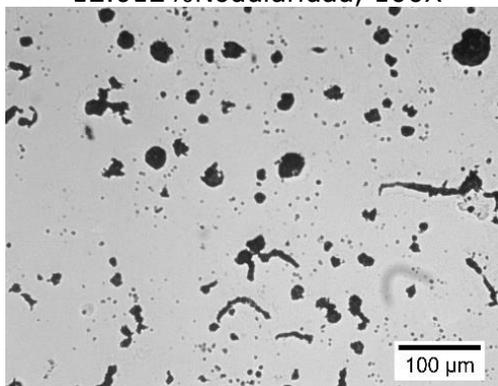


Muestra 3. sin ataque, Mg/Ti 0.546, se observa gran cantidad de vermiculos de grafito, 12.012%Nodularidad, 100X

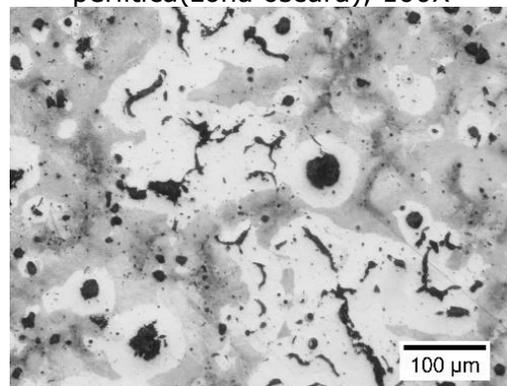


Muestra 3. Ataque nital 3, Mg/Ti 0.546, 12.012%Nodularidad, matriz ferrítica(zona gris)-perlítica(zona oscura), 100X

0.15



Muestra 4. sin ataque, Mg/Ti 1.32, se observa gran cantidad de esferoides de grafito, 49.776%Nodularidad, 100X



Muestra 4. Ataque nital 3, Mg/Ti 1.32, 49.776%Nodularidad, matriz ferrítica(zona gris)-perlítica(zona oscura), 100X



### 3.1.7. Presentación de datos.

Teniendo todo lo anterior, se puede recopilar la siguiente información, teniendo el registro en la **Tabla 23**.

**Tabla 23.** Presentación de datos obtenidos.

Muestra	%Nod	Dureza, (kg/mm <sup>2</sup> )		$\frac{Mg}{Ti}, (mol)$	T <sub>Eutética,</sub> (°C)	CE
%Ti		Brinell	Vickers			
0.0066	89.275	196.757	286	7.459	1159	4.485
0.0449	76.529	196.053	292	1.143	1129	4.056
0.075	12.012	196.144	324	0.546	----	4.519
0.1538	49.776	195.724	354	1.32	1110	4.358

### 3.2. Segunda fusión.

Como segunda parte, se tienen los siguientes resultados, dando la misma secuencia de presentación.

#### 3.2.1. Composición química.

Se presentan ahora los porcentajes de los elementos principales para la producción de un hierro vermicular, mostrados en la **Tabla 24**, de las tres muestras caracterizadas, teniendo los análisis químicos presentados de cada uno en el **Anexo II**.

**Tabla 24.** Composiciones químicas promedio de las muestras segunda fusión.

Muestra	%C	%Si	%Mn	%P	%S
1 (0.05%Ti)	3.719	2.396	0.616	0.0177	0.0150
2 (0.08%Ti)	3.437	2.514	0.612	0.0162	0.0113
3 (0.13%Ti)	3.827	2.594	0.589	0.0166	0.0111

Continuación.

Muestra	%Cu	%Ti	%Mg	%Fe	CE
1	0.3099	0.0534	0.0121	92.7	4.52
2	0.3070	0.0818	0.0140	92.8	4.28
3	0.2981	0.1180	0.0097	92.4	4.69



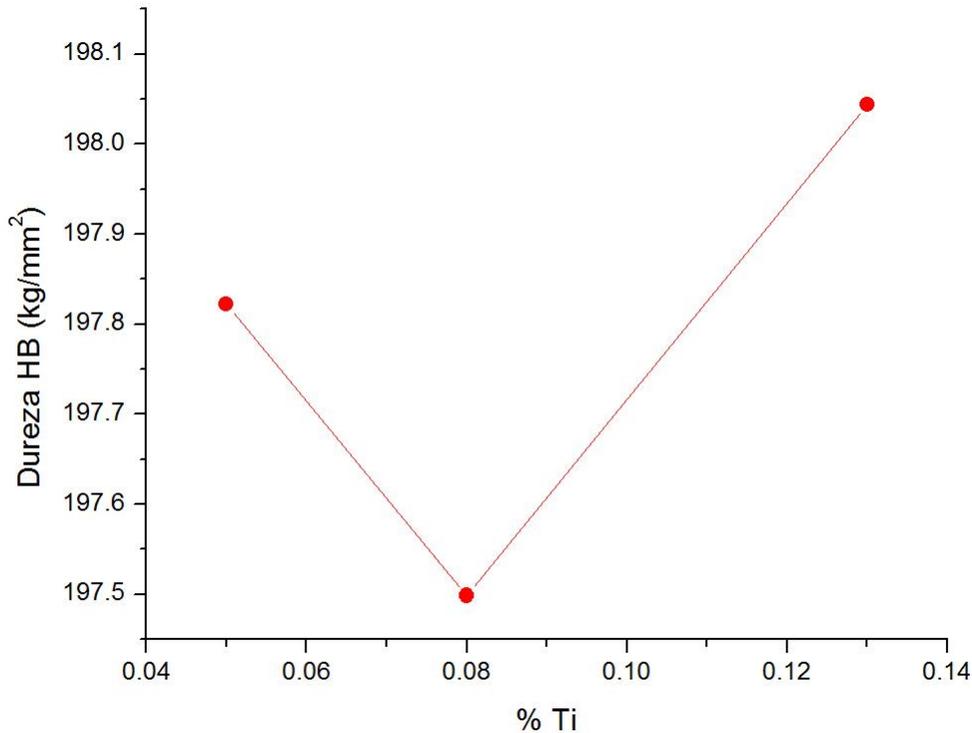
### 3.2.2. Dureza.

Se muestra en la **Tabla 25**, los valores de dureza Brinell obtenidos de la segunda fusión, usando la metodología de cálculo empleada en la medición de dureza de la sección anterior.

**Tabla 25.** Durezas de segunda fusión.

Muestra %Ti	Diámetro huella (mm)				Dureza Brinell (kg/mm <sup>2</sup> )
	Huella 1	Huella 2	Huella 3	Promedio	
0.0534	4.5	4.5	4.5	4.5	197.82
0.0818	4.4	4.4	4.4	4.4	197.49
0.1180	4.6	4.6	4.5	4.57	198.04

Como consecuente se obtiene la **Figura 30**, en donde se grafican los valores de dureza contra %Ti.



