



---

---

# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUIMICA E INDUSTRIAS  
EXTRACTIVAS

*“Estudio del efecto de agentes inoculantes,  
desoxidantes y desulfurantes en la fabricación de  
hierros grises”*

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN  
INGENIERIA METALURGICA**

PRESENTA

ING. ALFREDO DE JESÚS ASCENCIO

ASESOR:

DR. ALEJANDRO CRUZ RAMIREZ



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F., siendo las 16:00 horas del día 03 del mes de Diciembre del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIQIE para examinar la tesis titulada:  
 “Estudio del efecto de agentes inoculantes, desoxidantes y desulfurantes en la fabricación de hierros grises.”

Presentada por la alumno:

DE JESÚS

ASCENCIO

ALFREDO

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Con registro: 

A	1	1	0	2	8	9
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA METALÚRGICA

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

DR. ALEJANDRO CRUZ RAMÍREZ

DR. RICARDO GERARDO SÁNCHEZ ALVARADO

DR. AURELIO HERNÁNDEZ RAMÍREZ



DR. JOSÉ FEDERICO CHÁVEZ ALCALÁ

DR. JOSÉ ANTONIO ROMERO SERRANO

DR. DAVID HERNÁNDEZ SILVA

ESCUELA SUPERIOR DE  
 INGENIERÍA QUÍMICA E  
 INDUSTRIAS EXTRACTIVAS  
 SECRETARÍA DE ESTUDIOS  
 DE POSGRADO E  
 INVESTIGACIÓN

DR. ROGELIO SÓTELO BOYÁS



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, D.F. el día 1 del mes de Diciembre del año 2012, el que suscribe Alfredo de Jesús Ascencio alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica, con número de registro A110289, adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Alejandro Cruz Ramírez y cede los derechos del trabajo titulado “Estudio del efecto de agentes inoculantes, desoxidantes y desulfurantes en la fabricación de hierros grises”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso de la autora y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección alfredo\_dej@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Alfredo de Jesús Ascencio

# INDICE

---

## Índice

Resumen.....	I
Abstract .....	III
1. Introducción .....	1
2. Antecedentes .....	3
2.1 Clasificación de los hierros .....	3
2.2 Hierro gris.....	5
2.2.1 Propiedades mecánicas y aplicaciones del hierro gris .....	6
2.3. Carbono equivalente .....	9
2.4. Efecto de los elementos de aleación.....	10
2.4.1 Relación entre composición, resistencia a la tensión y estructura de un hierro gris .....	12
2.5. Diagrama Fe-Fe <sub>3</sub> C/Fe-C .....	12
2.6. Morfología del grafito .....	17
2.7 Solidificación eutéctica.....	21
2.8 Solidificación y estructura del hierro gris y el hierro blanco .....	22
2.9 La Interface entre el grafito y la nucleación heterogénea .....	22
2.10 Microestructura.....	26
2.11 Microestructura de la matriz.....	31
2.12. Principales constituyentes de las fundiciones.....	32
2.13. Inoculación .....	33
2.13.1. Tipos de inoculantes.....	35
2.13.2. Métodos de adición del inoculante.....	37
2.14. Estado del arte .....	38
3. Experimentación.....	42
3.1. Descripción de los equipos.....	44
3.2 Diagrama de flujo del desarrollo experimental.....	49
3.2.1. Caracterización de disco de freno de un hierro comercial.....	49
3.2.2 Pruebas de fusión en horno de inducción.....	50
3.2.3 Caracterización .....	51

# INDICE

---

4. Resultados y discusión.....	53
4.1.1 Composición química .....	53
4.1.2 Análisis microestructural.....	53
4.1.3 Ensayo de tensión. ....	55
4.1.4. Prueba de dureza .....	57
4.2 Resultados de las aleaciones producidas .....	57
4.2.1 Análisis químico.....	57
4.2.2 Resultados metalográficos. ....	59
4.2.3 Análisis metalográfico prueba 1.....	59
4.2.4 Análisis metalográfico de la prueba 2 .....	61
4.2.5 Análisis metalográfico prueba 3.....	64
4.2.6 Análisis metalográfico prueba 4.....	66
4.2.7 Análisis metalográfico prueba 5.....	68
4.2.8 Análisis metalográfico prueba 6.....	71
4.3 Análisis del tamaño y distribución de hojuela de grafito.....	75
4.3.1 Análisis del freno de disco reciclado. ....	75
4.3.2 Análisis piezas obtenidas por fusión. ....	76
4.4. Comparación entre el tipo de hojuela obtenido en la caracterización del sico de freno y las aleaciones producidas.....	80
4.5. Análisis metalográfico realizado a los discos de freno de las aleaciones fabricadas.....	82
4.6. MEB .....	87
4.7. Resultados pruebas mecánicas. ....	98
4.7.1 Ensayo de tensión. ....	98
4.7.2 Dureza .....	101
5. Conclusiones.....	106
6. bibliografía.....	107

# INDICE DE FIGURAS

---

## Índice de figuras

Figura 1. Producción de hierro gris desde el año 1999 hasta el 2014 <sup>[1]</sup> .	3
Figura 2. Clasificación de las fundiciones <sup>[2]</sup> .	4
Figura 3. Modelos espaciales de las hojuelas de grafito.	6
Figura 4. Microestructura de un hierro gris perlítico <sup>[1]</sup> .	6
Figura 5. Influencia del contenido de carbono y de silicio sobre la resistencia tensil <sup>[3]</sup> .	8
Figura 6. Diagrama de fases Fe-C con 2.5 % Si-carbono <sup>[2]</sup> .	9
Figura 7. Efectos de los elementos de aleación en la dureza y en la resistencia a la tensión <sup>[2]</sup> .	12
Figura 8. Diagrama de equilibrio Fe-C, líneas continuas sistema estable (Fe-C) y líneas punteadas es el sistema metaestable (Fe-Fe <sub>3</sub> C).	13
Figura 9. Fragmento del diagrama estable hierro-carbono- 2% silicio <sup>[2]</sup> .	14
Figura 10. Efecto del espesor con respecto a la resistencia a la tensión <sup>[2]</sup> .	15
Figura 11. Proceso de solidificación de diversos tipos de fundición.	16
Figura 12. Clasificación del tamaño de hojuelas de grafito de acuerdo a la norma ASTM A247 <sup>[2-5]</sup> .	18
Figura 13. Tipos de hojuelas de grafito <sup>[4, 5, 6]</sup> .	20
Figura 14. Proceso de solidificación para obtener los diferentes tipos de hojuelas de grafito, para enfriamientos a) lento, b) moderado, c) rápido, y d) muy rápido <sup>[7]</sup> .	21
Figura 15. Cambio de energía libre durante la nucleación heterogénea sobre un sustrato. ....	23
Figura 16. Modelo de interfaz coherente entre dos fases.	24
Figura 17. Modelo de interfaz semi-coherente con regiones de correspondencia perfecta alternadas con regiones sin correspondencia .....	24
Figura 18. Energía libre de nucleación para interface coherente y semi-coherente.....	26
Figura 19. Fractura de la prueba de cuña, mostrando de izquierda a derecha la evolución de la fractura desde hierro blanco, combinado y por último gris. ....	27
Figura 20. Influencia del factor de solidificación ( $G_T/V$ ).y el contenido de cerio en la transición estructural del hierro para un carbono equivalente constante. FG, hojuela de grafito, CG grafito compacto.....	27

## INDICE DE FIGURAS

---

Figura 21. Formas básicas de grafito en hierros comerciales obtenidas por a) grabado profundo, b) por extracción y c) a través de la disolución de la matriz. ....	28
Figura 22. Micrografías obtenidas por MEB, de un hierro gris, a) hojuelas de grafito tipo A, b) grafito tipo D, c) grafito vermicular y d) grafito esferoidal, a 300X. ....	28
Figura 23. Influencia del contenido de azufre sobre la morfología en la interfaz de solidificación direccional de aleaciones hierro-carbono (C = 4.15 a 4.45 % y Si < 0.017%). ....	29
Figura 24. Morfología en la interface de la solidificación direccional de las fundiciones. (a) planar (hojuela de grafito), (b) celular (grafito compacto), (c) dendrítico (esferoidal) ....	30
Figura 25. Transición estructural en la solidificación direccional de las fundiciones. ....	30
Figura 26. a) hierro dúctil (Fe-3.35%, C-2.05%, Si-0.08%, Mn-0.04, %P-0.02, %Cr-0.02, %Ni-0.045, %Mg-0.045), C, cementita, L, ledeburita, P, perlita y ferrita alrededor de los nódulos, 100X, Figura 26 b) C, cementita, L, ledeburita, F, ferrita y P, perlita, 500X. ....	32
Figura 27. Formación del grafito según el subenfriamiento ( $T_E$ , temperatura eutéctica, GL grafito laminar, GV grafito vermicular, GE grafito esferoidal) <sup>[7]</sup> . ....	34
Figura 28. Horno de inducción marca Inductoherm. ....	45
Figura 29. Máquina de tensión Shimadzu. ....	45
Figura 30. Espectrómetro. ....	46
Figura 31. Modelo de disco de freno. ....	46
Figura 32. Modelo y esquema de Yblock ....	47
Figura 33. Modelo y esquema de placa escalonada. ....	47
Figura 34. Durómetro para realizar dureza Rockwell B. ....	48
Figura 35. Programa carnoy utilizado para medir hojuelas de grafito. ....	48
Figura 36. Zona de toma de muestras para caracterización del disco de freno. ....	50
Figura 37. Analizador de imágenes y microscopio óptico. ....	52
Figura 38. Esquema que muestra las dimensiones de las probetas de tensión. ....	52
Figura 39. Esquema del tipo de grafito en las diferentes zonas del disco de freno. ....	54
Figura 40 Comparación del tipo de hojuelas y microestructura del disco de freno. ....	55
Figura 41. Probetas de tensión obtenidas de las pista de frenado del disco de freno. ....	56
Figura 42. Grafica Esfuerzo Vs. Deformación, disco de freno reciclado ....	56

## INDICE DE FIGURAS

---

Figura 43. Piezas obtenidas en las pruebas de fusión, a) freno de disco y b) placa con diferentes espesores.....	58
Figura 44. Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con calcifer para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm. ....	60
Figura 45. Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con calcifer atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.....	61
Figura 46. Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con cabala para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm. ....	62
Figura 47. Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con cabala atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.....	63
Figura 48. Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con cabala y aluminio para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.....	65
Figura 49. Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con cabla y aluminio atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm. ....	66
Figura 50. Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con calcifer y aluminio para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.....	67
Figura 51. Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con calcifer y aluminio atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm. ....	68
Figura 52. Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con noduloy 5R para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.....	70
Figura 53. Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con Noduloy 5R atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm....	71
Figura 54. Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con Noduloy 9C3 para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.....	72
Figura 55. Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con Noduloy 9C3 atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm....	73
Figura 56. Tipo de distribución y tamaño de hojuelas que se tiene en el hierro gris comercial 4. .	75

## INDICE DE FIGURAS

---

Figura 57. Tipo de distribución y tamaño obtenido en la pieza de diferentes espesores de la prueba 1.....	77
Figura 58. Tipo de distribución y tamaño obtenidos en la pieza de diferentes espesores de la prueba 2. ....	78
Figura 59. Tipo de distribución y tamaño a diferentes espesores para la prueba 3.....	80
Figura 60. Corte transversal de los discos de freno fabricados donde se indica las zonas del análisis. ....	82
Figura 61. Tipo de hojuela, distribución y matriz para las diferentes zonas del disco de freno.....	83
Figura 62. Tipo de hojuela, distribución y matriz para las diferentes zonas del disco de freno.....	84
Figura 63. Tipo de hojuela, distribución y matriz para las diferentes zonas del disco de freno.....	85
Figura 64. Tipo de hojuela, distribución y matriz para las diferentes zonas del disco de freno.....	86
Figura 65. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer y su análisis EDS.....	88
Figura 66. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer-aluminio y su análisis EDS. ...	89
Figura 67. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer-aluminio y su análisis EDS. ...	90
Figura 68. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer-aluminio y su análisis EDS. ...	90
Figura 69. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer-aluminio y su análisis EDS. ...	91
Figura 70. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer-aluminio y su análisis EDS. ...	92
Figura 71. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de cabala y su análisis EDS. ....	92
Figura 72. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de cabala-aluminio y su análisis EDS.....	93
Figura 73. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de inoculante cabala y su análisis EDS... 94	94
Figura 74. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de inoculante cabala y su análisis EDS... 95	95
Figura 75. Fotomicrografía del hierro gris con la adición nodulizante 5R y su análisis EDS. ....	96
Figura 76. Fotomicrografía del hierro gris con la adición nodulizante 5R y su análisis EDS. ....	97
Figura 77. Fotomicrografía del hierro gris con la adición de nodulizante 5R y su análisis EDS. ....	98
Figura 78. Curvas $\sigma$ vs. $\epsilon$ Real de las probetas obtenidas en todas las pruebas, a) aluminio-calcifer, b) aluminio-cabala, c) 9C3, d) 5R, e) calcifer, y f) cabala. ....	99
Figura 79. Curvas $\sigma$ vs. $\epsilon$ real obtenidas en todas las pruebas. ....	100
Figura 80. Perfil de durezas de las aleaciones producidas.....	102

## INDICE DE TABLAS

---

### Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de los hierros grises según ASTM A 48 <sup>[4]</sup> .....	7
Tabla 2. Dureza de varias piezas de hierro clasificadas por la microestructura <sup>[3]</sup> . .....	7
Tabla 3. Composición típica de las fundiciones de hierro.....	8
Tabla 4. Tamaño de las hojuelas de grafito. ....	17
Tabla 5. Composición de algunos inoculantes base ferrosilicio para fundición gris.....	36
Tabla 6 Parámetros de las pruebas. ....	50
Tabla 7. Composición del material del disco de freno. ....	53
Tabla 8. Resultados del esfuerzo máximo a la tensión del disco de freno reciclado.....	56
Tabla 9. Resultados de dureza .....	57
Tabla 10. Resultados de análisis químico.....	58
Tabla 11. Tamaño promedio de las hojuelas de grafito en el disco de freno. ....	81
Tabla 12. Tamaño de hojuela promedio obtenido para las pruebas 1, 2 y 3, para los diferentes espesores.....	81
Tabla 13. Análisis microestructural de las diferentes zonas del disco de freno para la prueba 1.....	83
Tabla 14. Análisis microestructural de las diferentes zonas del disco de freno para la prueba 2.....	84
Tabla 15. Análisis microestructural de las diferentes zonas del disco de freno para la prueba 3.....	86
Tabla 16. Análisis microestructural de las diferentes zonas del disco de freno para la prueba 4.....	87
Tabla 17. Propiedades de resistencia de las aleaciones fabricadas,.....	101

# RESUMEN

---

## Resumen

Las fundiciones son aleaciones hierro-carbono-silicio, las cuales se clasifican dependiendo de la morfología de los precipitados de grafito en: fundición blanca, gris y dúctil, principalmente. Las fundiciones grises generalmente contienen entre 2.5 y 4 % C y de 1.0 a 3.0 % Si, presentan una microestructura que consiste en láminas de grafito. Las propiedades de las fundiciones de hierro gris se ven influenciadas por la forma y distribución de las láminas de grafito. La especificación ASTM A247 clasifica la forma, distribución y el tamaño de las hojuelas de grafito, en donde, el tipo A presenta una distribución aleatoria de laminillas de tamaño uniforme y es el tipo preferido para aplicaciones automotrices de resistencia al desgaste como en la fabricación de discos de freno. Industrialmente se prepara el metal base en hornos de inducción o cubilote a partir de chatarra de acero, arrabio y retorno como carga metálica, posteriormente se inocula el metal base en la olla con FeSi o CaSi. La generación de esta microestructura depende de la composición química del hierro, velocidad de enfriamiento y la etapa de inoculación. En este trabajo se caracterizó un disco de freno reciclado para conocer su microestructura, composición química y propiedades mecánicas en base a la norma ASTM A159 se determinó que corresponde a un hierro gris grado G3000. Posteriormente se fabricaron hierros grises grado G3000 en un horno de inducción marca Inductotherm de 25 kg. de capacidad, mediante seis procedimientos diferentes en la etapa de inoculación. Se evaluó el efecto de la adición de dos agentes inoculantes comerciales calcifer (base Ca y Ba) y cabala (base Ca), dos inoculantes comerciales con adiciones de aluminio y adición de dos agentes desulfurantes comerciales base magnesio (5R y 9C3), sin inoculación. Se determinó el efecto de los seis procesos diferentes en la fabricación de los hierros grises sobre el efecto en la formación de las hojuelas de grafito de acuerdo a la norma ASTM A247. Se determinó la composición química de los hierros fabricados mediante el espectrofotómetro de emisión óptica (chispa), el análisis microestructural se llevo a cabo con microscopia óptica y MEB/EDS, y la caracterización mecánica se llevo a cabo mediante ensayos de tensión bajo la norma ASTM E8 y determinación de dureza bajo norma ASTM E10. Los resultados indican que el inoculante calcifer presentó la mejor distribución y tamaño apropiado de hojuela, esto es grafito tipo A y tamaño de 4, en una matriz perlítica. La adición de aluminio a este inoculante presento una matriz perlítica-ferrítica, con grafito tipo A y tamaño de 5. Los resultados de tensión y dureza corroboran los

## RESUMEN

---

resultados microestructurales para estas dos pruebas ya que presentaron valores de UTS mayores a 30000 psi, superiores a los que marca la norma ASTM A159 para este grado de hierro. Los hierros fabricados con la adición de agentes desulfurantes presentaron formación de hojuelas del tipo D y tamaños de 1 para el agente 9C3 y de nódulos para el agente 5R, lo que indica una formación inadecuada de hojuelas de grafitos. El análisis con el MEB indica que el mecanismo de crecimiento de las hojuelas es a partir la formación inicial de partículas de óxidos, sulfuros y combinaciones entre ellos.

# ABSTRACT

---

## Abstract

Cast irons are alloys based on iron-carbon-silicon, which are rating according with graphite morphology as: white cast, gray and ductile irons, mainly. Grey cast iron generally contains about 2.5 and 4 % C and from 1.0 to 3.0% Si, with a microstructure constituted by graphite flakes. Grey cast iron properties are influenced by shape and distribution of graphite flakes. The specification ASTM A247 classifies the shape, distribution and graphite flakes size, where A type presents a random distribution of graphite flakes with a uniform size, this is the preferred type for wear resistance automotive applications, as in the manufacture of brake discs. Industrially, metal is prepared in cupola or induction furnaces from scrap steel, pig iron and scrap iron, then base metal is inoculated with FeSi or CaSi. The microstructure generation depends on the chemical composition, cooling rate and inoculation process. In this work a brake disc recycled was characterized to know their microstructure, chemical composition and mechanical properties, according with ASTM A159, it corresponds to a G3000 grade cast iron. After that, G3000 grey cast irons were manufactured in an inductotherm induction furnace of 25 kg of capacity for six different procedures in the inoculation stage. These are, with adding of two different commercial inoculants cabala y calcifer, two commercial inoculants with aluminum additions and adding two different commercial desulphurising agents based magnesium (9C3 and 5R) without inoculation. The effects of the six different processes were evaluated on the graphite flake formation based on ASTM A247. Grey cast iron produced were characterized by chemical composition of with optical emission spectrometer, the microstructural analysis was carried out with optical and SEM/EDS microscopy, and the mechanical characterization was conducted under tension and hardness tests according with ASTM E8 and ASTM E10, respectively. The results indicate that calcifer inoculant presented the best graphite flakes distribution (A type) and size (4) in a perlitic matrix, while aluminum addition promotes a perlitic-ferritic matrix with graphite type A and size of 5. Mechanical results are in agreement with those obtained in the microstructural characterization. UTS values greater than 30,000 psi were obtained as is point out in ASTM A159 for this iron grade. Irons manufactured with the addition of desulphurising agents presented graphite type D and size of 1 to the agent 9C3 and graphite nodules to the agent 5R, indicating an inadequate forming of graphite flakes. Analysis by

## ABSTRACT

---

SEM indicated that the growth mechanism of the graphite flakes is from the initial formation of particles of oxides, sulphides and combinations.

# 1. INTRODUCCION

---

## 1. Introducción

Las fundiciones son aleaciones ferrosas de hierro, carbono y silicio, las cuales generalmente también contiene manganeso, fósforo y azufre. Su contenido de carbono varía entre 2 y 6.67%. Debido a que el contenido de carbono es demasiado alto en comparación al acero esto ocasiona que la ductilidad del hierro sea muy baja y es por este motivo que este tipo de aleación no puede laminarse o trabajarse a temperatura ambiente. Los hierros representan uno de los sistemas de aleación más complejo ya que una amplia variedad de microestructuras y propiedades, se obtienen a partir de la variación de la composición química, las condiciones de solidificación y tratamientos térmicos.

Algunas de las principales propiedades de las fundiciones, en comparación con el acero es que el proceso de fundición es más barato, las piezas obtenidas son más fáciles de mecanizar, se pueden fabricar con relativa facilidad piezas de grandes dimensiones y también piezas pequeñas de geometría complicada. Se fabrican numerosos componentes de motores y maquinaria, las temperaturas del proceso de fundición son relativamente bajas. El nivel de silicio en los hierros le proporciona al metal fluidez, además, durante la solidificación presentan una contracción considerablemente menor que los aceros. Existen diversos métodos para clasificar los tipos de hierro, básicamente se basan en la estructura metalográfica y por su fractura. Se consideran 5 tipos de hierro fundido los cuales son: gris, moteado, dúctil, maleable y blanco. El hierro gris y el blanco reciben su nombre por el color de la superficie de su fractura.

Los hierros se pueden fabricar en hornos de cubilote o en hornos de inducción donde la carga está constituida por metal sordel, hierro de primera fusión, chatarra de hierro y acero. Por lo que durante su proceso de fabricación en el horno de inducción se suelen agregar diversos elementos de aleación y agentes inoculantes, estos últimos facilitan la nucleación del grafito, la cual puede ser en forma de hojuelas, rosetas o esferoidal.

La forma del grafito así como su tamaño proporciona a las fundiciones características y propiedades únicas que las diferencian de los aceros. Los hierros grises se fabrican mediante un control adecuado de la composición química y velocidad de enfriamiento. Además se requiere de una etapa de inoculación generalmente con FeSi al 75% para obtener grafito en forma de hojuelas,

# 1. INTRODUCCION

---

el cual le proporciona una gran resistencia al desgaste, características primordiales en la fabricación de piezas automotrices como monoblocks y discos de freno.

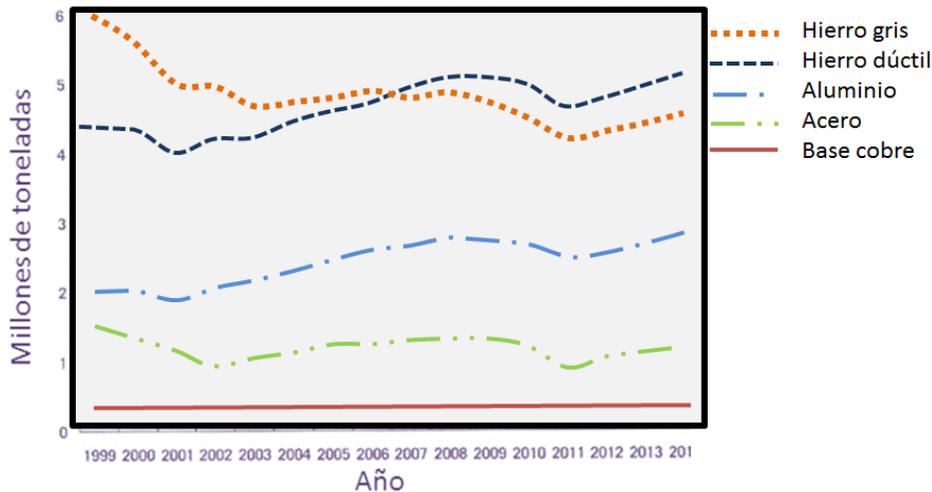
La producción mundial del hierro entre los años 2009-2010 ha tenido una baja considerable, debido a que en el 2009 se producían aproximadamente 4.8 millones de toneladas por año y en el 2010 la producción bajo hasta 4.2 millones de toneladas por año, esto se debe a las condiciones del mercado y al avance tecnológico de otras aleaciones; sin embargo, en este año la producción se ha mantenido y se prevé que para el año 2014, se tenga un considerable incremento no solo en el país sino a nivel mundial, específicamente en la producción de los hierros grises y los hierros dúctiles.

La inoculación es una etapa de suma importancia en la fabricación de los hierros grises ya que de esta depende la formación de sitios de nucleación heterogénea para el grafito, esta etapa principalmente se realiza con FeSi. En este trabajo se evaluó el efecto de dos agentes inoculantes comerciales base FeSi, agentes inoculantes con adiciones de aluminio, y con agentes desulfurantes en hierros resultados, esto con el objeto de evaluar la formación de sitios de nucleación para las hojuelas de grafito a partir de la formación de óxidos con el aluminio adicionado y de sulfuros con la adición de magnesio.

## 2. ANTECEDENTES

### 2. Antecedentes

La producción mundial de fundiciones a partir de 1999 se observa en la figura 1. Se observa que el mercado de las fundiciones es dominado por la producción de hierro gris y nodular comparada con otros metales, en general, la producción del hierro gris se ha mantenido constante y se espera que la tendencia de producción se incremente para el año 2014 <sup>[1]</sup>.



**Figura 1.** Producción de hierro gris desde el año 1999 hasta el 2014 <sup>[1]</sup>.

En México, la producción de fundiciones se ha incrementado. De 1999 a 2006 se logró un incremento considerablemente de 34.7% en la producción de hierro gris y se espera que esta tendencia se mantenga de forma gradual para los próximos años <sup>[1]</sup>.

### 2.1 Clasificación de los hierros

El mejor método para clasificar los hierros fundidos es de acuerdo a su estructura metalográfica. Donde las variables a considerar que dan lugar a los diferentes tipos de hierro son: contenido de carbono, elementos de aleación, impurezas y la rapidez de enfriamiento. Estas variables controlan la condición del carbono ya que puede estar combinado como carburo de hierro en la cementita o existir como carbono sin combinar en forma de grafito y también su forma física (blanco, gris, moteado y maleable), como se observa en la figura 2.

## 2. ANTECEDENTES

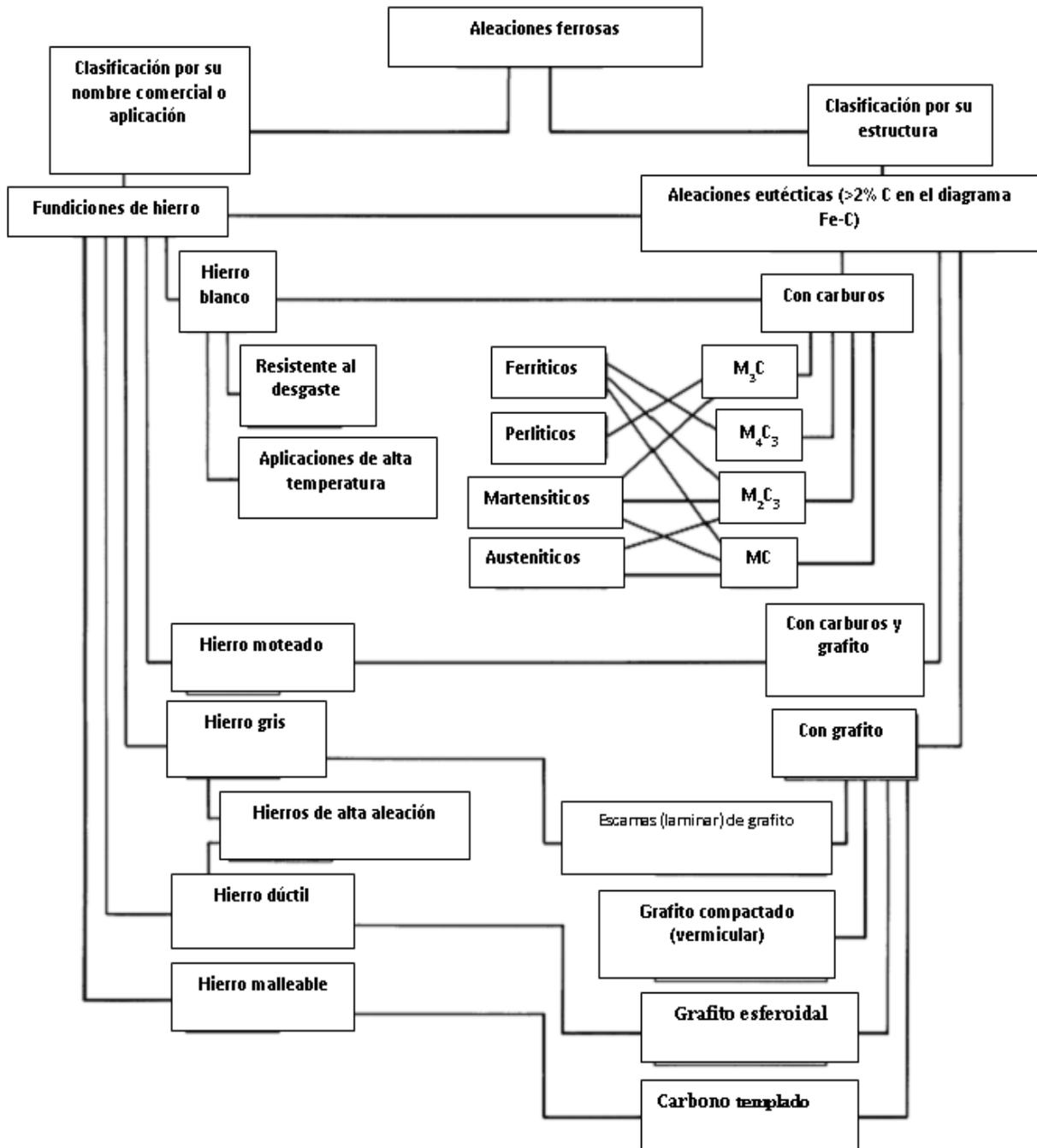


Figura 2. Clasificación de las fundiciones <sup>[2]</sup>.

El hierro y la fundición gris derivan sus nombres de la apariencia de la superficie de su fractura. El hierro moteado está situado entre el hierro gris y el hierro blanco y su fractura muestra zonas de hierro gris y zonas de hierro blanco; mientras que el hierro maleable es un hierro blanco después de ser sometido a un tratamiento térmico de maleabilización en donde se le imparte ductilidad <sup>[3]</sup>.

## 2. ANTECEDENTES

---

Existen dos subdivisiones adicionales a estos cinco tipos básicos y son: aleación de grafito compacto y grafito de alta aleación. Los de alta aleación se utilizan principalmente para aplicaciones que requieren alta resistencia a la corrosión y una combinación de resistencia, en este tipo de aleación se produce tanto el grafito laminar de la fundición gris y el grafito esferoidal de la fundición dúctil <sup>[2-4]</sup>. La fundición de grafito compacto (CG), se caracteriza por que el grafito se interconecta dentro de las celdas eutécticas como la hojuela en el hierro gris, pero a diferencia del hierro gris, en esta fundición el grafito es más grueso y redondo <sup>[1-5]</sup>.

### 2.2 Hierro gris

Este tipo de aleación normalmente se caracteriza por una microestructura de hojuela de grafito en una matriz perlítica o ferrítica. Las fundiciones grises en esencia son aleaciones hierro-silicio-carbono, que contienen pequeñas cantidades de diversos elementos de aleación, los cuales hacen variar ampliamente sus propiedades físicas y mecánicas. Este grupo de aleaciones constituye una de las aleaciones más ampliamente utilizadas, para la fabricación de piezas de fundición. Para su fabricación se utilizan como materia prima fundamental, el arrabio o lingote de hierro, chatarra de fundición y chatarra de acero, las cuales se funden en hornos de inducción y/o hornos de cubilote <sup>[1-7]</sup>.

La metalurgia del hierro gris es una de las más complejas debido a que influyen una gran cantidad de factores durante la solidificación y posteriormente las transformaciones al estado sólido. En este tipo de aleaciones la tendencia de la cementita a separarse en grafito y austenita o ferrita es favorecida controlando la composición química y la rapidez de enfriamiento. La mayoría de este tipo de hierros son aleaciones hipoeutécticas que contienen entre 2.5 y 4% de carbono. Formando grafito y austenita en la temperatura eutéctica. El grafito aparece como placas irregulares generalmente alargadas y curvas, las cuales dan al hierro fundido gris su característica fractura grisácea. Las hojuelas son partículas tridimensionales de placas curvas algunas, veces enlazadas y pueden representarse por los modelos mostrados en la figura 3 <sup>[2-5]</sup>.

Durante el enfriamiento continuo, ocurre una precipitación adicional de carbono como grafito y/o cementita debido al decremento de la solubilidad en la austenita. Una determinada composición y rapidez de enfriamiento permite que la cementita se grafitice, entonces la matriz

## 2. ANTECEDENTES

---

será completamente ferrítica, pero si la grafitización de la cementita se evita, la matriz será perlítica.



**Figura 3.** Modelos espaciales de las hojuelas de grafito.

La constitución de la matriz puede variar desde perlita pasando por mezclas entre ferrita y perlita hasta obtener una matriz de ferrita pura. La mezcla entre el grafito y la ferrita hacen un hierro gris más suave y débil, pero la resistencia y dureza aumentan con el incremento del carbono hasta alcanzar un máximo con la formación de un hierro gris perlítico. La figura 4 muestra la microestructura de un hierro gris perlítico, donde se indican zonas de perlita y ferrita <sup>[7-10]</sup>.



**Figura 4.** Microestructura de un hierro gris perlítico <sup>[1]</sup>.

### 2.2.1 Propiedades mecánicas y aplicaciones del hierro gris

La norma ASTM A 48, es utilizada ampliamente para las piezas de hierro gris, se clasifican en siete clases (números 20, 25, 30, 35, 40, 50, y 60) los cuales indican la mínima resistencia a la

## 2. ANTECEDENTES

tensión de las barras de prueba en miles de lb/in<sup>2</sup>; por ejemplo el hierro gris de la clase 20 tendría una resistencia tensil mínima de 20,000 lb/in<sup>2</sup>. La tabla 1 muestra la composición química requerida para obtener una determinada resistencia tensil de hierro gris estándar <sup>[3, 4, 5]</sup>. La dureza del hierro gris es un resultado promedio entre el grafito suave en el hierro y la matriz metálica, la variación en el tamaño y distribución de grafito genera amplias variaciones en la dureza. La microestructura es el factor principal para determinar la dureza del hierro gris. La tabla 2 indica el amplio intervalo de dureza Brinell obtenidos con diferentes microestructuras de hierro <sup>[3]</sup>.

**Tabla 1.** Clasificación de los hierros grises según ASTM A 48 <sup>[4]</sup>

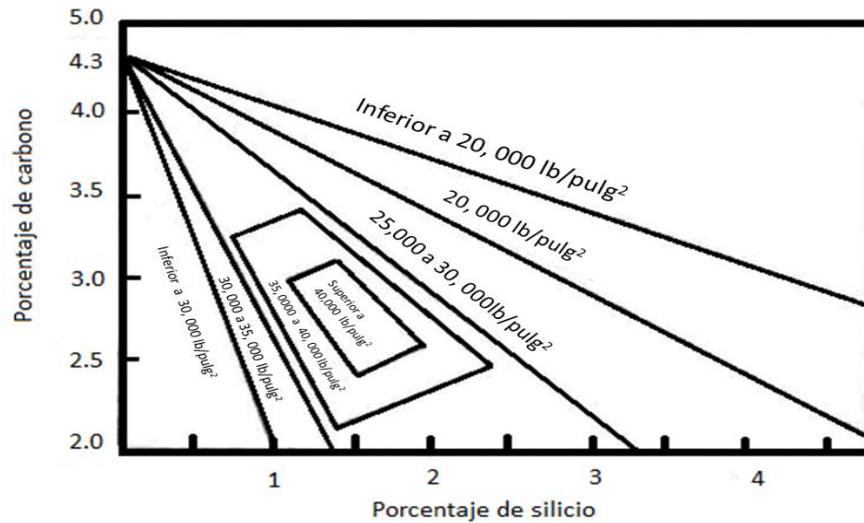
Tipo de hierro	% C	% Si
Clase 20	3.40-3.60	2.30-2.50
Clase 30	3.10-3.30	2.10-2.30
Clase 40	2.95-3.15	1.70-2.00
Clase 50	2.70-3.00	1.70-2.00
Clase 60	2.50-2.85	1.90-2.10

**Tabla 2.** Dureza de varias piezas de hierro clasificadas por la microestructura <sup>[3]</sup>.

Tipo	Dureza Brinell
Hierro gris ferrítico (recocido)	110-140
Hierros austeníticos	140-160
Hierro gris suave	140-180
Hierros perlíticos	160-220
Hierro perlítico aleado	200-250
Hierros revenidos martensíticos	260-350
Hierros martensíticos	350-450
Hierro blanco sin alear	280-500
Hierro blanco aleado	450-550
Hierro martensítico suave	550-700
Hierro nitrurado	900-1000

La composición química también ejerce un considerable efecto sobre la dureza. Generalmente, cuando se aumenta el contenido de carbono y silicio, se obtiene una disminución en la dureza y en la resistencia tensil. La figura 5 muestra la influencia del contenido de carbono y de silicio sobre la resistencia tensil, donde se puede observar que la máxima resistencia se obtiene con 2.75% de carbono y 1.5% de silicio. Estos porcentajes darán como resultado un hierro gris perlítico <sup>[1-10]</sup>.

## 2. ANTECEDENTES



**Figura 5.** Influencia del contenido de carbono y de silicio sobre la resistencia tensil <sup>[3]</sup>.

Las composiciones típicas de los hierros fundidos se presentan en la tabla 3, en donde el carbono puede estar en forma de grafito o en forma combinada como cementita. La tabla 3 indica que la composición básica de las fundiciones se basa principalmente en los elementos: carbono, silicio, fósforo y manganeso <sup>[2-7]</sup>.

**Tabla 3.** Composición típica de las fundiciones de hierro.

Tipo	Contenido %				
	Carbono	Silicio	Manganeso	Azufre	Fósforo
<b>Gris</b>	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.02-0.25	0.02-1.0
<b>Dúctil (0.035 % Mg)</b>	3.0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
<b>Grafito compacto</b>	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
<b>Maleable</b>	2.0 -2.9	0.9-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.02-0.2
<b>Blanca</b>	1.8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.8	0.06-0.2	0.06-0.2

Los elementos más importantes son el carbono, el hierro y el silicio. En los hierros grises. Este tipo de aleación normalmente se considera como una aleación ternaria hierro-silicio-carbono (figura 6). Como se puede observar el material presenta una solidificación eutéctica y está sujeto en estado líquido a una transformación eutectoide, estos factores dominan la metalurgia del hierro. <sup>[2-3]</sup>. El carbono y el silicio influyen en la naturaleza de las fundiciones de hierro, por lo que es necesario desarrollar una aproximación del impacto de este en la solidificación y esto se logra a través del concepto de carbono equivalente (CE) o teniendo en cuenta el contenido de fósforo <sup>[3-9]</sup>.