**Figura 30.** Gráfico de dureza Brinell contra %Ti.



A continuación, se muestran los valores de microdureza Vickers, resultantes de las muestras de la segunda fusión, adjuntados en la **Tabla 26.**

<b>Tabla 26.</b> Valores de dureza Vickers (kg/mm <sup>2</sup> ).			
Prueba / %Ti	0.0534	0.0818	0.118
1	229	279	278
2	251	299	289
3	267	309	297
4	273	361	298
5	283	364	299
6	288	370	303
7	305	370	306
8	310	415	311
9	315	423	317
10	329	441	319
11	331	447	328
12	341	462	338
13	354	482	339
14	367	491	351
15	382	546	399

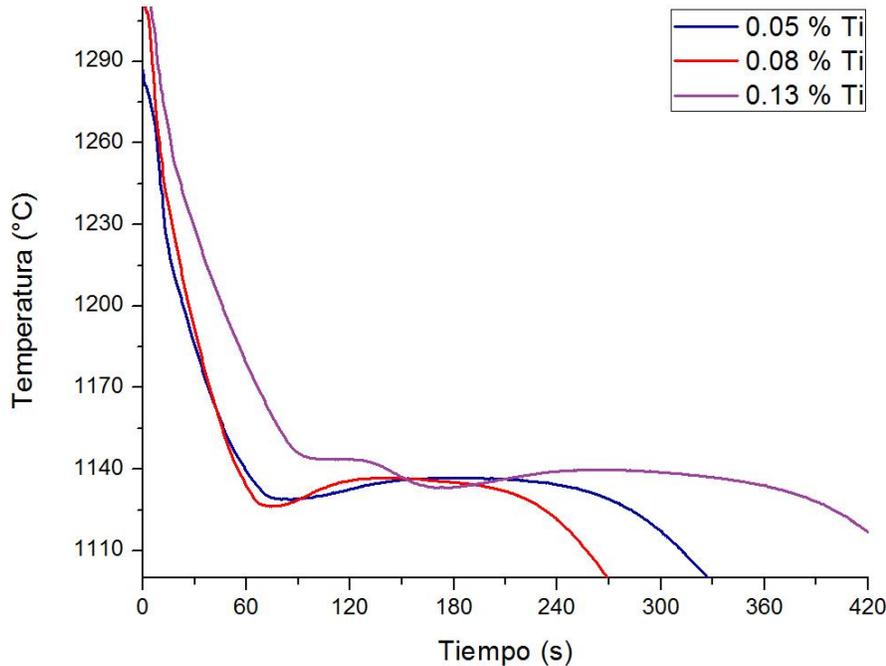
De igual manera el micro durómetro Vickers arroja inmediatamente al finalizar las 15 pruebas los siguientes valores, registrados en la **Tabla 27.**

<b>Tabla 27.</b> Valores estadísticos de microdureza, segunda fusión (kg/mm <sup>2</sup> ).			
%Ti	0.0534	0.0818	0.118
Valor Medio	308	404	318
Desviación Estándar	43.6	76.68	30.06
Coefficiente de variación	14.14	18.98	9.45
Valor máximo	382	546	399
Valor mínimo	229	279	278



### 3.2.3. Curvas de enfriamiento.

Se muestra ahora, las curvas de enfriamiento obtenidas durante el vaciado en la segunda fusión mostrándose en la **Figura 31**.



**Figura 31.** Curvas de enfriamiento registradas en la segunda fusión.

Observando los datos, se obtuvieron los siguientes valores de temperatura eutéctica, registrados en la **Tabla 28**.

**Tabla 28.** Valores de temperatura eutéctica, obtenidos de las curvas de enfriamiento.

%Ti	$T_{\text{Eutéctica}}$ , (°C)	Intervalo	$\Delta T$
0.0534	1136	1128-1136	8
0.0818	1136	1126-1136	10
0.1180	1139	1133-1139	6

### 3.2.4. Relación Mg/Ti.

La tabla siguiente muestra las relaciones Mg/Ti, procedentes de la segunda fusión, usando la misma metodología de la sección anterior, registrando los valores en la **Tabla 29**.

**Tabla 29.** Relaciones Magnesio Titanio.

%Ti	Segunda fusión			Relaciones		
	%Mg	P.A. Mg	P.A. Ti	Porcentaje	Molar	Mg:Ti
0.0534	0.0121			0.227	0.446	0.446   1
0.0818	0.014	24.305	47.867	0.171	0.337	0.337   1
0.118	0.0097			0.082	0.162	0.162   1

### 3.2.5. Nodularidad.

Ahora analizando las imágenes con *software*, en este caso *ImageJ*, obtenemos los siguientes valores de nodularidad, con respecto al análisis realizado sobre las metalografías presentadas en la **Tabla 30**.

**Tabla 30.** Nodularidad segunda fusión

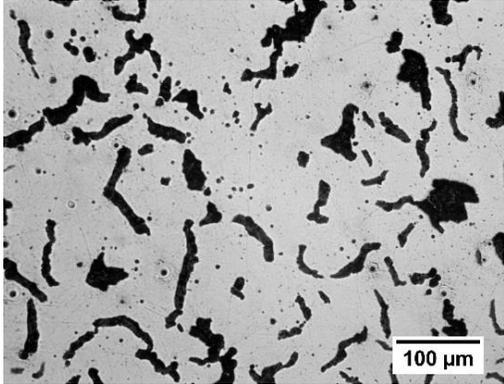
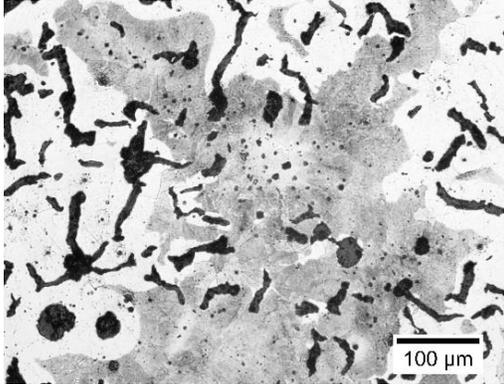
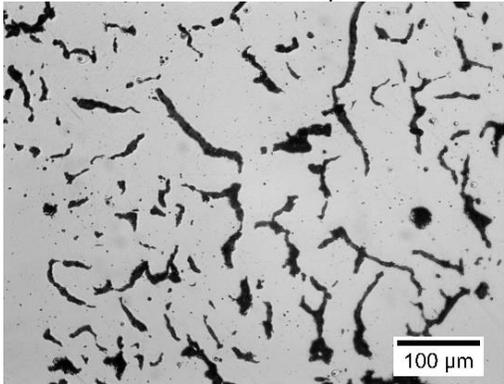
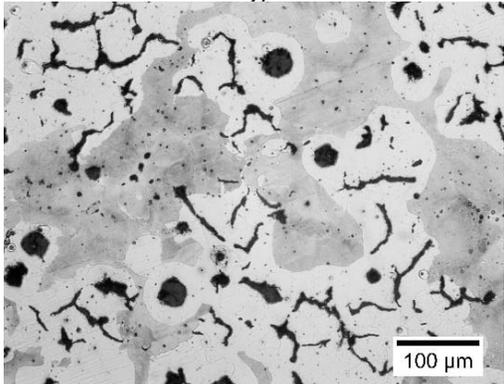
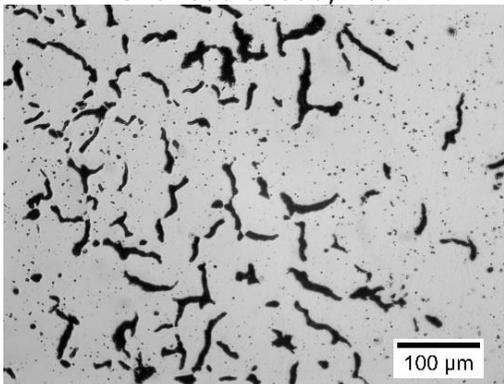
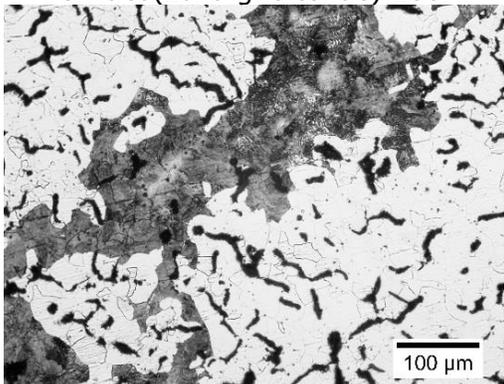
%Ti	Áreas ( $\mu\text{m}^2$ )			%Nodularidad
	Total	Esferoides	Intermedios	
0.0534	47479.227	2079.776	4602.393	9.227
0.0818	33702.959	1166.55	1019.674	4.974
0.118	30470.435	2073.939	626.808	7.834

### 3.2.6. Metalografía.

Se presentan a continuación en la **Tabla 31** las metalografías de la segunda fusión.



**Tabla 31.** Metalografías segunda fusión.

%Ti	Sin ataque	Con ataque
0.05	 <p>Muestra 1. Sin ataque, Mg/Ti 0.446, se observa gran cantidad de vermiculos de grafito, 9.2%Nodularidad, 100X</p>	 <p>Muestra 1. Ataque nital 3, 9.2%Nodularidad, matriz perlítico(zona gris)-ferrítico(zona blanca), 100X</p>
0.08	 <p>Muestra 2. Sin ataque, Mg/Ti 0.337, se observa gran cantidad de vermiculos de grafito, 4.9%Nodularidad, 100X</p>	 <p>Muestra 2. Ataque nital 3, , 4.9%Nodularidad, matriz perlítico(zona gris oscuro)-ferrítico(zona gris tenue) 100X</p>
0.11	 <p>Muestra 3. Sin ataque, Mg/Ti 0.162, se observa gran cantidad de vermiculos de grafito, 7.8%Nodularidad, 100X</p>	 <p>Muestra 3. Ataque nital 3, 7.8%Nodularidad, matriz ferrítica(zona blanca)-perlítica(zona gris), 100X</p>



### 3.2.7. Presentación de datos.

Teniendo todo lo anterior, se recopila la siguiente información, registrándose en la **Tabla 32**.

Muestras %Ti	%Nod	Dureza, (kg/mm <sup>2</sup> )		$\frac{Mg}{Ti}$ , (mol)	T <sup>Eutética</sup> , (°C)	CE
		Brinell	Vickers			
0.0534	9.227	197.82	308	0.446	1128	4.52
0.0818	4.974	197.49	404	0.337	1126	4.28
0.118	7.834	198.04	318	0.162	1133	4.69



## CAPITULO IV. ANALISIS DE RESULTADOS.

Como primer análisis, se toma la composición química, en específico el %Carbono y %Silicio, teniendo intervalos de valores en Carbono de entre 3.15 y 3.82%C y teniendo valores de Silicio de 2.39 a 2.67%Si. Tomando como referencia la **Figura 6** los valores obtenidos caen dentro del rango de los valores necesarios para obtener un hierro vermicular, sin que ocurran los defectos planteados en la teoría, teniendo como promedio de Carbono equivalente en las dos fusiones de 4.41%CE, concluyendo así que las muestras obtenidas son hipereutecticas.

Con respecto a los elementos aleantes, los niveles de Manganeso son superiores a 0.6%, al igual que los porcentajes de Cobre que oscilan en valores muy cercanos a 0.3%Cu, por lo cual se propicia que la matriz de las muestras sea perlítica, a excepción de la muestra 3, que predomina la matriz ferrítica, los niveles de Azufre y Fósforo se encuentran en general menores a 0.02%, por lo cual se cumple con la composición química esperada de un hierro dúctil grado 100-70-03.

En la primera fusión, con respecto al Magnesio, se tienen valores entre 0.02 a 0.026%Mg, que se puede decir que fue un valor esperado a excepción de la muestra 4 que contiene 0.103%Mg, este valor se eleva drásticamente a más de lo esperado, este defecto puede deberse a un gradiente de concentración de Magnesio en la olla de tratamiento o a un manejo inadecuado de la adición de metal líquido en la olla de tratamiento, vertiendo menos del necesario (10kg), dando como resultado que la nodularidad de la muestra 4 en la fusión 1, se encuentre elevada (49.776%), otro efecto del alto contenido de Magnesio es que su efecto esferoidizante se abate con el Titanio como antiesferoidizante.



Ahora con la segunda fusión, los niveles de Magnesio oscilan entre 0.009 a 0.014, valores que son menores a los esperados (0.02%Mg<sub>residual</sub>), este error se atribuye a una adición no controlada del metal líquido a la olla de tratamiento, por lo cual las muestras de la segunda fusión son totalmente vermiculares.

Los niveles de Titanio son los esperados exceptuando la muestra 3 de la primera fusión correspondiente al valor esperado de 0.10%Ti, quedando con 0.075%Ti experimentalmente, dando como resultado la relación molar Mg/Ti=0.581, dado que esta relación resultó ser la óptima de producción con las variables fijas de la primera fusión, se decidió variar un valor arriba y uno abajo del nivel óptimo registrado, quedando en los niveles registrados en la **Tabla 12**.

En la primera y segunda fusión los valores de dureza Brinell oscilan entre 195 a 198kg/mm<sup>2</sup> este valor de dureza es adecuado debido al contenido de perlita que oscila entre 50 a 80%, así mismo de acuerdo a *SinterCast* en el artículo *Compacted Graphite Iron - Material Data Sheet*, [18] la composición química que presenta las muestras y la dureza registrada, corresponde a un hierro vermicular GJV-400 de acuerdo a la norma ISO 16112

Para los resultados de microdureza Vickers de la primera y segunda fusión, el instrumento de microdureza Vickers, arroja los valores estadísticos presentados en la **Tabla 17** y en la **Tabla 26**, en los cuales se observa que conforme aumenta el nivel de %Ti, la diferencia entre los valores máximos y mínimos, se puede referir a la distancia que puede tener la indentación respecto a la fase ferrita o al mismo vermiculo, disminuyendo en manera significativa los valores de microdureza Vickers.



Las curvas de enfriamiento reportadas en la **Figura 29** no muestran un comportamiento esperado, a lo teórico en un hierro vermicular, es decir, no presentan subenfriamiento tan marcado como lo muestra la **Figura 31**, que muestra el subenfriamiento esperado teórico, obteniendo en esta última muestras completamente vermiculares, ahora bien con los datos registrados en la **Tabla 19**, muestra que la temperatura eutéctica disminuye conforme aumenta los porcentajes de Titanio, exceptuando el nivel 0.075%Ti, por lo cual se infiere en primera instancia que los datos y curva de enfriamiento de este nivel son poco confiables, ahora bien en la **Tabla 28** se obtiene que la temperatura eutéctica se abate de manera significativa con los niveles de Titanio empleados, dando pie a que se obtiene de manera óptima la producción de un hierro vermicular.

La **Tabla 22** corresponde a las metalografías de la fusión 1, la muestra 1, corresponde a una muestra totalmente nodular, su nodularidad corresponde a 89.275% totalmente esperada debido a que no se adiciona Titanio en el horno, teniendo una relación Mg/Ti de 7.46 la muestra 2 presenta una nodularidad de 76.529%, el nivel de Titanio de 0.044% aun no alcanza a modificar completamente la morfología de los esferoides, quedando con una relación molar Mg/Ti de 1.145, la muestra 3 presenta una nodularidad de 12.012%, una muestra totalmente vermicular, el nivel de Titanio de 0.075% modifica de manera adecuada la morfología de los esferoides dando paso a vermiculos, quedando una relación de Mg/Ti de 0.546, mientras que la muestra 4, tiene nodularidad de 49.776%, algo que es más cercano a ser hierro dúctil, teniendo su relación Mg/Ti de 1.32, por lo que en primera instancia se observó que la relaciones ideales de Mg/Ti, tiene que ser menor a 1.145 para obtener hierro vermicular.