## 2. ANTECEDENTES

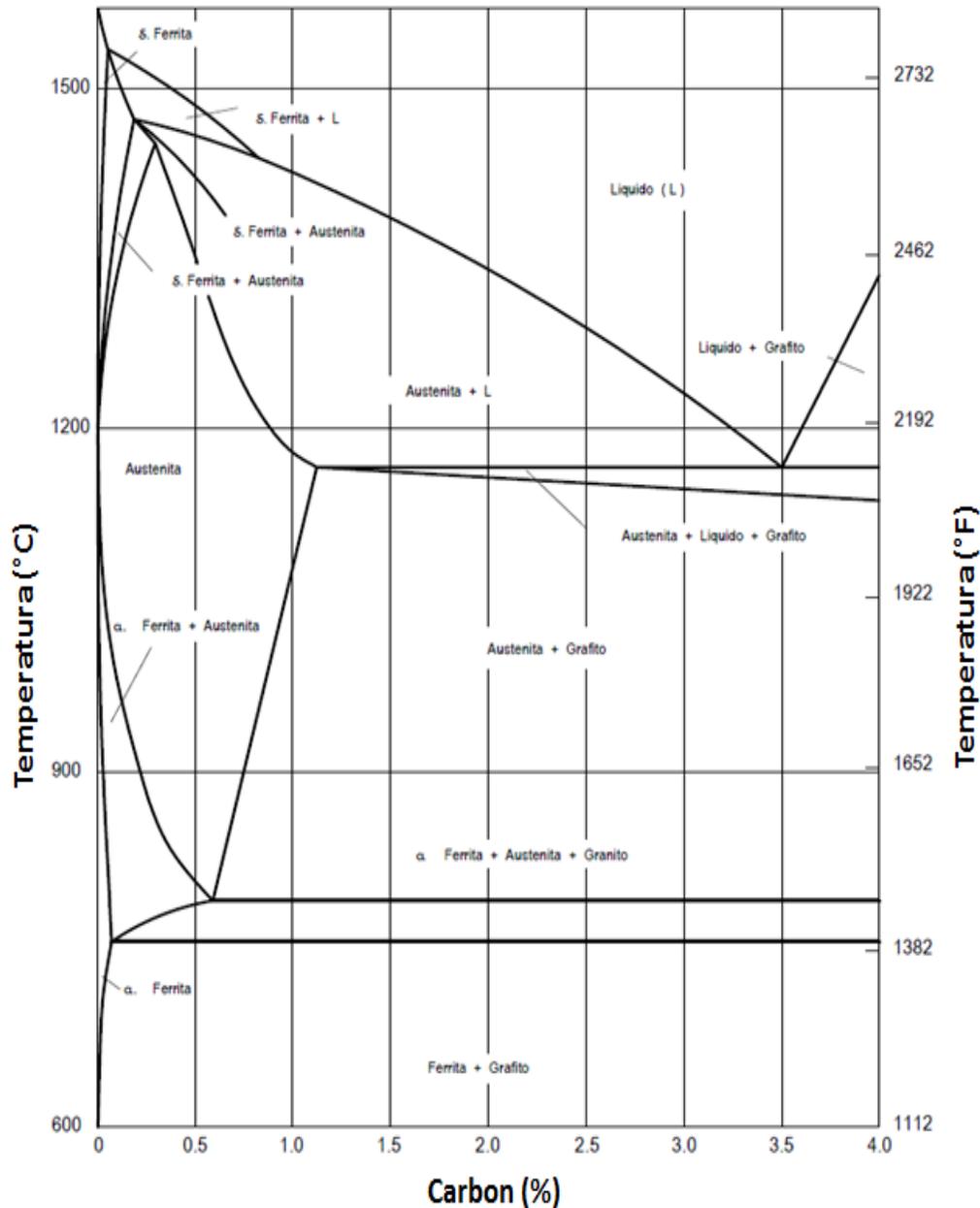


Figura 6. Diagrama de fases Fe-C con 2.5 % Si-carbono <sup>[2]</sup>.

### 2.3. Carbono equivalente

Los tres principales constituyentes de los hierros que más afectan la dureza y la resistencia son el carbono total, silicio y fósforo. Un valor conocido como carbono equivalente (CE), combina el efecto de estos tres elementos. El hierro gris eutéctico se produce cuando se tiene un contenido de carbono de 4.3% en el sistema binario Fe-C. Si el silicio y el fósforo están presentes el contenido

## 2. ANTECEDENTES

---

de carbono del eutéctico baja. La ecuación (1) representa la determinación del carbono equivalente

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

Hierros fundidos con valores de carbono equivalente menores a 4.3% son llamados hipoeutécticos, aquellos que tienen valores de carbono equivalente mayores a 4.3% son conocidos como hipereutécticos. La mayoría de los hierros grises son hipoeutécticos, es decir, tienen un CE < a 4.3. Las propiedades mecánicas y físicas de los hierros están relacionadas con el valor del CE (eq.1) [5 y 31].

### 2.4. Efecto de los elementos de aleación

A continuación se describen algunos de los elementos más importantes de aleación y el efecto que tienen en las fundiciones:

**Carbono:** Es el principal elemento de aleación en los hierros, una gran parte de este elemento forma precipitados de grafito, mientras que el resto se disuelve en diversas fases presentes o tiende a formar carburos con los diversos elementos aleantes

**Fósforo.** Este elemento por lo general proviene del arrabio y de la chatarra, tiende a aumentar la fluidez del hierro, también suele formar una fase conocida como *steadita* ( $Fe_3P$ ). La *steadita* es relativamente frágil y en altos contenidos promueve la porosidad. La mayoría de las piezas de fundición contienen entre 0.02 y 0.10% de fósforo. [2,3]

**Azufre.** En los hierros grises los niveles de azufre son muy importantes, y en cierta medida su presencia es un tema de gran controversia, ya que muchos investigadores [15], dicen que este elemento juega un papel muy importante en la nucleación del grafito en los hierros grises. Por otro lado los hierros comerciales contienen alrededor de 0.06 y 0.12% de azufre, Contenidos elevados de azufre propician la formación de  $Fe_3C$ , por lo que se favorece la formación de hierro blanco. Para minimizar este comportamiento se requiere que la fundición contenga manganeso para promover la formación de sulfuros de manganeso. [1-5]

**Manganeso.** Es un elemento estabilizador de carburos y tiende a incrementar la cantidad de carbono combinado y favorece la formación de cementita, tiende a blanquear las fundiciones y aumenta la dureza, normalmente las fundiciones suelen contener de 0.4 a 1.5 % de manganeso. El

## 2. ANTECEDENTES

---

principal papel del manganeso es neutralizar al azufre evitando que este forme sulfuro de hierro.  
[2,3]

**Oxígeno.** Es un fuerte antigrafitizante, el cual se encuentra presente en las fundiciones, en forma de inclusiones no metálicas, el porcentaje de oxígeno que contienen las fundiciones esta en el intervalo de 0.002 y 0.20 %.<sup>[1]</sup>

**Hidrógeno.** Se presenta como impureza gaseosa y da lugar a porosidades cuando su contenido es elevado. La solubilidad del hidrógeno en la fundición aumenta con el contenido de silicio. Por ello las fundiciones con alto contenido de silicio tienden a ser más porosas.<sup>[2,3]</sup>

**Silicio.** Es un elemento de gran importancia en los hierros grises, ya que este elemento incrementa la fluidez, disminuye el área de la austenita, ocasionando que el contenido de carbono baje y la reacción eutectoide ocurra en un campo más amplio, este elemento favorece la solidificación de acuerdo al sistema estable hierro-grafito, donde el carbono precipita como grafito primario en forma de hojuelas.

**Cromo.-** En pequeñas cantidades hasta 0.75 %, causa un aumento significativo en la resistencia del hierro gris, promueve una matriz perlítica y aumenta considerablemente la dureza, se añade como ferrocromo y en el baño se debe tener cuidado de que se disuelva por completo.

**Cobre.-** Aumenta la resistencia a la tracción del hierro gris, promoviendo una matriz perlítica, tiene un ligero efecto de grafitización y por lo tanto no promueve la formación de carburos, este material debe de ser agregado con una alta pureza.

**Níquel.** Contenidos alrededor del 2% causan un pequeño incremento en la resistencia a la tensión del hierro gris, no promueve la formación de carburos, y se adiciona como materia elemental y no presenta problemas con su disolución en la fundición.

**Molibdeno.** En cantidades de 0.25 a 0.75 % tiene un impacto significativo en la resistencia del hierro gris, ya que fortalece la matriz y promueve el refinamiento de las escamas de grafito.

**Estaño.** En intervalos de 0.025 a 0.1 % tiende a estabilizar la perlita, no incrementa la resistencia de una fundición perlítica, y se adiciona de forma pura.

**Vanadio.** Incrementa significativamente la dureza y la resistencia del hierro gris.

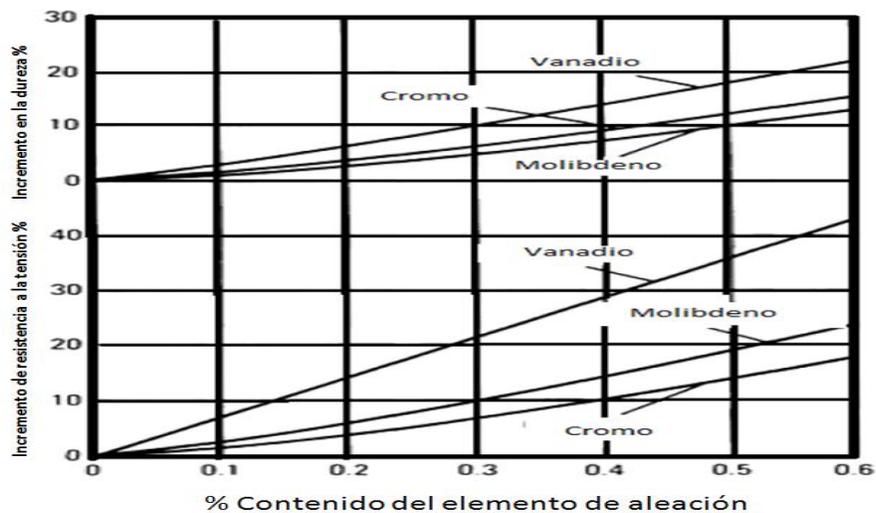
## 2. ANTECEDENTES

**Plomo.**-la presencia del plomo en el hierro gris, en cantidades tan bajas como 0.004%, causa una pérdida considerable en la resistencia a la tensión, a través de su efecto perjudicial sobre la estructura de las hojuelas de grafito <sup>[2, 31]</sup>.

**Aluminio.**-proviene principalmente de la chatarra de acero hasta niveles de 0.1%. En contenidos de hasta 2% promueve la grafitización, engruesa la estructura del grafito y favorece la formación de ferrita. Contenidos mayores al 2% disminuye su poder grafitizante hasta cero. El aluminio promueve la disolución de hidrógeno, lo que puede causar defectos en las piezas de fundición <sup>[2-31]</sup>.

### 2.4.1 Relación entre composición, resistencia a la tensión y estructura de un hierro gris

La figura 7 muestra el efecto del contenido de elementos aleantes en la resistencia a la tensión y dureza.



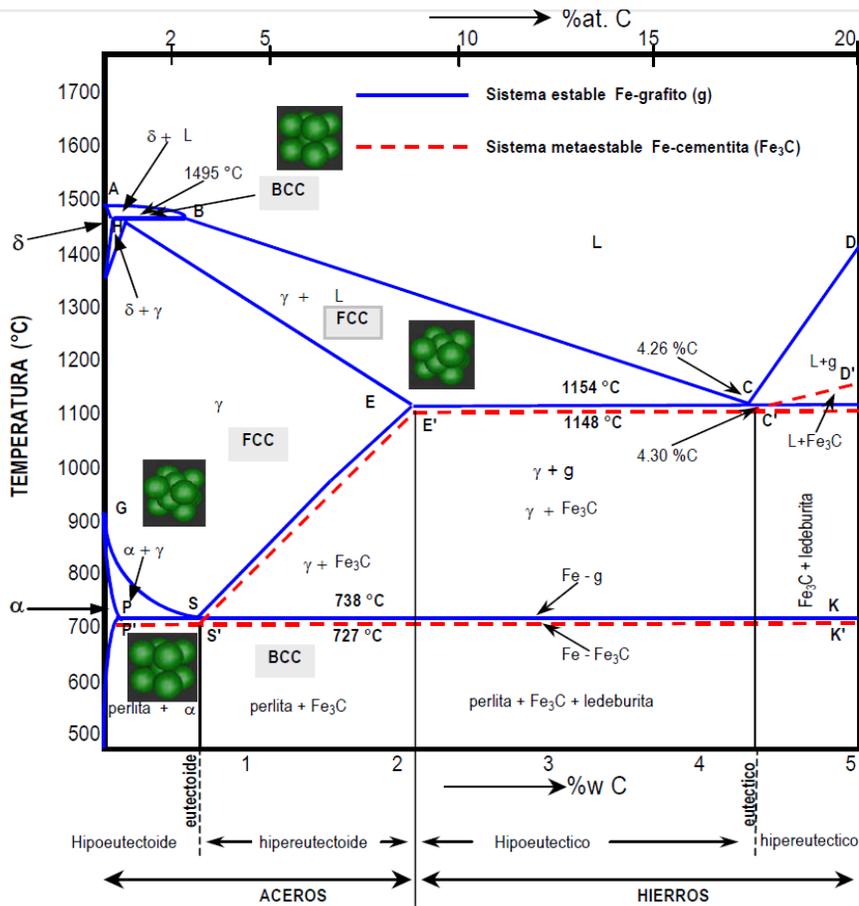
**Figura 7.** Efectos de los elementos de aleación en la dureza y en la resistencia a la tensión <sup>[2]</sup>.

### 2.5. Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C/Fe-C

El diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C, que estudia los aceros, se denomina metastable, ya que estas aleaciones contienen un bajo contenido de carbono y de silicio. Mientras que el diagrama Fe-C (fig. 8), se le denomina diagrama de equilibrio estable y se utiliza para estudiar la solidificación eutéctica y las transformaciones de fase de las fundiciones las cuales son responsables de la forma del grafito y de la matriz en su estructura. Estas transformaciones deben verificarse de acuerdo al

## 2. ANTECEDENTES

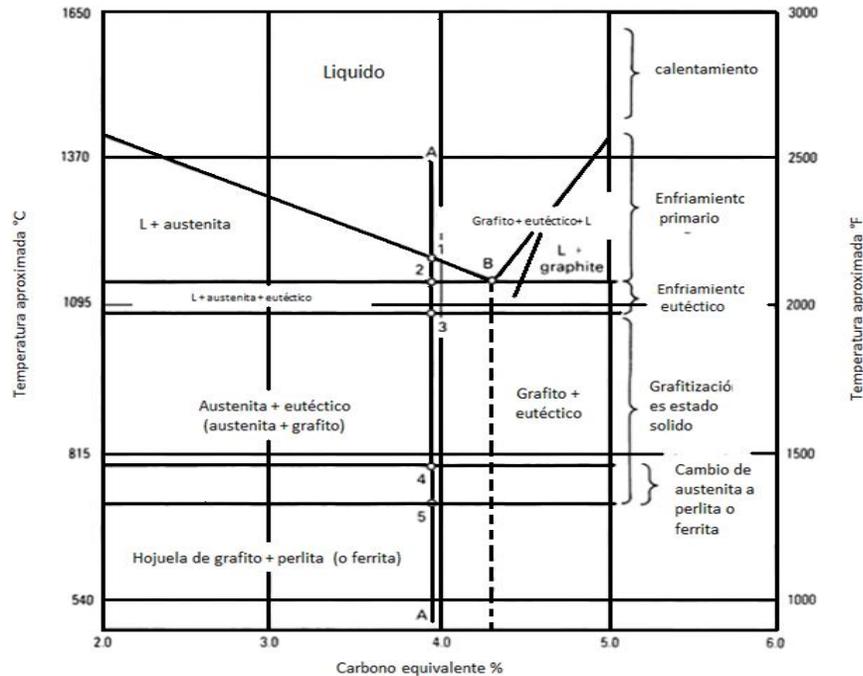
diagrama de equilibrio estable, además de que se debe tener un alto contenido de silicio y controlar el enfriamiento haciéndolo lo más lento posible. Debido a que las fundiciones no transforman exclusivamente al diagrama estable, se puede decir que una parte transforma de acuerdo al diagrama estable y otra según el metaestable [2, 3, 26].



**Figura 8.** Diagrama de equilibrio Fe-C, líneas continuas sistema estable (Fe-C) y líneas punteadas es el sistema metaestable (Fe-Fe<sub>3</sub>C).

Como se mencionó anteriormente la mayoría de los hierros grises son aleaciones hipoeutecticas con un CE < 4.3. La secuencia de solidificación así como los eventos asociados se pueden observar en la figura 9 (diagrama hierro-carbono-silicio "estable" simplificado), tomando en cuenta el carbono equivalente, donde las fases fueron tomadas a un 2% de silicio [6-9].

## 2. ANTECEDENTES



**Figura 9.** Fragmento del diagrama estable hierro-carbono- 2% silicio<sup>[2]</sup>.

La figura 9 muestra la trayectoria de solidificación de un hierro hipoeutectico a través de la línea A. Se observa que por encima del punto 1, el hierro es totalmente líquido y a medida de que la temperatura disminuye cruza la línea de liquidus, iniciando la solidificación primaria con la formación de dendritas de austenita proeutectoide. Debajo de la temperatura de solidificación entre los puntos 1 y 2, las dendritas comienzan a crecer y se forman nuevas dendritas.

El tamaño de la dendrita se rige por el valor del CE y la velocidad de solidificación, ya que a valores de CE pequeños se producen dendritas grandes, debido a que el intervalo de temperatura que se encuentra entre la línea de liquidus y la eutéctica es mucho mayor en comparación a los que tiene un valor mayor de CE. Enfriamientos rápidos promueven la aparición de dendritas finas, y durante la solidificación y formación de las dendritas de austenita, el carbono es rechazado en el líquido incrementando su contenido hasta alcanzar la composición eutéctica de 4.3% de carbono, el líquido se puede transformar en dos sólidos, de acuerdo a los puntos 2 y 3 de la figura 9<sup>[2]</sup>.

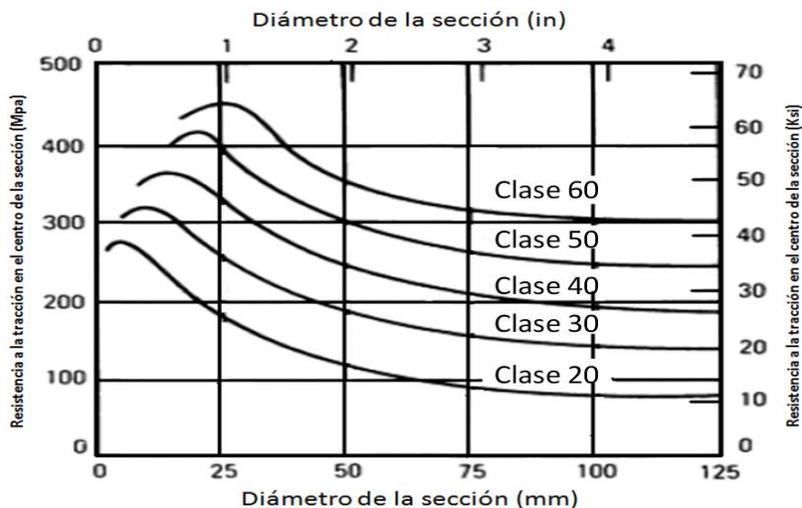
El tipo de sólido que se forme depende si la solidificación ocurre después de la reacción eutéctica estable o metaestable, la separación del grafito se lleva a cabo a temperaturas muy parecidas en ambos casos. Dependiendo del caso puede ocurrir lo siguiente, durante la reacción metaestable se forma austenita o carburo de hierro, mientras que durante la reacción estable se

## 2. ANTECEDENTES

puede formar austenita saturada y grafito, pero si se continúa el enfriamiento el grafito puede precipitar y a la temperatura eutectoide la austenita puede descomponerse en ferrita y grafito. <sup>[1-5]</sup>

En los puntos 3 y 4 de la figura 9 se muestra un intervalo de temperatura de transformaciones eutécticas y eutectoides, ya que el alto contenido de carbono en la austenita es rechazado, propiciando que el carbono se difunda en forma de escamas de grafito. Este comportamiento hace posible que la austenita tenga la composición apropiada para la transformación eutectoide, la cual se lleva a cabo en el intervalo de los puntos 4 y 5, en donde la austenita se descompone en perlita o en perlita más ferrita <sup>[6-9]</sup>.

La solidificación de las fundiciones como se mencionó anteriormente es controlada por la composición y la velocidad de enfriamiento del hierro, cada una de las variables tiene un efecto considerable sobre la solidificación. Por lo que la velocidad de enfriamiento en la solidificación se convierte en la variable de control, esta también influye en la microestructura. La velocidad de enfriamiento está influenciada por diversas variables como: temperatura de colada, velocidad de vaciado, conductividad térmica del molde, diseño de la pieza, entre otras; sin embargo también la velocidad de enfriamiento varía con la sección de la pieza, por lo que diversos espesores pueden ocasionar una variación de propiedades en la pieza de fundición. La figura 10 muestra el efecto de la variación del espesor para los diferentes tipos de hierros grises, se observa que la resistencia a la tensión disminuye cuando se incrementa el espesor.

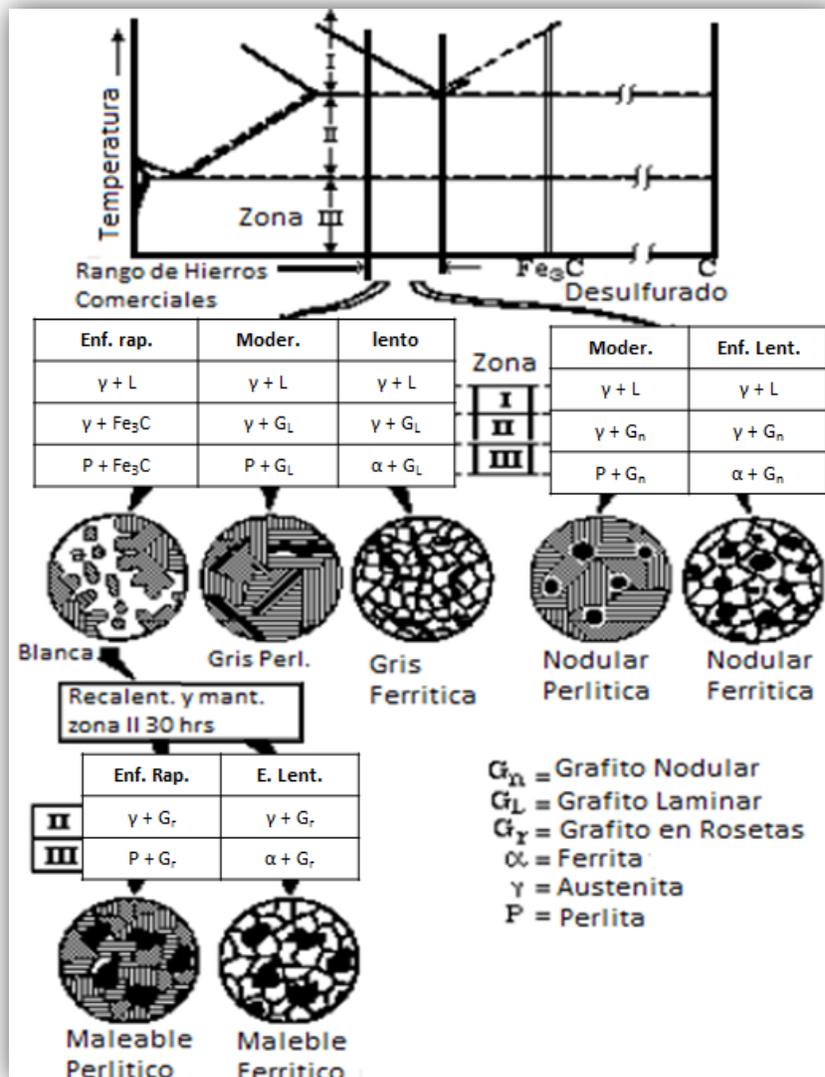


**Figura 10.** Efecto del espesor con respecto a la resistencia a la tensión <sup>[2]</sup>.

## 2. ANTECEDENTES

Este comportamiento se atribuye a que la cantidad de grafito combinado es menor, lo que ocasiona grandes hojuelas de grafito y un incremento en la cantidad de ferrita, disminuyendo considerablemente las propiedades mecánicas de los hierros grises. Las velocidades de enfriamiento pueden llegar a ser difíciles de predecir para formas complejas, sin embargo se puede llegar a conocer haciendo una comparación de las diferentes secciones de la pieza [4, 6, 9].

La figura 11 representa esquemáticamente la posibilidad de producir una gran variedad de microestructuras tanto por solidificación convencional como por tratamiento térmico para diferentes composiciones en función de la velocidad de solidificación en el diagrama metaestable Fe-Fe<sub>3</sub>C.



**Figura 11.** Proceso de solidificación de diversos tipos de fundición.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.6. Morfología del grafito

Grandes hojuelas de grafito interrumpen seriamente la continuidad de la matriz (perlítica y/o ferrítica) reduciendo de esta manera la resistencia a la ductilidad del hierro gris. Hojuelas pequeñas de grafito afectan menos a las propiedades mecánicas de las fundiciones, por lo que se prefieren hojuelas de tamaño entre 4 y 3 según AFS-ASTM <sup>[1, 2, 3, 7]</sup>.

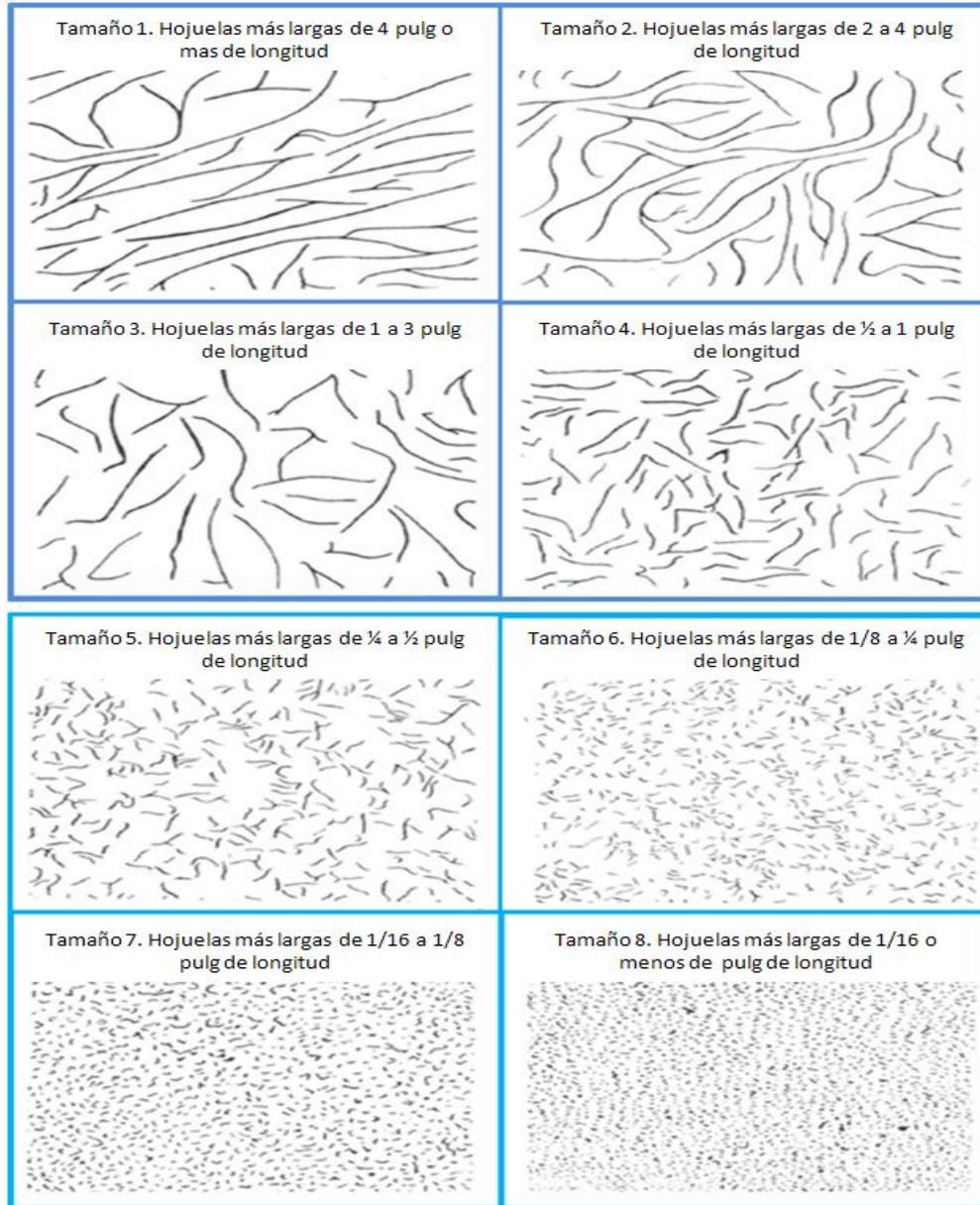
Los tamaños de las hojuelas de grafito generalmente se determinan por comparación con tamaños estándar reportados por la AFS (American Foundrymen's Society) y la ASTM (American Society for Testing Materials). El procedimiento para preparar y medir el tamaño de las hojuelas esta estandarizado de acuerdo a la norma ASTM A247. El método consiste básicamente en medir la longitud de las hojuelas de grafito en una metalografía pulida sin ataque del hierro gris a 100x. La tabla 5 aparece la asignación de los números y la figura 12 muestran el número de tamaño de hojuelas en función de la longitud de láminas y las figuras que representan estas mediciones respectivamente <sup>[4, 5, 6]</sup>.

**Tabla 4.** Tamaño de las hojuelas de grafito.

Número del tamaño de la hojuela	Longitud de las hojuelas más largas a 100X	
	AFS	
1	in	mm
2	4 o más	128
3	2-4	64
4	1-2	32
5	1/2-1	16
6	1/4-1/2	8
7	1/8-1/4	4
8	1/16-1/8	2
	1/16 o menos	1

Altos contenidos de carbono incrementan la cantidad de eutéctico y por lo tanto aumenta la cantidad de grafito formado, con lo cual se obtiene un hierro fundido con bajas propiedades mecánicas. El silicio es un fuerte grafitizante el cual incrementa la cantidad de eutéctico formado, reduciendo el tamaño de hojuela. La matriz obtenida con contenidos elevados de silicio probablemente será ferrítica y dará como resultado una pieza de fundición con bajas propiedades mecánicas.

## 2. ANTECEDENTES



**Figura 12.** Clasificación del tamaño de hojuelas de grafito de acuerdo a la norma ASTM A247. [2-5].

El mejor método para reducir el tamaño y mejorar la distribución de las hojuelas de grafito es mediante la adición de una pequeña cantidad de material conocido como inoculante. Los agentes de inoculación utilizados satisfactoriamente son el calcio metálico, aluminio, titanio, zirconio, ferrosilicio, carburo de silicio, siliciuro de calcio o combinaciones de estos. La forma de las hojuelas de grafito se clasifica en los tipos A-E de acuerdo a la clasificación AFS-ASTM de microestructuras de hierro gris fundido.

## 2. ANTECEDENTES

---

Las principales características que favorecen la formación de grafito son como se ha señalado antes, un elevado porcentaje de silicio y un enfriamiento relativamente lento. Experimentalmente se ha comprobado también que la presencia de núcleos de cristalización (agente inoculante) en la fase líquida, ejercen gran influencia en la formación del grafito. La temperatura de fusión y la temperatura de colada, también influyen en la cantidad, tamaño y distribución de las láminas de grafito <sup>[1-10]</sup>.

En la práctica casi nunca se transforma todo el carbono a grafito. La cantidad de grafito o cementita que se forme en cada caso depende de la influencia que ejerzan los factores que favorezcan la formación de grafito o que favorezca la formación de cementita. En general el grafito se forma más fácilmente a altas temperaturas que a bajas temperaturas y en fundiciones hipereutécticas se realiza más fácilmente la formación del grafito cuando la aleación está todavía líquida que cuando se encuentra en estado sólido <sup>[3-7]</sup>.

Las propiedades mecánicas y físicas del hierro gris se rigen por la forma, tamaño y distribución de las hojuelas de grafito. Un método para evaluar la distribución de las hojuelas de grafito y el tamaño, lo proporciona la norma ASTM A247 <sup>[4, 5]</sup>. Existen cinco tipos diferentes de distribución que se puede observar en la figura 13 <sup>[1-7]</sup>.

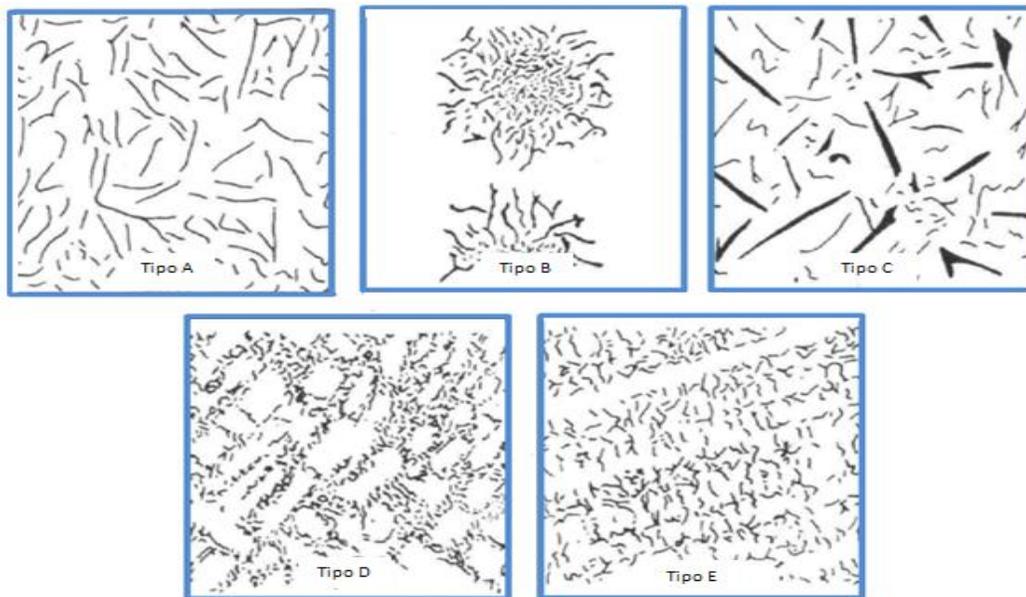
En el grafito tipo A, las láminas de grafito se distribuyen al azar orientadas a lo largo de la matriz de hierro, este tipo de grafito es comúnmente encontrado en fundiciones que solidifican con una cantidad mínima de sub-enfriamiento, así como este tipo de grafito es el más deseado si se requiere optimizar las propiedades mecánicas. <sup>[2,3]</sup>, para producir este tipo de grafito se añaden ciertas cantidades de materiales que producen nucleación heterogénea denominados inoculantes ya que estos materiales mejoran las condiciones de nucleación, y producen cambios apreciables en la morfología del grafito. La secuencia de solidificación es mostrada en la figura 14 (a), ya que el proceso de solidificación controla tanto la estructura como la uniformidad del grafito, lo que significa que el tamaño y distribución de las láminas determina la calidad de las fundiciones.

El grafito tipo B, se forma en los hierros que tienen una composición eutéctica, estos solidifican con una mayor cantidad de subenfriamiento, se presenta como rosetas de grafito fino, como se observa en la figura 13. Este tipo de grafito precipita al inicio de la solidificación eutéctica <sup>[2, 3,5]</sup>. Al iniciar la solidificación se observa un incremento de la temperatura como se observa en la

## 2. ANTECEDENTES

---

figura 14 (b). Esta morfología se debe a un mayor subenfriamiento que incrementa la fuerza motriz para la nucleación del grafito y por lo tanto la presencia de más sitios de nucleación<sup>[3-7]</sup>.

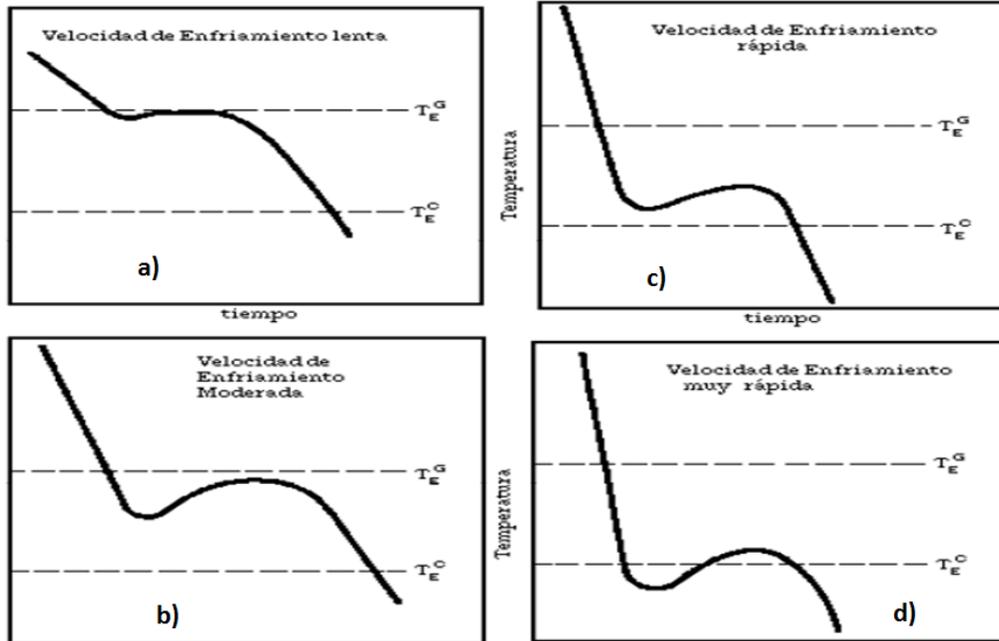


**Figura 13.** Tipos de hojuelas de grafito<sup>[4, 5, 6]</sup>.

El grafito tipo E, se obtiene cuando el subenfriamiento es muy alto pero no lo suficiente para la formación de carburos, ambos se encuentran en las regiones interdendríticas. El tipo D se caracteriza por una distribución aleatoria, con un enfriamiento mayor como se mencionó anteriormente como se puede observar en la figura 14 (c). En donde el subenfriamiento es lo suficientemente grande para generar un alto valor de enfriamiento cinético de manera que el calor de solidificación es insuficiente para el aumento de la temperatura del líquido a la temperatura eutéctica estable y esto da lugar a un grafito tipo D, mientras que el tipo E presenta una orientación preferencial, es muy parecido al tipo A, sólo que este tipo de grafito se localiza en las áreas interdendríticas, este tipo de grafito se produce en hierros que contienen un gran número de dendritas (bajos contenidos de CE) el esquema de enfriamiento se puede observar en la figura 14<sup>[3-7]</sup>.

El grafito tipo C que se muestra en la figura 13, es característico de hierros hipereutecticos, con un alto contenido de carbono, este precipita durante la solidificación primaria, frecuentemente aparece como hojuelas rectas, placas gruesas, lo que ocasiona una reducción en las propiedades mecánicas del hierro.

## 2. ANTECEDENTES



**Figura 14.** Proceso de solidificación para obtener los diferentes tipos de hojuelas de grafito, para enfriamientos a) lento, b) moderado, c) rápido, y d) muy rápido [7].

La clasificación del tamaño del grafito según la norma ASTM A247 se puede observar en la figura 13, en donde las escamas grandes están asociadas a hierros que tienen un CE alto y bajos intervalos de enfriamiento. Las escamas pequeñas son características de hierros hipoeutéticos y con una solidificación rápida [4-7].

### 2.7 Solidificación eutética

La solidificación eutética considera dos casos: a) el crecimiento de dos fases no afectadas, como por ejemplo en los sistemas metálicos y b) El crecimiento de la estructura que tiene una fase no afectada y una fase en facetas como el grafito eutético.

La teoría de crecimiento eutético se aplica a sistemas metalúrgicos, que emplean el análisis de la cinética de difusión. La teoría de nucleación eutética tiene una faceta que también considera la interface cinética.

Los sistemas eutéticos en metalurgia son regularmente de geometría ordinaria y consisten en forma de placas o de varillas, los sistemas eutéticos por lo general tiene una fase que es

## 2. ANTECEDENTES

---

generalmente irregular en su geometría, como por ejemplo, la solidificación eutéctica del hierro gris <sup>[27]</sup>.

### 2.8 Solidificación y estructura del hierro gris y el hierro blanco

#### Nucleación.

La nucleación en las fundiciones se describe como homogénea y heterogénea. En general, para las condiciones de fusión comerciales, la nucleación es heterogénea y este será el caso para el hierro fundido y todos los tipos de aleación, por ejemplo, hojuelas, esférico o grafito intermedio.

Sin embargo, usando materiales puros, y en particular las aleaciones con Ni-C, donde el metal utilizado en la experimentación está libre de impurezas, puede ser posible lograr la nucleación homogénea. Este puede ser el caso cuando se utilizan técnicas de fusión en vacío <sup>[28]</sup>.

#### Nucleación heterogénea del grafito.

La nucleación heterogénea del grafito es un estudio importante en la metalurgia del hierro gris. Esta debe ser examinada en relación a los metales que conforman la aleación líquida y también a su composición química. Algunos efectos estructurales relacionados con la nucleación heterogénea del grafito son:

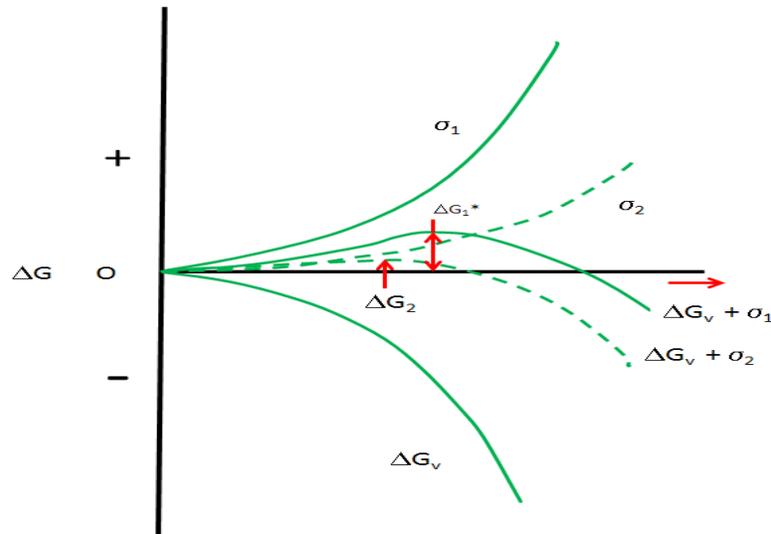
- a) La promoción de cristalización gris (grafito) en lugar de la modalidad alternativa color blanco (carburo).
- b) Evita la formación de estructuras no deseadas por sobre enfriamiento.
- c) En el hierro gris se genera un incremento en el conteo de celdas eutécticas (frecuentemente nucleación eutéctica)
- d) En la fundición nodular genera un incrementando en el número de nódulos <sup>[28]</sup>.

### 2.9 La Interface entre el grafito y la nucleación heterogénea

La energía libre interfacial  $\sigma$  entre la fase nucleada y el núcleo heterogéneo tiene una influencia importante en la energía libre crítica para la nucleación, esto se puede observar en la figura 15. Cuando la energía interfacial es igual a cero, el valor de  $\Delta G^*$  será cero y la nucleación teóricamente debe empezar con el enfriamiento, al pasar por debajo de la temperatura de

## 2. ANTECEDENTES

equilibrio. El valor de  $\sigma$  depende de la estructura de la nucleación heterogénea y considera diferentes efectos coherentes y semi-coherentes

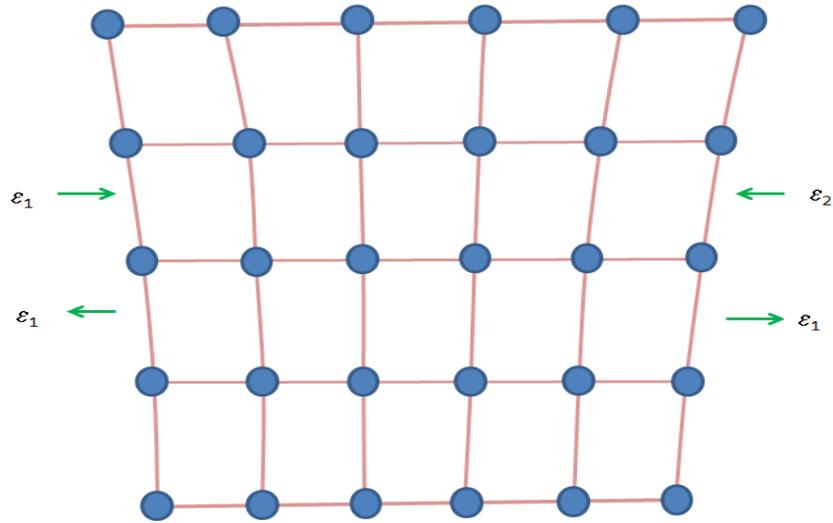


**Figura 15.** Cambio de energía libre durante la nucleación heterogénea sobre un sustrato.

Cuando la energía interfacial  $\sigma$  tiende a cero, la energía crítica para la nucleación tiende a cero.  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  tiene diferentes valores de energía  $\Delta G_1^*$  y  $\Delta G_2^*$ , los cuales corresponde a los valores de energía crítica de nucleación.

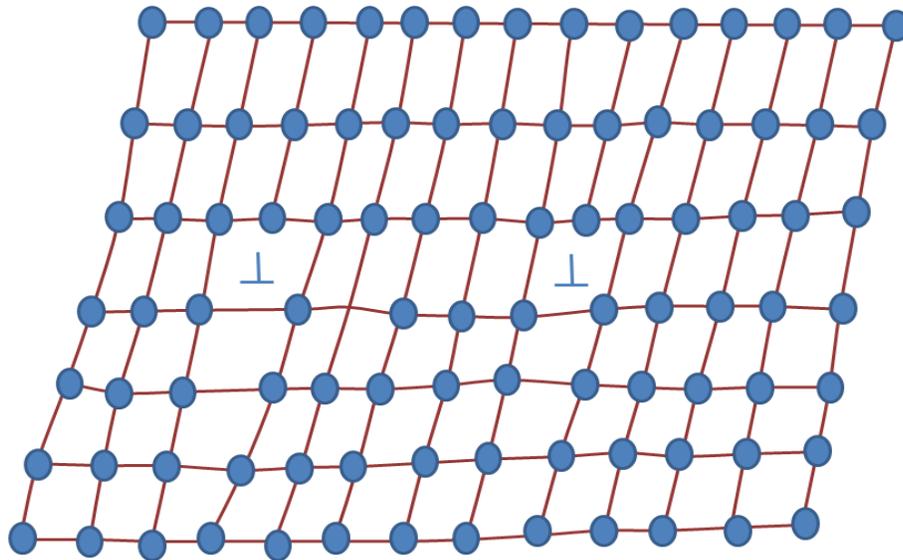
En la figura 16 se observa una interfaz coherente, en coincidencia entre los átomos que constituyen la interfaz. La equiparación de los planos implica tensiones en ambos lados. Estas se indican en la figura 16, donde el sustrato de nucleación está retrasado y la fase de nucleación se contrajo, generando dos tensiones son  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$ , y la tensión de la interface  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ .

## 2. ANTECEDENTES



**Figura 16.** Modelo de interfaz coherente entre dos fases.

Interface semi-coherente. Una interfaz semi-coherente está formada por regiones que tienden a encontrar una correspondencia perfecta con las regiones de desajuste. Esto puede representarse mediante un modelo de interfaz coherente con dislocaciones como se observa en la figura 17.



**Figura 17.** Modelo de interfaz semi-coherente con regiones de correspondencia perfecta alternadas con regiones sin correspondencia

## 2. ANTECEDENTES

---

En este caso, la energía interfacial está constituida de la energía de la región de comparación  $\sigma_\varepsilon$  y de la energía de la región inadaptada  $\sigma_s$ , donde esta última puede ser atribuida a la dislocación.

$$\sigma = \sigma_\varepsilon + \sigma_s \quad (2)$$

Este modelo de interfaz se debe a Van der Merwe <sup>[34]</sup>. Un ejemplo típico propuesto es la nucleación de la cara de un cristal hexagonal (0001), en la cara de una celda cubica (111), en estos planos cristalográficos, la estructura es idéntica. Esto es aplicable a la nucleación de la estructura del grafito hexagonal, por fases cubicas. Por las dos redes existe una distorsión que se puede calcular con la ecuación (3).

$$\delta = \frac{a_\alpha - a_\beta}{a_\beta} \quad (3)$$

Donde  $a_\alpha$  es el espacio reticular hexagonal (0001) y  $a_\beta$  es el espacio reticular cubico (111). El valor de  $a_\alpha$  puede ser obtenido por el grafito y  $a_\beta$  puede ser aplicado para diferentes fases sugeridas como núcleos de grafito. La distorsión se debe en parte por la tensión y en parte por las dislocaciones.

Se considera una interfaz incoherente cuando en la distorsión, la separación es menor en la dislocación, entonces el límite se convierte en lo que generalmente se denomina incoherente. Para la nucleación coherente, la energía de deformación puede ser grande y la energía de la superficie puede ser pequeña, de tal forma que la energía libre para la nucleación de interfaces coherentes y semi-coherentes se determina por la ecuación (4).

$$\Delta G^* = \frac{\mu V^\beta \varepsilon^2}{1 - \nu} \quad (4)$$

Donde:

$\mu$ = modulo de corte

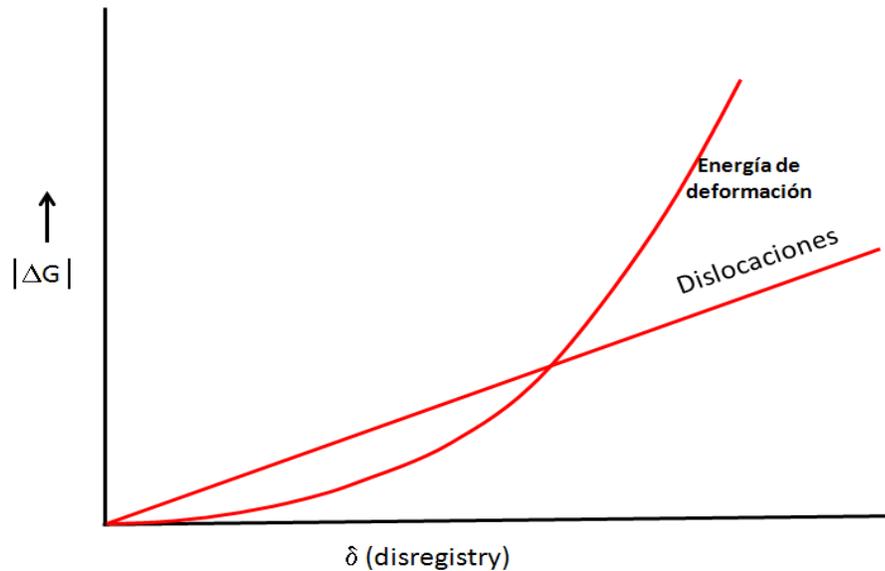
$\varepsilon$ =distorsión de los átomos a lo largo de una dirección

$\nu$ =relación de Poisson

$V^\beta$ =volumen específico de los átomos en la fase  $\beta$

## 2. ANTECEDENTES

Cuando la distorsión  $\delta$  incrementa, la contribución de  $\Delta G^*$  con la energía de deformación y el cambio de dislocaciones aumenta. Esto se observa en la figura 18 para una distorsión  $\delta$  pequeña, el termino energía de deformación es el preferido para la coherencia. A medida que  $\delta$  se incrementa, la energía de deformación se vuelve energéticamente más favorable para asumir el desajuste de las dislocaciones <sup>[28]</sup>.



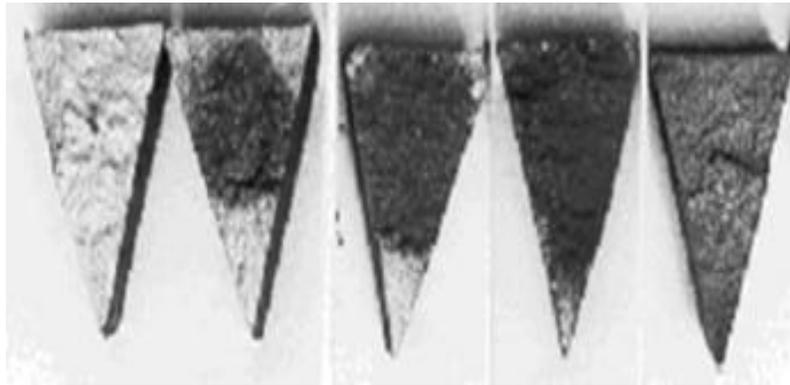
**Figura 18.** Energía libre de nucleación para interface coherente y semi-coherente.

### 2.10 Microestructura

La estructura de transición entre el hierro gris y el hierro blanco en las fundiciones de hierro, es el resultado del crecimiento y la competencia entre la nucleación eutéctica estable (gris y metaestable (blanco)). La nucleación y crecimiento se ven afectados por el intervalo de enfriamiento. Un alto contenido de carbono equivalente y una velocidad de enfriamiento lenta favorecen la solidificación para el hierro gris y condiciones opuestas promueven la formación del hierro blanco.

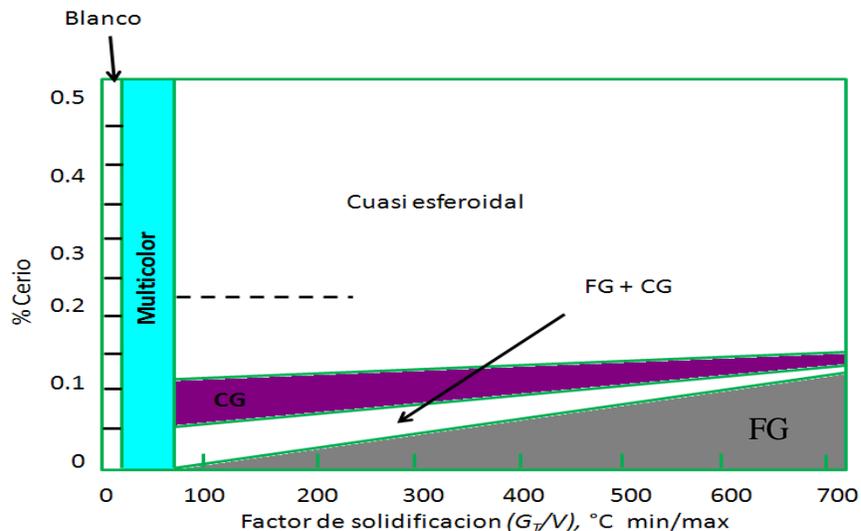
Una manera conveniente para demostrar la transición de hierro gris a hierro blanco en muestras metalográficas es mediante el uso de muestras obtenidas en la prueba cuña (figura 19), en esta prueba se incrementa el intervalo de enfriamiento desde la base hasta la punta de la cuña y se pueden manifestar todos los tipos de micro estructuras de las fundiciones de hierro, desde el hierro gris hasta el hierro blanco, dependiendo de las variables del proceso.

## 2. ANTECEDENTES



**Figura 19.**Fractura de la prueba de cuña, mostrando de izquierda a derecha la evolución de la fractura desde hierro blanco, combinado y por último gris.

La composición y el intervalo de enfriamiento también afectan la forma del grafito en el hierro gris. Si la solidificación direccional se lleva a cabo, el intervalo de enfriamiento puede ser dividido en dos variables independientes, la velocidad de solidificación ( $V$ ) y el gradiente de temperatura ( $G_T$ ). Entonces, las variables básicas del proceso que afectan la morfología del eutéctico son la proporción y composición ( $G_T/V$ ), como se observa en la figura 20.



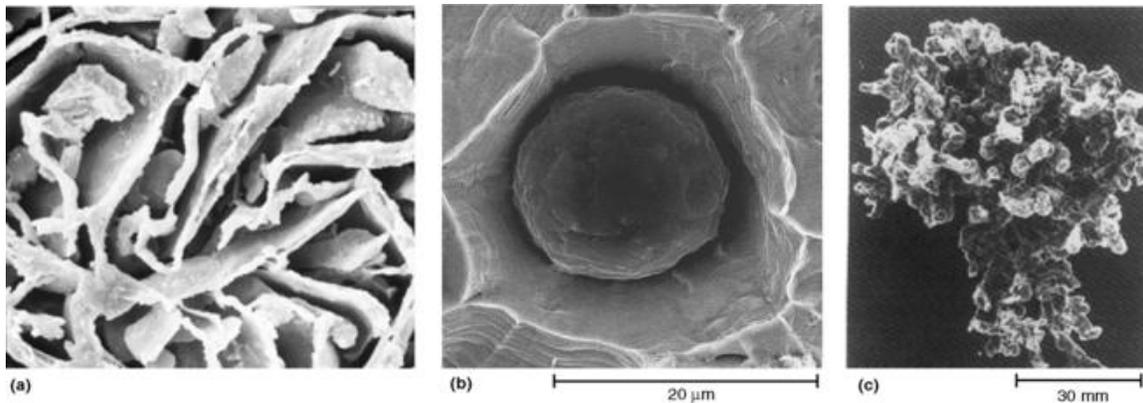
**Figura 20.** Influencia del factor de solidificación ( $G_T/V$ ) y el contenido de cerio en la transición estructural del hierro para un carbono equivalente constante. FG, hojuela de grafito, CG grafito compacto.

Es posible que se obtenga una variación entre el grafito y la matriz de la estructura en las fundiciones de hierro cuando varía la relación entre  $G_T/V$ , y el nivel de impurezas, tal como

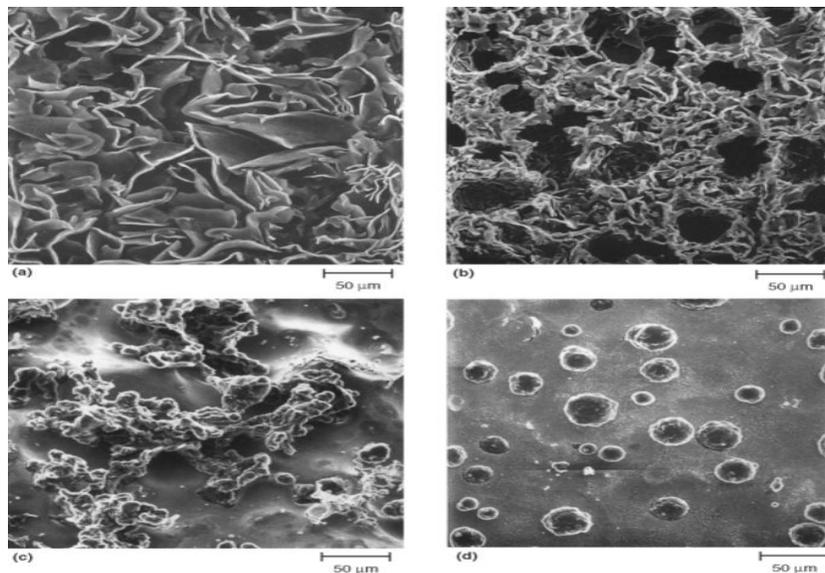
## 2. ANTECEDENTES

magnesio, cerio o azufre. En la figura 20 se determinó que en la transición de hierro gris a hierro blanco depende principalmente de la relación  $G_T/V$ , mientras que la transición entre las diferentes formas de grafito (laminar, compacto y esferoidal) depende de la concentración de cerio.

Ejemplos típicos de las diferentes morfologías del grafito, presentes durante la solidificación se observan en la figura 21 y 22 <sup>[27]</sup>.



**Figura 21.** Formas básicas de grafito en hierros comerciales obtenidas por a) grabado profundo, b) por extracción y c) a través de la disolución de la matriz.



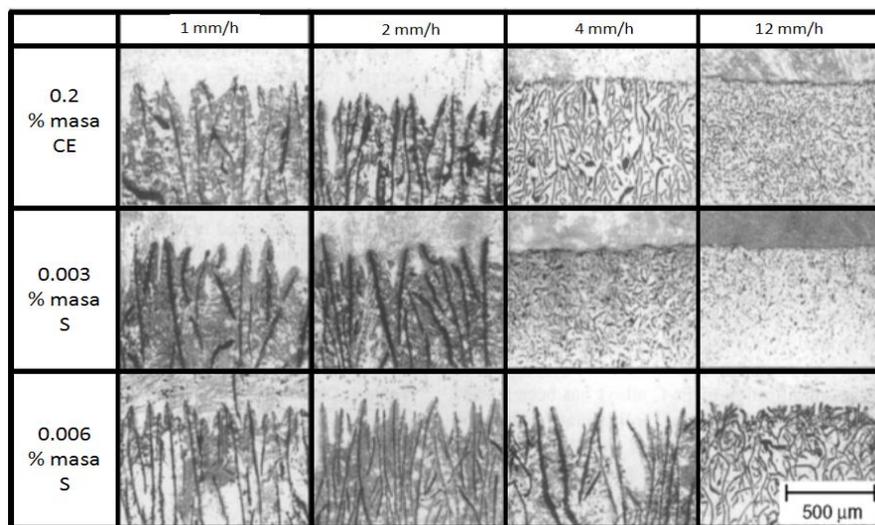
**Figura 22.** Micrografías obtenidas por MEB, de un hierro gris, a) hojuelas de grafito tipo A, b) grafito tipo D, c) grafito vermicular y d) grafito esferoidal, a 300X.

La escala de longitud de la hojuela de grafito laminar (espaciamiento inter laminar) está en función de la velocidad de enfriamiento y la composición. Para condiciones de altas velocidades de

## 2. ANTECEDENTES

enfriamiento, bajo CE, o bajo contenido de azufre, el espaciamiento interlaminar disminuye y el grafito sufre un cambio en su forma laminar de tipo A a tipo D.

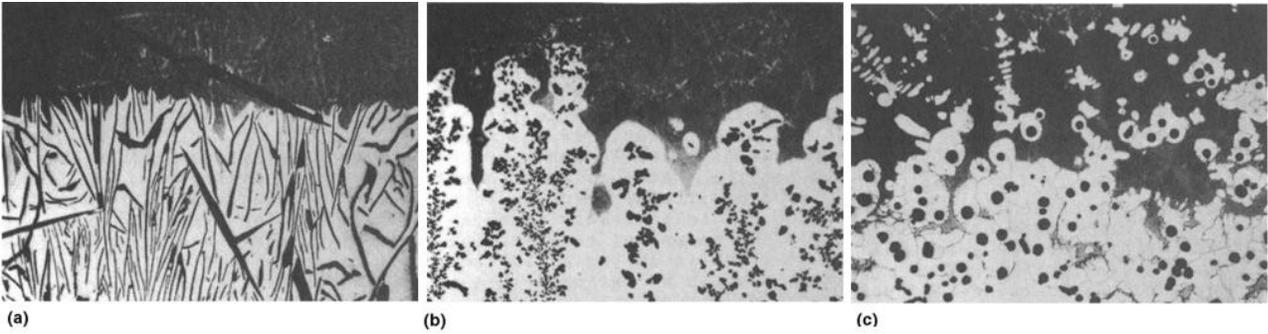
Un análisis más detallado de la influencia del azufre y del cerio sobre la morfología en la interfaz de las aleaciones hierro-carbono, que solidifican en austenita y grafito eutéctico se presentan en la figura 23. Se observa de manera clara que con el incremento de la velocidad de enfriamiento (de 1 mm/h a 12 mm/h), el espaciamiento interlaminar disminuye, y el grafito cambia de tipo A a tipo D. El mismo comportamiento se obtiene con la disminución del contenido de azufre de 0.012 hasta 0.003%. [27].



**Figura 23.** Influencia del contenido de azufre sobre la morfología en la interfaz de solidificación direccional de aleaciones hierro-carbono ( $C = 4.15$  a  $4.45$  % y  $Si < 0.017$ %).

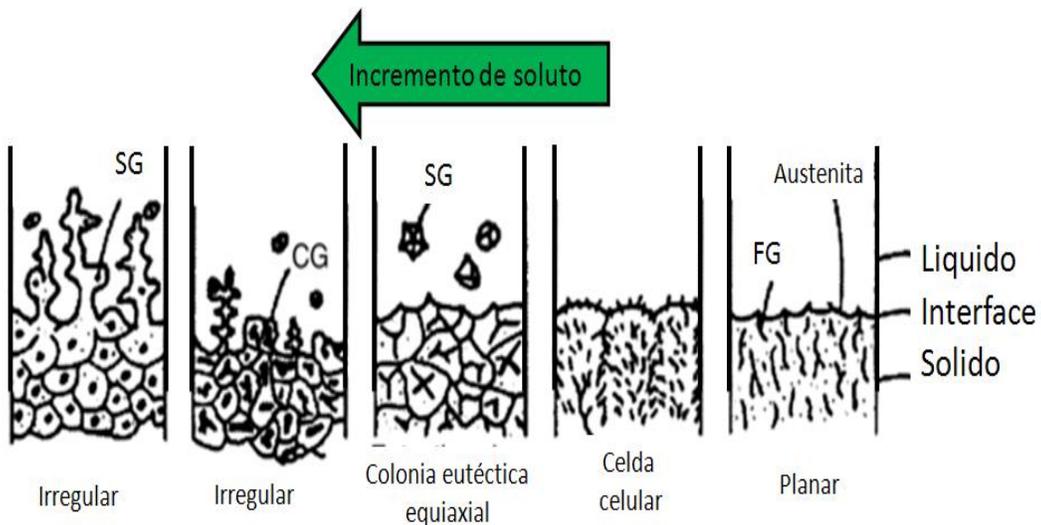
Una mayor explicación de la solidificación del hierro gris se puede observar en la figura 24, que muestra la morfología de la interfaz de la solidificación direccional de los hierros que contiene diversas cantidades de magnesio para diferentes velocidades de enfriamiento. La hojuela de grafito en el hierro exhibe una interfaz plana sólido-líquido (S/L) con el grafito de la fase principal (figura 24 a). Cuando la velocidad de enfriamiento se incrementa a  $5 \mu\text{m/s}$ , y cierta cantidad de magnesio es adicionado, los cambios en la interfaz de la morfología de grafito celular a grafito compacto ocurren (figura 24b). Contenidos elevados de magnesio ocasionan una desestabilización en la interface, la austenita crece como dendritas y se obtiene grafito esferoidal (figura 24c).

## 2. ANTECEDENTES



**Figura 24.** Morfología en la interface de la solidificación direccional de las fundiciones. (a) planar (hojuela de grafito), (b) celular (grafito compacto), (c) dendrítico (esferoidal)

La secuencia en los cambios de la morfología que ocurren en la solidificación direccional de los hierros grises, es una función del contenido de soluto. Como se puede observar en la figura 25, donde la relación entre el gradiente de temperatura en la interfaz S/L y la velocidad de crecimiento,  $G_T/V$  (*factor de solidificación*), hace que aumente o disminuya la composición ( $C_0$ ), por ejemplo magnesio o cerio, provocando cambios en la interface S/L, a partir de la forma plana, a celular y por ultimo a equiaxial, mientras que el grafito básicamente sigue estando en escamas. El crecimiento de la austenita se produce por el cambio adicional de  $G_T/V$  o de  $C_0$ , provocando una interfaz irregular, con dendritas de austenita que sobresalen en el líquido, ocasionando que el grafito esferoidal se compacte y el crecimiento eutéctico se divida.



**Figura 25.** Transición estructural en la solidificación direccional de las fundiciones.

## 2. ANTECEDENTES

---

Las propiedades y características del grafito precipitado son: forma, tamaño y distribución. Existe una correlación entre los diferentes tipos de morfología del grafito, la composición química y la velocidad de enfriamiento.

La hojuela de grafito en el hierro gris. Las hojuelas de grafito (laminar) es característico de los hierros grises y componentes tales como el aluminio, carbono y silicio promueven esta formación. Cuando la velocidad de enfriamiento se incrementa, se tiende a formar hojuelas y estas tienen una distribución interdendrítica.

En las fundiciones hay una gran variedad de elementos de aleación que tienden a formar carburos como por ejemplo: cromo, manganeso y vanadio, y elementos con bajo punto de fusión como: bismuto, plomo y azufre, la formación de carburos también afecta la morfología del grafito<sup>[27]</sup>.

### 2.11 Microestructura de la matriz

La matriz de las fundiciones grises, nodulares, grafito compacto y maleable, puede ser perlítica, ferrítica o una combinación de ambas. Los mismos constituyentes pueden estar presentes en la fundición blanca, en los precipitados de cementita, en lugar del grafito debido a la solidificación del sistema meta estable.

La matriz de la Microestructura depende de la composición química así como de la temperatura de transformación eutécticoide. La Microestructura de la matriz de las fundiciones tiende a ser perlítica pasando por perlítica-ferrítica a ferrítica, y depende del valor del CE.

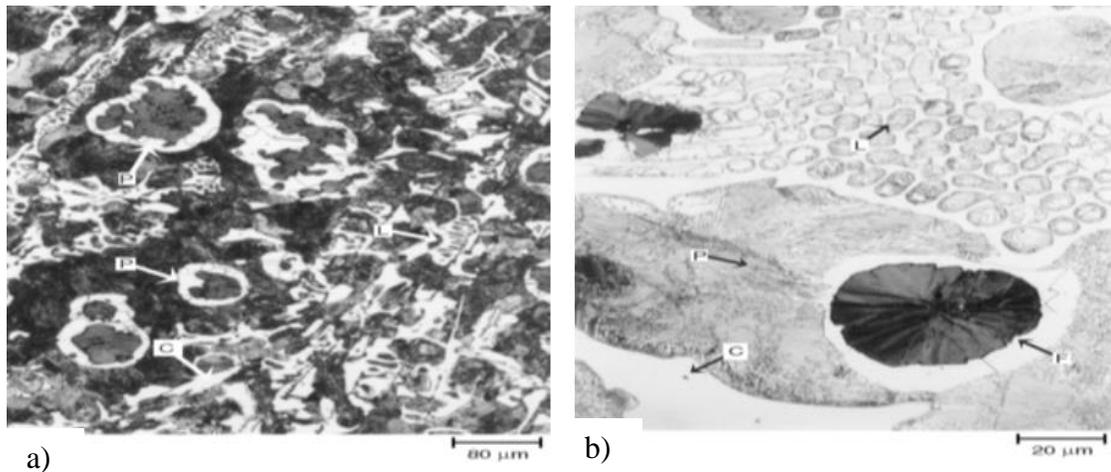
Otro componente característico de las microestructuras del hierro gris es el fósforo eutéctico, conocido como steadita. Este tipo de Microestructura eutéctica aparece en los hierros fundidos, con un contenido de fósforo de 0.7%. La forma eutéctica del fósforo depende de la composición química del hierro gris con una fuerte tendencia de solidificación de la cementita y con diversos elementos formadores de carburos, El eutéctico ternario puede también estar presente como largos precipitados de cementita o granos columnares.

Al aumentar la cantidad de elementos grafitizantes, tales como el silicio, se promueve la solidificación del fósforo eutéctico binario, en lugar del ternario. El eutéctico binario mejor

## 2. ANTECEDENTES

conocido como eutéctico pseudobinario, debido a que el carbono del eutéctico se elimina durante la difusión en estado sólido.

En la figura 26 se muestra la microestructura de un hierro dúctil perlítico con cementita y ledeburita, en este caso la cementita era un componente deseado en la microestructura para mejorar la resistencia al desgaste del hierro, este microconstituyente se obtiene agregando al metal fundido, una aleación hierro-magnesio sin inocular [27].



**Figura 26.** a) hierro dúctil (Fe-3.35%, C-2.05%, Si-0.08%, Mn-0.04, %P-0.02, %Cr-0.02, %Ni-0.045, %Mg-0.045), C, cementita, L, ledeburita, P, perlita y ferrita alrededor de los nódulos, 100X, Figura 26 b) C, cementita, L, ledeburita, F, ferrita y P, perlita, 500X.

### 2.12. Principales constituyentes de las fundiciones

**Grafito.** Es la forma elemental del carbono, es blando, de color gris oscuro, grasoso, se presenta en estado libre en algunas fundiciones ejerciendo una influencia muy importante en sus propiedades y características. Refiriéndose a fundiciones grises se puede decir que la presencia en contenidos elevados, baja la dureza, la resistencia y el módulo de elasticidad. El grafito mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión, ya que en cierto modo actúa como un lubricante.

**Steadita.** Compuesto de naturaleza eutéctica, que es duro y frágil, de bajo punto de fusión que aparece en las fundiciones con alto contenido de fósforo. En la fundición gris, la steadita está compuesta de un eutéctico binario de ferrita y fósforo de hierro. Este compuesto puede disminuir las propiedades mecánicas

## 2. ANTECEDENTES

---

**Ferrita.** Contiene importantes cantidades de silicio disueltos, que elevan la dureza y la resistencia. Es blanda y de bajo contenido de carbono.

**Perlita.** Es el producto de transformación eutectoide y en un hierro gris se compone de placas alternadas de ferrita y cementita.

**Ledeburita.** La ledeburita no existe a temperatura ambiente en las fundiciones ordinarias debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita; sin embargo en las fundiciones se pueden conocer las zonas donde existió la ledeburita, por el aspecto eutéctico con que quedan estas zonas de perlita y cementita.

**Cementita.** Es un compuesto duro, frágil intermetálico. Su formación se ve favorecida en las áreas donde un rápido enfriamiento se lleva a cabo, como en secciones delgadas, en las esquinas y a lo largo de la superficie del modelo <sup>[1-10]</sup>.

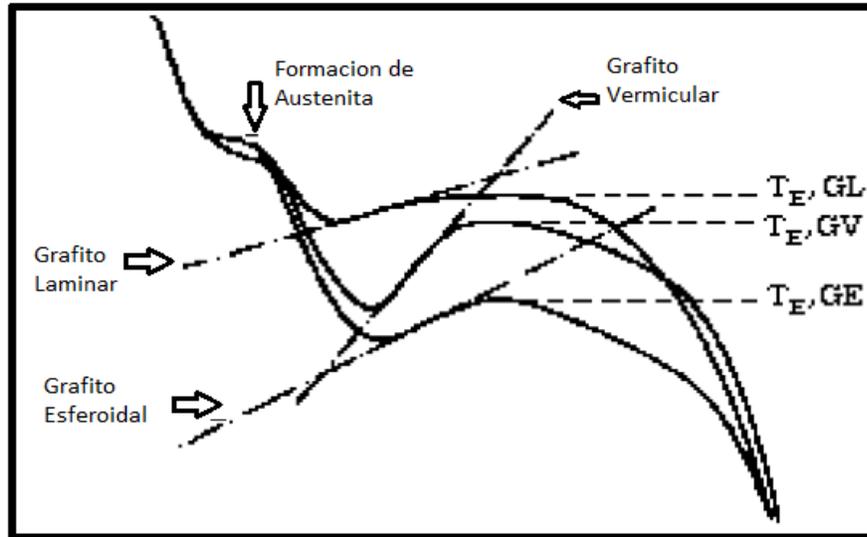
### 2.13. Inoculación

Este proceso se define como el último paso donde se hace la adición de ciertos agentes como pueden ser aleaciones de ferrosilicio, para producir cambios en la distribución del grafito y poder producir cambios en la microestructura y propiedades de los hierros sin afectar su composición química. Uno de los propósitos del inoculante es el de aumentar el número de núcleos en el hierro para que se lleve a cabo la solidificación eutéctica, específicamente la precipitación del grafito. Las principales características del proceso de inoculación que afectan la eficacia del inoculante son: Un adecuado tiempo de permanencia del inoculante en el estado líquido, el valor del contenido de carbono equivalente (CE), este debe ser bajo si se quiere tener una mejor eficiencia del inoculante. Existe una cantidad óptima de inoculante que debe ser añadida al hierro ya que no por aumentar la cantidad de inoculante aumenta el efecto de inoculación.

La inoculación tiene varios efectos, estos son: a) el aumento de las celdas eutécticas, independientemente de la velocidad de enfriamiento y de la composición química, b) cambio en la forma del grafito, y c) según el grado de subenfriamiento; como se observa en la figura 27. La inoculación produce cambios en las temperaturas del punto eutéctico y establece que tipo de subenfriamiento se debe tener para fundiciones con grafito laminar y grafito esferoidal y en un

## 2. ANTECEDENTES

término intermedio el grafito vermicular. Los principales agentes de inoculación son: calcio metálico, aluminio, estroncio, bario, titanio, y circonio, como inoculantes elementales; carburo de silicio, ferro-silicio, y siliciuro de calcio, como inoculantes binarios; y los inoculantes complejos que contienen como base a los elementos calcio, aluminio, bario, y estroncio, junto a silicio, manganeso, y circonio que facilitan la inoculación [3, 4, 7].



**Figura 27.** Formación del grafito según el subenfriamiento ( $T_E$ , temperatura eutéctica, GL grafito laminar, GV grafito vermicular, GE grafito esferoidal) [7].

La inoculación puede ayudar a mejorar las propiedades del material como la resistencia a la tensión, esto es factible para determinados tipos de hierro con un carbono equivalente bajo ya que como sabemos la resistencia a la tensión disminuye conforme aumenta el contenido de carbono equivalente, otro de los beneficios de este proceso es que reduce la formación de carburos y minimiza la zona de enfriamiento [1-5].

Los principales componentes de la mayoría de los inoculantes comerciales utilizados en la fusión de hierros, son Fe y Si. Sin embargo cantidades pequeñas de otros elementos pueden estar presentes, por ejemplo: Ca, Al, Zr, Ba, Sr y Ti. En el proceso Meehanite pequeñas cantidades de metales alcalinotérreos, por ejemplo: Ca, Mg, y Ba, son introducidos [28].

Los hierros fundidos en su mayoría son hipo-eutécticos, en la composición y normalmente se caracterizan por el crecimiento primario de la fase  $\gamma$ . La inoculación previene eficazmente las

## 2. ANTECEDENTES

---

estructuras dominadas por esta fase. La solidificación interdendrítica del grafito eutéctico dará lugar a estructuras indeseables y en las secciones más delgadas del eutéctico dominará el crecimiento de la ledeburita eutéctica<sup>[28]</sup>.

El número de celdas eutécticas está influenciada por la inoculación y se relaciona con la resistencia mecánica. La influencia de la resistencia mecánica sobre la inoculación. Por ejemplo la dependencia del número de celdas en la concentración del silicio, azufre, y elementos en menores contenidos, indican que el núcleo del grafito en el hierro es muy complejo<sup>[28]</sup>.

Mientras que diferentes modelos del método de inoculación en los hierros han sido presentados. El análisis de datos experimentales indican que la nucleación del grafito se debe, principalmente al  $\text{SiO}_2$  y a otros elementos presentes en la red, que probablemente formen adiciones importantes debido a su afinidad con el oxígeno, aunque no parece que afecten el parámetro de red de la fase del  $\text{SiO}_2$ . Este tipo de nucleación es compleja y se hace evidente a partir del estudio experimental. Una propuesta que describe la nucleación se debe de tomar como una demostración de un proceso de dos etapas, en el que la formación del óxido es predicha por la formación de un sulfuro<sup>[28]</sup>.

### 2.13.1. Tipos de inoculantes

Aleaciones de grafito o ferrosilicio se pueden utilizar como inoculantes para el hierro gris, donde los tipos de grafito pueden ser altamente cristalino o de forma amorfa. El grafito se utiliza de forma muy escasa de forma sola y es por eso que se prefiere utilizar en combinación con ferrosilicio. Sin embargo, la adición de grafito no ha obtenido resultados completamente favorables, debido a que se requiere una alta temperatura para que se asegure su completa disolución. Las aleaciones de ferrosilicio se utilizan ampliamente para inocular hierro gris, además de contener a otros elementos de inoculación como son: el aluminio, bario, cerio u otras tierras raras, la ventaja del ferrosilicio es que se disuelve muy fácilmente en el hierro y ayuda a la distribución uniforme de los demás elementos en el baño metálico.

Es importante comentar que los elementos reactivos no solo reaccionan con el hierro sino que también reaccionan con el azufre y el oxígeno del baño, por lo que su adición da lugar a la formación de escoria. En la tabla 6 se observa la composición química de algunos inoculantes comerciales base ferrosilicio. Los inoculantes se dividen en cuatro categorías de acuerdo a su

## 2. ANTECEDENTES

desempeño, estas son: estándar, intermedia, de alta potencia y de estabilización, como se observa en la tabla 5. <sup>[3-7]</sup>

**Tabla 5.** Composición de algunos inoculantes base ferrosilicio para fundición gris.

Categoría del inoculante	Composición %									
	Si	Al	Ca	Ba	Ce	TRE	Ti	Mn	Sr	otros
Estándar	46-	0.5-	0.60-							
	50	1.25	0.90							
	74-	1.25	0.50-							
	69	Max	1.0							
Medio	74-	0.75-	1.0-1.5							
	79	1.5								
	50-		0.5-1.5				9-11			
Alto	55									
	36-				9-11	10.5-15				
	40									
	46-	0.50	0.10						0.60-	
	50	Max	Max						1.0	

El aluminio es un elemento que se encuentra en todos los inoculantes a base de ferrosilicio en diversas cantidades, este elemento es de gran importancia ya que controla la formación del hierro gris en frío, pero a su vez es un tema de gran debate entre los investigadores ya que este elemento está relacionado con la formación de porosidades en las piezas de fundición fabricadas en moldeo en verde debido a su gran afinidad por absorber hidrógeno. Los inoculantes estabilizadores están diseñados para promover la formación de perlita y ofrecer al mismo tiempo la grafitización durante la solidificación. Son útiles en la producción de piezas de fundición de alta resistencia con un mínimo de fragilidad y también ayuda a evitar la formación de la ferrita en secciones gruesas. Los inoculantes estabilizadores normalmente emplean cromo para estabilizar la perlita, debido a que este tipo de aleaciones son difíciles de disolver.