Con respecto a la **Tabla 31**, correspondiente a la segunda fusión, se tiene que en la muestra 1 se obtiene un hierro vermicular, la nodularidad que



presenta de 9.227% muestra una relación molar de Mg/Ti de 0.337, se observa en gran cantidad partículas vermiculares, algunas presentan morfología intermedia de acuerdo a la norma ISO 16112, la muestra 2 registra una nodularidad de 4.974%, teniendo de manera certera un hierro vermicular, se observan partículas que pueden ser considerados esferoides, se tendría que realizarse otro estudio para determinar si estas partículas son esferoides o vermiculos, su relación Mg/Ti de 0.446 es muy cercana a la de la primera fusión, la muestra 3 tienen una nodularidad de 7.834%, de igual manera que la muestra 1, la muestra 3 tiene partículas que de acuerdo a la norma son intermedias, la relación Mg/Ti de 0.162 no está muy alejada de las adecuadas de la primera y segunda fusión (0.546 y 0.337 respectivamente).

Analizando los valores de nodularidad respecto a la relación Mg/Ti, se tiene un intervalo de obtención de hierro vermicular entre 0.162 a 0.546, las relaciones superiores cercanas a esta relación dan como resultado "hierros intermedios", como lo es la muestra 2 de la primera fusión (Mg/Ti=1.14), en donde no se observan esferoides si no partículas intermedias, este efecto se puede atribuir a que el Titanio aun no es suficiente para modificar la tensión superficial de todos los esferoides de Carbono.

Por lo que para asegurar la obtención de hierro vermicular se establecería un rango de composición química Mg y Ti, quedando de 0.012 a 0.02%Mg con 0.0534 a 0.118%Ti, quedando las relaciones molares Mg/Ti de 0.162 a 0.546



## **CAPITULO V. CONCLUSIONES**

- Para la obtención de un hierro vermicular se requiere un rango de composición química Mg y Ti, para Magnesio de 0.012 a 0.02% y para Titanio de 0.0534 a 0.118%Ti
- Las relaciones molares Mg/Ti para la obtención del CGI son de 0.162 a 0.546



- [1] ASM(1992) Metals Handbook, *Casting*, 9º ed., vol. 15, USA: ASM International, 1992.
- [2] SinterCast, «Process Control for the Reliable High Volume Production of Compacted Graphite iron,» 2014. [En línea]. Available: <http://sintercast.com/>. [Último acceso: 14 Junio 2017].
- [3] ASTM(1998) A 247, «Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings,» ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1998.
- [4] ASM(1990) Metals Handbook, *Properties and selection: Irons, Steels and High Performance Alloys*, 10º ed., vol. 1, USA: ASM International, 1990.
- [5] ASTM(2003) A-48, «Standard Specification for Gray Iron Castings,» ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2003.
- [6] ISO 185:2008, «Gray Cast Iron - Classification,» Suiza, 2008.
- [7] ASTM(1999) A 536, «Standard Specification for Ductile Iron Castings,» ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1999.
- [8] ISO 1083:2015, «Spheroidal graphite cast irons - Classification,» Suiza, 2015.
- [9] ASTM(2003) A 842, «Standard Specification for Compacted Graphite Iron Castings,» ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2004.



- [10] ISO 16112:2006, «Compacted (vermicular) graphite cast irons - Classification,» Suiza, 2006.
- [11] S. I. Karsay, DUCTILE IRON production practices, United States of America: American Foundrymen's Society, 1975.
- [12] M. Górny , M. Kawalec, «Role of Titanium in Thin Wall Vermicular,» *Archives of Foundry Engineering*, vol. 13, pp. 25-28, 06 05 2013.
- [13] Elkem Foundry Products, «Cast Iron Inoculation, The Technology of Graphite Shape Control,» Abril 2012. [En línea]. Available: [www.foundry.elkem.com](http://www.foundry.elkem.com). [Último acceso: 27 Septiembre 2017].
- [14] Yih-Hsun Shy, Cheng-Hsun Hsu, Shen-Chih Lee, Chih-Yuan Hou, «Effects of titanium addition and section size on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron,» Agosto 1999. [En línea]. Available: <http://www.elsevier.com>. [Último acceso: 21 Agosto 2017].
- [15] Moumeni, E., Hattel, J. H., Tiedje, N. S., & Horsewell, A., «Solidification of cast iron - A study on the effect,» Kgs. Lyngby, Technical University of Denmark., 2013.
- [16] Hasse Fredriksson, Mats H. Hillert, «The Physical Metallurgy of Cast Iron: Proceedings of the Third International Symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron,» Stockholm, Sweden, North-Holland, 1984, p. 552.
- [17] Mariusz Holtzer, Marcin Górny, Rafal Danko, Microstructure and Properties of Ductile Iron and Compacted Graphite Iron Castings.



The Effects of Mold Sand/Metal Interface Phenomena, Polonia:  
Springer International Publishing AG Switzerland, 2015.

[18] SinterCast, «Compacted Graphite Iron - Material Data Sheet,» [En línea]. Available: <http://www.sintercast.com>. [Último acceso: 23 Octubre 2017].



## **Anexo I. Balance general.**

Como premisa de las materias primas utilizadas, se tienen los análisis químicos de las chatarras, tanto de acero como de hierro, se buscó utilizar en mayor parte chatarra de hierro, que de acero, debido al bajo punto de fusión del hierro, así como la solubilidad que presenta el acero en el hierro, la fusión 1 empleo 60% de hierro gris como chatarra así como 40% de acero bajo Carbono, esto para una carga de 95kg, mientras que para la fusión 2 se emplearon 80%de chatarra de la primera colada y un 20% de chatarra de acero, durante el procedimiento de fusión, se realizaron simultáneamente el precalentado a la olla de tratamiento.

### Balance primera fusión.

Los datos empleados para esta parte, se presentan a continuación.

- Hierro colado: 57kg (60%)
- Acero: 38kg (40%)
- Materia prima de ajuste:
  - Recarburante: 99.8%C (n=96%)
  - FeSi: 75%Si (n=99%)
  - FeMn: 73% (n=98%)



**Tabla 33.** Composiciones químicas chatarras y metal base.

	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Ti	%Cu
Hierro	2.8	1.5	0.47	0.018	0.017	0.005	0.19
Acero	0.07	0.03	0.27	0.008	0.01	0.016	0
100-70-03	4.2	2.45	0.6	0.015	0.05	0.05	0.35

Cantidades aportadas por chatarras.

Hierro colado 57kg (60%)

$$C = (57kg) \left( \frac{2.8\%C}{100\%Metal} \right) = 1.596kg \quad P = (57kg) \left( \frac{0.017\%P}{100\%Metal} \right) = 0.00969kg$$

$$Si = (57kg) \left( \frac{1.5\%Si}{100\%Metal} \right) = 0.855kg \quad Ti = (57kg) \left( \frac{0.005\%Ti}{100\%Metal} \right) = 0.00285kg$$

$$Mn = (57kg) \left( \frac{0.47\%Mn}{100\%Metal} \right) = 0.2679kg \quad Cu = (57kg) \left( \frac{0.19\%Cu}{100\%Metal} \right) = 0.1083kg$$

$$S = (57kg) \left( \frac{0.018\%S}{100\%Metal} \right) = 0.01026kg$$

Acero 38kg (40%)

$$C = (38kg) \left( \frac{0.07\%C}{100\%Metal} \right) = 0.0266kg \quad P = (38kg) \left( \frac{0.0038\%P}{100\%Metal} \right) = 0.0038kg$$

$$Si = (38kg) \left( \frac{0.03\%Si}{100\%Metal} \right) = 0.0114kg \quad Ti = (38kg) \left( \frac{0.016\%Ti}{100\%Metal} \right) = 0.00608kg$$

$$Mn = (38kg) \left( \frac{0.27\%Mn}{100\%Metal} \right) = 0.1026kg \quad S = (38kg) \left( \frac{0.008\%S}{100\%Metal} \right) = 0.00304kg$$

Carga total = kg hierro + kg acero = 57kg + 38kg = 95kg



Cantidades aportadas (kg) de cada elemento.

$$C = (95kg) \frac{\left(\frac{4.2\%}{100\%}\right)}{\left(\frac{94\%}{100\%}\right)} = 4.2447kg \quad P = (95kg) \frac{\left(\frac{0.05\%}{100\%}\right)}{\left(\frac{100\%}{100\%}\right)} = 0.0475kg$$

$$Si_{Horno} = (95kg) \frac{\left(\frac{2.45\%}{100\%} - \frac{0.318\%Nod}{100\%} - \frac{0.10\%Inoc}{100\%}\right)}{\left(\frac{94\%}{100\%}\right)} = 2.0108kg$$

$$Mn = (95kg) \frac{\left(\frac{0.6\%}{100\%}\right)}{\left(\frac{98\%}{100\%}\right)} = 0.5816kg \quad Cu = (95kg) \frac{\left(\frac{0.35\%}{100\%}\right)}{\left(\frac{98.5\%}{100\%}\right)} = 0.3376kg$$

Balance para cada elemento.