Existe una gran variedad de métodos para evaluar la eficacia de los inoculantes, un método muy empleado es la evaluación por medio de cuñas, o por pruebas en frío, de acuerdo a la norma ASTM A 367. El proceso de inoculación se sabe que aumenta las celdas eutécticas del hierro gris por lo que puede considerarse como un indicador del estado de nucleación, otro método que existe para observar el rendimiento de un inoculante es mediante la evaluación de las propiedades

## 2. ANTECEDENTES

---

mecánicas y de la microestructura, ya que si se indica la presencia de grafito tipo A, en lugar de carburos se tendrá un aumento en las propiedades mecánicas en especial la resistencia a la tensión. Otro método que se puede utilizar para evaluar el rendimiento de un inoculante es mediante las curvas de enfriamiento, donde la sección más recta de la curva puede ser utilizada como indicador para indicar la eficacia del inoculante [2, -8].

### 2.13.2. Métodos de adición del inoculante

La inoculación por cuchara, es un método muy común en las fundición de hierro gris, en este método de adición se tiene que dejar en el fondo de la cuchara una pequeña cantidad de metal líquido para agregar sobre esta el inoculante y a la hora de volver a llenar la cuchara este se distribuya de manera uniforme en el hierro. El efecto máximo de un inoculante se realiza inmediatamente después de que la aleación se disuelve en el metal líquido, pero es posible que el efecto del inoculante se pueda perder en los primeros 5 minutos después de la etapa de inoculación. La inoculación de flujo requiere que la aleación se añada a la corriente del metal líquido que fluye desde la cuchara hasta que se vierte en el molde. Un tamaño uniforme en el inoculante parece ser un factor importante en el proceso de inoculación de flujo. Ya que un gran tamaño puede causar obstrucciones y una disolución incompleta. Por lo que se recomienda un tamaño de partícula de 8 a 30 mallas.

Otro método de inoculación es el que se lleva a cabo en el molde, este proceso de inoculación implica la colocación de la aleación en el sistema de colada, por ejemplo en la vasija, en la base del bebedero o en cámaras adecuadas en el sistema del corredor. Para este método se recomienda triturar el material en polvo para poder tener una mejor disolución de la aleación, se recomienda que se triture aun número de malla de 20 a 70. La inoculación en molde es utilizada como un complemento a la inoculación de cuchara. Existen varias ventajas de las inoculaciones finales sobre la cuchara; donde la decoloración de la fundición es prácticamente eliminada, una mayor inoculación a medida que se presenta una mayor coherencia en la microestructura de fundición, es más eficaz por la prevención de formación de carburos en secciones delgadas, eliminado así el tratamiento térmico. [2, 6, 7, 8, 9]

## 2. ANTECEDENTES

---

### 2.14. Estado del arte

M. Chisamera, y colaboradores <sup>[15]</sup> estudiaron la nucleación del grafito en fundiciones de hierro gris con diferentes contenidos de azufre (0.02-0.1%), aluminio residual (0.001-0.010 %), y zirconio (0.001-0.015 %), en fundiciones de hierro. Encontraron que tres grupos de elementos son importantes en la nucleación del grafito en fundiciones de hierro gris, estos son:(a) elementos desoxidantes como el Al y Zr promueven la formación de inclusiones muy pequeñas, generalmente óxidos, que posteriormente actuaran como sitios de nucleación y más tarde servirán para formar compuestos complejos que contengan azufre como por ejemplo MnS (b). El S y Mn promueven la formación de MnS el cual propicia sitios de nucleación para el grafito, (c). La inoculación con elementos como el Ca y Sr en primera instancia actúan en la formación del grafito, para mejorar las capacidades de estos compuestos ayudaran a la nucleación del grafito. Determinaron que un 0.07% de azufre es benéfico para la nucleación del grafito en fundiciones de hierro gris, y que no sólo la inoculación sino también el preacondicionamiento del metal con elementos como el Al y Zr tienen un fuerte efecto benéfico sobre el patrón de solidificación de fundiciones de hierro y en la formación del grafito tipo A en fundiciones grises con un grado de subenfriamiento menor y con menos carburo ya que estos elementos se asociaron a una aleación compleja base ferrosilicio, que fue muy eficiente en el pre-acondicionamiento de los hierros grises para fundiciones de paredes delgadas.

H. Nakae <sup>[13]</sup> estudió el efecto de la adición de inoculantes y su desarrollo mediante el análisis de los cambios morfológicos del grafito partiendo de un grafito tipo D para obtener uno tipo A mediante la adición de un inoculante con titanio, debido a que este elemento promueve el aumento o disminución de celdas eutécticas. Determinó el efecto del titanio sobre la velocidad y el comportamiento de solidificación (isotermas y temperatura de solidificación). La variación del comportamiento de solidificación depende de los cambios morfológicos del grafito, por ejemplo, si la velocidad de solidificación es mayor a la velocidad crítica o la isoterma es mayor que el valor crítico, entonces se producirán cambios en el grafito considerando que los valores críticos se ven influenciados por la composición química del hierro, inoculantes (Ti, Si) y la velocidad de enfriamiento.

A Vadiraj y colaboradores <sup>[14]</sup> fabricaron aleaciones de hierro gris con y sin inoculante comercial a base de tierras raras (mish 0.1%), compararon propiedades de desgaste con hierros

## 2. ANTECEDENTES

---

grises convencionales utilizados para una aplicación típica de embrague de vehículos comerciales pesados. Donde las aleaciones de hierro gris sin inoculante misch mostraron un mayor volumen de perlita cerca de un 89% y un menor porcentaje de escamas de grafito 11% en comparación con el hierro gris con inoculante misch, el cual presento un 15 % de grafito laminar y 85 % de perlita como matriz, con resistencia a la tensión de 300 a 344 MPa y durezas entre 221 a 247 VHN. La adición del inoculante misch incrementó el volumen del grafito de un 40 a un 60% con la correspondiente disminución de resistencia y dureza en las aleaciones de hierros grises fabricadas. Sin embargo el desgaste de estas aleaciones disminuyo en un 34% en comparación con las aleaciones sin inoculante misch para pruebas de desgaste a dos diferentes velocidades de deslizamiento a 1.6 m/s y a 2.5 m/s. Los hierros inoculados con un contenido de azufre inferior a 0.08% mostraron un mayor grado de desgaste a mayor velocidad de deslizamiento debido a la menor densidad de escamas de grafito en comparación con el hierro que contiene un porcentaje mayor al 0.12% de azufre, lo que indicó que la resistencia al desgaste se ve influenciada por la cantidad de grafito que se libera en la interfaz durante el deslizamiento para proporcionar la lubricación y reducir el desgaste. Por lo que concluyeron que el inoculante de la tierra rara misch tiene una influencia positiva sobre la morfología del grafito en el hierro gris

K. Edalati y colaboradores <sup>[19]</sup> estudiaron la influencia del ferrosilicio y el carburo de silicio como portadores de silicio en las curvas de enfriamiento, la fluidez, la microestructura y la dureza en hierros grises hipoeutecticos vaciados a diferentes temperaturas. Determinaron que la adición de carburo de silicio en lugar de ferrosilicio ocasiona la variación de la microestructura junto con un incremento de la fluidez, además de que se obtuvo una mayor cantidad de grafito tipo A con una distribución de hojuelas más uniforme. Estos resultados se atribuyeron a la etapa de pre-inoculación con carburo de silicio en las fundiciones de hierro gris fabricadas con una ligera decoloración de la fundición durante la solidificación.

G.L. Rivera y colaboradores <sup>[17]</sup> estudiaron la solidificación hipoeutectica e hipereutectica del hierro gris utilizando técnicas novedosas como la técnica macrografica DAAS que fue utilizada para revelar la microestructura de un hierro gris hipoeutectico e hipereutectico, otra técnica utilizada fue la de metalografía de color, para revelar los sitios donde se encuentran las dendritas de austenita y su interacción con las láminas de grafito. Determinaron que la naturaleza de la

## 2. ANTECEDENTES

---

macro y microestructura sugiere que el mecanismo de solidificación es diferente de la forma generalmente aceptada. Este estudio demostró que el crecimiento de las dendritas de austenita es predominante no sólo para los hierros grises hipoeutecticos sino también para los hipereutecticos.

M. Hillert <sup>[16]</sup> determino la orientación de la austenita a temperatura ambiente, la cual normalmente se transforma en martensita mediante enfriamientos rápidos durante las etapas de solidificación natural, técnica que fue empleado por Boyle <sup>[32]</sup>, mientras que Hultgreen <sup>[33]</sup>, estableció que la solidificación de las fundiciones grises normalmente empieza con la formación de grandes dendritas de austenita. M.Hillert <sup>[12]</sup> determino que Boyle <sup>[32]</sup>, Hultgreen <sup>[33]</sup> y Rivera <sup>[13]</sup>, tenían la impresión de que cada celda eutéctica tiene sus propios núcleos de grafito y austenita estando establecido que la austenita en forma de dendritas estaba presente mucho antes de la formación de colonias eutécticas, debido a que varios de estos autores consideran que la estructura del grano es similar entre muestras del mismo tamaño, sin embargo, no consideraron el carbono equivalente, por lo que se debe tomar en cuenta que la fase primaria es la austenita ya que esta no debe ser afectada por la reacción eutéctica. Por último M. Hillert <sup>[12]</sup> aclara que cada celda eutéctica está compuesta por dos cristales entrelazados que son uno de grafito y uno de austenita, que debe ser considerado como celda eutéctica, por el hecho de que la austenita se deriva de dendritas y puede tener la misma orientación que la austenita de las celdas eutécticas vecinas.

H. R. Ababasi <sup>[29]</sup> determino el efecto del fósforo como elemento de aleación en la microestructura, la temperatura eutéctica, dureza y propiedades mecánicas, de cinco hierros grises con diferentes contenidos de fosforo (0.5, 1, 1.5, 2 y 2.5 %P). Los resultados muestran que el incremento de fosforo de 0.45 a 2.58 % en fundición gris, aumenta la cantidad de fósforo eutéctico de 4.7 a 17.81 %, se debilitan las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y resistencia al impacto), se incrementó la dureza y la temperatura eutéctica disminuye de 1139.7 a 1102.5 °C.

A. Sommerfeld <sup>[30]</sup> propone que la forma y distribución del grafito en el hierro gris tiene mucha influencia en las propiedades mecánicas y depende de numerosos factores, tales como la nucleación y la velocidad de enfriamiento. Por lo que investigo la influencia del manganeso, azufre y oxígeno, en la nucleación del grafito laminar en las fundiciones. Estudios anteriores <sup>[14]</sup> han demostrado que la nucleación es iniciada por un MnS. Los resultados experimentales fueron

## 2. ANTECEDENTES

---

comparados y calculados con el software Thermo-Calc. Mostrando que el contenido de Mn, S y la relación Mn/S, respectivamente, juega un papel muy importante para la nucleación. Sin embargo no se observó una influencia directa del O<sub>2</sub> en la nucleación.

## 3. EXPERIMENTACION

---

### 3. Experimentación

En la parte experimental de este trabajo se llevaron a cabo pruebas de fusión en un horno de inducción para la obtención de hierros grises con la adición de agentes inoculantes comerciales (Ca, Ba), desoxidantes (Al) y desulfurantes (Mg) para evaluar el efecto en la nucleación de las hojuelas de grafito. Previamente se caracterizó un disco de freno reciclado para determinar su composición química, su microestructura y propiedades mecánicas, con esta información se fabricaron hierros grises grado automotriz con aplicaciones en disco de freno. Los hierros fabricados se caracterizaron microestructuralmente con las normas ASTM A 159 y A247. Para determinar el tipo de distribución y tamaño de hojuela.

La caracterización mecánica se llevó a cabo mediante las normas ASTM A 395 y E8, para determinar dureza y resistencia a la tensión, respectivamente. El análisis químico se determinó mediante el espectrofotómetro de emisión óptico (equipo de chispa).

Para el desarrollo experimental de este trabajo, se utilizaron los siguientes materiales y equipos.

#### ***Materiales.***

*Acero AISI SAE 1018 en barra, con la siguiente composición*



C	Si	Mn	P	S
0.2 %	0.35%	0.45%	0.05%	0.05%

*Metal soret, con la siguiente composición*



C	Si	Mn	P	S
0%	0.079%	0.028%	0.041%	0.03%

### 3. EXPERIMENTACION

#### Grafito



C	S	N	Cenizas	Materia volátil
98%	0.05 máx.	0.03 máx.	8.0 máx.	1.7 máx.

#### Retorno de hierro nodular.



C	Si	Mn	P	S
3.60%	2.50%	0.3 % max.	0.02% max.	0.015%max.

*Inoculantes comerciales "Cabala y Calcifer" con la siguiente composición.*

Calcifer	
Elemento	%
Si	7.56
Ca	1
Al	0.9
Ba	1.1

Cabala	
Elemento	%
Si	7.56
Ca	1
Al	0.9

*Desulfurantes: se utilizaron dos desulfurantes base Mg, Noduloy (5R y 9C3)*

Noduloy 5R		Noduloy 9C3	
Elemento	%	Elemento	%
Si	49-50	Si	44-45
Ca	1	Ca	3.3
Al	1.2	Al	1.15
Mg	7	Mg	8
Ce+La	1	Ce+La	2.8
otros	0.5	otros	0.4

### 3. EXPERIMENTACION

---

*Desoxidantes: aluminio*



*Ferrosilicio al 75%*



**Equipos:**

- Horno de inducción marca Inductotherm
- Espectrómetro marca OXFORD
- Placas modelo ( disco de freno, placas escalonada, probetas de tensión)
- Máquina de tensión SHIMADZU
- Microscopio Óptico
- Durómetro Albert Gnehm

#### **3.1. Descripción de los equipos.**

##### ***Horno de inducción.***

Las pruebas de fusión se realizaron en un horno de inducción de 30 kg de alta frecuencia como se observa en la figura 28, sin núcleo de la marca Inductotherm. Este horno consiste en un crisol cubierto de material refractario rodeado por una bobina hueca de cobre que se enfría con agua que está conectada a una fuente eléctrica de alta energía. La bobina puede estar sostenida por unas barras verticales que pueden actuar como yugos magnéticos. El campo magnético crea una agitación en el crisol del horno. En este tipo de hornos la fusión se lleva a cabo a través de la conversión de un campo magnético inducido en calor en la carga metálica.

### 3. EXPERIMENTACION

---



**Figura 28.** Horno de inducción marca Inductoherm.

#### ***Máquina de tensión Shimadzu***

Esta máquina tiene una capacidad de 10 toneladas, en la cual se realizaron las pruebas de tensión como se observa en la figura 29.



**Figura 29.** Máquina de tensión Shimadzu.

#### ***Espectrómetro***

Espectrómetro marca OXFORD, en el cual se pueden analizar diversos tipos de aleaciones, siempre y cuando el equipo este correctamente calibrado, para realizar la prueba no se necesita mucho material, debe tener una superficie plana no pulida para poder realizar el ensayo a la chispa. En este equipo se realizó el análisis químico de los hierros fabricados para conocer con precisión su composición química. La figura 30, muestra el equipo utilizado.

### 3. EXPERIMENTACION

---



**Figura 30.** Espectrómetro.

#### ***Placas modelo***

- Freno de disco.- placa diseñada para poder fabricar un freno de disco a partir de un hierro gris, como se observa en la figura 31, con la cual se determinó la homogeneidad de la microestructura en toda la pieza.



**Figura 31.** Modelo de disco de freno.

- *Y block*.- placa modelo estandarizada por ASTM A 395 (figura 32), con la que es posible obtener probetas para ensayos de tensión para cada colada y poder determinar su resistencia a la tensión

### 3. EXPERIMENTACION

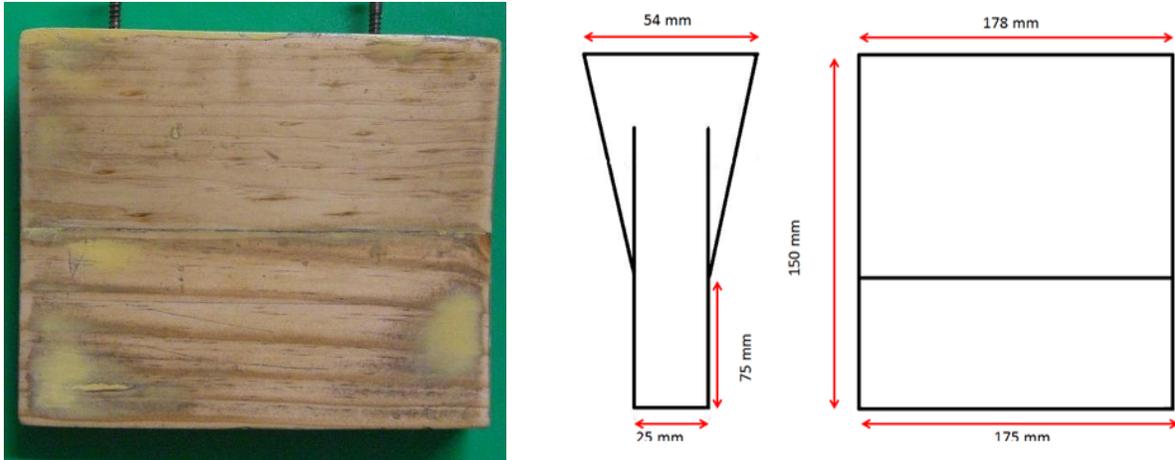


Figura 32. Modelo y esquema de Yblock

- *Escalonada*.- placa con diferentes secciones y con un intervalo entre cada espesor de 1 a 1/6 de pulgada para poder evaluar el efecto del espesor sobre la velocidad de enfriamiento y poder evaluar sus propiedades mecánicas como se observa en la figura 33.

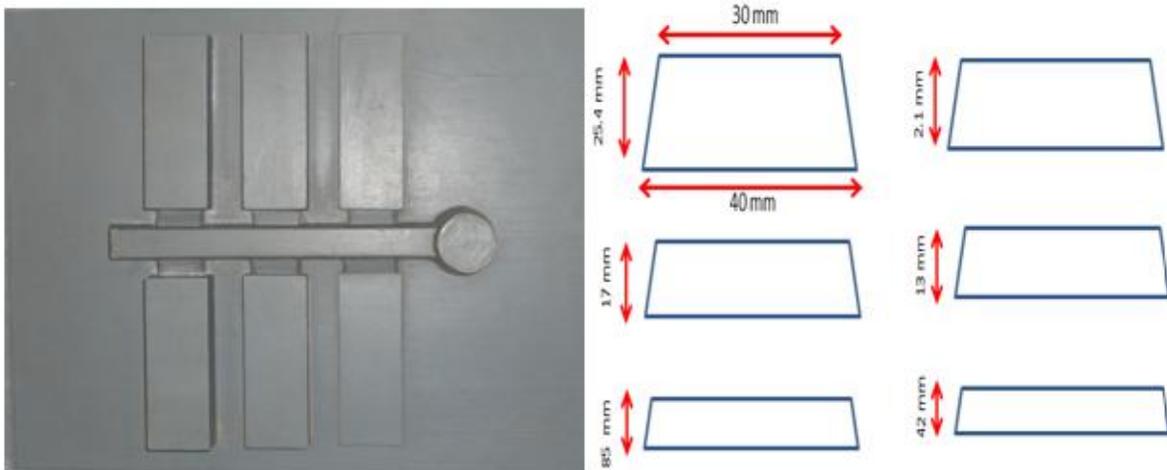


Figura 33. Modelo y esquema de placa escalonada.

#### **Durómetro Albert Gnehm.**

Durómetro que se utilizó para realizar las pruebas de dureza de las aleaciones producidas. La dureza se determinó en la escala Rockwell B, usando un indentador de balín con un diámetro de 1/16 de pulg; con una carga de 100 kg , o con indentador de diamante para una carga de 150 kg.

### 3. EXPERIMENTACION



**Figura 34.** Durómetro para realizar dureza Rockwell B.

#### **Programa Carnoy**

Se utilizó el programa carnoy para realizar las mediciones de las hojuelas de grafito a las aleaciones producidas, estas mediciones se realizan en las imágenes tomadas en microscopio óptico (M.O), a 100X, en este programa antes de comenzar las mediciones a las hojuelas de grafito, se debe de calibrar para la escala a la que se encuentre la foto, para posteriormente comenzar a medir las hojuelas de grafito, las mediciones se realizaron para la pieza con diferentes espesores y para el disco de freno, se realizaron 50 mediciones para poder tener un promedio y saber el tamaño aproximado de las hojuelas de grafito, tal y como se muestra en la figura 35

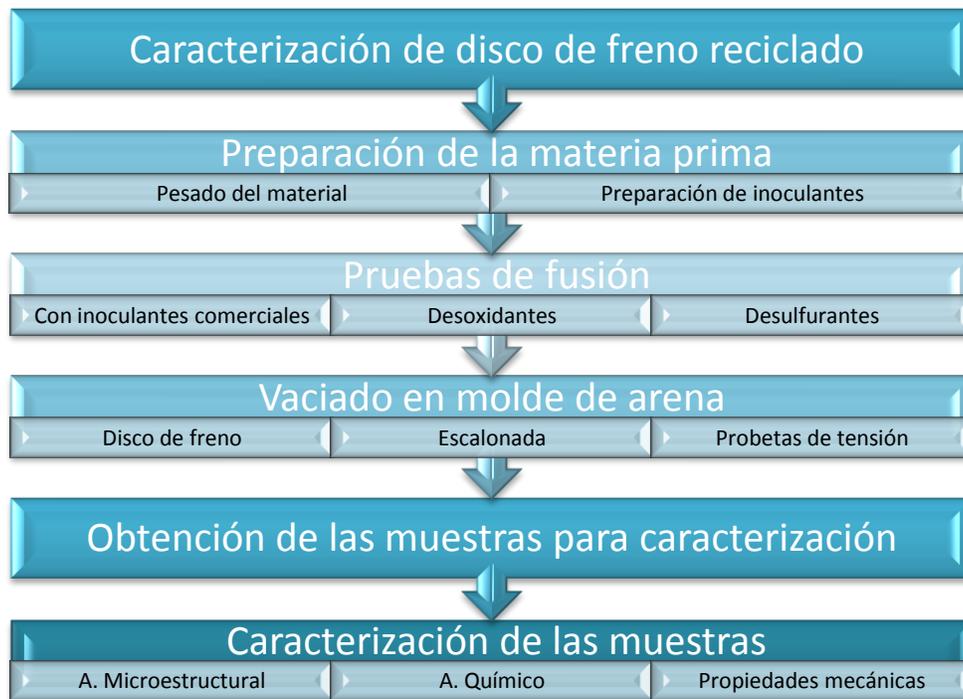


**Figura 35.** Programa carnoy utilizado para medir hojuelas de grafito.

### 3. EXPERIMENTACION

#### 3.2 Diagrama de flujo del desarrollo experimental

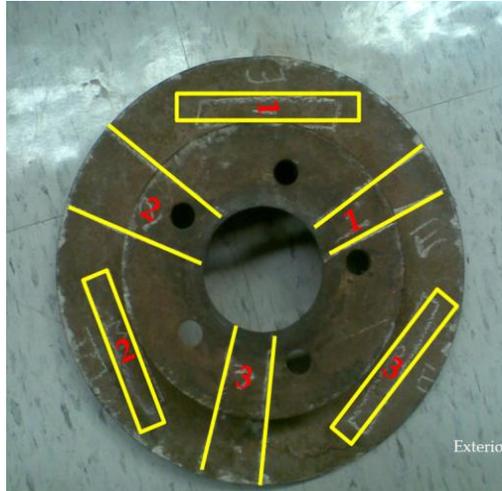
El presente trabajo consistió en fabricar seis tipos de hierro gris en un horno de inducción, la primera con inoculantes comerciales, la segunda con desoxidantes y la tercera con desulfurantes, para determinar el efecto que tiene cada uno de estos así como evaluar la posible sustitución y/o eliminación de la etapa de inoculación por una etapa de desoxidación o desulfuración. Estudiar el efecto de estos elementos sobre la microestructura y sobre las propiedades mecánicas y poder compáralas con un hierro convencional para frenos de disco. La secuencia experimental se observa en el siguiente diagrama.



#### 3.2.1. Caracterización de disco de freno de un hierro comercial.

Antes de efectuarse las pruebas de fusión, se realizó la caracterización de un hierro comercial utilizando para discos de freno automotriz. Las muestras para llevar a cabo pruebas de tensión, dureza y análisis microestructural se tomaron del disco de freno como se observa en la figura 36.

### 3. EXPERIMENTACION



**Figura 36.** Zona de toma de muestras para caracterización del disco de freno.

#### 3.2.2 Pruebas de fusión en horno de inducción.

La tabla 6 muestra los parámetros considerados en el desarrollo de las pruebas, como la relación de carga, metálica utilizada, las coladas preparadas se vaciaron en los moldes de las figuras 31 a 33.

**Tabla 6** Parámetros de las pruebas.

Parámetros	
<b>Constantes</b>	Masa metal 30 kg. Tiempo de desmoldeo (30 min) Moldeo en verde (7-10 % Humedad) Temperatura (1400-1380 °C) de vaciado Crisol (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
<b>Variables</b>	Inoculantes 2% de la carga Desoxidantes 1% de la carga Desulfurantes 2.5 % de la carga
<b>Carga metálica</b>	Acero (1018), 59.2% Metal sorel, 20.8% Retorno, 20% FeSi, 0.458 kg. Grafito, 0.6279

Se realizaron 6 pruebas de fusión en un horno de inducción de 30kg variando el método de inoculación para: a) adición de inoculantes comerciales Cabala y calcifer, b) inoculante comercial más aluminio como desoxidante y c) resulfurando el hierro y adicionando agentes desulfurantes comerciales 9C3 y 5R. Una vez solidificadas las piezas se desmoldeo y se obtuvieron muestras de

## 3. EXPERIMENTACION

---

cada pieza para realizar la caracterización de cada una de ellas, por análisis químico, pruebas mecánicas y análisis microestructural.

### 3.2.3 Caracterización

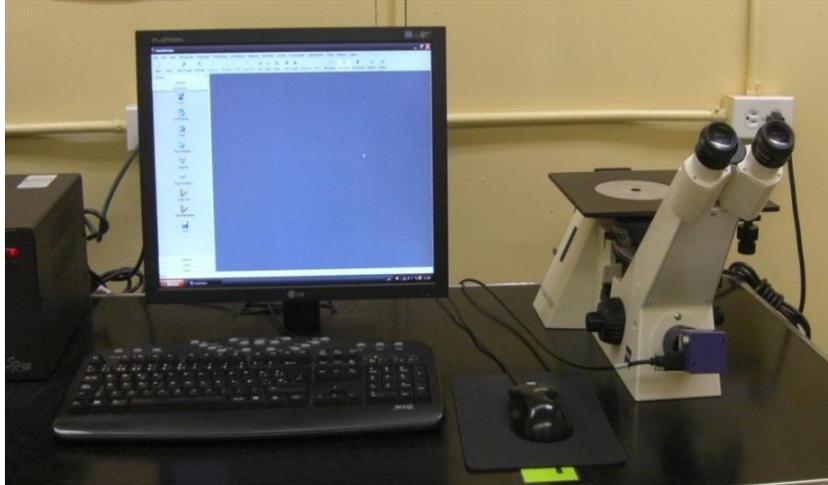
- *Análisis Químico*

Se obtuvo rebaba con un taladro a bajas revoluciones para evitar la pérdida del grafito en el momento de hacer el barrenado de la pieza. Los ensayos para determinar la composición de la aleación se llevaron a cabo en los laboratorios de análisis metalúrgicos de la ESIQIE por absorción atómica por carbono, silicio, fósforo, manganeso y azufre total, para la cual se extrajo muestra en rebaba de aproximadamente 10 g para su análisis. Se realizó el ensayo a la chispa para determinar la composición química del material y comparar los resultados obtenidos mediante por vía húmeda. Para esta prueba se ocuparon muestras con una superficie plana sin limitación en el tamaño.

- *Análisis de imágenes*

Las muestras antes de poder tomarles foto en un M.O fueron previamente montadas en baquelita, para facilitar su manejo, posteriormente se paso a una etapa de desbaste con lijas de carburo de silicio del numero 320 al 1500, una vez concluida la etapa de desbaste fueron pulidas con aluminio de 0.3 micras y un paño de algodón, al terminar el pulido se tomo foto a 100x para poder observar la distribución del grafito, una vez que se tomaron las fotos de todas las muestras, se procedió a atacar las muestras con una solución de ácido nítrico y alcohol (nital), con el fin de revelar la matriz de la microestructura, y de igual manera tomar fotos a 500x para observar de una mejor manera la matriz de en la que se encontraba el grafito. Esto se realizó para la caracterización del disco de freno y para las piezas hechas con las aleaciones fabricadas, con el fin de poder observar su microestructura utilizando un microscopio óptico y un analizador de imágenes de la figura 37, y posteriormente tomar fotos de la microestructura obtenida.

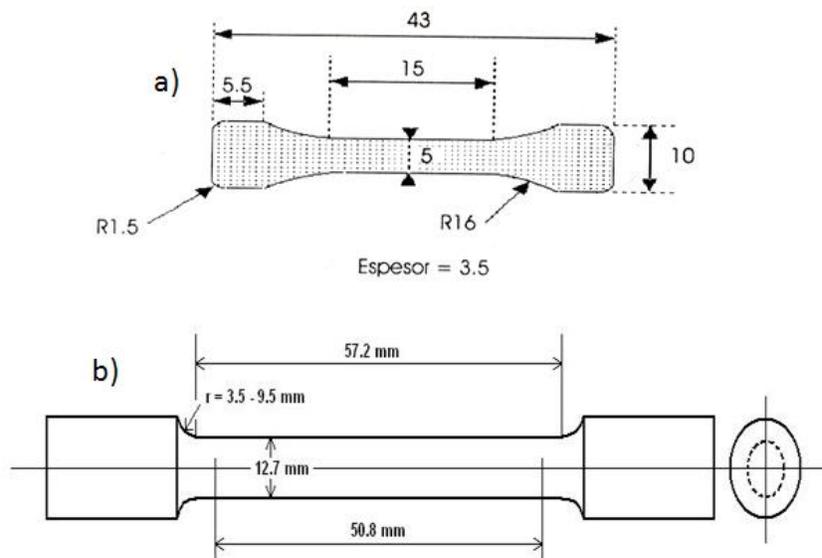
### 3. EXPERIMENTACION



**Figura 37.** Analizador de imágenes y microscopio óptico.

- *Ensayo de tensión*

Se utilizó la máquina Shimadzu para evaluar la resistencia a la tensión de las muestras obtenidas del disco de freno reciclado y de las fundiciones fabricadas, para lo cual se maquinaron probetas planas de tensión de acuerdo a la norma ASTM E-8 con las dimensiones que se muestran en la figura 38 a), para las muestra obtenidas del disco de freno reciclado y para las fundiciones fabricadas se maquinaron probetas de acuerdo a la norma ASTM A395, con las medidas mostradas en la figura 38 b), los parámetros experimentales que se consideraron en el ensayo de tensión son la velocidad de carga, carga máxima y alargamiento del material.



**Figura 38.** Esquema que muestra las dimensiones de las probetas de tensión

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

### 4. Resultados y discusión

Los resultados de la caracterización del disco de freno reciclado se muestran a continuación

#### 4.1.1 Composición química

La tabla numero 7 muestra la composición obtenida por análisis químico del disco de freno reciclado. Mediante el espectrómetro de chispa.

**Tabla 7.** Composición del material del disco de freno.

	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>Elemento/ compuesto</b>	Resultado %	Resultado %
<b>C</b>	3.44	3.39
<b>Si</b>	2.00	2.04
<b>Mn</b>	0.40	0.38
<b>P</b>	0.022	0.030
<b>S</b>	0.05329	0.05832

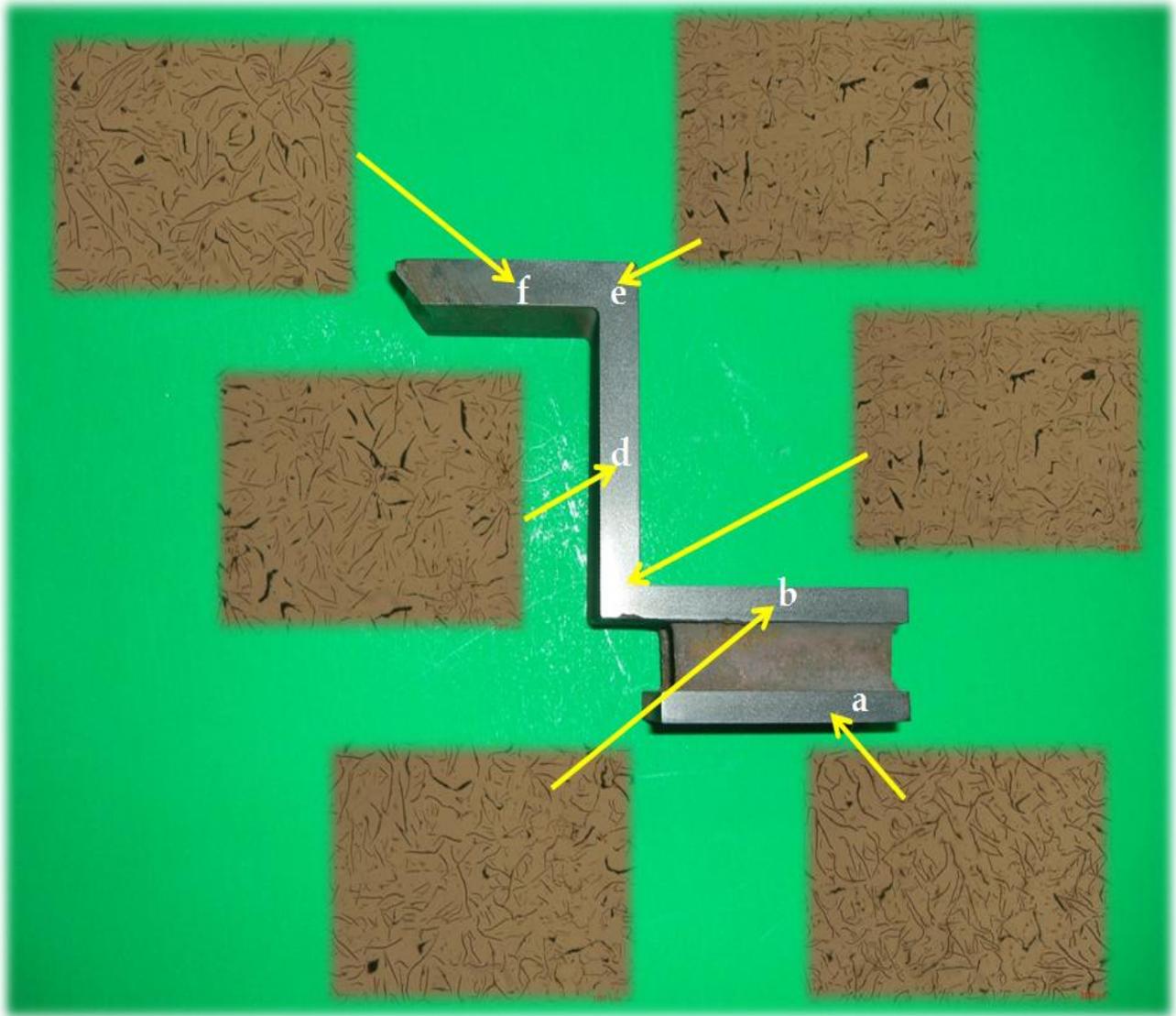
Se observó que el contenido promedio de carbono, silicio, manganeso de las dos muestras es de 3.44%, 2% y 0.4%, respectivamente, lo cual comparando con la norma ASTM A159 donde se clasifica los hierros grises para partes automotrices, este corresponde a un hierro grado G3000.

#### 4.1.2 Análisis microestructural

En la figura 39 se puede observar como la distribución y tipo de hojuela es homogénea en toda la geometría del disco de freno, incluyendo las pistas de frenado que es una región de suma importancia, se puede deducir comparando con la norma ASTM A247 que la distribución pertenece a un grafito tipo A, la cual es homogénea en todo el disco de freno.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

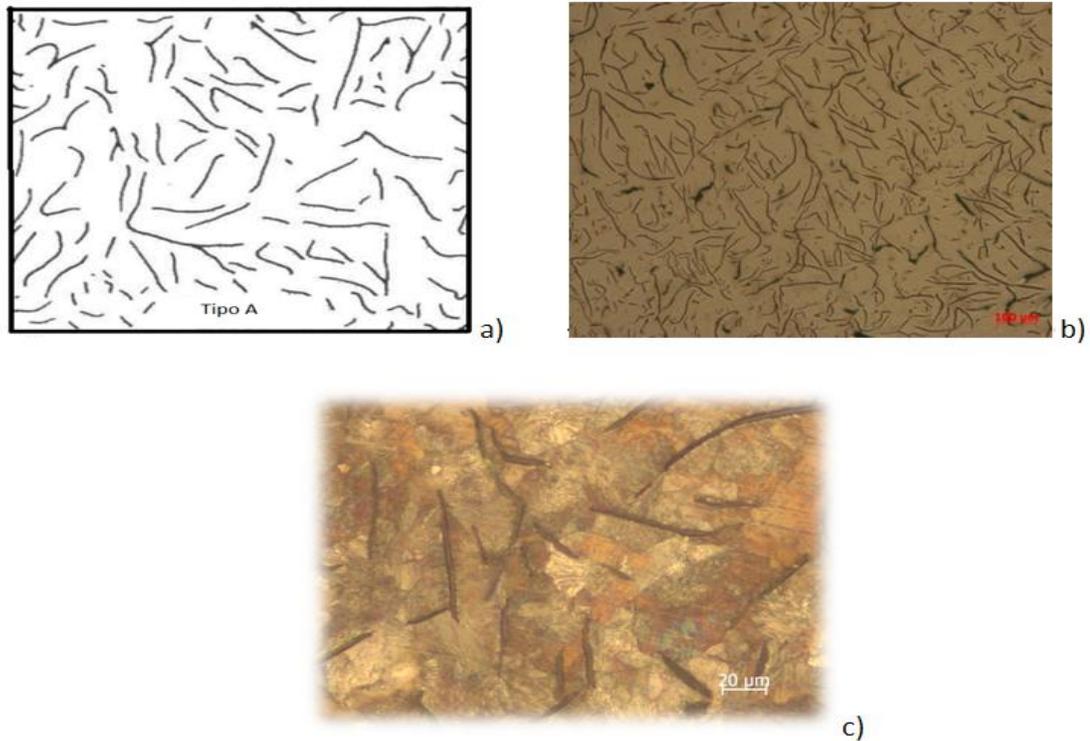


**Figura 39.** Esquema del tipo de grafito en las diferentes zonas del disco de freno.

Comparando la distribución de las hojuelas de grafito con las que marca la norma ASTM A 247 se puede observar que las hojuelas de grafito corresponden a un grafito tipo A, como se observa en la figura 40, en la figura 40a) se muestra una hojuela tipo A según ASTM A 247, la figura 40 b) es el tipo de hojuela obtenido en el material del disco de freno caracterizado y la figura 40 c) corresponde a la microestructura del disco de freno caracterizado atacado con nital, la cual presenta una matriz perlítica.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---



**Figura 40** Comparación del tipo de hojuelas y microestructura del disco de freno.

### 4.1.3 Ensayo de tensión.

Del disco de freno reciclado se obtuvieron probetas planas reducidas, bajo la norma ASTM E8, como se puede observar en la figura 41. Las probetas de tensión fueron obtenidas de la región de las pistas de frenado interior y exterior, el ensayo de tensión se realizó con una velocidad de desplazamiento de 5 mm/seg.