Para este balance se usará la siguiente ecuación de manera general, para calcular las cantidades necesarias y requeridas por elemento.

$$Cantidad\ requerida = Aporte\ hierro + Aporte\ acero + Necesario$$

Carbono

$$4.2447 = 1.596 + 0.0266$$

$$4.2447 > 1.6226$$

$$4.2447 - 1.6226 = 2.6221kg\ recarburante$$

$$Rec = \frac{2.6221kg}{(99.8\%)} = 2.6273kg\ se\ adicionaron\ en\ el\ horno$$

Silicio

$$2.0108 = 0.855 + 0.0114$$

$$2.0108 > 0.8664$$

$$2.0108 - 0.8664 = 1.144kg\ FeSi$$

$$FeSi = \frac{1.144}{(75\%)} = 1.5253kg\ FeSi\ se\ adicionaron\ en\ el\ horno$$



## Manganeso



$$0.5816 = 0.2679 + 0.1026$$

$$0.5816 > 0.3705$$

$$0.5816 - 0.3705 = 0.211kg \text{ FeMn}$$

$$\text{FeMn} = \frac{0.211kg}{(73\%)} = 0.289kg \text{ FeMn se adicionaron en el horno}$$

## Azufre

$$0.01425 = 0.01026 + 0.00304$$

$$0.01425 > 0.0133 \text{ Esta dentro de composición química}$$

## Fósforo

$$0.0475 = 0.00969 + 0.0038$$

$$0.0475 > 0.01349 \text{ Esta dentro de composición química}$$

Balance segunda fusión.

Los datos empleados para esta parte, se presentan a continuación.

- Hierro colado: 42kg (70%)
- Acero: 18kg (30%)
- Materia prima de ajuste:
  - Recarburante: 99.8%C (n=96%)
  - FeSi: 75%Si (n=99%)
  - FeMn: 73% (n=98%)

**Tabla 34.** Composiciones químicas chatarras y metal base.

	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Ti	%Cu
Hierro	3.5	2.55	0.62	0.018	0.017	0.07	0.3
Acero	0.07	0.03	0.27	0.008	0.01	0.016	0
100-70-03	4.2	2.45	0.6	0.015	0.05	0.05	0.35

Cantidades aportadas por chatarras.

Hierro colado 42kg (70%)

$$C = (42kg) \left( \frac{3.5\%C}{100\%Metal} \right) = 1.47kg \quad P = (42kg) \left( \frac{0.017\%P}{100\%Metal} \right) = 0.00714kg$$

$$Si = (42kg) \left( \frac{2.55\%Si}{100\%Metal} \right) = 1.071kg \quad Ti = (42kg) \left( \frac{0.07\%Ti}{100\%Metal} \right) = 0.0294kg$$

$$Mn = (42kg) \left( \frac{0.62\%Mn}{100\%Metal} \right) = 0.2604kg \quad Cu = (42kg) \left( \frac{0.3\%Cu}{100\%Metal} \right) = 0.126kg$$

$$S = (42kg) \left( \frac{0.018\%S}{100\%Metal} \right) = 0.00756kg$$

Acero 18kg (30%)

$$C = (18kg) \left( \frac{0.07\%C}{100\%Metal} \right) = 0.016kg \quad P = (18kg) \left( \frac{0.0038\%P}{100\%Metal} \right) = 0.000684kg$$

$$Si = (18kg) \left( \frac{0.03\%Si}{100\%Metal} \right) = 0.0054kg \quad Ti = (18kg) \left( \frac{0.016\%Ti}{100\%Metal} \right) = 0.00288kg$$

$$Mn = (18kg) \left( \frac{0.27\%Mn}{100\%Metal} \right) = 0.0486kg \quad S = (18kg) \left( \frac{0.008\%S}{100\%Metal} \right) = 0.00144kg$$

Carga total = kg hierro + kg acero = 42kg + 18kg = 60kg



Cantidades aportadas (kg) de cada elemento.

$$C = (60kg) \frac{\left(\frac{4.2\%}{100\%}\right)}{\left(\frac{94\%}{100\%}\right)} = 2.6808kg \quad P = (60kg) \frac{\left(\frac{0.05\%}{100\%}\right)}{\left(\frac{100\%}{100\%}\right)} = 0.03kg$$

$$Si_{Horno} = (60kg) \frac{\left(\frac{2.45\%}{100\%} - \frac{0.318\%Nod}{100\%} - \frac{0.10\%Inoc}{100\%}\right)}{\left(\frac{94\%}{100\%}\right)} = 1.297kg$$

$$Mn = (60kg) \frac{\left(\frac{0.6\%}{100\%}\right)}{\left(\frac{98\%}{100\%}\right)} = 0.3673kg \quad Cu = (60kg) \frac{\left(\frac{0.35\%}{100\%}\right)}{\left(\frac{98.5\%}{100\%}\right)} = 0.2131kg$$

Balance para cada elemento.

Para este balance se usará la siguiente ecuación de manera general, para calcular las cantidades necesarias y requeridas por elemento.

$$Cantidad\ requerida = Aporte\ hierro + Aporte\ acero + Necesario$$

Carbono

$$2.6808 = 1.47 + 0.016$$

$$2.6808 > 1.486$$

$$2.6808 - 1.486 = 1.1946kg \text{ recarburante}$$

$$Rec = \frac{1.1946kg}{(99.8\%)} = 1.1969kg \text{ se adicionaron en el horno}$$

Silicio

$$1.297 = 1.071 + 0.0054$$

$$1.297 > 1.0764$$

$$1.297 - 0.8664 = 0.2206kg \text{ FeSi}$$

$$FeSi = \frac{0.2206}{(75\%)} = 0.2941kg \text{ FeSi se adicionaron en el horno}$$



## Manganeso



$$0.3673 = 0.2604 + 0.0486$$

$$0.3673 > 0.309$$

$$0.3673 - 0.3705 = 0.0583 \text{ kg FeMn}$$

$$\text{FeMn} = \frac{0.0583 \text{ kg}}{(73\%)} = 0.0798 \text{ kg FeMn se adicionaron en el horno}$$