Se llevaron a cabo seis pruebas de tensión, los resultados se observan en la tabla 8 y en la gráfica de la figura 42, se obtuvo un valor promedio de esfuerzo máximo a la tensión de 35,223.430 psi, el cual se encuentra en el intervalo de esfuerzo reportado en la norma ASTM A159 y el cual corresponde a un hierro gris grado G3000, utilizado para aplicaciones automotrices.

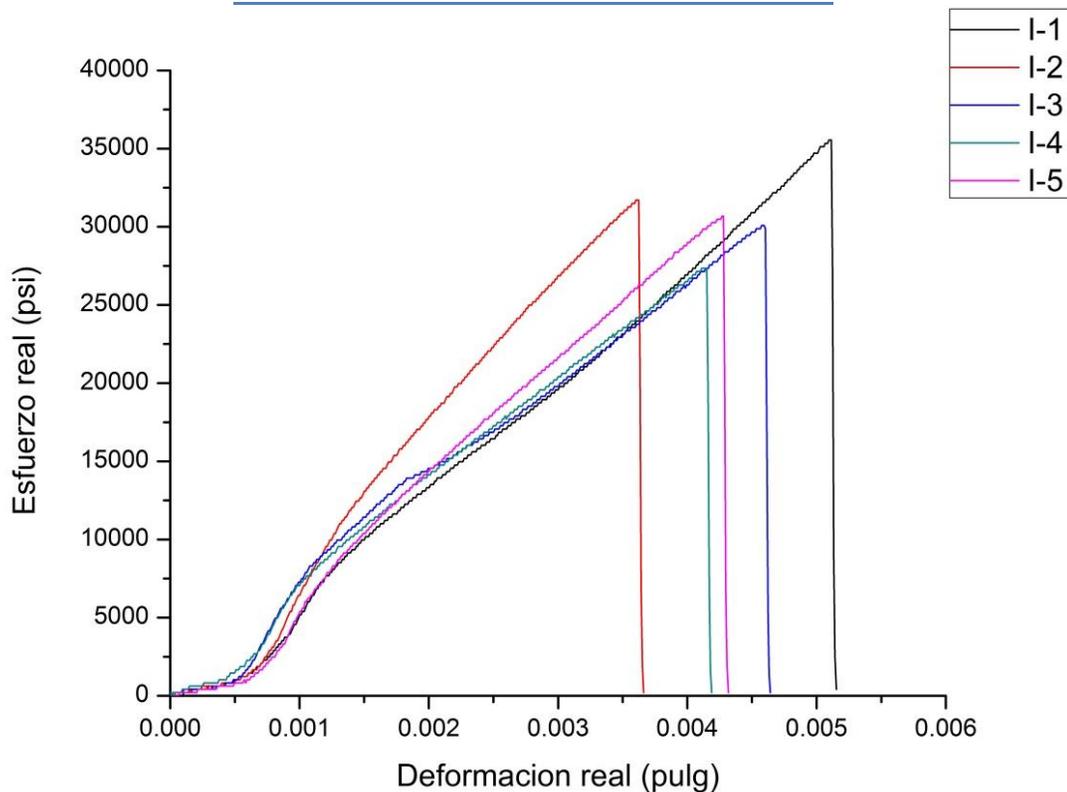
## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



**Figura 41.** Probetas de tensión obtenidas de las pista de frenado del disco de freno.

**Tabla 8.** Resultados del esfuerzo máximo a la tensión del disco de freno reciclado.

Nombre	Max. Esfuerzo N/mm2	Max. Esfuerzo Psi
I-1	242.857	35,223.430
I-2	217.143	31,493.929
I-3	205.714	29,836.296
I-4	187.143	27,142.797
I-5	210	30,457.925



**Figura 42.** Grafica Esfuerzo Vs. Deformación, disco de freno reciclado

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1.4. Prueba de dureza

Se tomaron 10 medidas de dureza en dos muestras del disco de freno, los resultados obtenidos en la aleación del freno de disco convencional fueron los que se observan en la tabla 9, usando un equipo de dureza Rockwell B con un balín de 1/16 y una carga de 100 kg. Debido a que la norma ASTM A159 reporta la dureza en escala Brinell, se llevó a cabo la conversión de la escala Rockwell B a Brinell, los resultados se observan en la tabla 9.

**Tabla 9.** Resultados de dureza

No	Dureza Rockwell (B)		Dureza Brinell	
	A	B		
1	92	90	195	185
2	91	91.5	190	190
3	93	91	199	190
4	94	92	204	195
5	92	92.5	195	195
6	93.5	92	199	195
7	91	92	190	195
8	93	94	199	204
9	93	95	199	209
10	91	93	190	199
			1960	1957
<b>promedio</b>	92.35	92.3	196	195.7

El valor promedio de la dureza es de 195.85 HB para ambas muestras, lo cual confirma que el material pertenece a un grado G3000 ya que la norma ASTM A159 reporta un intervalo de dureza de 187 a 241 HB para este grado de hierro.

### 4.2 Resultados de las aleaciones producidas

#### 4.2.1 Análisis químico

La tabla 11 muestra el resultado de los análisis químicos realizados a las fundiciones de hierro gris fabricadas. Se llevaron a cabo varias pruebas preliminares para ajustar los parámetros del proceso de fabricación. Las seis pruebas realizadas se encuentran dentro de la composición química de acuerdo a la norma ASTM A159, que marca la especificación de los hierros grises grado G3000 para partes automotrices. Cabe mencionar que las pruebas 3 y 4 se agregó aluminio

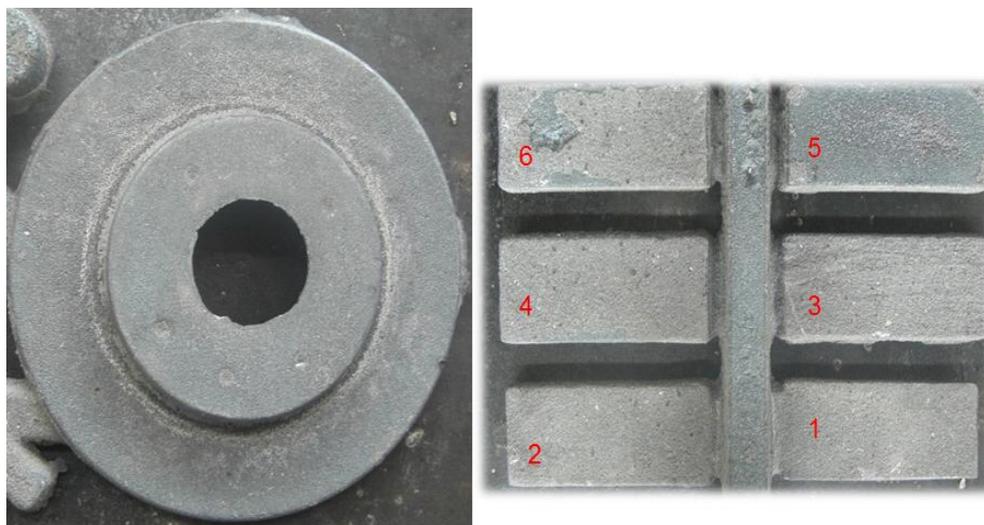
## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

intencionalmente como desoxidante ya que este elemento tiende a incrementar la grafitización, para las pruebas 5 y 6 se les adiciono azufre, para elevar el contenido de este elemento y posteriormente reducirlo con un desulfurante, en este caso se utilizó magnesio (9C3 y 5R), estos compuestos se agregaron al metal base con la intención de formar inclusiones a base de sulfuros y/o óxidos para que actúen como sitios de nucleación heterogénea para la formación de las hojuelas de grafito.

**Tabla 10.** Resultados de análisis químico

Fusión	Agente inoculante	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mg	%Al
1	Calcifer	3.38	2.56	0.42	0.04	0.03		
2	Cabala	3.37	2.35	0.40	0.0139	0.0184		
3	Al-Cabala	3.11	2.23	0.42	0.0121	0.0230		0.865
4	Al- Calcifer	3.02	2.22	0.40	0.0149	0.0333		0.814
5	5R (Mg)	2.87	2.41	0.340	0.0093	>0.140	0.0309	
6	9C3 (Mg)	2.89	2.58	0.330	0.0119	0.0873	0.0245	

La figura 43 muestra las piezas obtenidas en el desarrollo experimental de este trabajo, no se observó la presencia de ningún tipo de defecto de fundición como rechupes o porosidades en las superficies. La figura 43 a), muestra el disco de freno y la figura 43 b), muestra la placa escalonada con espesores desde: E1=4.2 mm hasta E6= 25.4 mm.



**Figura 43.** Piezas obtenidas en las pruebas de fusión, a) freno de disco y b) placa con diferentes espesores

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

### 4.2.2 Resultados metalográficos.

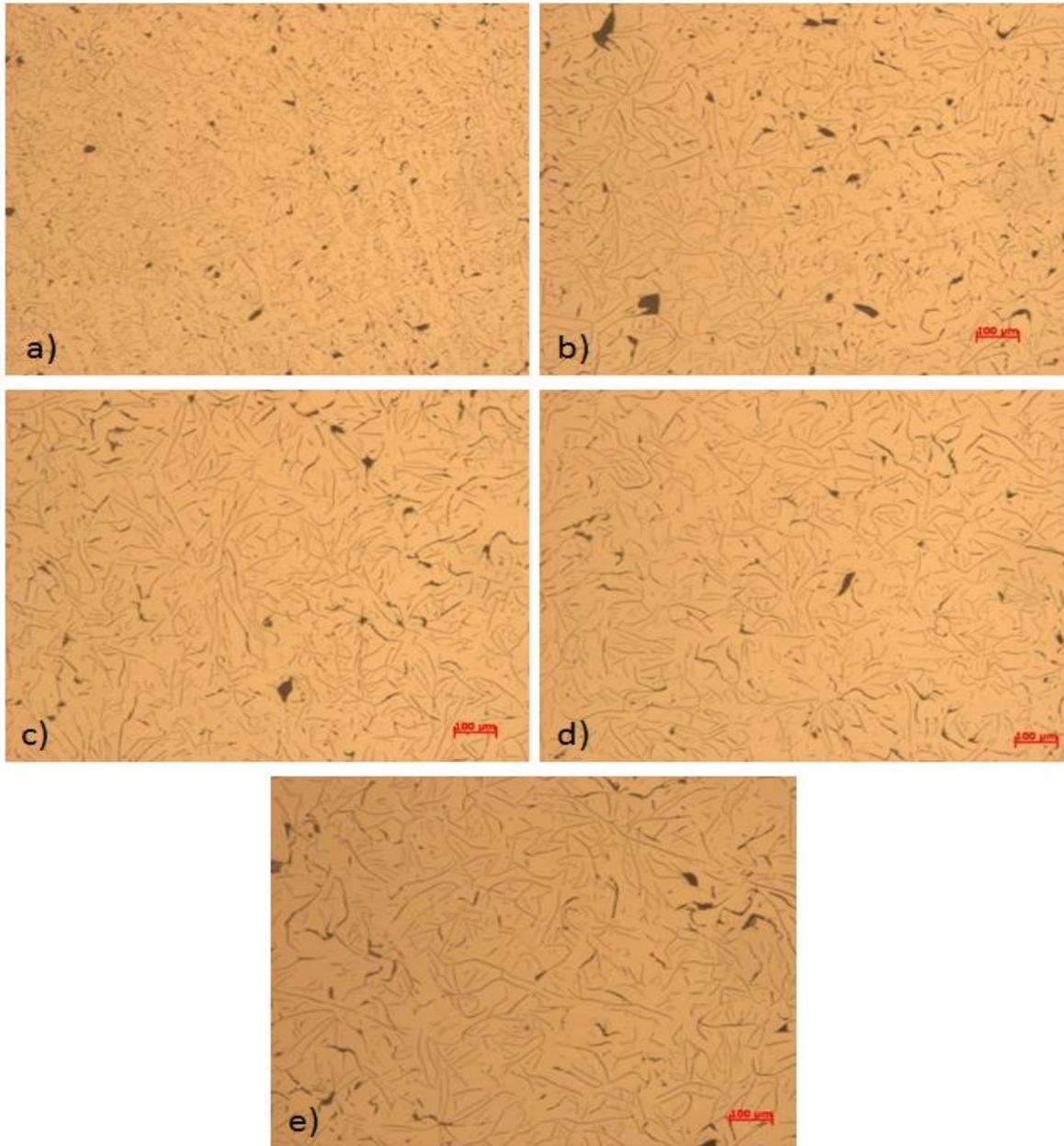
Se realizó un estudio metalográfico a diferentes zonas de los modelos fabricados (placa escalonada y disco de freno) para poder conocer la distribución y tipo de grafito así como la matriz en la que este se encuentra. Se muestran las imágenes metalografías obtenidas para cada espesor E1 a E6, donde E1 es el espesor más delgado y E6 el espesor más grueso, se presentan en milímetros, y para la sección transversal del disco de freno. Se observa de las imágenes la distribución y tipo de grafito, así como la matriz en la que este se encuentra. En la mayoría de las imágenes se puede observar de forma evidente la distribución y forma del grafito dentro de una matriz perlítica. También se puede observar como el tamaño y distribución de las hojuelas de grafito van cambiando conforme se incrementa el espesor. Las pruebas 1 y 2 se realizaron con agentes inoculantes comerciales, calcifer y cabala, respectivamente. El análisis se realizó a la pieza fabricada para los diferentes espesores para las 6 pruebas mientras que el análisis que se hizo al disco de freno fabricado solo se llevo a cabo para las primeras cuatro pruebas.

### 4.2.3 Análisis metalográfico prueba 1

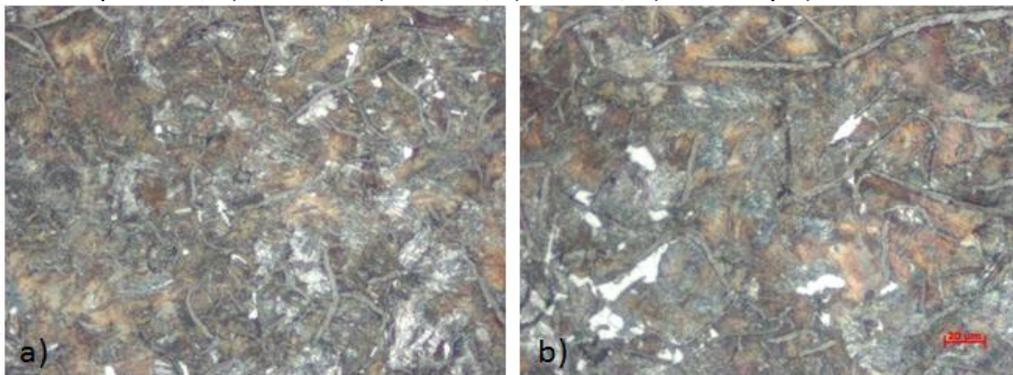
Como se puede observar de la figura 44, la distribución y tamaño de la hojuela de grafito va cambiando con forme aumenta el espesor, teniendo una distribución y tamaño de hojuela más uniforme, que se asemeja mucho a un tipo de hojuela tipo A según ASTM A 247 como se puede aprecia de la figura 44. De manera general se obtuvo la siguiente distribución de grafito para cada uno de los espesores: a) 8.5 mm 20% grafito tipo A y 80% tipo E, b). Espesor 13 mm, 10% grafito tipo B y 90 %tipo A, c). Espesor 17 mm, 90 % grafito tipo A y 10 Tipo E, d). Espesor 21 mm, grafito tipo A, e). Espesor 25.4 mm, grafito tipo A,

En la figura 45, se presentan las micrografías de la prueba 1, el análisis fue hecho en la pieza de diferentes espesores, y se puede observar que las hojuelas de grafito están dentro de una matriz perlítica, este tipo de estructura es homogénea en todas las muestras, aunque se pueden ver algunas zonas de ferrita en las muestras de menor espesor (figura 45 a y 45 b), el cual no es muy considerable, ya que en las muestras de mayor espesor (figura 45c a 45e) se puede apreciar que el material es 100% perlítico. También se determinó la presencia de sulfuros (figura 45d), carburos (figura 45 c) y steadita (figura 45 e).

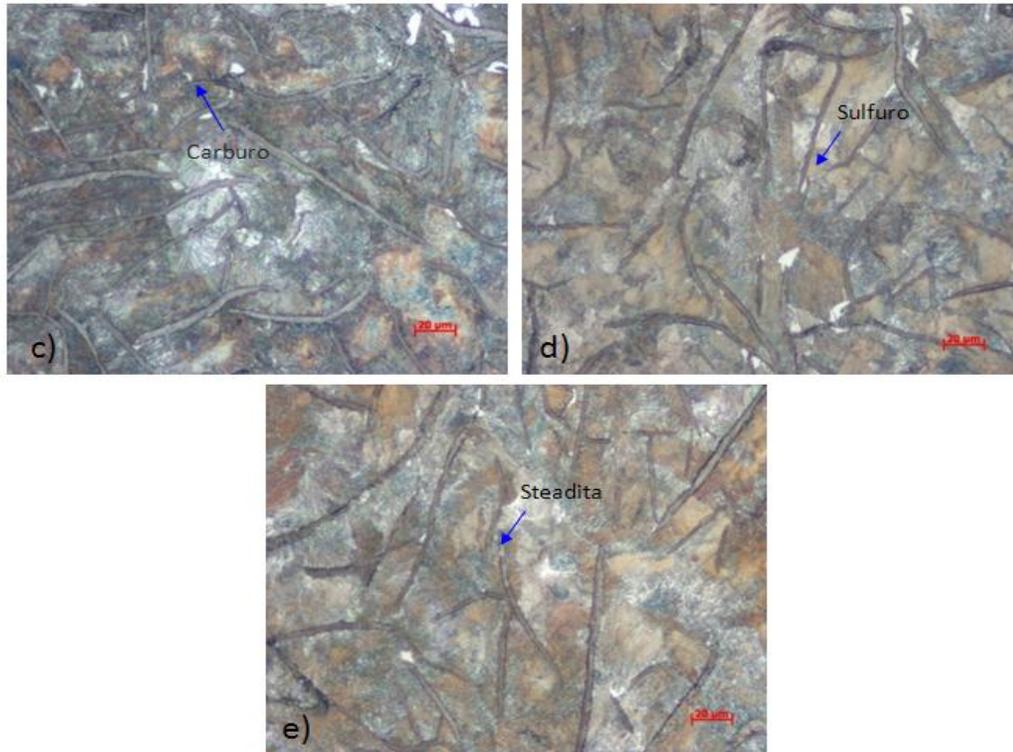
## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



**Figura 44.** Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con calcifer para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



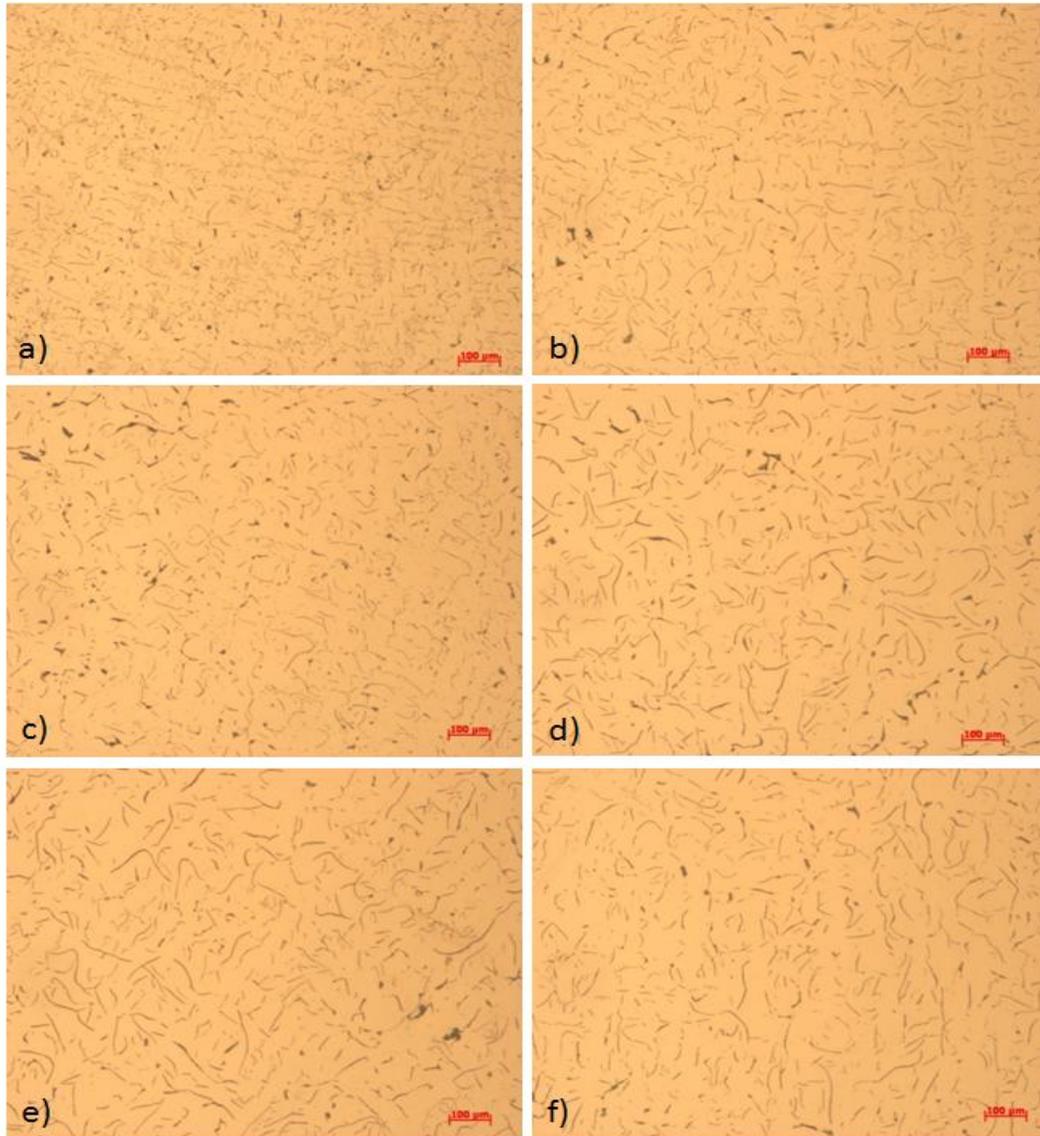
**Figura 45.** Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con calcifer atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm

### 4.2.4 Análisis metalográfico de la prueba 2

La figura 46 presenta los resultados microestructurales de la prueba dos con la adición del inoculante cabala, se observa en esta prueba una distribución de las hojuelas de grafito más uniforme, muy parecida a una distribución tipo A según ASTM A 247. Se observa que la longitud de la hojuela es de un tamaño más homogéneo, aunque todavía se pueden apreciar zonas donde la hojuela es pequeña y bandas de espaciamiento, pero en general las microestructuras de las figuras 46 a) a la 46 f), presentan un tipo y distribución de grafito aceptable de la siguiente manera a pesar de que en el espesor más delgado aún se tiene un tipo de distribución tipo D (figura 46a).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

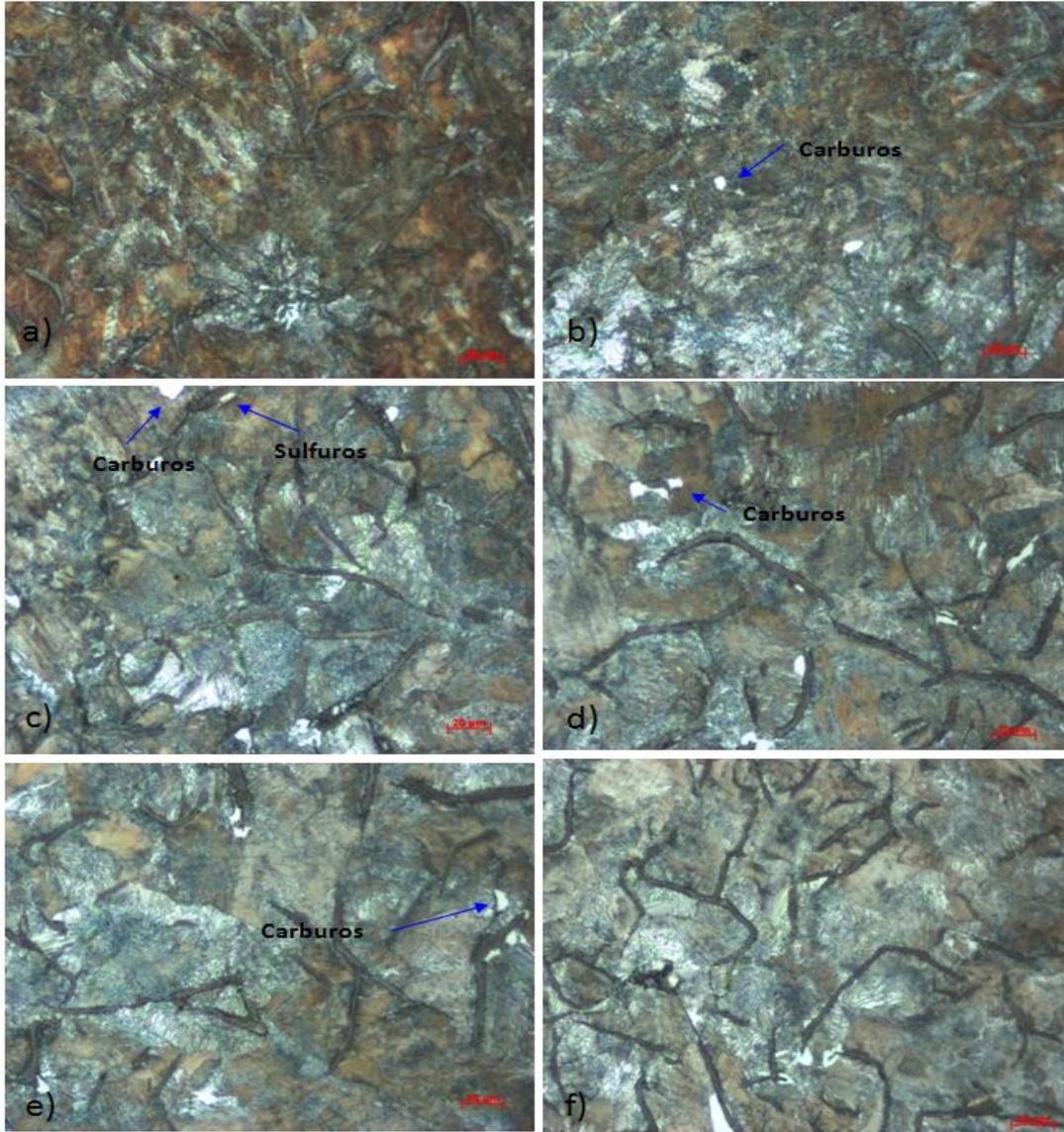
---



**Figura 46.** Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con cabala para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.

En la figura 47, se puede apreciar que el grafito se encuentra contenido en una matriz casi 100% perlítica, esto se debe a la velocidad de solidificación del metal y al tiempo de desmoldeo, ya que es una velocidad moderada lo que favorece la formación de perlita, aunque también se pueden apreciar pequeñas zonas de ferrita, y algunos carburos (figura 47 b, 47 c y 47 e) y sulfuros. (Figura 47 c) aislados.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



**Figura 47.** Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con cabala atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm

Comparando el efecto entre los dos inoculantes comerciales calcifer y cabala, se determino una distribución homogénea de hojuelas de grafito tipo A según ASTM A247; sin embargo, la prueba dos con el inoculante cabala presentó un tamaño de hojuela más homogéneo para los diferentes espesores ensayados a diferencia de la prueba uno con el inoculante comercial calcifer, el cual presento en los espesores mayores hojuelas demasiado largas, lo cual puede ser perjudicial para el material aunque se cuente con una distribución adecuada.

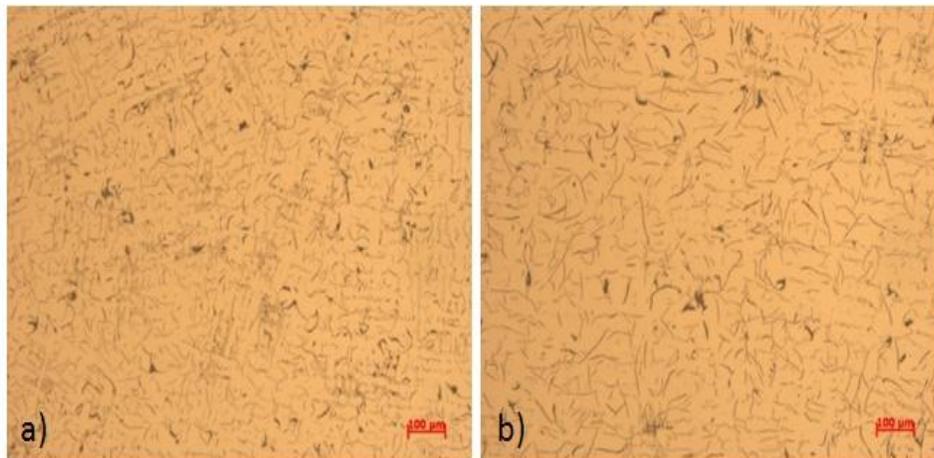
## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

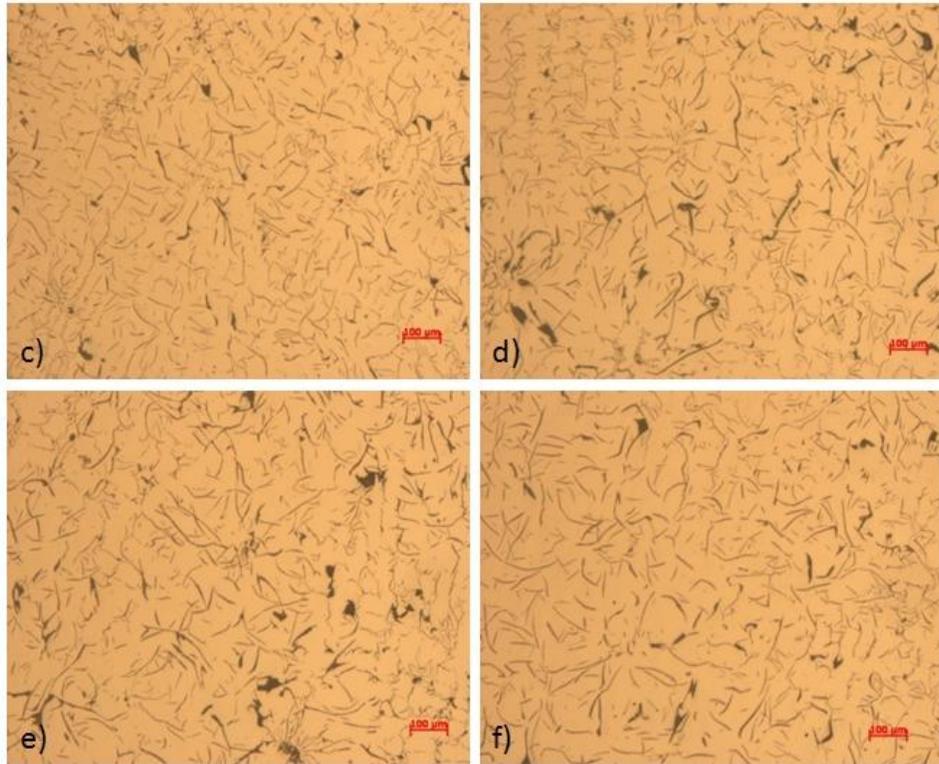
### 4.2.5 Análisis metalográfico prueba 3

En la figura 48 se observan los resultados de la prueba tres, la cual se inoculo con cabala y se le adiciono aluminio (1.5% dependiendo del total de la carga) como desoxidante. Se observa el tipo y distribución de grafito y el efecto del aluminio en la formación de las hojuelas de grafito, ya que este elemento propicio la formación de inclusiones que actuaron como sitios de nucleación para las hojuelas de grafito. Podemos apreciar como en la figura 48 a), que representa el espesor más pequeño, se tiene una distribución de grafito tipo E, pero conforme se incrementa el espesor se obtienen los siguientes tipos de distribución para cada uno de los diferentes espesores: b) Espesor 8.5 mm, grafito tipo B y tipo A, c) Espesor 13 mm, grafito tipo B y tipo A, d) Espesor 17 mm, grafito tipo B y tipo A, e) Espesor 21 mm, grafito tipo B y tipo A, f) Espesor 25.4 mm, grafito tipo A y tipo B

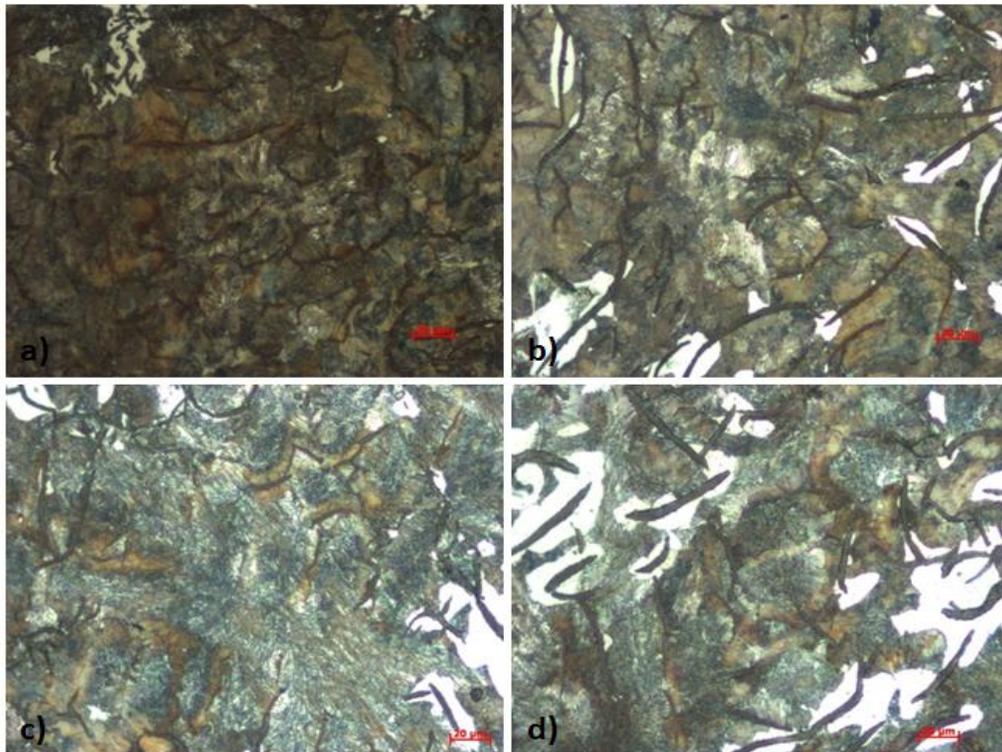
En la figura 49 se observa que las hojuelas de grafito se encuentran en una matriz ferrítica-perlítica, también se observan regiones de ferrita, las cuales se concentran principalmente alrededor de las hojuelas de grafito, este comportamiento se atribuye al efecto del aluminio sobre la formación de las hojuelas de grafito, debido a que este elemento forma compuestos que actúan como sitios de nucleación heterogénea para las hojuelas de grafito, además de que favorece la formación de la ferrita. Quedando la matriz de cada uno de los espesores de la siguiente manera: a) Espesor 4.2 mm, 50X, perlita 90%, b) Espesor 8.5 mm, 90% perlita c) Espesor 13 mm, 90 % perlita, d) Espesor 17 mm, 85% perlita, 5% ferrita, e) Espesor 21 mm, 85% perlita, 5% ferrita, f) Espesor 25.4 mm, 85% perlita, 5% ferrita.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

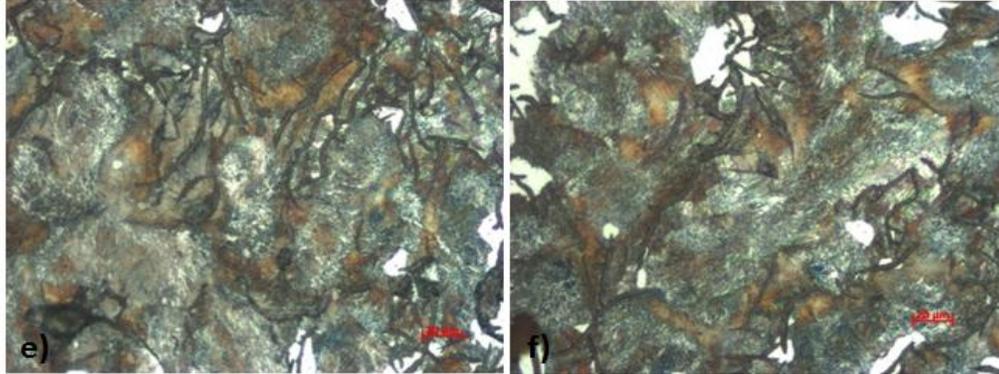


**Figura 48.** Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con cabala y aluminio para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

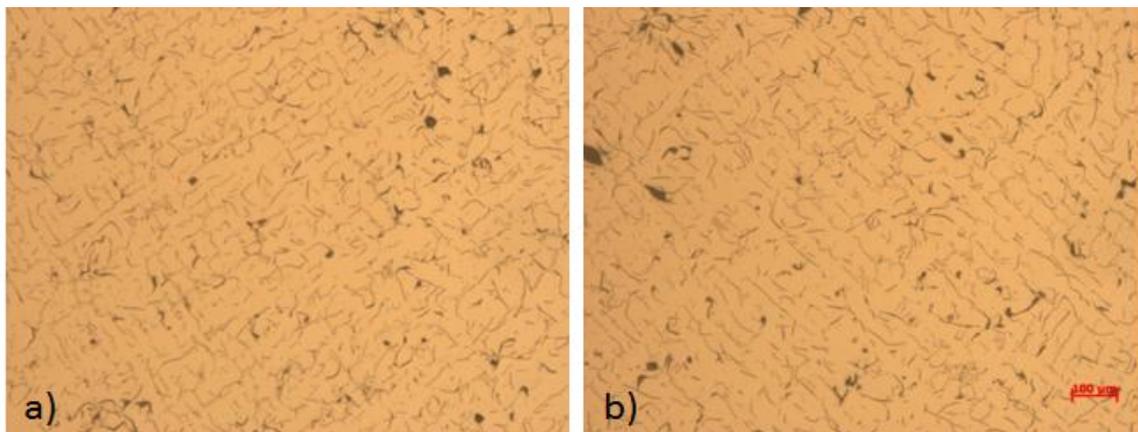
---



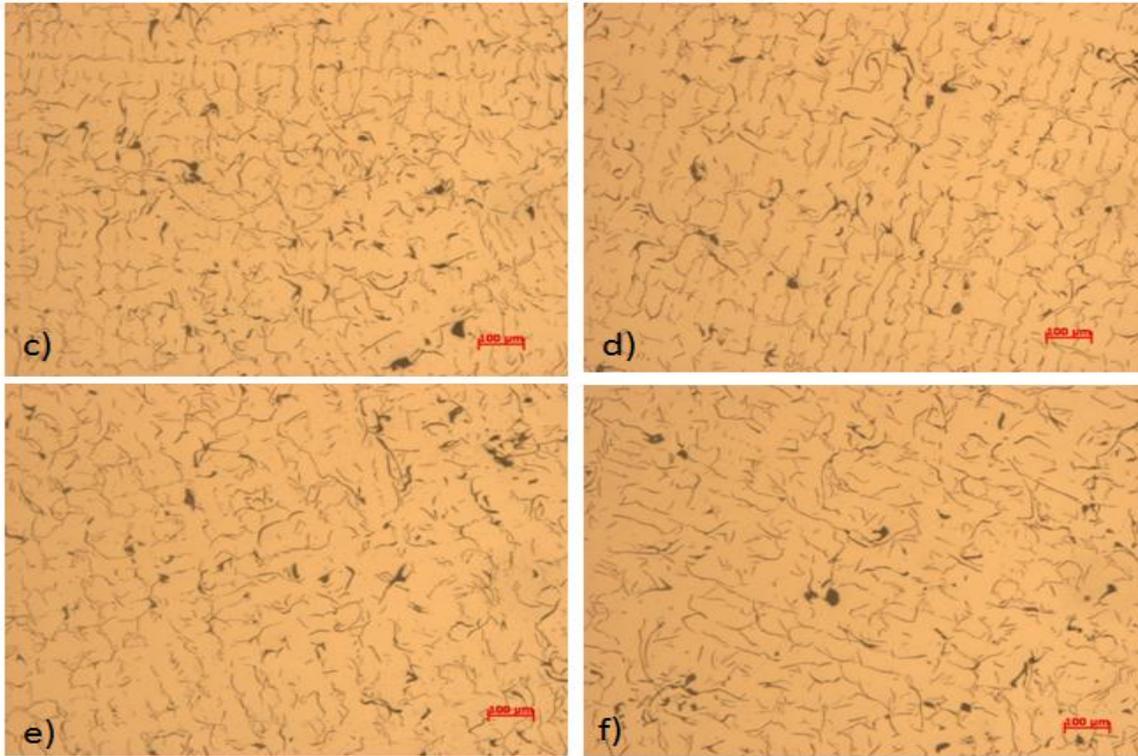
**Figura 49.** Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con cable y aluminio atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.

### 4.2.6 Análisis metalográfico prueba 4

Esta prueba responde a los resultados de la adición de aluminio (1% dependiendo de la carga) e inoculante calcifer. Se puede apreciar en la figura 50, como es notable el efecto que ejerce la adición de aluminio en el tipo y distribución de las hojuelas de grafito, podemos observar como en los diferentes espesores (figura 50), se tiene una distribución homogénea de grafito tipo E, que es la más indeseable, en la industria, esto se atribuye a el aluminio adicionado, lo cual al momento de vaciar en los moldes se observó que el metal se hacía más espeso, así como al tiempo de solidificación ya que posiblemente pudo ser demasiado. El tipo de distribución y grafito en comparación a la prueba que se realizó con el agente inoculante cabala y aluminio presento una mejor distribución que en esta prueba.

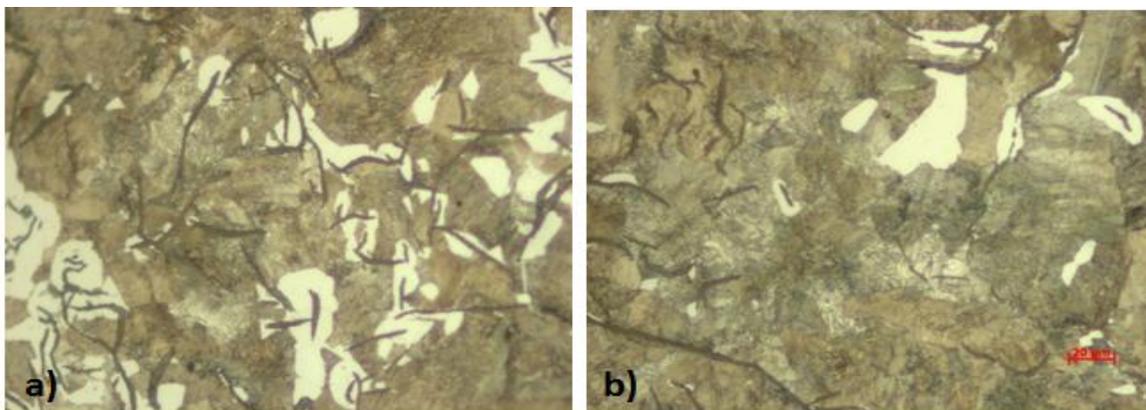


## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

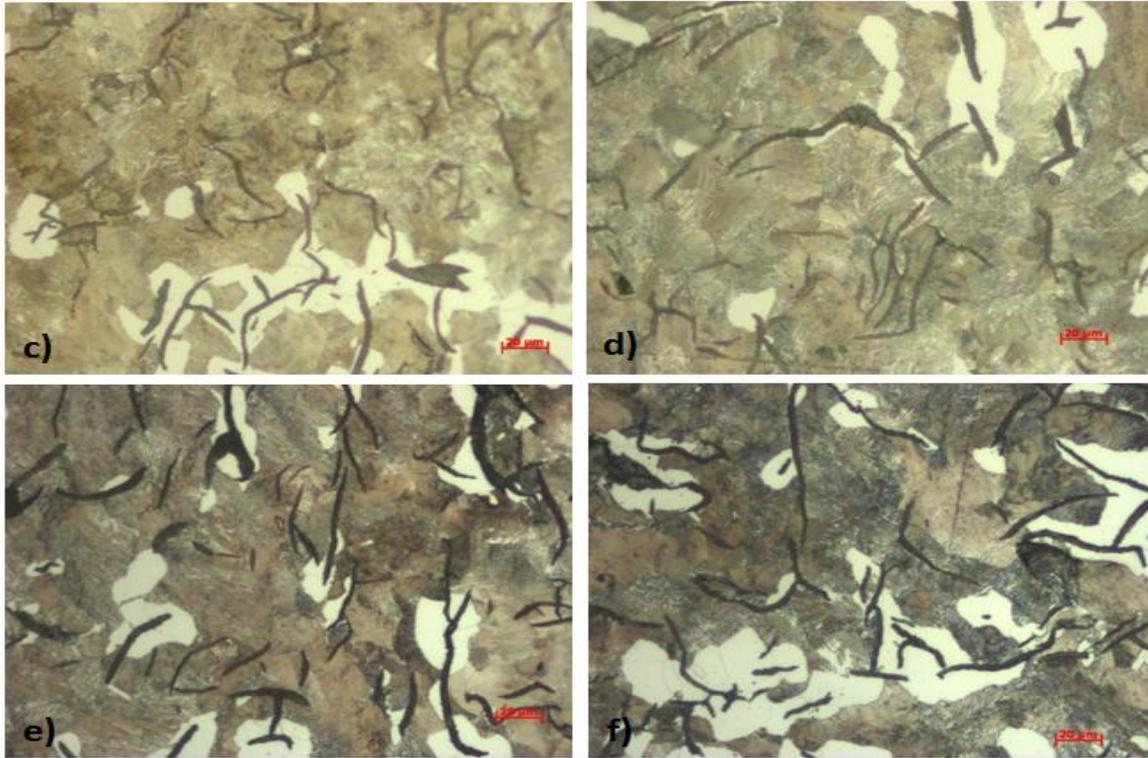


**Figura 50.** Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con calcifer y aluminio para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.

En la figura 51, se observa como la matriz de la microestructura es 83% perlítica y 7% ferrítica, se observa que al incrementar el espesor, la perlita se incrementa, en este caso las regiones de ferrita son muy notables y marcadas, lo cual confirma que el aluminio promueve su formación.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



**Figura 51.** Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con calcifer y aluminio atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.

De manera general se puede comentar que la inoculación con los inoculantes comerciales más la adición de aluminio, forman compuestos complejos, que actúan como sitios de nucleación para las hojuelas de grafito; además el aluminio favorece la grafitización, decrece la estabilidad de los carburos, engruesa la estructura del grafito y ablanda y favorece la formación de ferrita, tal y como se puede observar en las micrografías de estas pruebas (de la figura 48 y 51). También podemos decir que se tiene una mejor distribución de las hojuelas en la prueba 3 realizado con cabala y adiciones del 1.5% de aluminio, que la que se realizó con calcifer 1% de aluminio, aunque el aluminio residual en ambas pruebas se mantiene casi igual.

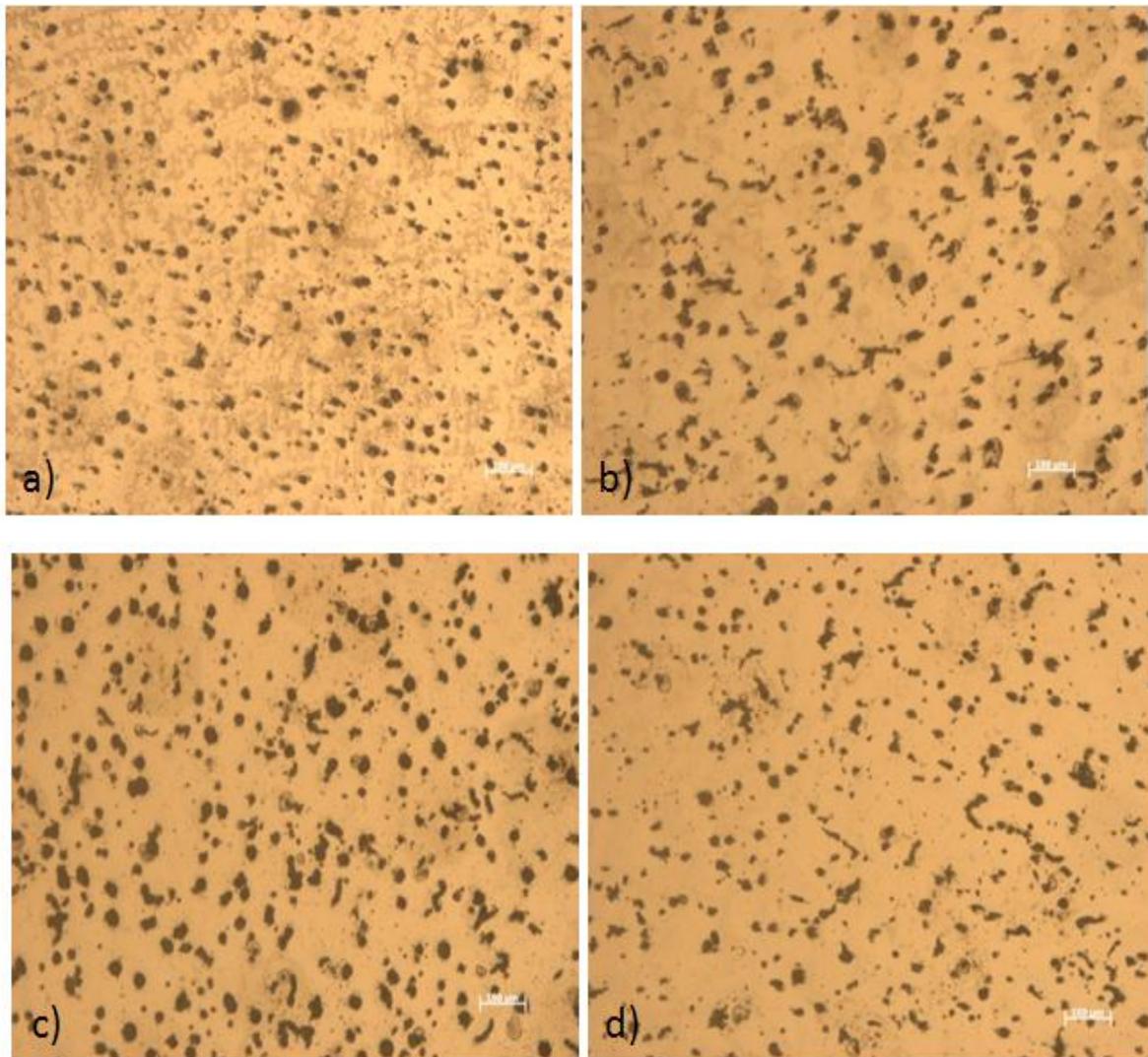
### 4.2.7 Análisis metalográfico prueba 5

Los resultados de esta prueba corresponden a un hierro al cual se le incremento el contenido de azufre 0.01222 gr, posteriormente se adiciono el agente comercial Noduloy 5R, el cual contiene magnesio, con el objeto de formar partículas de sulfuro de magnesio, las cuales

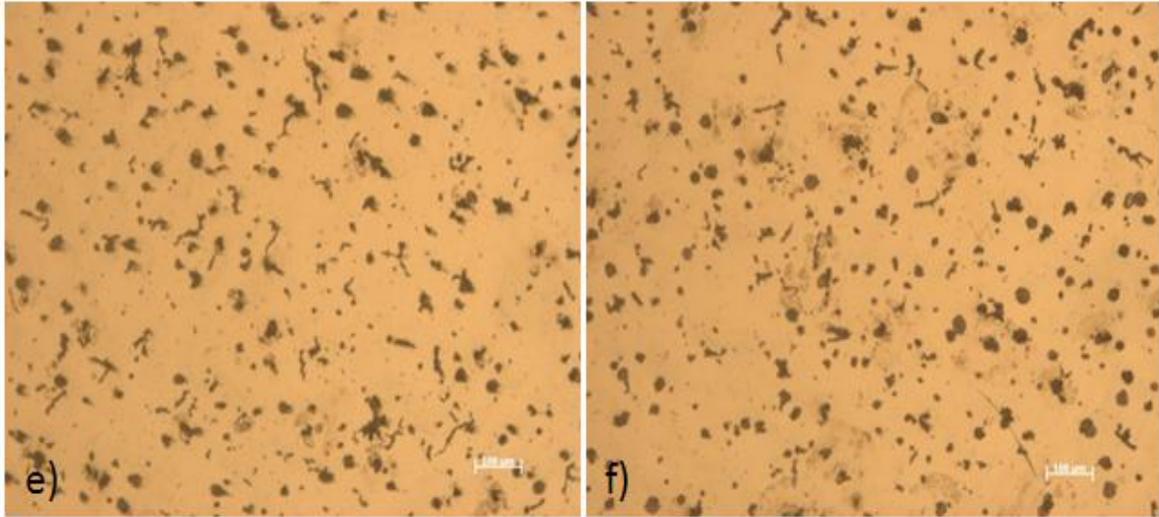
## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

actúan como sitios de nucleación para el grafito. En este caso no se inoculo para evaluar exclusivamente el efecto del agente desulfurante. La figura 52 presenta los resultados de esta prueba, se observa claramente que en vez de formarse hojuelas de grafito, el noduloy promovió la formación de nódulos para los espesores más delgados; sin embargo, en la figura 52 d) y en la figura 52 e), se observar como estos nódulos tienden a unirse para iniciar la formación de las hojuelas de grafito. También este efecto puede deberse a la variación de magnesio y azufre en la composición química, ya que se puede apreciar que se formo una fase en el material que posiblemente sea cementita o ledeburita. (Figura 52 a) y 52 b)).

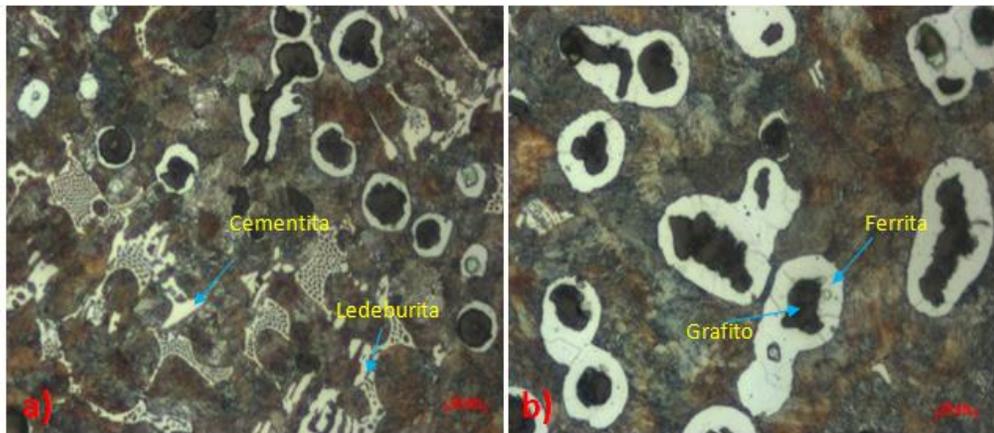


## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



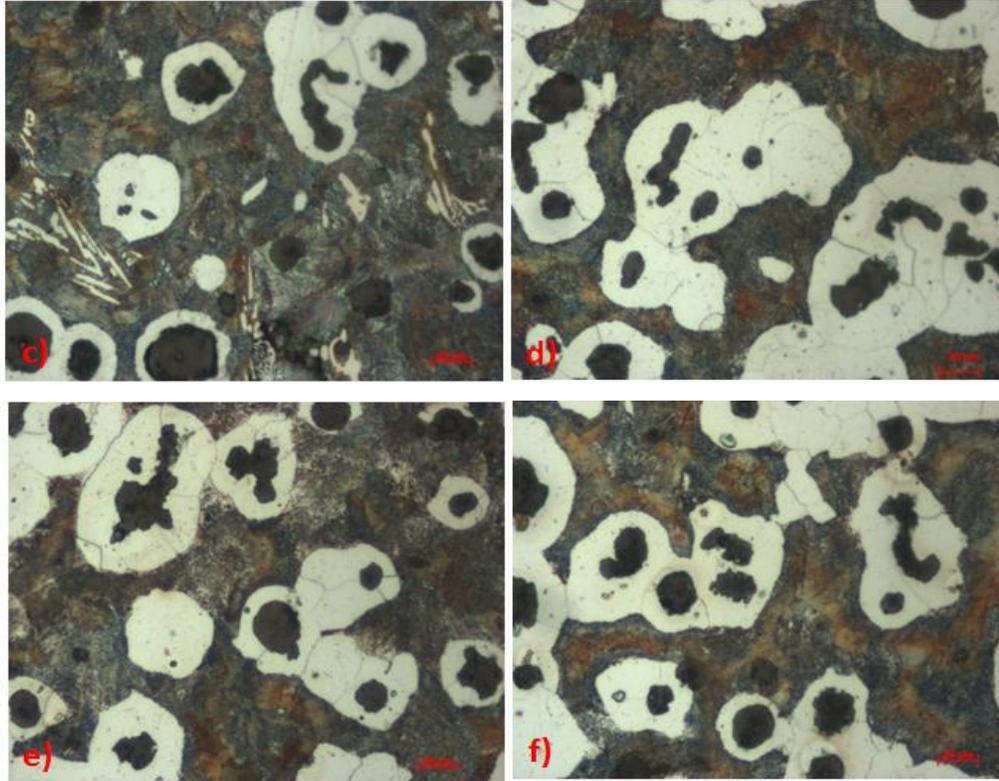
**Figura 52.** Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con noduloy 5R para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.

En la figura 53, la cual corresponde a la misma prueba pero atacada con nital, se aprecia más claramente que los nódulos de grafito se interconectan para dar paso a la formación de la hojuela de grafito como se observa en la figura 53 b). En este caso el grafito se encuentra rodeado de ferrita dentro de una matriz perlítica, además de que se aprecian fases como cementita y ledeburita (figura 53a).



## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

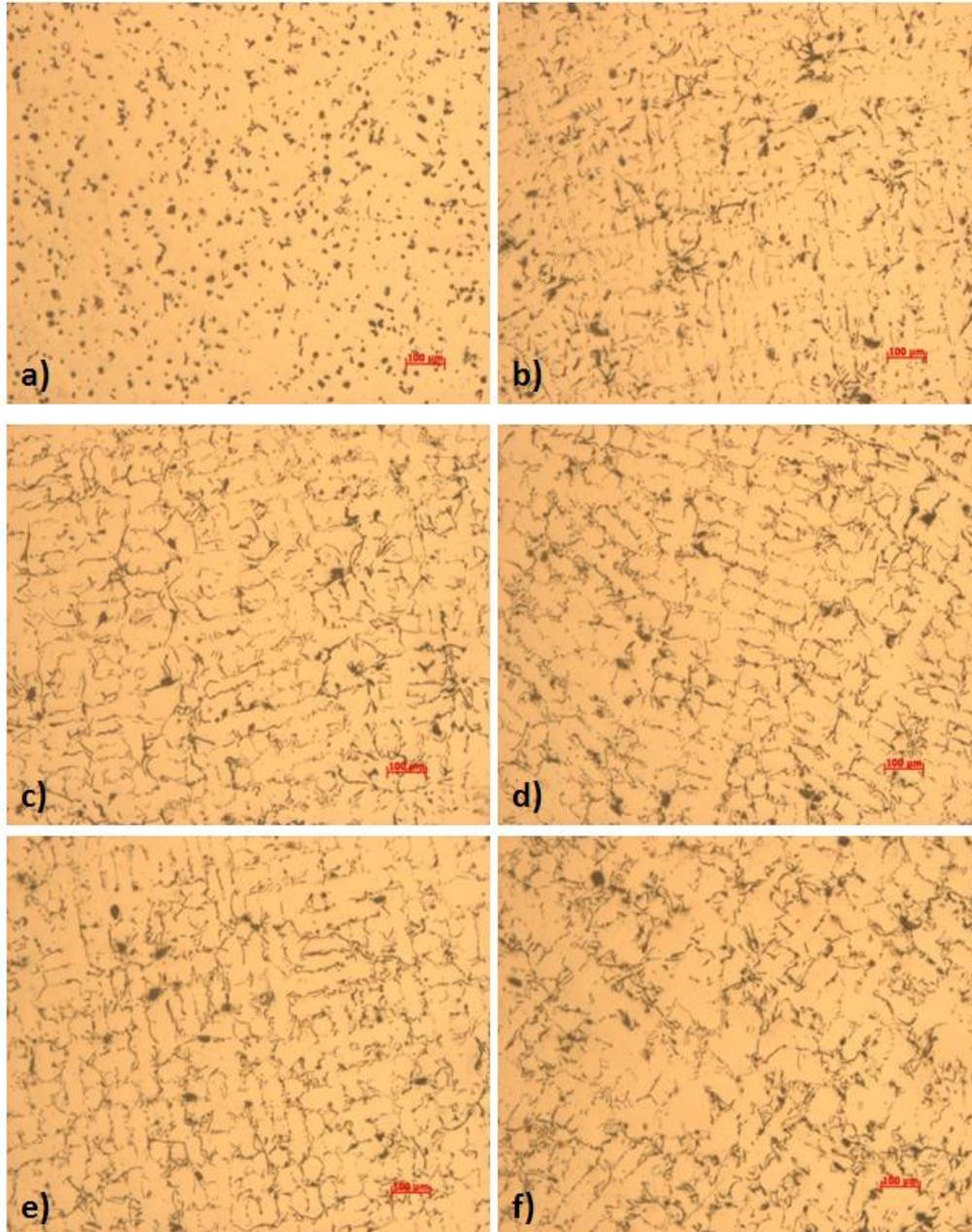


**Figura 53.** Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con Noduloy 5R atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.

### 4.2.8 Análisis metalográfico prueba 6

De igual manera que la prueba 5, la prueba 6 se llevo a cabo sin inoculación y con la adición del agente noduloy 9C3, el cual a diferencia del anterior contiene 0.087% de azufre. En la figura 54 se observa el efecto de este agente desulfurante sobre la formación de las hojuelas de grafito, para el menor espesor (figura 54 a), solo se tiene la formación de nódulos de grafito y ligeros indicios de formación de las hojuelas, mientras que para las demás muestras, se observa la formación de hojuelas, aunque no con una distribución y tamaño óptimo. En este caso el porcentaje de azufre extra reaccionó para formar sulfuros los cuales actuaron como sitios de nucleación heterogénea.

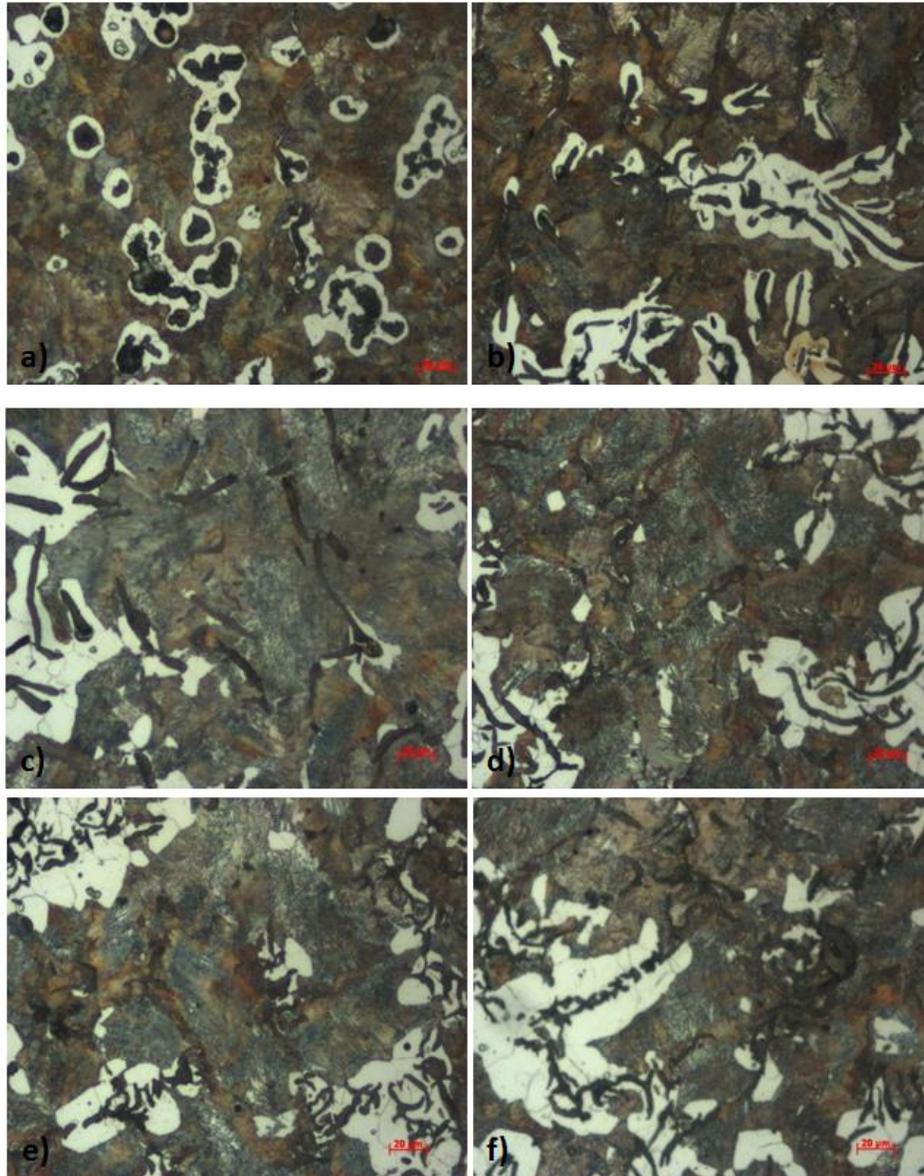
## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



**Figura 54.** Análisis microestructural a 10 aumentos de la prueba uno con Noduloy 9C3 para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.

En las muestras atacadas para esta prueba se observa como los nódulos se van uniendo para formar las hojuelas de grafito (figura 55). Se observa una completa formación de las hojuelas de grafito, no del tipo, tamaño y distribución deseada pero se verifica que al reaccionar el magnesio y el azufre se forman sitios propicios para la nucleación de las hojuelas de grafito, las cuales se encuentran en una matriz perlítica-ferrítica.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



**Figura 55.** Análisis microestructural a 50 aumentos de la prueba uno con Noduloy 9C3 atacada con nital al 2% para diferentes espesores, a) 8.5 mm, b) 13 mm, c) 17 mm, d) 21 mm y e) 25.4 mm.

El comportamiento de la prueba 5 con el noduloy 5R, el contenido de azufre fue mayor a 0.140%, mientras que para la prueba 6, este fue de 0.0873. En el primer caso se propicio la formación de nódulos, debido a que el noduloy 5R en su composición presenta una mayor cantidad de silicio a diferencia del 9C3, por lo que el silicio promovió la inoculación y el magnesio la nodulización en la prueba 5. En la prueba 6 con el nodulizante 9C3, se propicio la formación inicial de nódulos que se interconectaron para formar hojuelas de grafito, en este caso el azufre reacciono preferentemente con el magnesio contenido en el nodulizante.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

El contenido de magnesio y azufre tienen una gran influencia en la formación nucleación de precipitados de grafito, y mediante una adecuada velocidades de solidificación se puede controlar la morfología del grafito ya sea como nódulos y/o hojuelas.

De manera general el análisis microestructural nos revelo el efecto que tienen los inoculantes comerciales y el papel que juega en la formación de las hojuelas de grafito, así como la combinación de estos mismos con aluminio, como elemento desoxidante, y el papel que juega el azufre en combinación de magnesio utilizado como agente desulfurante, en la formación de sitios de nucleación heterogénea para las hojuelas de grafito, ya que como se puede apreciar a lo largo de las 6 pruebas se logró obtener una distribución de tipo A según ASTM A247, en las pruebas 1,2,3, que se realizaron con agentes inoculantes comerciales (1 y 2) y con agentes inoculantes comerciales con adiciones de aluminio( 3), ya que este elemento no solo puede generar sitios de nucleación, también promueve la grafitización. No obstante también podemos observar como el azufre también juega un papel muy importante en la formación de sitios de nucleación heterogénea para el grafito, ya que si se combina con el magnesio puede ayudar a generar estos sitios, y promover una mayor grafitización y generar hojuelas de grafito tal y como se observó en el análisis de la prueba 6, de manera general también podemos observar que en las 6 pruebas se tiene una matriz perlítica, especialmente en las pruebas 1 y 2 donde la matriz es 100% perlítica, por otro lado en las pruebas realizadas con adiciones de aluminio se obtuvo una matriz perlítica-ferrítica, con aproximadamente un 80% de perlita y un 20% de ferrita, esto por el efecto del aluminio ya que este promueve la formación de la ferrita, en las pruebas 5 y 6 se obtuvo una matriz perlítica ferrítica, con un porcentaje de perlita del 70% aproximadamente, este efecto se relaciona directamente con la composición química, la velocidad de solidificación y al tiempo de desmoldeo, principalmente. De manera general se observo que tanto la composición de los inoculante como las adiciones de aluminio como elemento desoxidante y magnesio como elemento desulfurante, asociado a una velocidad de enfriamiento adecuada, pueden promover no solo la formación de sitios de nucleación para el grafito sino también distribuciones aceptables.

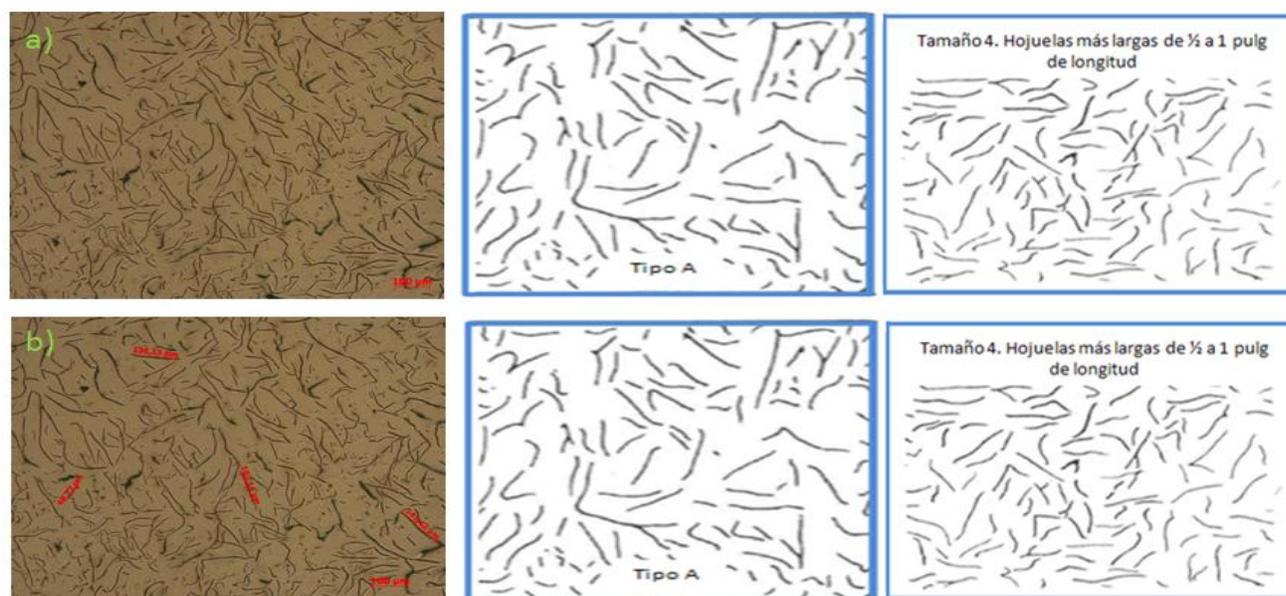
## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.3 Análisis del tamaño y distribución de hojuela de grafito.

En esta sección se presenta el análisis para la determinación del tipo de distribución y tamaño de acuerdo a las normas ASTM A247. El análisis se llevó a cabo para el freno de disco reciclado, así como a las fundiciones fabricadas de las pruebas 1, 2, y 3, las cuales corresponde a calcifer, cabala y cabala con aluminio respectivamente. El análisis se llevó a cabo exclusivamente para estas pruebas, debido a que el análisis micro estructural previo en estas pruebas fueron las que presentaron una mejor distribución y un mejor tamaño en las hojuelas de grafito de acuerdo a la norma ASTM A247, cabe resaltar que el análisis no se realizó para el espesor más pequeño (4.5 mm), debido a que en todas las pruebas presento un tamaño y una distribución de hojuela bastante pequeña.

#### 4.3.1 Análisis del freno de disco reciclado.

La norma ASTM A247 nos permite conocer los diferentes tipos de distribución, así como el tamaño de las hojuelas de grafito en observaciones realizadas a 10x, mientras que en la figura 58, se observa claramente que la distribución de las hojuelas del hierro del disco de freno reciclado es de tipo A con tamaño de hojuela 4, según ASTM A247, en la figura 56 b), se puede apreciar la longitud de la hojuelas en una foto tomada a 10X y esto nos das una idea más cercana de la longitud real de las hojuelas de grafito.



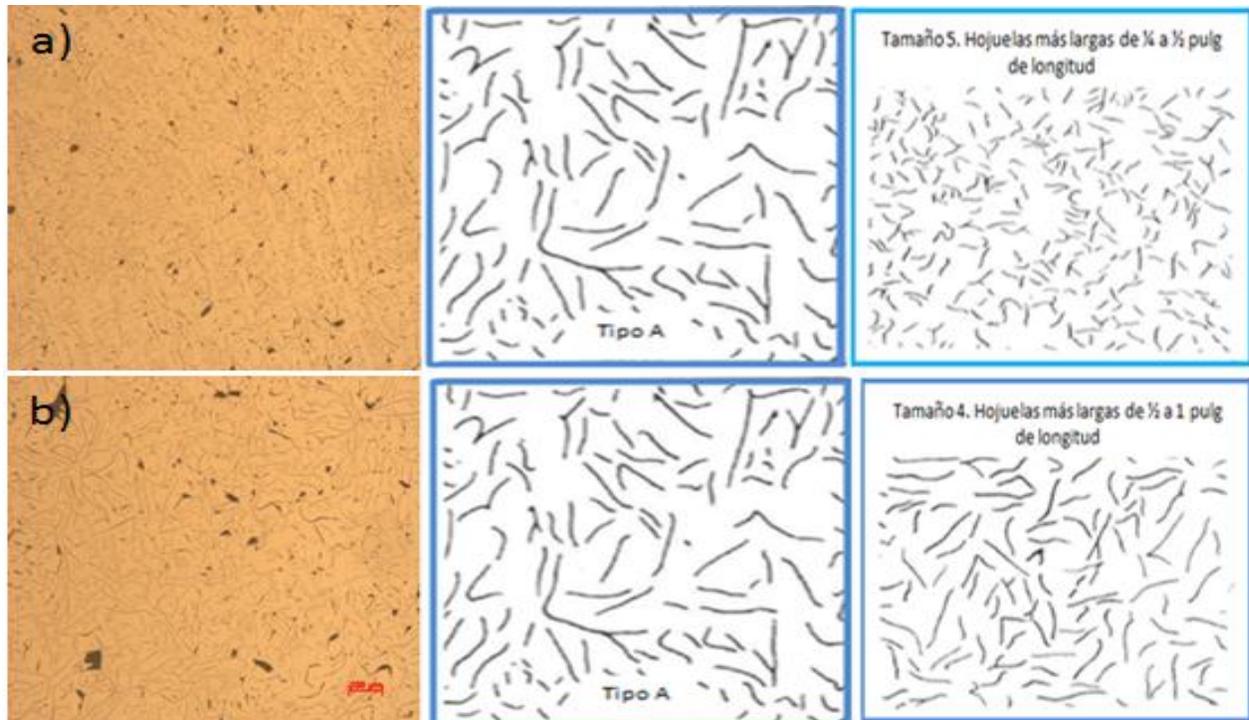
**Figura 56.** Tipo de distribución y tamaño de hojuelas que se tiene en el hierro gris comercial 4.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

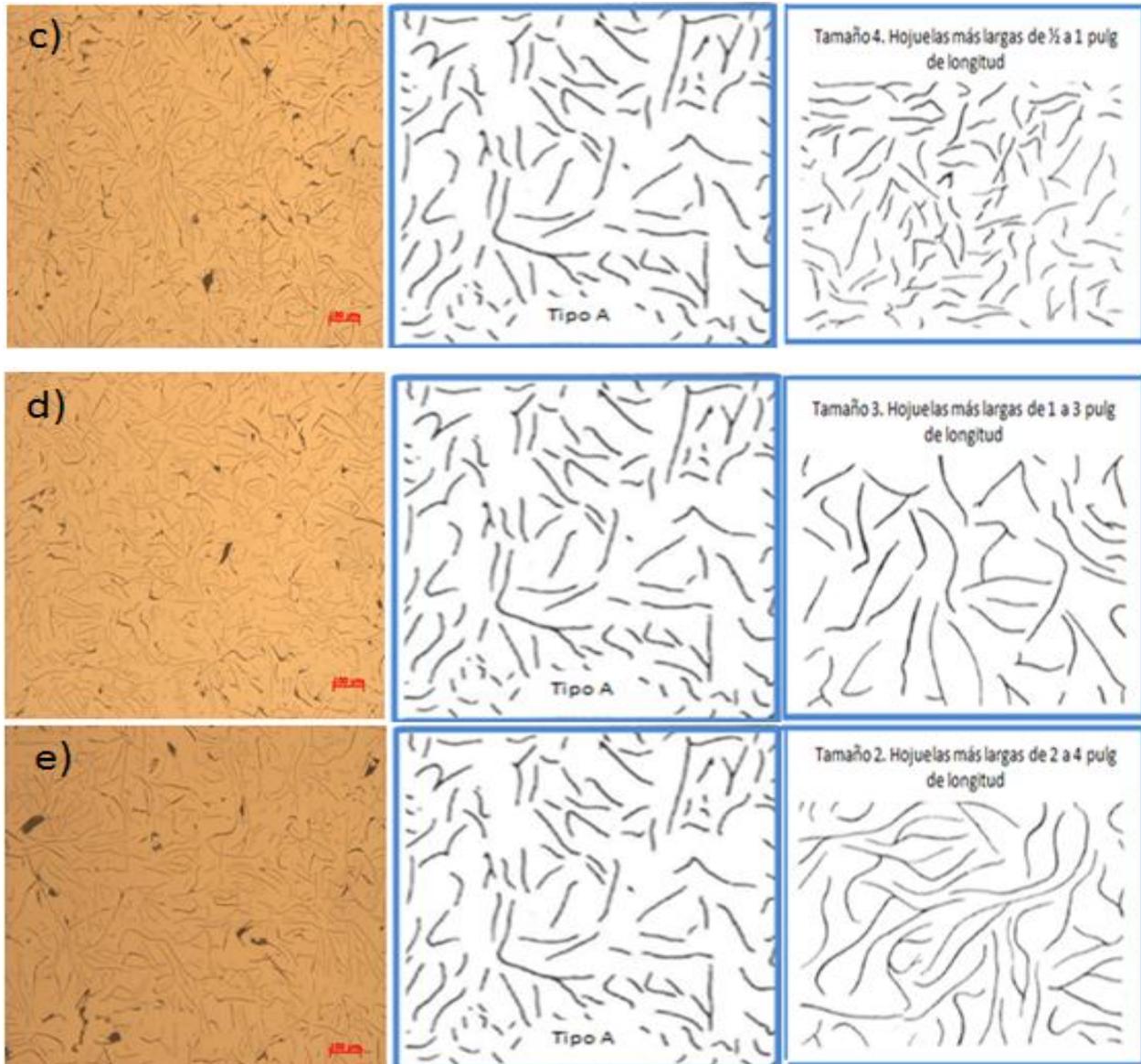
### 4.3.2 Análisis piezas obtenidas por fusión.