## Azufre

$$0.01425 = 0.1026 + 0.00304$$

$$0.01425 > 0.0133 \text{ Esta dentro de composición química}$$

## Fósforo

$$0.0475 = 0.00969 + 0.0038$$

$$0.0475 > 0.01349 \text{ Esta dentro de composición química}$$

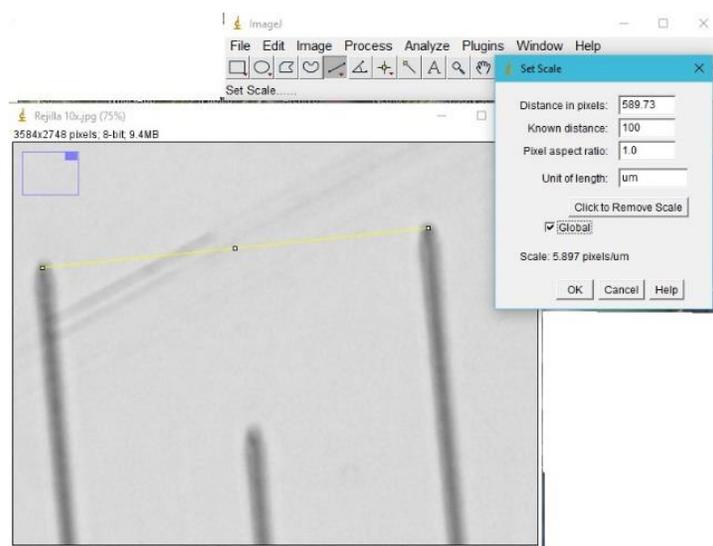


## Anexo II. Determinación de nodularidad.

Para la determinación de %Nodularidad, se empleó el *software ImageJ* de licencia libre, el proceso consiste en tener las micrografías de las muestras, sin ataque, consistiendo en los siguientes pasos.

- Calibración de *software*.
- Cargar y hacer binaria (dos tonos, blanco y negro) la micrografía a analizar.
- Seleccionar datos a presentar.
- Uso de analizador de partículas, para analizar áreas de Carbono grafito precipitado.

Calibración de *Software*: Para la calibración se usa micrografía de una reglilla calibrada de 1mm, de esta se usa la sección de longitud de 0.1mm equivalente a 100 $\mu$ m, usando en la sección "Analyze" y presionando en "Set Scale" arroja la ventana "Set Scale" en donde muestra las relaciones y unidades que se emplean en el proceso, ahora se calibro la relación pixeles - distancia conocida, y aplicando la modificación de manera global, como se marca en la casilla de "set scale" (**Figura 32**).



**Figura 32.** Set scale



Cargar y hacer binaria (dos tonos, blanco y negro) micrografía a analizar: Abriendo la micrografía, se utilizó la opción de "Process" seleccionando "Binary" y finalizando con "Make binary", esto hace que la imagen quede en dos tonos, el fondo blanco y los nódulos y vermiculos se encuentren en un color sólido para que el software realice el análisis de partículas, (Figura 33).

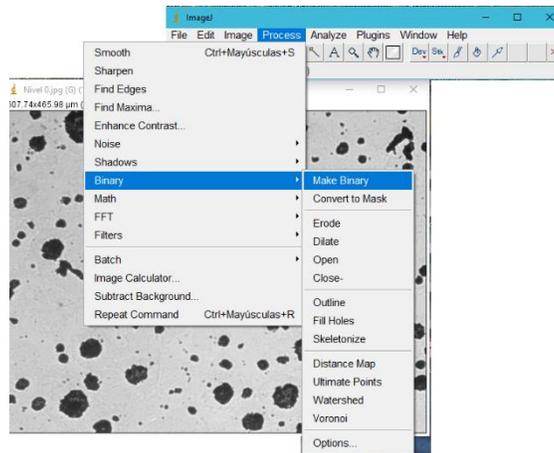


Figura 33. Imagen binaria.

Seleccionar datos a presentar: En la sección "Analyze" se encuentra la opción "Set measurements" la cual despliega una gama de opciones, que la de interés será área, seleccionándola en la ventana y guardando los ajustes (Figura 34).

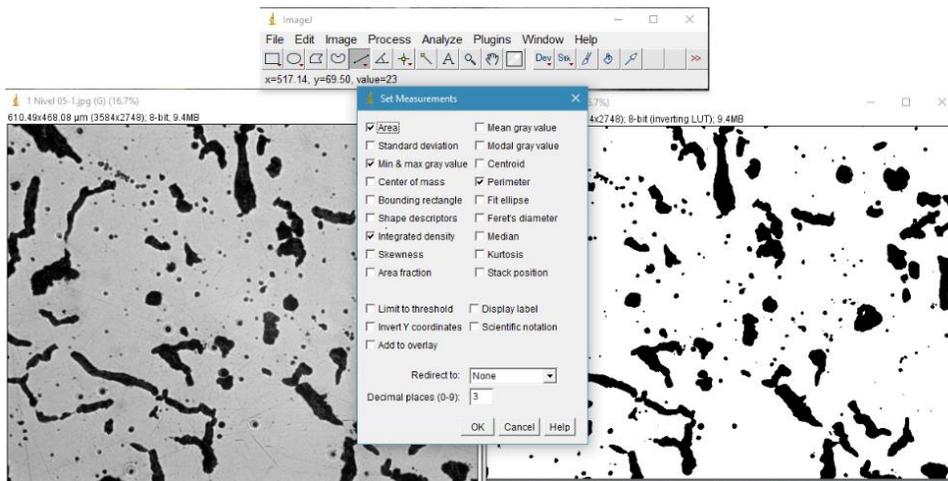
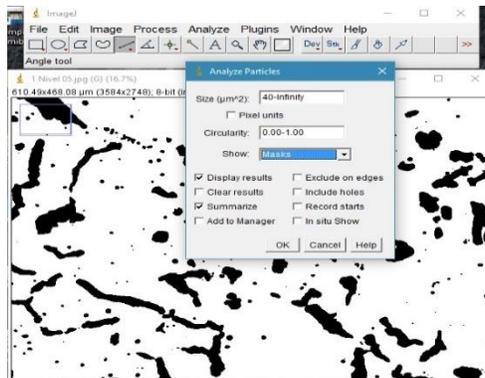


Figura 34. Selección de parámetros a analizar.

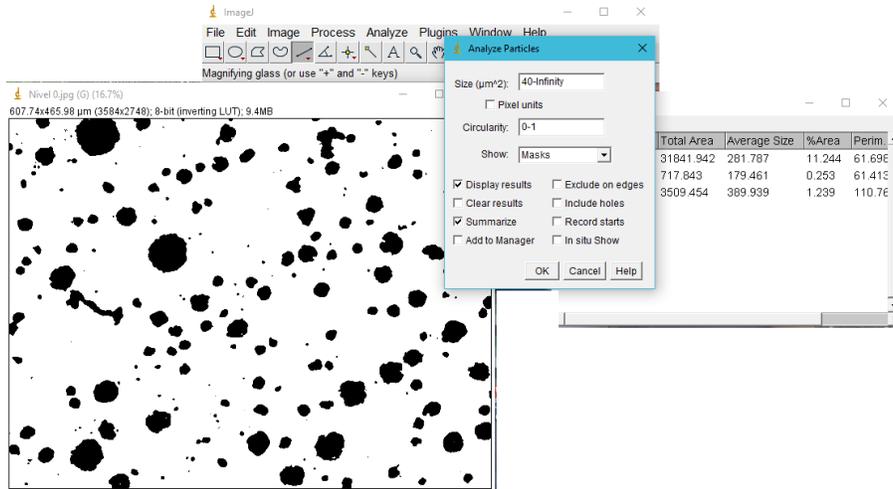


Uso de analizador de partículas: Se usa únicamente la imagen binaria de la micrografía, usando la opción "Analyze" y seleccionando "Analyze particles", desplegando una ventana en donde muestra "Size", ingresando 40-infinity, esto quiere decir que las partículas menores a 40 $\mu\text{m}^2$  serán excluidas, este criterio se tomó debido a que hay partículas demasiado pequeñas, las cuales interfieren en la medición de la nodularidad, alterando significativamente las mediciones (ISO 16112), en donde determina el tamaño sobre el cual recae los nódulos de tamaño 8, excluyendo partículas iguales o inferiores a este tamaño, (**Figura 35**).