#### *Prueba 1*

En la figura 57 se muestra el análisis realizado a la prueba uno con inoculante comercial calcifer, este análisis se realizó en la pieza con diferentes espesores, se observa en la figura 57 a) la cual corresponde a la placa con un espesor de 8.5 mm, un 90% de distribución de grafito tipo A, mientras que de la figura 57 b) a la figura 57 e), se observa que se tiene una distribución de grafito tipo A más homogénea en estos espesores, pero solo la distribución es homogénea ya que el tamaño de las hojuelas es distinto en la mayoría de los espesores. En la figura 57 a) se tiene un tamaño 5, a diferencia de las figuras 57 b) y 57 c), donde se tiene un tamaño igual a 4 en la figura 57 d) se tiene un tamaño igual a 3 y en la figura 57 e) un tamaño igual a 2, de acuerdo a estos resultados se deduce que el espesor y por lo tanto la velocidad de solidificación influyen de manera considerable en la distribución y tamaño de las hojuelas de grafito, en este caso, se tiene que conforme se incrementa el espesor, se incrementa el tamaño de las hojuelas de grafito, las cuales corresponden a un tipo A.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

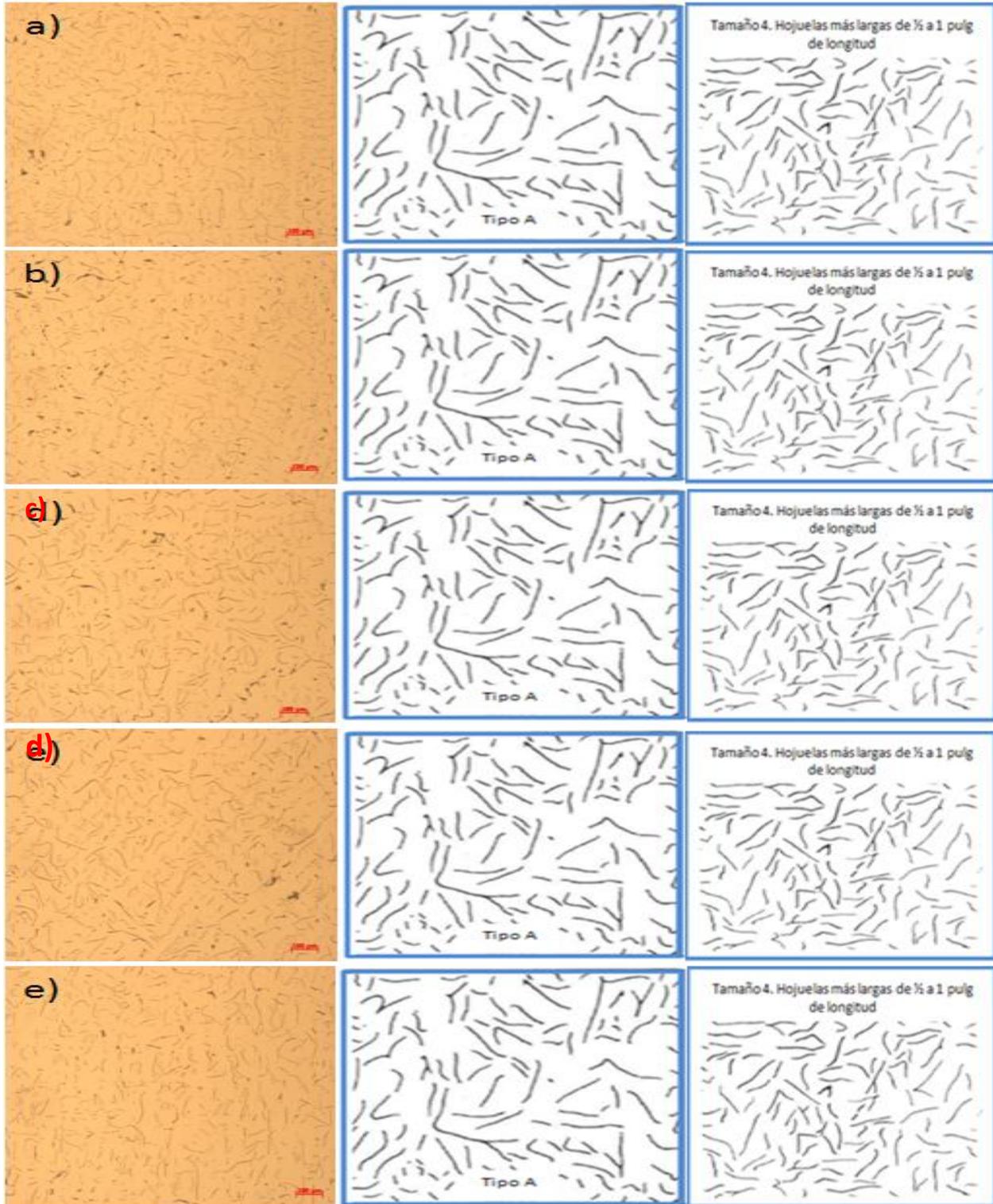


**Figura 57.** Tipo de distribución y tamaño obtenido en la pieza de diferentes espesores de la prueba 1.

### **Prueba 2**

El análisis que se realizó a la prueba 2 se observa en la figura 58, esta corresponde a la prueba realizada con agente inoculante comercial cabala, al igual que el análisis realizado en la prueba 2, se puede apreciar el tipo de de distribución y tamaño de la hojuela para los diferentes espesores de la pieza fabricada. En esta prueba se observo que para todos los espesores se tiene una distribución y tamaño homogéneo de la hojuela de grafito, el cual corresponde a una distribución tipo A y un tamaño de hojuela de 4. Este comportamiento se atribuye al tipo de inoculante.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



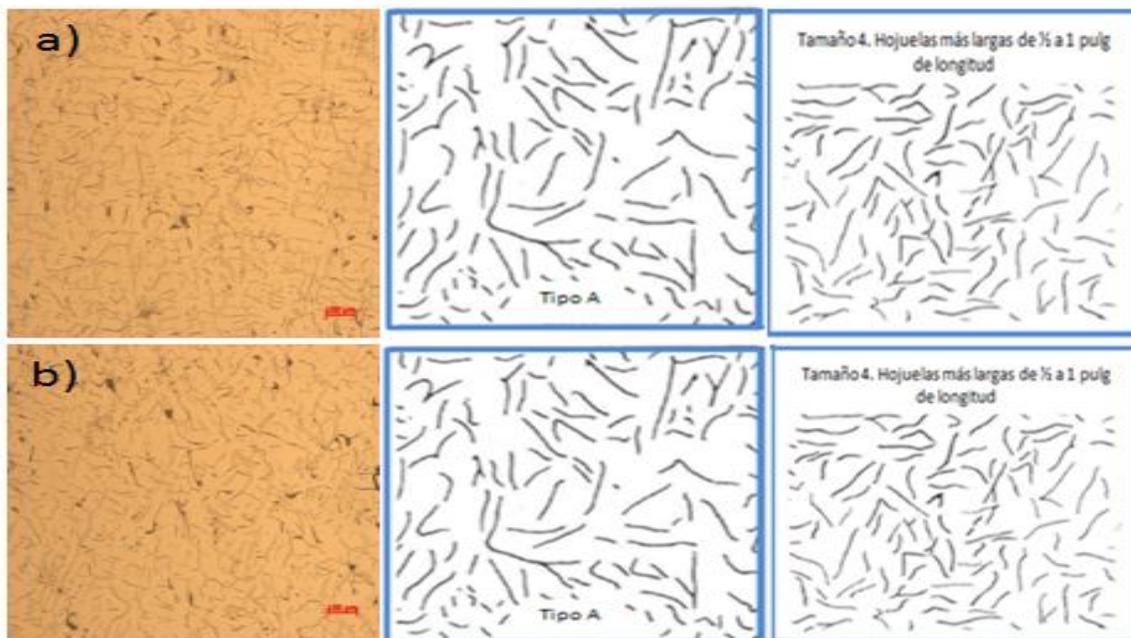
**Figura 58.** Tipo de distribución y tamaño obtenidos en la pieza de diferentes espesores de la prueba 2.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

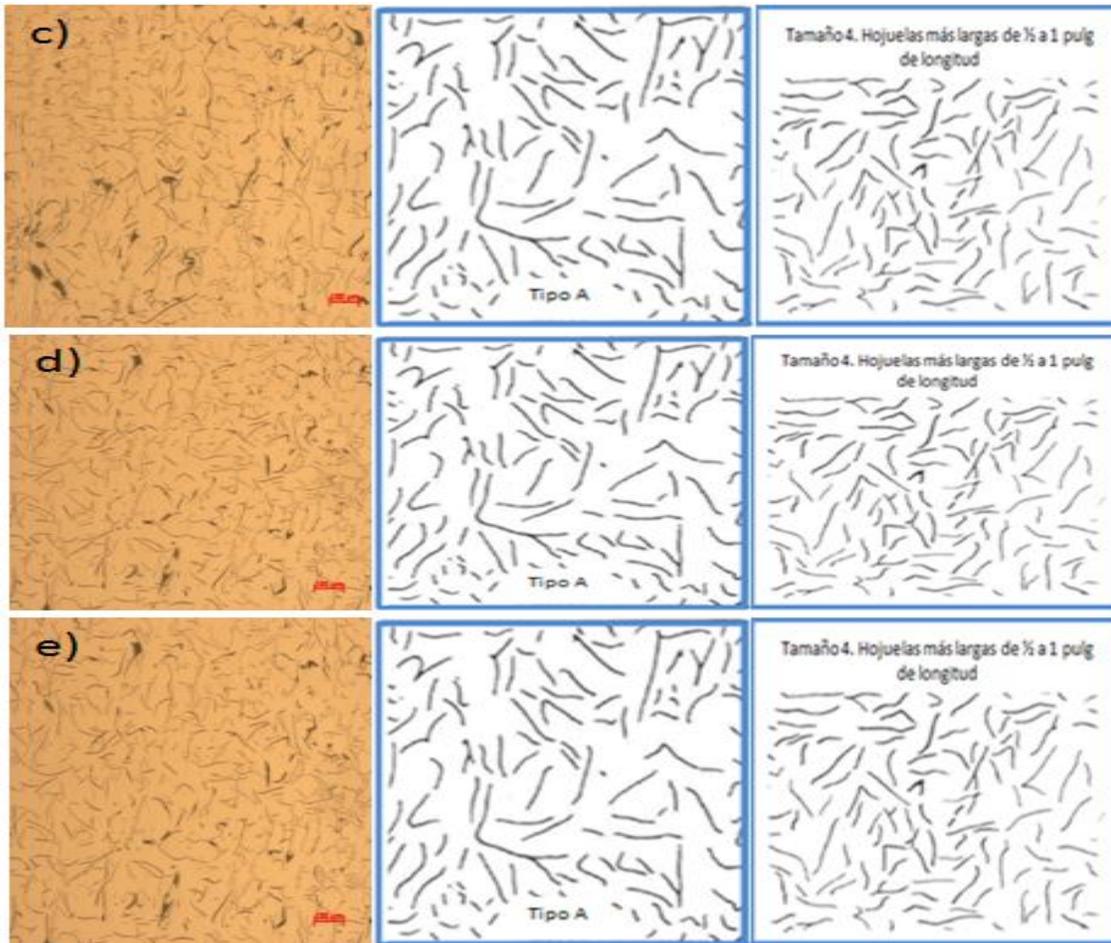
Comprando la prueba 1 y 2, se observa que hubo una variación considerable en cuanto al tamaño de las hojuelas de grafito, esto puede deberse al tipo de inoculante utilizado en ambas pruebas ya que en una se utilizó calcifer y en la otra cabala, respectivamente y a la velocidad de solidificación relacionada con el cambio de espesor, principalmente. También podemos observar cómo se obtuvo un tamaño y una distribución mas homogénea en la prueba 2, ya que en la prueba 1 se obtuvo una distribución homogénea pero el tamaño incremento considerablemente en las placas con mayor espesor, esto puede ser perjudicial para el material, ya que lo que se busca es tener un tamaño promedio, para brindarle buenas propiedades al material.

### **Prueba 3**

El análisis realizado a la prueba 3, la cual se realizo con cabala más aluminio para determinar el efecto del aluminio sobre la formación de sitios de nucleación heterogénea para la formación de las hojuelas. La figura 59, muestra los resultados para los diferentes espesores, se tiene una distribución tipo A en todos los espesores, así como un tamaño de hojuela igual a 4, lo cual puede indicar que el aluminio no solo ayuda a generar sitios de nucleacion sino que al parecer también favorece una mejor distribución de las hojuelas de grafito y un tamaño aceptable, ya que como se menciono anteriormente este elemento tiende a favorecer la grafitización, y engruesa la estructura final del grafito.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



**Figura 59.** Tipo de distribución y tamaño a diferentes espesores para la prueba 3.

Cabe mencionar que el análisis para el tamaño y distribución de la hojuela de grafito, con agentes comerciales más adiciones de aluminio, solo se realizo para la prueba 3 (cabala+aluminio), ya que la prueba 4 (calcifer+aluminio), presento una mala distribución, y un tamaño pequeño, esto se pudo deber a la variación del contenido de aluminio adicionado, velocidad de solidificación y tiempo de desmoldeo. Lo cual ocasiono una distribución y tamaño tipo E.

### **4.4. Comparación entre el tipo de hojuela obtenido en la caraterizacion del sico de freno y las aleaciones producidas.**

Para determinar el tamaño promedio real de las hojuelas de grafito que están presentes en el disco de freno reciclado y las fundiciones fabricadas, se utilizó el programa carnoy, que nos permite poder realizar las mediciones directamente en la foto tomada a 10x. En este programa se

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

realizaron 50 mediciones aleatorias de hojuelas de grafito, en una imagen a 10x, como se menciona anteriormente, para poder determinar el tamaño de hojuela promedio. La tabla 11, muestra los resultados obtenidos para el disco de freno reciclado, en donde se realizaron mediciones en tres diferentes zonas del disco de freno.

**Tabla 11.** Tamaño promedio de las hojuelas de grafito en el disco de freno.

Zona	Pista interior de frenado	Pista exterior de frenado	Parte horizontal
Tamaño promedio de la hojuela ( $\mu\text{m}$ )	116.77	111.49	128.94

La tabla 12, muestra los resultados de la medición de hojuelas de grafito que se hicieron con el programa Carnoy, para las fundiciones fabricadas 1, 2 y 3, para los diferentes espesores las cuales presentaron el mejor tipo de distribución y un tamaño de hojuela óptimo. Se determinó que se tiene un tamaño de hojuela en promedio entre 70 y 90  $\mu\text{m}$

**Tabla 12.** Tamaño de hojuela promedio obtenido para las pruebas 1, 2 y 3, para los diferentes espesores.

Prueba		Espesor ( $\mu\text{m}$ )				
		8.5	13	17	21	25.4
1	Tamaño de hojuela promedio	103.86	83.45	90.96	92.37	95.21
2	Tamaño de hojuela promedio	80.87	71.29	86.68	87.43	78.52
3	Tamaño de hojuela promedio	80.56	82.72	84.34	90.53	87.08

En base a los resultados de la tabla 12, se puede decir que en las pruebas realizadas con inoculantes comerciales (prueba 1y 2), se tiene un tamaño y distribución de grafito aceptables, mientras que en la prueba 3 a la cual se le adiciono aluminio, se determinó que este elemento también favorece a la grafitización, obteniendo un tamaño y distribución de hojuela aceptable.

En la tabla 12, se puede observar como el tamaño de la hojuela es completamente homogéneo a excepción de la prueba uno, donde se observa que se tuvo las hojuelas más largas, esto pudo deberse, tanto al agente inoculante y a la velocidad de solidificación, por lo cual, posiblemente se dio lugar a que la hojuela creciera bastante, esto se ve reflejado en la muestra con un espesor de 8.5 mm de espesor, ya que en esta se encontraban hojuelas de gran tamaño aunque

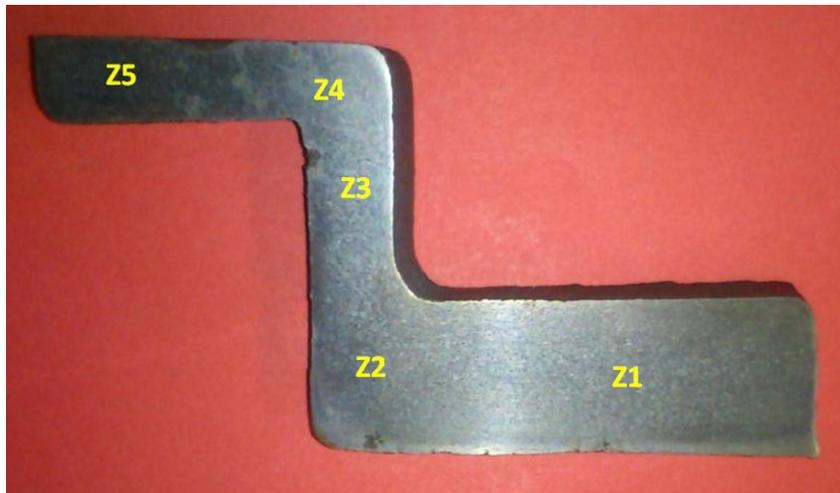
## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

no en toda la superficie de la muestra, y las mediciones se realizaron a estas hojuelas, es por ese motivo que se observa que tiene un tamaño mucho mayor a los demás espesores, pero de manera general se observa un buen tamaño y una buena distribución de hojuelas de grafito en las pruebas 1,2 y 3

### 4.5. Análisis metalográfico realizado a los discos de freno de las aleaciones fabricadas.

En esta sección se presentan los resultados microestructurales de los discos de freno fabricados para las pruebas 1 a 4. La figura 60, muestra un corte transversal del disco de freno fabricado en las pruebas, y se indica cada una de las zonas donde se realizó el análisis microestructural. Donde Z1 es la pista de frenado, Z2 ángulo inferior, Z3 la parte vertical, Z4 ángulo superior, Z5 parte superior del disco. Las figuras 63 a 66 presentan fotomicrografías de las diferentes zonas del disco de freno a 10x para microestructura sin ataque y a 50x para probetas atacadas revelando la microestructura. Las tablas 15 a 18, presentan los resultados del tipo de hojuela, tamaño, distribución y matriz de las diferentes zonas del disco de freno para cada prueba realizada.



**Figura 60.** Corte trasversal de los discos de freno fabricados donde se indica las zonas del análisis.

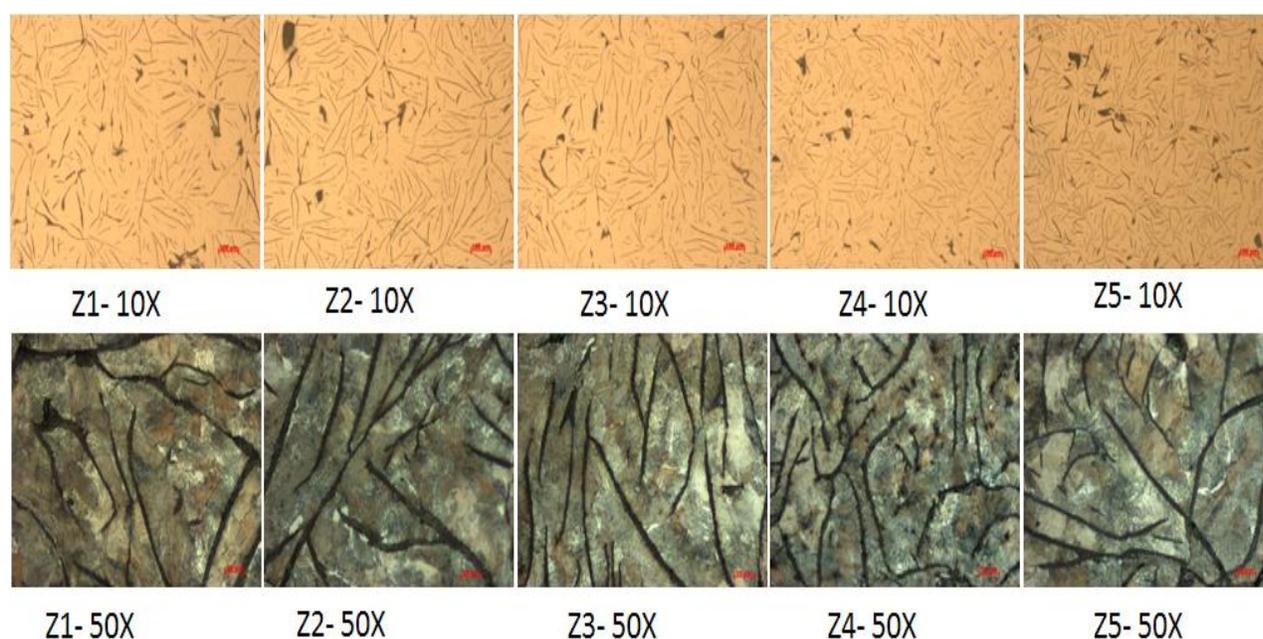
#### ***Prueba 1***

La figura 61 presenta los resultados microestructurales de cada una de las zonas del disco de freno para la prueba 1 con calcifer como inoculante. Se observa que dependiendo del espesor de la zona del disco de freno se tiene una distribución y longitud de hojuela diferente. Se identificó

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

que el grafito se encuentra dentro de una matriz perlítica, aunque se observan algunas regiones de ferrita que se encuentran alrededor de las hojuelas de grafito. La tabla 13 presenta el tipo de distribución, matriz y tamaño de hojuela para esta prueba.

En general se observa que se te obtuvo una distribución y tamaño bastantes aceptables. La variación en el tipo de distribución y tamaño de las hojuelas de grafito se puede atribuir a que el material no tenía la fluidez adecuada, variando la velocidad de solidificación y composición química, sin embargo este comportamiento se relaciona con el tipo de inoculante, en este caso se utilizó el inoculante comercial calcífer a base de Ca y Ba.



**Figura 61.** Tipo de hojuela, distribución y matriz para las diferentes zonas del disco de freno.

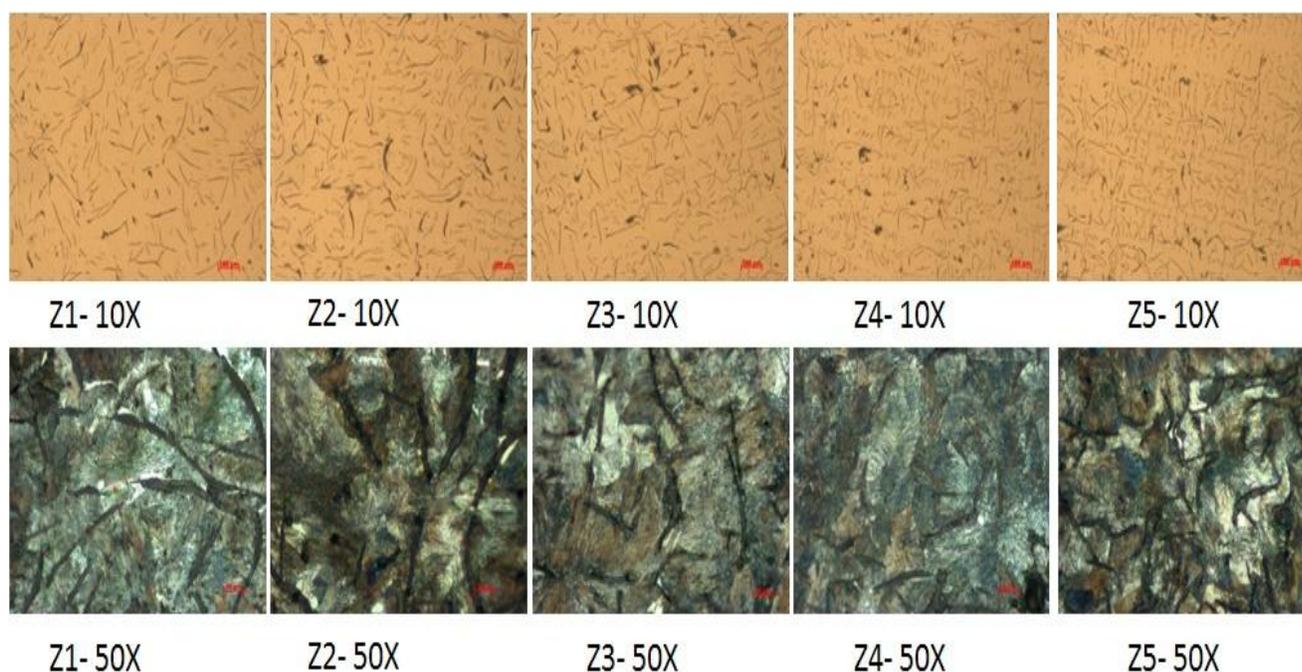
**Tabla 13.** Análisis microestructural de las diferentes zonas del disco de freno para la prueba 1.

Análisis Microestructural	Zona				
	1	2	3	4	5
Tipo de distribución	90%B, 10%A	90%B, 10%A	90%B, 10%A	80%B, 20%A	100%B
Tamaño ASTM-AFS	2 y 3	2 y 3	4 y 3	4	4
Matriz	Perlítica	Perlítica	Perlítica	perlítica	Perlítica
Tamaño 10X (µm)	91.14	92.04	103.68	101.98	91.51

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

### **Prueba 2**

La figura 62 muestra el tipo de distribución y tipo de matriz que se obtuvo en el disco de freno para la prueba con cabala como agente inoculante, se puede apreciar que en la zona 1 y 2 se tiene un tipo de distribución tipo A y un tamaño de hojuela aceptable, y en la zona 3, 4 y 5 se tiene un tipo de distribución tipo D y E, también se observa que la matriz que se obtiene en este material es homogénea en toda la pieza, esto es grafito contenido en una matriz perlítica. Se resumen las principales características microestructurales en la tabla 14, en donde se indica el tipo de distribución de cada zona, matriz y tamaño de la hojuela bajo la norma ASTM A247.



**Figura 62.** Tipo de hojuela, distribución y matriz para las diferentes zonas del disco de freno.

**Tabla 14.** Análisis microestructural de las diferentes zonas del disco de freno para la prueba 2.

Análisis Microestructural	Zona				
	1	2	3	4	5
Tipo de distribución	100% A	100% A	90%A, 10%E	80%A, 20%E	100%E
Tamaño ASTM-AFS	4 y 5	4 y 5	4 y 5	4 y 5	4 y 5
Matriz	Perlítica	Perlítica	Perlítica	Perlítica	Perlítica
Tamaño 10X (µm)	86.60	71.56	89.63	109.15	88.58

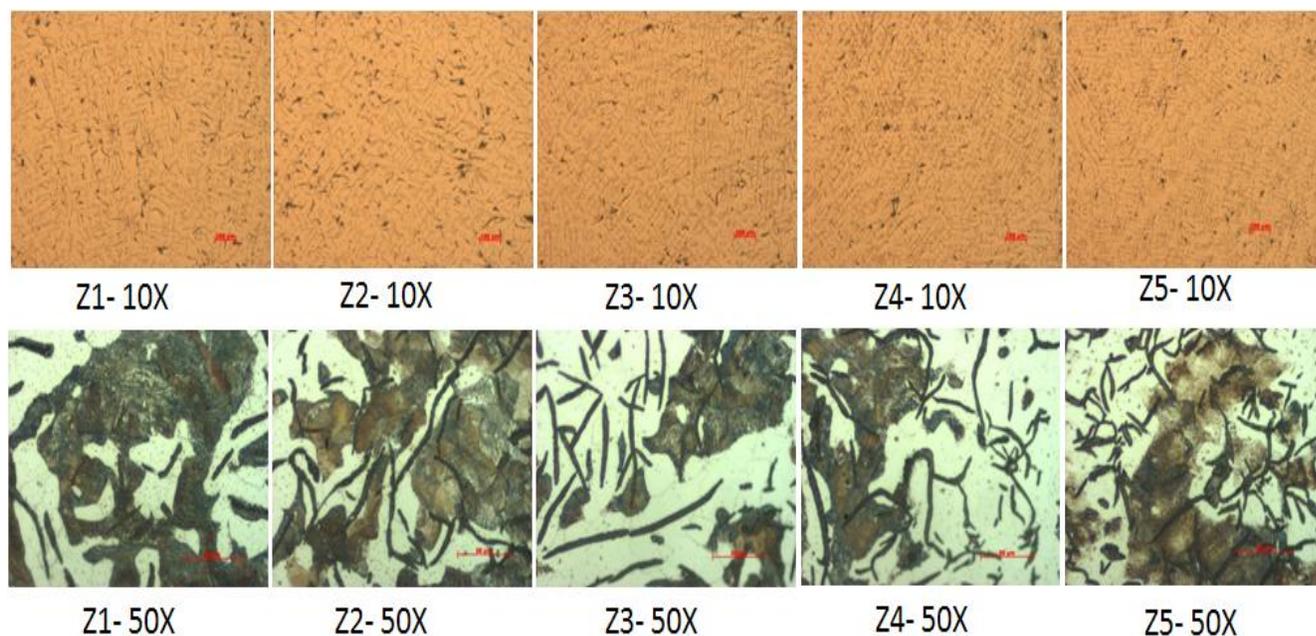
En este caso la variación del tipo de distribución y el tamaño se debe al efecto del inoculante, asociado a las condiciones experimentales, geometría de la pieza y a la velocidad de solidificación,

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

ya que se tienen zonas con diferente espesor, por lo que al verse afectada la velocidad de solidificación y de enfriamiento, se afectó la distribución y tamaño de las hojuelas, ya que como se observa en la figura 61 se obtuvo un mejor tamaño y distribución en las zonas con un mayor espesor.

### **Prueba 3**

La figura 63 presenta los resultados de la prueba 3 con el inoculante cabala mas aluminio. Se determinó una distribución tipo D y E en la hojuela de grafito, este tipo de distribución es el menos deseado en la industria. También se determinó que el tipo de matriz del hierro es perlita-ferrita, aunque dependiendo del espesor de la zona del disco de freno aumenta el contenido de ferrita y decrece la perlita.



**Figura 63.** Tipo de hojuela, distribución y matriz para las diferentes zonas del disco de freno.

En este caso el tipo de distribución obtenido se debe al aluminio adicionando en esta prueba. Se observa que las hojuelas son abundantes y están dispersas por toda la matriz, aunque no sea una distribución y tamaño apropiados. El aluminio es un elemento que promueve la grafitización en contenidos menores del 2%, también promueve la formación de la ferrita como se observa en la figura 63. Además experimentalmente se comprobó que la adición de aluminio

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

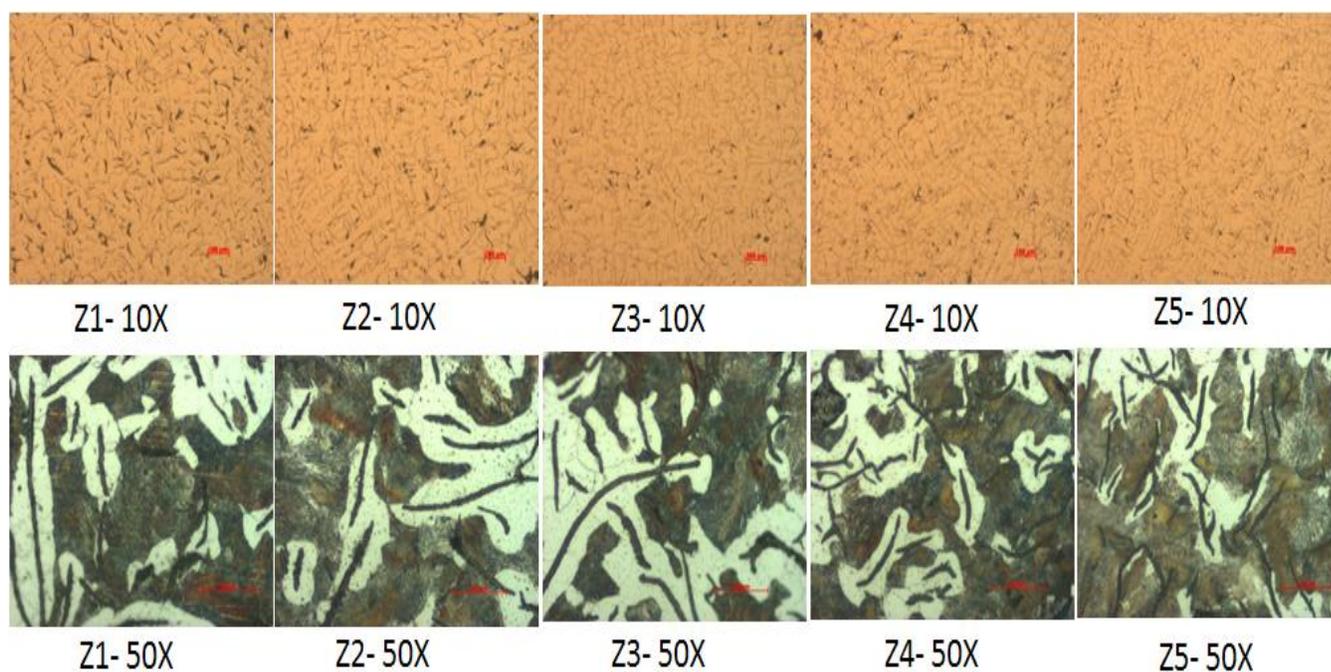
afecto la fluidez del material, por lo que la velocidad de solidificación cambio con la geometría del disco.

**Tabla 15.** Análisis microestructural de las diferentes zonas del disco de freno para la prueba 3.

Análisis Microestructural	Zona				
	1	2	3	4	5
Tipo de distribución	70% A, 30%B	80%A, 20%B	80%A, 20%B	100% E	50%B, 50%E
Tamaño ASTM-AFS	4 y 5	4 y 5	4 y 5	5	5
Matriz	Perlita-Ferrita	Perlita-Ferrita	Perlita-Ferrita	Perlita-Ferrita	Perlita-Ferrita
Tamaño 10X (µm)	74.33	66.25	58.33	47.30	53.64

### Prueba 4

La figura 64 presenta los resultados para la prueba 4, la cual contiene calcifer más aluminio, se observa su efecto en la distribución y tipo de matriz en el disco fabricado.



**Figura 64.** Tipo de hojuela, distribución y matriz para las diferentes zonas del disco de freno.

Se determinó que en la zona 1 se tiene un tipo de distribución tipo A, mientras que de la zona 2 a la zona 5 se tiene un tipo de distribución tipo D y E en una matriz perlítica-ferrítica. Los resultados se presentan en la tabla 15.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

**Tabla 16.** Análisis microestructural de las diferentes zonas del disco de freno para la prueba 4.

Análisis Microestructural	Zona				
	1	2	3	4	5
Tipo de distribución	100% A	90%A, 10% E	100% A	90%D, 10%E	100% E
Tamaño ASTM-AFS	4 y 5	4 y 5	4 y 5	4 y 5	5
Matriz	Perlita-Ferrita	Perlita-Ferrita	Perlita-Ferrita	Perlita-Ferrita	Perlita-Ferrita
Tamaño 10X ( $\mu\text{m}$ )	64.88	66.94	59.31	49.75	55.13

Al igual que la prueba 3. La adición de aluminio promueve fuertemente el efecto de grafitización, es decir se tiene una gran cantidad de grafito transformado en hojuelas como se observa en la figura 64, aunque no se obtuvo una distribución óptima en la mayoría de las zonas. En este caso el contenido de aluminio fue menor al de la prueba anterior, ocasionando la variación en la fluidez, velocidad de solidificación, lo que ocasiono la variación en el tipo de distribución y tamaño de las hojuelas de grafito.

De manera general se puede apreciar que de la prueba 3 a la prueba 5 se obtuvo un tamaño, distribución y matriz aceptable. La variación de diferentes materiales como agentes inoculantes, desoxidantes y desulfurantes nos permite tener un mejor criterio de selección de materiales, aunado a un adecuado control de la velocidad de solidificación, permite obtener un mayor contenido de hojuelas de grafito, tamaño, distribución y matriz aceptables en la fabricación de hierros grises.

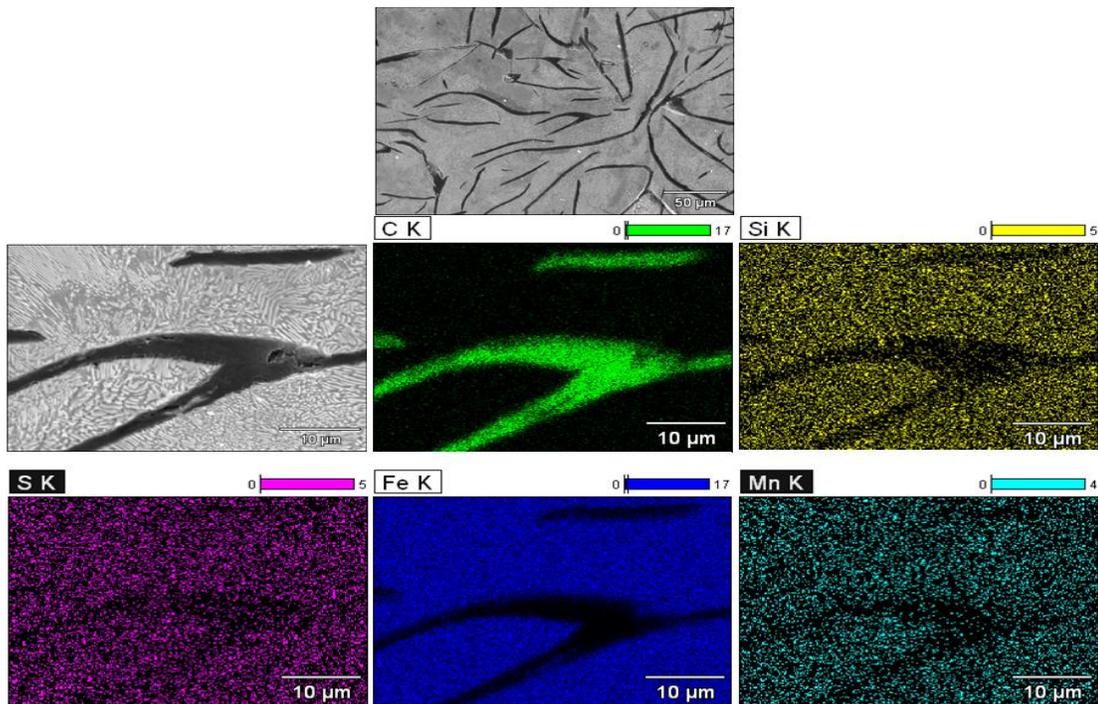
### 4.6. MEB

Se realizaron pruebas de MEB/EDS, para las fundiciones fabricadas, pero solo se reportan los resultados más sobresalientes ya que en la mayoría de las muestras que se analizaron en el MEB se obtuvo una distribución uniforme de los elementos de aleación, este comportamiento se observo principalmente para las pruebas con inoculantes comerciales, sin embargo también se observan muestras con evidencias de que algunas partículas (óxidos y sulfuros) ayudan a la nucleación y posteriormente crecimiento de las hojuelas de grafito, este comportamiento se observo para las pruebas con inoculantes comerciales y con adiciones de aluminio para desoxidar y las pruebas sin inoculante con adición de magnesio para desulfurar.