**Figura 35.** Analizando circularidad de las partículas totales.

Con el paso anterior se analizan todas las partículas, al analizar despliega dos conjuntos de datos: *Summary* y *Results*, los datos a tomar serán los de *Summary*, cerrando sin guardar *Results*, se harán 3 análisis de circularidad, como lo dice la norma ISO, en la sección de *Circularity* se usarán de 0.00-1.00; 0.62-1.00; 0.52-0.62. La sección *Summary* conservará los datos de área contabilizada de los 3 análisis (**Figura 36**), y con la ecuación (2), se determinará el %Nodularidad.



**Figura 36.** Datos de áreas de las tres circularidades a analizar.

Por ejemplo, se utiliza la ecuación (2) y se toman los datos de la **Tabla 30** considerando los valores del nivel 0.08%Ti esperado.

$$\%Nodularidad = \frac{1166.55 + 0.5(1019.674)}{33702.959} * 100 = 4.974\%$$



## Anexo III. Análisis químicos de primera y segunda fusión. ANALISIS QUIMICOS, MUESTRAS DE PRIMERA FUSIÓN

Program: FE-22

03/11/2017 12:45:16 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS

Single spark(s)

Elements: Concentration

Muestra No: CQFINAL (Bco Sin Ti)

Quality:

Usuario: asignatura proyecto

Analista: Agustin G Ruiz Tamayo

Comentario:

No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3.645	2.491	0.609	0.0195	0.0179	0.1324	0.0531	0.0362	<0.0050
2	3.678	2.438	0.608	0.0207	0.0179	0.1322	0.0521	0.0353	0.0051
3	3.640	2.487	0.612	0.0200	0.0156	0.1331	0.0527	0.0372	<0.0050

No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0057	0.3020	0.0074	0.0067	0.0141	0.0052	0.0253	92.6
2	<0.0050	0.3025	0.0074	0.0066	0.0142	0.0053	0.0260	92.6
3	0.0059	0.3042	0.0077	0.0065	0.0143	0.0052	0.0237	92.6

Program: FE-22

03/11/2017 12:45:16 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS

Average and RSD (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No: CQFINAL (Bco Sin Ti)

Quality:

Usuario: asignatura proyecto

Analista: Agustin G Ruiz Tamayo

Comentario:

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	3.654	2.472	0.610	0.0201	0.0171	0.1326	0.0526	0.0362	<0.0050
$s$	0.0204	0.0295	0.0023	0.0006	0.0013	0.0005	0.0005	0.0010	0.0006
$sr$	0.558	1.193	0.383	2.834	7.662	0.383	0.915	2.680	12.277

	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.0054	0.3029	0.0075	0.0066	0.0142	0.0052	0.0250	92.6
$s$	0.0006	0.0011	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0012	0.0117
$sr$	10.990	0.378	2.433	1.049	0.583	1.224	4.832	0.013

Figura 37. Análisis químico muestra 1 (0.00%Ti)



Program: FE-22

03/11/2017 01:02:42 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS

Single spark(s)

Elements: Concentration

Muestra No: CQFINAL (0.05% Ti)

Quality:

Usuario: Asignatura Proyecto

Analista: Agustin G Ruiz Tamayo

Comentario:

No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3.015	2.698	0.634	0.0174	0.0160	0.1393	0.0563	0.0382	<0.0050
2	3.268	2.707	0.621	0.0202	0.0183	0.1362	0.0558	0.0379	<0.0050
3	3.193	2.618	0.623	0.0175	0.0137	0.1353	0.0536	0.0350	<0.0050

No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0068	0.3059	0.0083	0.0464	0.0160	0.0040	0.0271	93.0
2	0.0066	0.3079	0.0078	0.0453	0.0159	0.0040	0.0272	92.7
3	0.0053	0.3025	0.0070	0.0430	0.0150	0.0037	0.0240	92.9

Program: FE-22

03/11/2017 01:02:42 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS

Average and RSD (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No: CQFINAL (0.05% Ti)

Quality:

Usuario: Asignatura Proyecto

Analista: Agustin G Ruiz Tamayo

Comentario:

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	3.159	2.674	0.626	0.0184	0.0160	0.1370	0.0552	0.0370	<0.0050
<i>s</i>	0.1296	0.0488	0.0069	0.0015	0.0023	0.0021	0.0015	0.0018	0.0003
<i>sr</i>	4.102	1.825	1.104	8.377	14.269	1.509	2.651	4.811	6.190

	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.0062	0.3054	0.0077	0.0449	0.0157	0.0039	0.0261	92.9
<i>s</i>	0.0008	0.0027	0.0007	0.0018	0.0005	0.0001	0.0019	0.1301
<i>sr</i>	12.893	0.895	8.666	3.949	3.351	3.331	7.137	0.140

Figura 38. Análisis químico muestra 2 (0.05%Ti)



Program: FE-22  
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS  
 Single spark(s)

03/11/2017 01:30:32 PM

Elements: Concentration

Muestra No: CQFINAL (0.1%Ti)  
 Usuario: Asignatura Proyecto  
 Comentario:

Quality:  
 Analista: Agustín G Ruiz tamayo

No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3.683	2.526	0.622	0.0206	0.0181	0.1349	0.0552	0.0375	<0.0050
2	3.642	2.525	0.628	0.0202	0.0202	0.1367	0.0552	0.0387	<0.0050
3	3.696	2.487	0.632	0.0219	0.0194	0.1353	0.0543	0.0371	<0.0050

No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0055	0.3172	0.0078	0.0758	0.0171	0.0037	0.0187	92.5
2	0.0061	0.3163	0.0083	0.0742	0.0163	0.0035	0.0197	92.5
3	0.0053	0.3143	0.0076	0.0751	0.0164	0.0037	0.0241	92.5

Program: FE-22  
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS  
 Average and RSD (n=3)

03/11/2017 01:30:32 PM

Elements: Concentration

Muestra No: CQFINAL (0.1%Ti)  
 Usuario: Asignatura Proyecto  
 Comentario:

Quality:  
 Analista: Agustín G Ruiz tamayo

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	3.674	2.513	0.628	0.0209	0.0192	0.1356	0.0549	0.0378	<0.0050
s	0.0282	0.0224	0.0048	0.0009	0.0010	0.0009	0.0005	0.0008	0.0002
sr	0.766	0.890	0.762	4.149	5.423	0.685	0.905	2.203	4.468

	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.0056	0.3159	0.0079	0.0750	0.0166	0.0036	0.0208	92.5
s	0.0004	0.0015	0.0003	0.0008	0.0004	0.0001	0.0029	0.0169
sr	7.769	0.472	4.279	1.054	2.391	3.224	13.696	0.018

Figura 39. Análisis químico muestra 3 (0.10%Ti)



Program: FE-22  
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS  
 Single spark(s)

03/11/2017 03:20:24 PM

Elements: Concentration

Muestra No: CQFINAL Carabarín (0.15% Ti)  
 Usuario: Asignatura de proyecto  
 Comentario:

Quality:  
 Analista: Agustín G Ruiz Tomayo

No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3.321	2.650	0.612	0.0196	0.0296	0.1418	0.0578	0.0363	<0.0050
2	3.264	2.705	0.570	0.0185	0.1041	0.1322	0.0587	0.0304	<0.0050
3	3.515	2.574	0.614	0.0256	0.0422	0.1421	0.0598	0.0358	<0.0050
4	3.833	2.490	0.621	0.0208	0.0862	0.1471	0.0618	0.0363	<0.0050

No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0057	0.3046	0.0068	0.1408	0.0198	0.0025	0.0682	92.6
2	0.0060	0.2577	0.0068	-0.1592	0.0254	0.0022	0.0906	92.6
3	<0.0050	0.3088	0.0072	-0.1572	0.0221	0.0013	0.0946	92.4
4	<0.0050	0.2960	0.0075	-0.1579	0.0220	0.0020	>0.1440	92.1

Program: FE-22  
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS  
 Average and RSD (n=4)

03/11/2017 03:20:24 PM

Elements: Concentration

Muestra No: CQFINAL Carabarín (0.15% Ti)  
 Usuario: Asignatura de proyecto  
 Comentario:

Quality:  
 Analista: Agustín G Ruiz Tomayo

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	3.483	2.605	0.604	0.0211	0.0655	0.1408	0.0595	0.0347	<0.0050
s	0.2566	0.0933	0.0230	0.0031	0.0354	0.0062	0.0017	0.0029	0.0007
sr	7.366	3.582	3.801	14.742	53.959	4.410	2.857	8.376	13.443

	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.0052	0.2918	0.0071	-0.1538	0.0223	0.0020	0.1031	92.4
s	0.0008	0.0233	0.0003	0.0087	0.0023	0.0005	0.0390	0.2468
sr	15.521	7.987	4.698	5.667	10.342	25.847	37.833	0.267

Figura 40. Análisis químico muestra 4 (0.15%Ti)



## ANÁLISIS QUÍMICO, MUESTRAS DE SEGUNDA FUSIÓN

Program: FE-22										08/17/2017 01:26:30 PM
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS										
Single spark(s)										Elements: Concentration
Muestra No: CQF C1 (0.05%Ti, inoc 0.15%)					Quality:					
Usuario: Tesis Licenciatura					Analista: M en I Agustin G Ruiz Tamayo					
Comentario:										
No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
1	3.671	2.413	0.621	0.0155	0.0134	0.0766	<0.0500	0.0309	0.0068	
2	3.759	2.334	0.609	0.0193	0.0157	0.0753	<0.0500	0.0292	0.0052	
3	3.728	2.440	0.618	0.0185	0.0160	0.0768	<0.0500	0.0343	<0.0050	
No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe		
	%	%	%	%	%	%	%	%		
1	<0.0050	0.3018	0.0098	0.0545	0.0117	0.0032	0.0127	92.7		
2	<0.0050	0.3097	0.0097	0.0525	0.0111	0.0029	0.0118	92.7		
3	<0.0050	0.3182	0.0104	0.0531	0.0116	0.0037	0.0116	92.6		
Program: FE-22										08/17/2017 01:26:30 PM
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS										
Average and RSD (n=3)										Elements: Concentration
Muestra No: CQF C1 (0.05%Ti, inoc 0.15%)					Quality:					
Usuario: Tesis Licenciatura					Analista: M en I Agustin G Ruiz Tamayo					
Comentario:										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
-	3.719	2.396	0.616	0.0177	0.0150	0.0762	<0.0500	0.0315	0.0056	
s	0.0446	0.0553	0.0064	0.0020	0.0014	0.0009	0.0003	0.0026	0.0010	
sr	1.198	2.308	1.035	11.264	9.383	1.121	0.609	8.251	18.045	
	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe		
	%	%	%	%	%	%	%	%		
-	<0.0050	0.3099	0.0100	0.0534	0.0115	0.0033	0.0121	92.7		
s	0.0013	0.0082	0.0004	0.0010	0.0003	0.0004	0.0006	0.0602		
sr	26.252	2.651	3.868	1.892	2.527	11.944	4.870	0.065		

Figura 41. Análisis químico muestra 1 (0.05%Ti)



Program: FE-22										08/17/2017 01:50:16 PM
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS										
Single spark(s)										Elements: Concentration
Muestra No: CQF 2 (0.08%Ti, inoc 0.15%)					Quality:					
Usuario: Tesis Licenciatura					Analista: M en I Agustin G Ruiz Tamayo					
Comentario:										
No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
1	3.549	2.540	0.611	0.0149	0.0104	0.0771	<0.0500	0.0316	0.0054	
2	3.275	2.491	0.612	0.0181	0.0130	0.0772	<0.0500	0.0308	<0.0050	
3	3.488	2.513	0.613	0.0156	0.0105	0.0767	<0.0500	0.0317	<0.0050	
No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe		
	%	%	%	%	%	%	%	%		
1	<0.0050	0.3023	0.0095	0.0803	0.0110	0.0021	0.0149	92.7		
2	<0.0050	0.3097	0.0095	0.0848	0.0122	0.0015	0.0134	93.0		
3	<0.0050	0.3090	0.0094	0.0802	0.0113	0.0017	0.0138	92.8		
Program: FE-22										08/17/2017 01:50:16 PM
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS										
Average and RSD (n=3)										Elements: Concentration
Muestra No: CQF 2 (0.08%Ti, inoc 0.15%)					Quality:					
Usuario: Tesis Licenciatura					Analista: M en I Agustin G Ruiz Tamayo					
Comentario:										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
-										
x	3.437	2.514	0.612	0.0162	0.0113	0.0770	<0.0500	0.0313	<0.0050	
s	0.1438	0.0249	0.0013	0.0017	0.0015	0.0003	0.0002	0.0005	0.0009	
sr	4.183	0.992	0.209	10.409	13.150	0.338	0.481	1.604	18.473	
	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe		
	%	%	%	%	%	%	%	%		
-										
x	<0.0050	0.3070	0.0095	0.0818	0.0115	0.0018	0.0140	92.8		
s	0.0006	0.0040	0.0001	0.0026	0.0006	0.0003	0.0008	0.1598		
sr	12.567	1.318	0.954	3.213	5.455	15.101	5.423	0.172		

**Figura 42.** Análisis químico muestra 2 (0.08%Ti)



Program: FE-22 08/17/2017 01:40:36 PM  
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS  
 Single spark(s) Elements: Concentration

Muestra No: CQF C5 (0.13%Ti Inoc 0.15%)  
 Usuario: Tesis Licenciatura  
 Comentario:

Quality:  
 Analista: M en I Agustin G Ruiz Tamayo

No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3.648	2.591	0.588	0.0165	0.0112	0.0755	<0.0500	0.0296	0.0079
2	4.191	2.622	0.589	0.0156	0.0107	0.0760	<0.0500	0.0313	0.0077
3	3.644	2.569	0.590	0.0177	0.0114	0.0760	<0.0500	0.0299	0.0051

No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	<0.0050	0.2989	0.0090	0.1177	0.0127	0.0017	0.0090	92.5
2	<0.0050	0.2956	0.0090	0.1173	0.0126	0.0024	0.0105	92.0
3	<0.0050	0.2998	0.0089	0.1190	0.0131	0.0018	0.0097	92.6

Program: FE-22 08/17/2017 01:40:36 PM  
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS  
 Average and RSD (n=3) Elements: Concentration

Muestra No: CQF C4 (0.13%Ti Inoc 0.15%)  
 Usuario: Tesis Licenciatura  
 Comentario:

Quality:  
 Analista: M en I Agustin G Ruiz Tamayo

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	3.827	2.594	0.589	0.0166	0.0111	0.0758	<0.0500	0.0303	0.0069
s	0.3146	0.0270	0.0009	0.0011	0.0004	0.0003	0.0002	0.0010	0.0015
sr	8.219	1.041	0.151	6.362	3.210	0.363	0.424	3.149	22.365

	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	<0.0050	0.2981	0.0089	0.1180	0.0128	0.0019	0.0097	92.4
s	0.0008	0.0022	0.0000	0.0009	0.0002	0.0004	0.0008	0.3387
sr	15.388	0.742	0.525	0.742	1.882	19.831	7.878	0.367

Figura 43. Análisis químico muestra 3 (0.13%Ti)