Los resultados se presentan en una imagen a bajos aumentos de la zona de interés, posteriormente se magnifica la zona y se realiza un mapeo composicional de los principales

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

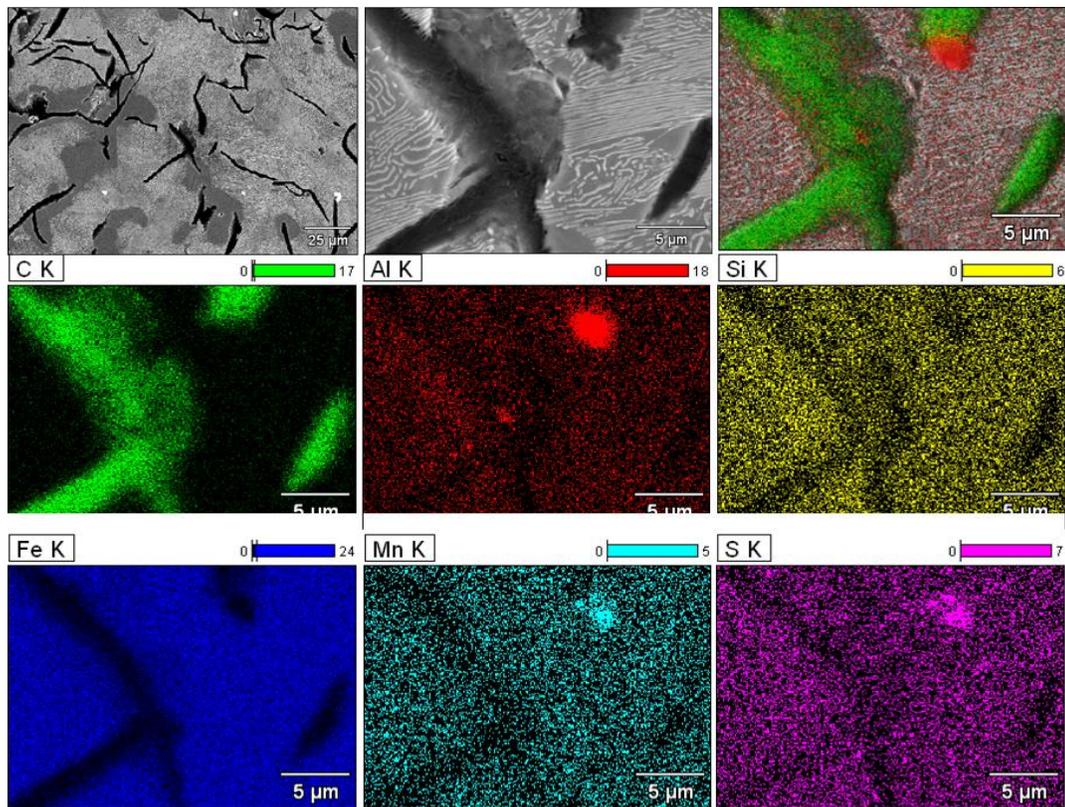
elementos que constituyen a los hierros. La figura 65, muestra un hierro gris fabricado con la adición del agente inoculante comercial calcifer, se observa con mayor detalle la hojuela de grafito y se determinó la distribución de elementos dentro de la hojuela de grafito, se observa que la distribución de elementos de aleación es homogénea dentro de la hojuela y se encuentran presentes elementos tales como silicio, azufre y manganeso.



**Figura 65.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer y su análisis EDS.

La figura 66, muestra una fotomicrografía de la prueba 4, la cual corresponde a la adición de calcifer-aluminio. El mapeo reveló una zona en específico, donde se detectó un alto contenido de aluminio, manganeso y azufre. Se observa también que de esta zona se desprende una hojuela de grafito, por lo que consideramos que esta partícula actuó como sitio de nucleación para la hojuela de grafito.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

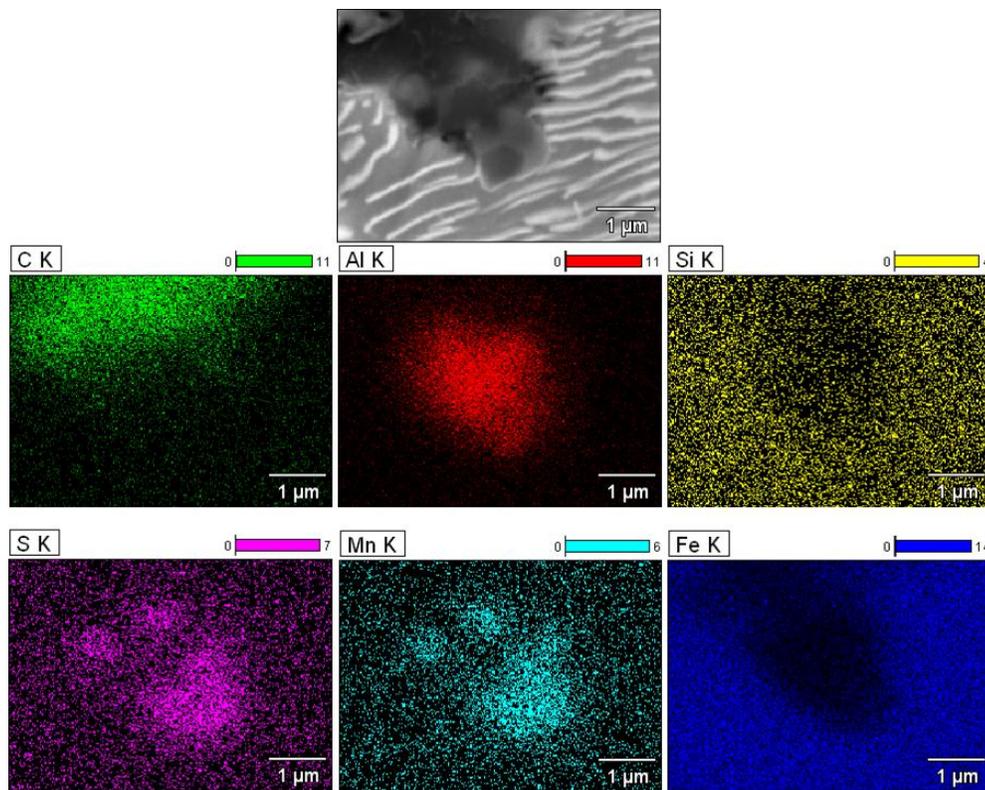


**Figura 66.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer-aluminio y su análisis EDS.

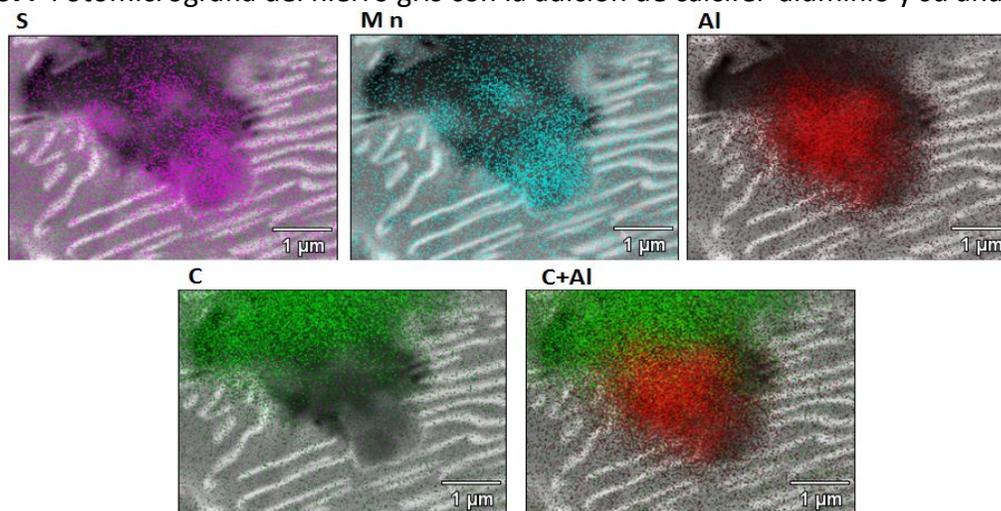
La figura 67 muestra la misma zona de la figura 66 solo que a más aumentos para definir mejor la forma de estas partículas, y determinar su relación con la formación de las hojuelas de grafito. De estos resultados se observa que estas partículas son de una forma esferoidal y se encuentran rodeadas de grafito; también se determinó que en la zona aledaña donde se encuentran las partículas, se localiza la hojuela de grafito. El mapeo de esta zona indica una alta concentración de aluminio, manganeso y azufre como se observa en el análisis EDS de la figura 67.

En la figura 68 se superponen los elementos encontrados en el barrido del mapeo composicional para la misma partícula observada en el caso anterior, de estos resultados podemos deducir que estas partículas corresponden a un óxido o un sulfuro, las cuales actúan como sitios de nucleación para las hojuelas de grafito.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



**Figura 67.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer-aluminio y su análisis EDS.

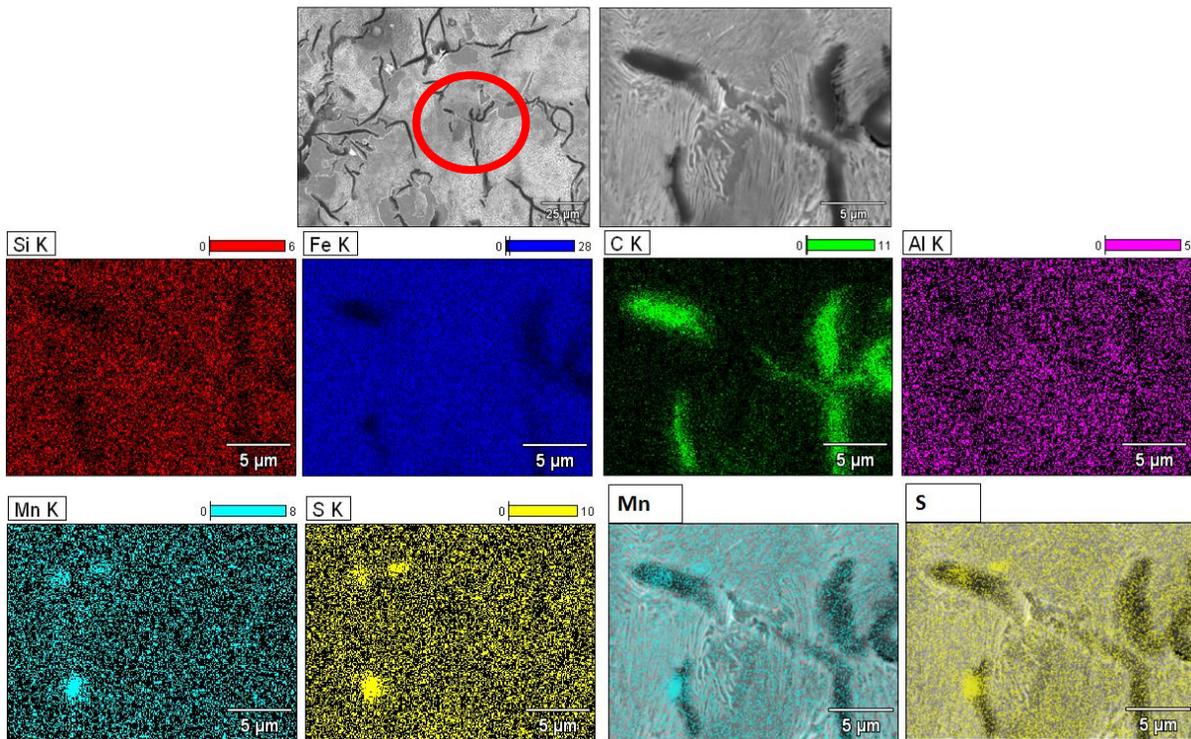


**Figura 68.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer-aluminio y su análisis EDS.

La figura 69, en la micrografía del lado superior izquierdo se marca con un círculo la zona donde se realizó el mapeo, podemos observar como en una de las hojuelas de grafito se encuentra una partícula, de la cual se desprende la hojuela de grafito. El mapeo composicional de esta zona, nos muestra que la partícula en contacto con la hojuela de grafito, existe una elevada

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

concentración de manganeso y de azufre por lo cual, se atribuye a un sulfuro que actúa como sitio de nucleación para el grafito. Se observa en la parte superior de la hojuela una elevada concentración de azufre y de manganeso, por lo que se deduce que el crecimiento de la hojuela es a partir de un sulfuro, ya que estos pueden actuar como sitios de nucleación del grafito.

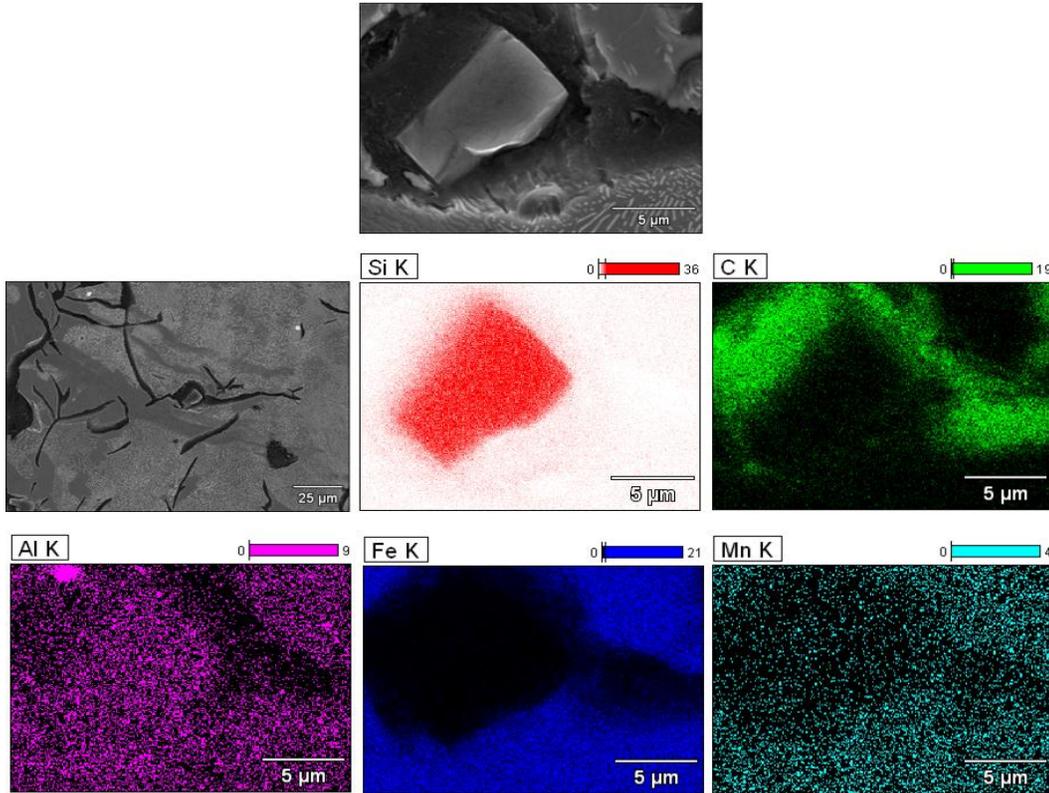


**Figura 69.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer-aluminio y su análisis EDS.

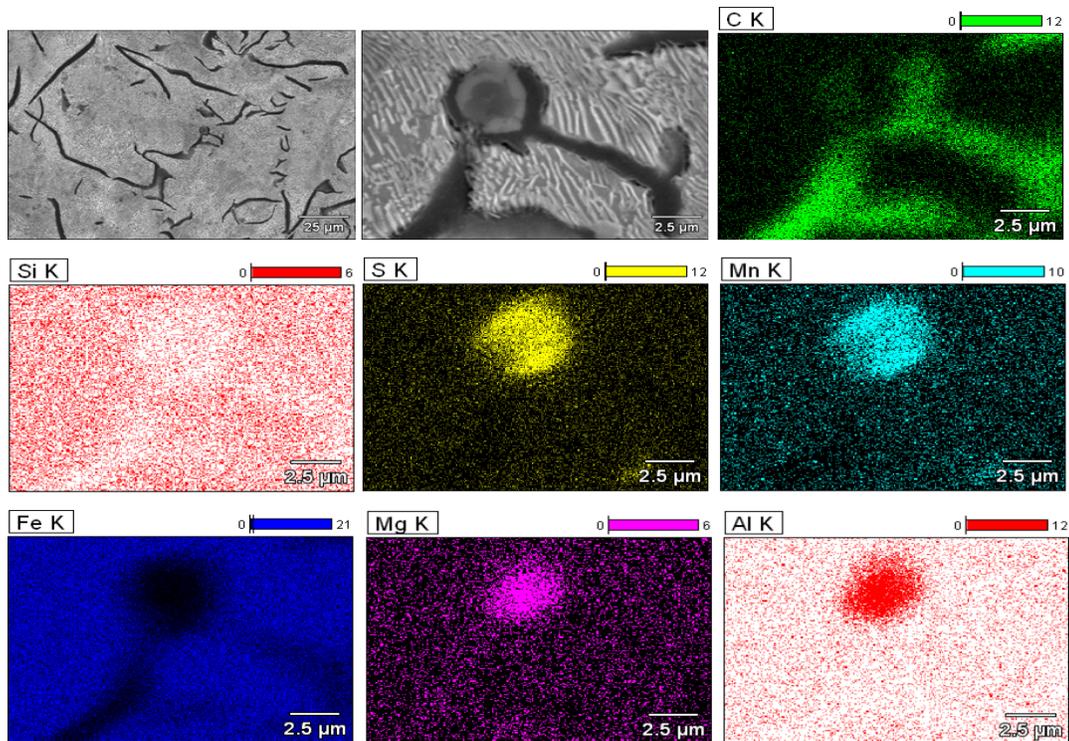
En la figura 70, correspondiente a la prueba 4 (calcifer-aluminio), se observa una partícula de geometría rectangular, la cual se encuentra rodeada, al parecer de una hojuela de grafito, por lo que se considera que la partícula, ayudo a la nucleación del grafito. El mapeo composicional de esta zona indica que la partícula está constituida en su mayoría por silicio y por aluminio, también se observa cómo se encuentra rodeada por grafito, por lo que la partícula está relacionada con el crecimiento y nucleación de la hojuela de grafito.

La figura 71 muestra la fotomicrografía de la prueba con inoculante comercial cabala, se observa una partícula redonda, se observa que la partícula está constituida por diferentes fases, debido a la tonalidad de cada una de estas zonas de la partícula, también podemos apreciar como esta partícula se encuentra rodeada de grafito, lo cual nos indica actuó como sitio de nucleación para el grafito.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION



**Figura 70.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de calcifer-aluminio y su análisis EDS.

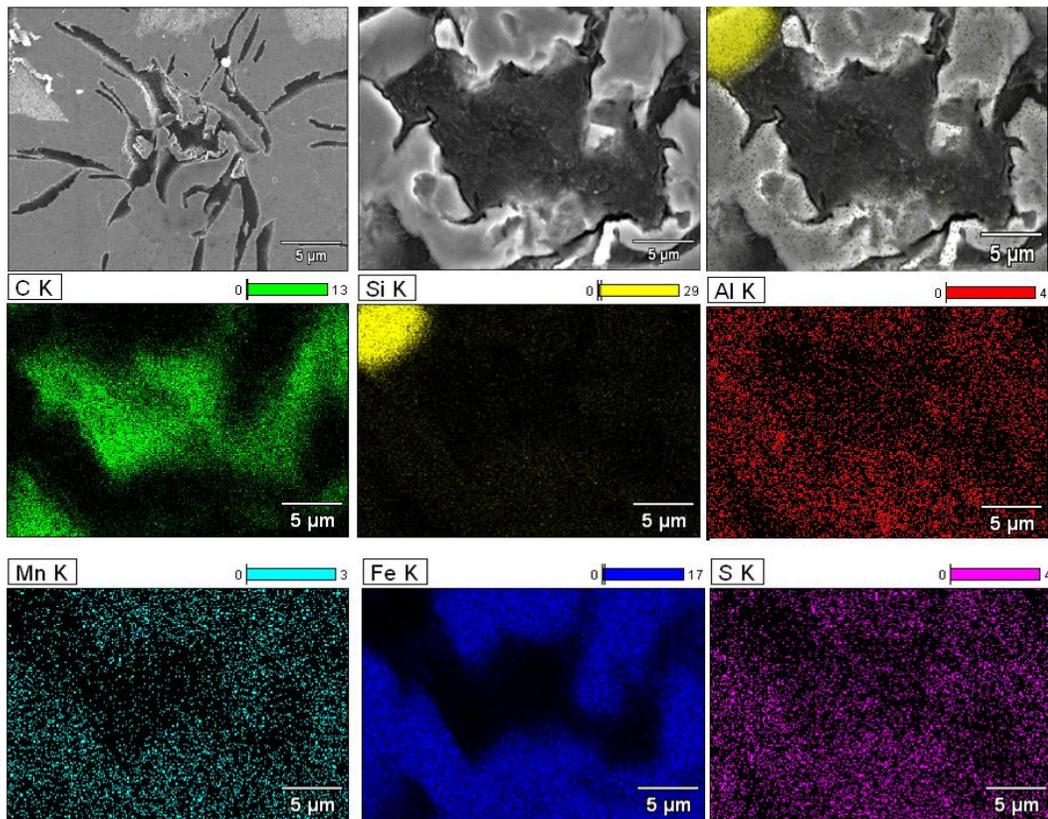


**Figura 71.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de cabala y su análisis EDS.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

El mapeo composicional de la partícula de la figura 71 indica que la partícula está compuesta principalmente por azufre, manganeso, magnesio y aluminio. Se observa claramente que esta partícula se encuentra rodeada de grafito, además de que existe un contenido de grafito menor en su interior. Este resultado nos indica que dicha partícula se atribuye a un óxido y/o sulfuro.

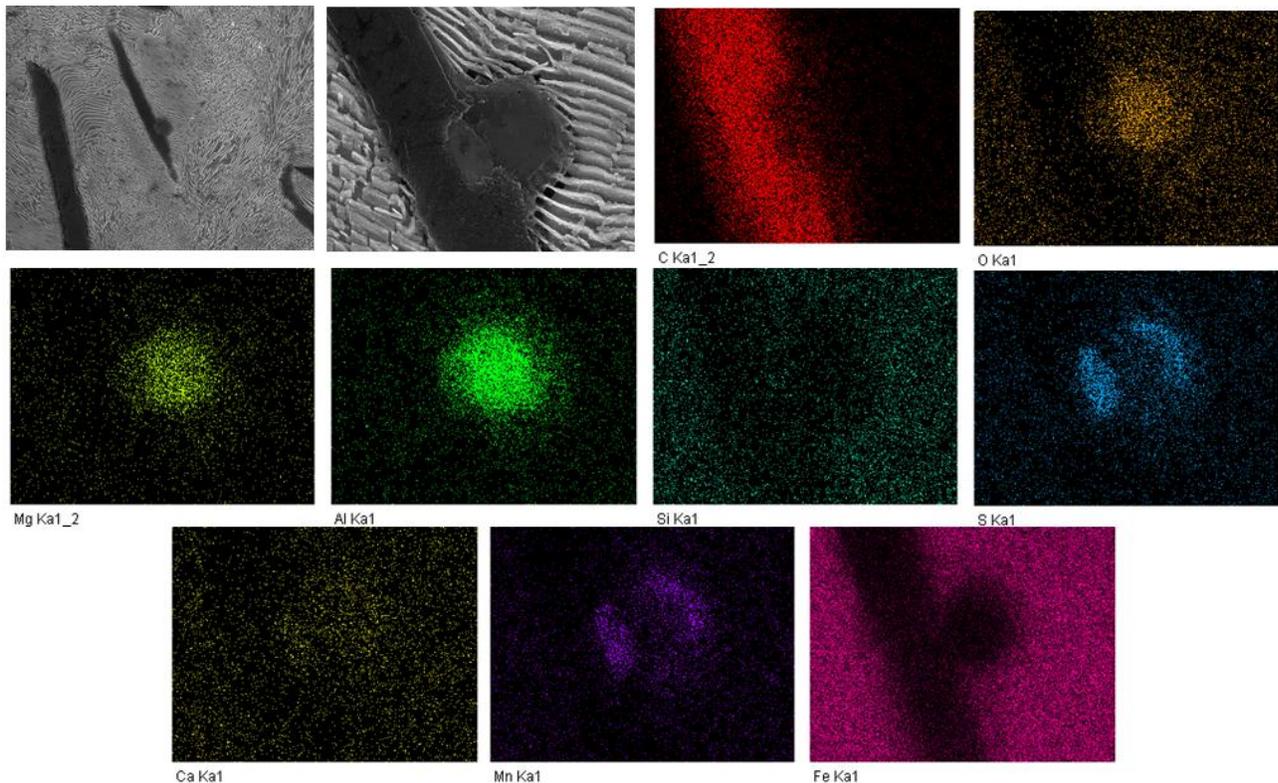
La figura 72 presenta un análisis de la fundición 3, la cual corresponde a la adición de aluminio. Se observa una partícula en la esquina superior izquierda, de la cual se desprende la que podría ser una hojuela de grafito. Se llevó a cabo el mapeo composicional de esta zona de la fotomicrografía, la partícula analizada está constituido por un alto contenido de grafito, también se aprecia como de esta partícula se desprende lo que podría ser una hojuela de grafito, como se observa en el mapeo corresponde a una partícula con alto contenido de grafito, además de que se observa una distribución uniforme de los principales elementos de aleación en la matriz.



**Figura 72.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de cabala-aluminio y su análisis EDS.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

Se realizó un análisis en el MEB de alta resolución para observar más claramente determinadas partículas que actúan como sitios de nucleación para las hojuelas de grafito, como se observa en la figura 73. Se observa como el grafito está rodeado de lo que puede ser un óxido o un sulfuro, de la misma forma se aprecia como la partícula externa a la hojuela de cierta manera se encuentra adherida a la hojuela de grafito, esto es importante porque permite afirmar que estas partículas ayudan a la formación de la hojuela de grafito.



**Figura 73.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de inoculante cabala y su análisis EDS.

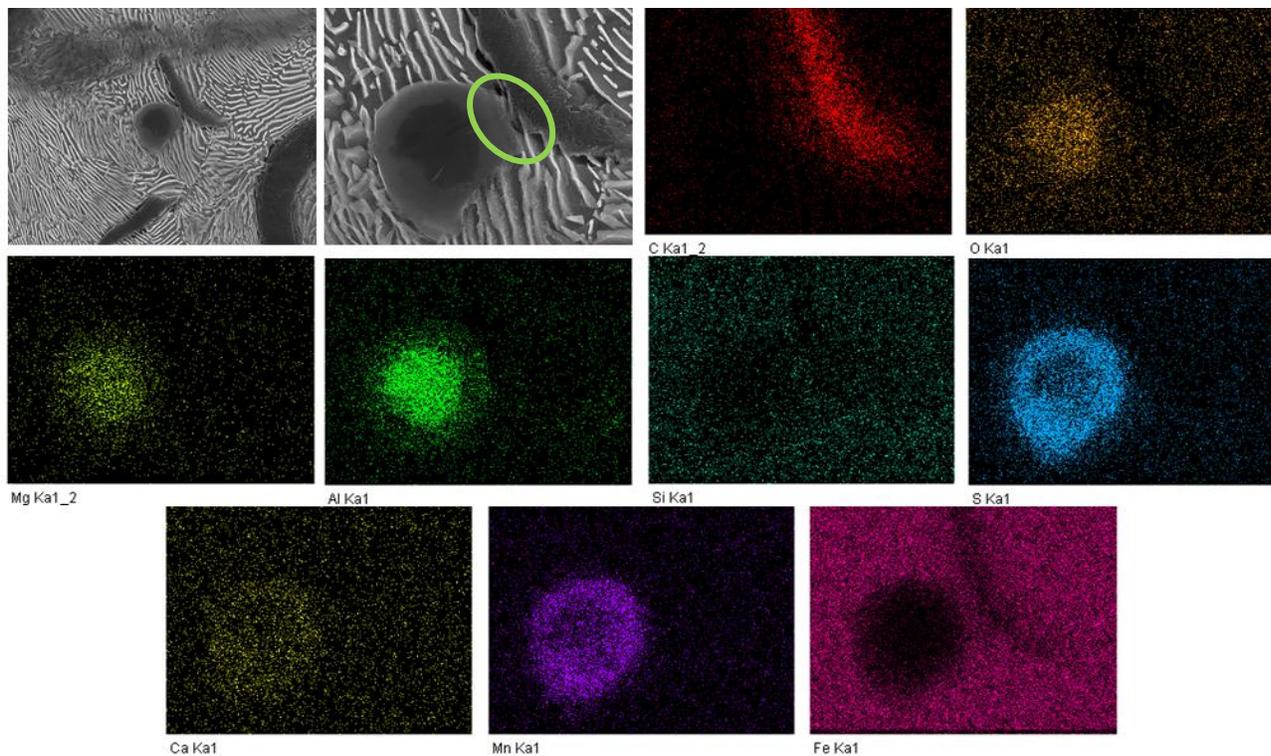
Se realizó un análisis en el MEB de alta resolución para observar más claramente determinadas partículas que actúan como sitios de nucleación para las hojuelas de grafito, como se observa en la figura 73, el grafito se encuentra rodeado de lo que puede ser un óxido o un sulfuro, se observa como la partícula externa a la hojuela se encuentra adherida a la hojuela de grafito, ayudando a su formación.

El mapeo del MEB de alta resolución indica que las partículas están compuestas principalmente por oxígeno, magnesio, aluminio, azufre, calcio y manganeso. La partícula que se

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

encuentra en el interior de la hojuela de grafito principalmente está compuesta por azufre y manganeso, lo que nos hace suponer que se trata de un sulfuro que favorece la nucleación heterogénea.

La figura 74 nos muestra una foto tomada en MEB de alta resolución de una partícula ligada a una hojuela de grafito, la cual se encuentra marcada con la circunferencia en verde, algo interesante es que dicha partícula está compuesta por dos fases. El mapeo realizado a la partícula indica que está compuesta principalmente por oxígeno, magnesio, aluminio, silicio, azufre, calcio y manganeso. Se establece que la fase interior de la partícula, corresponde a un óxido ya que como se puede apreciar en el mapeo está formado principalmente por oxígeno y aluminio, mientras que la parte exterior de la partícula corresponde a un sulfuro, ya que está formado principalmente por azufre y manganeso.

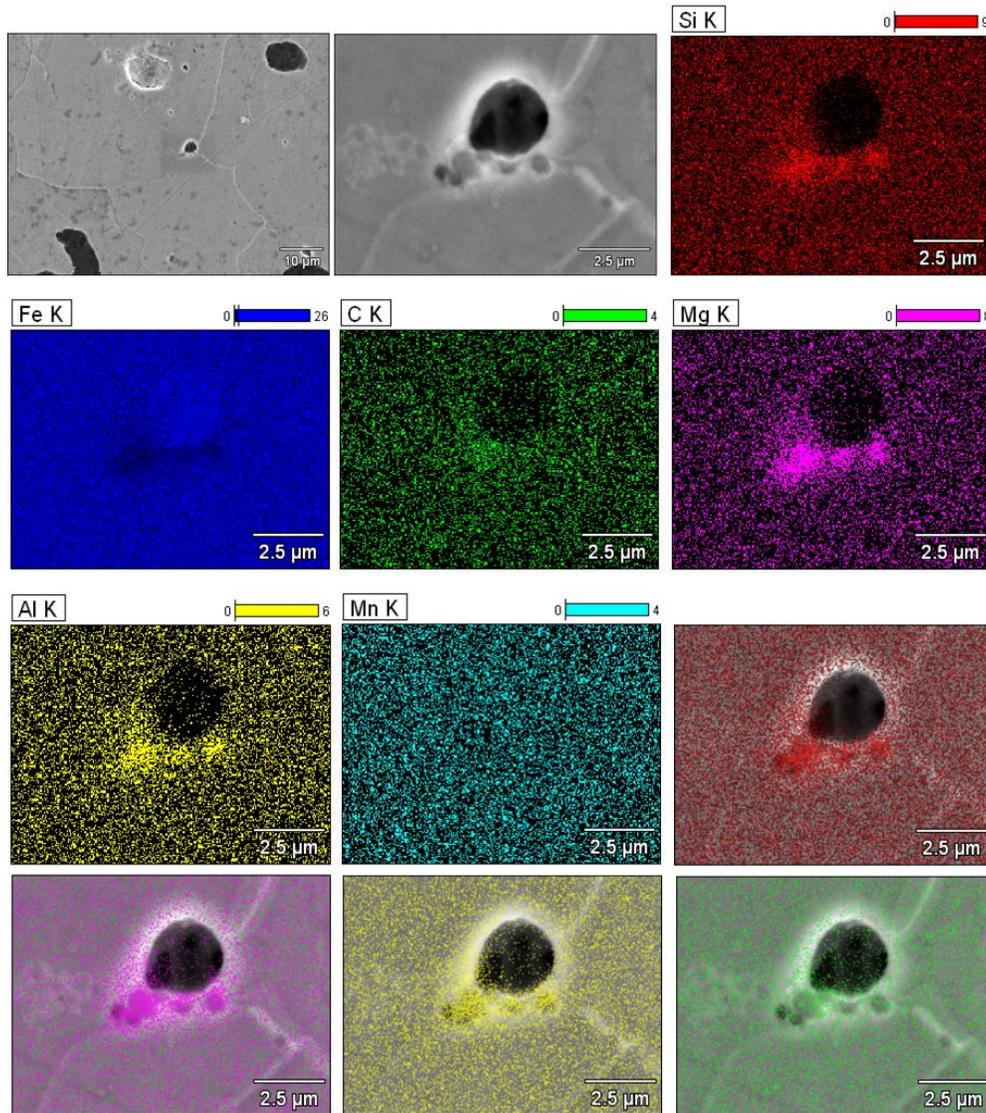


**Figura 74.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de inoculante cabala y su análisis EDS.

A continuación se muestran resultados de microscopia correspondientes a las fundiciones fabricadas sin la adición de agente inoculante, esto es, resulturación del hierro y posteriormente desulfuración del hierro con agentes nodulizantes, ricos en magnesio.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

La figura 75, corresponde a la prueba con el nodulizante 5R con exceso de azufre, se observan partículas que mediante el análisis EDS indican claramente una concentración elevada de silicio, magnesio y aluminio, (durante el mapeo no se detectó el azufre debido a que la zona de análisis contenía muy poco y el detector no pudo ser lo suficiente emnte sensible para detectarlo), lo que indica que estas partículas corresponden a óxidos y sulfuros. También se puede observar que existe una distribución homogénea de grafito alrededor de estas partículas.

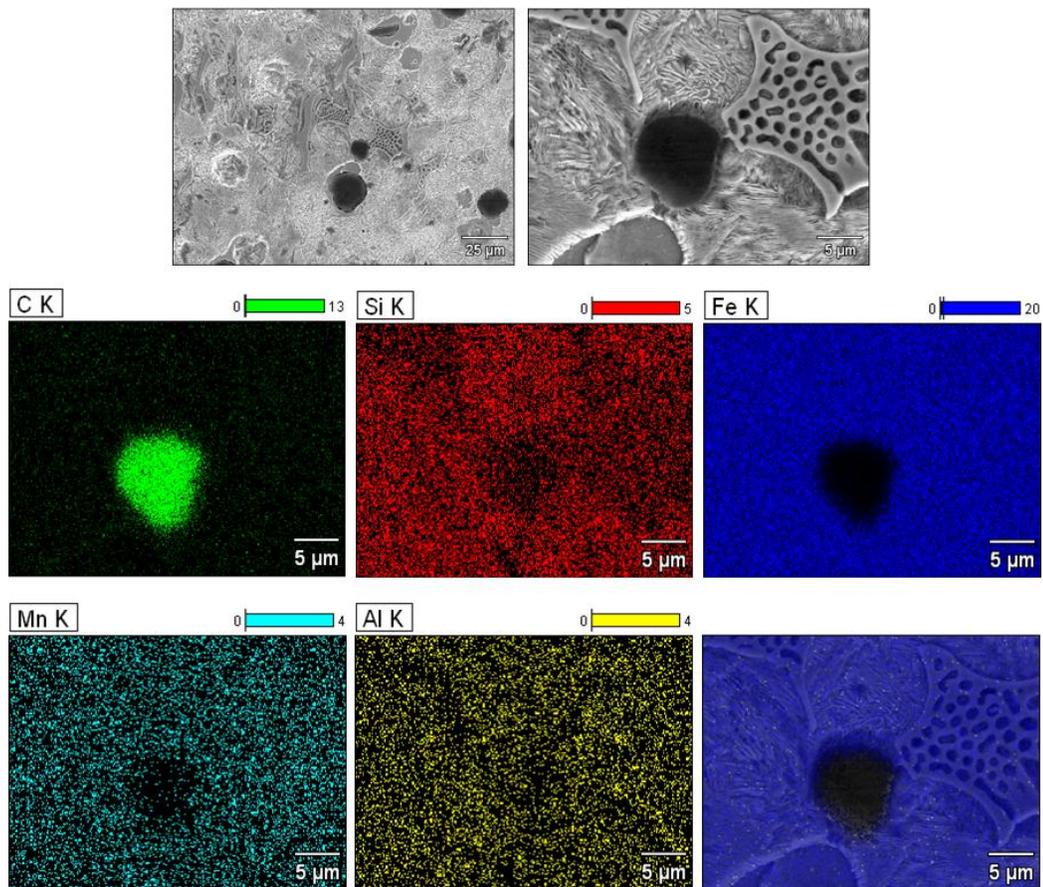


**Figura 75.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición nodulizante 5R y su análisis EDS.

En la figura 76 se muestra una partícula de grafito dentro de lo que parece ser una matriz perlítica, sin embargo también se observa otra fase la cual puede ser cementita o ferrita. No se

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

puede establecer con certeza si se está descomponiendo la perlita o que la reacción de transformación no ocurrió completamente ya que se observa que esta fase se desprende de la ferrita. El mapeo de la zona indica que la partícula oscura es de grafito, se observa una distribución uniforme de los elementos de aleación como el silicio, manganeso y aluminio. La fase desconocida es rica en hierro, por lo que se considera que se trata de cementita.

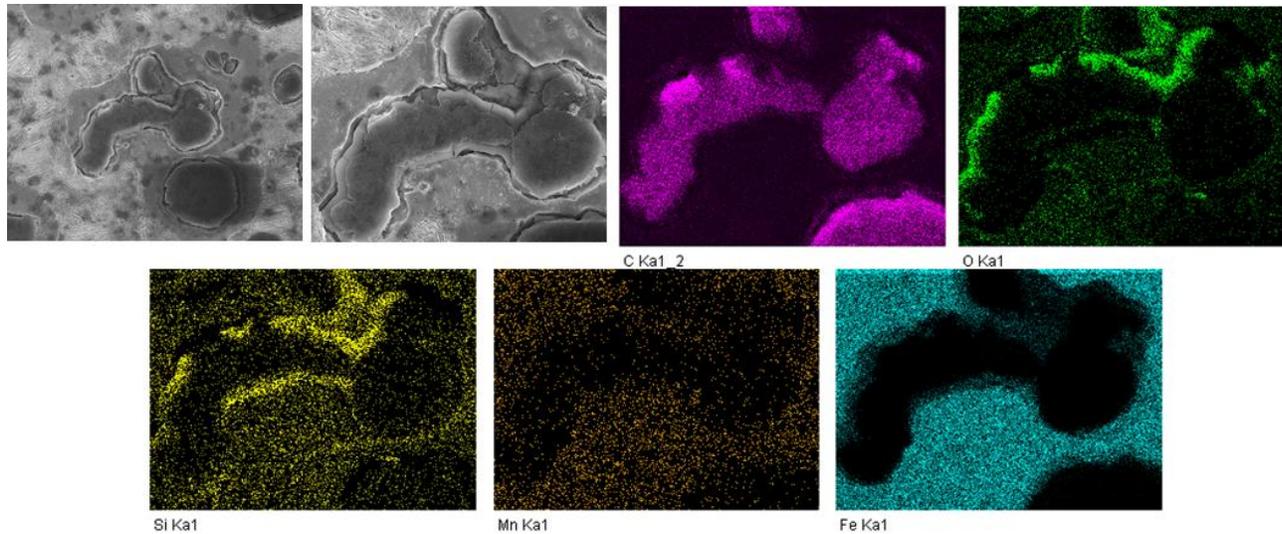


**Figura 76.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición nodulizante 5R y su análisis EDS.

Se realizó un análisis en el MEB de alta resolución para poder observar de una mejor manera determinadas partículas que posiblemente actúan como sitios de nucleación para las hojuelas de grafito. En la figura 77 se observa la formación de una hojuela de grafito, la cual se sitúa en un relieve superior de lo que parecen ser varios relieves lo que indica que la hojuela se encuentra en la parte superior de otra fase. Es muy interesante ver como la hojuela se encuentra alojada en esta fase y esta a su vez se encuentra dentro de una matriz ferrítica, es muy interesante no solo por el hecho de que podemos saber que elementos componen la fase donde se encuentra

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

la hojuela de grafito, sino que se forman muchos relieves durante lo que puede ser la formación o descomposición de la hojuela de grafito. El mapeo composicional de esta zona indica que esta fase esta principalmente compuesta por oxigeno, silicio y en menor proporción manganeso, esto nos permite afirmar que esta fase puede tratarse de un óxido que actuó como sitio de nucleación para el grafito no necesariamente para la hojuela sino para el grafito en general.



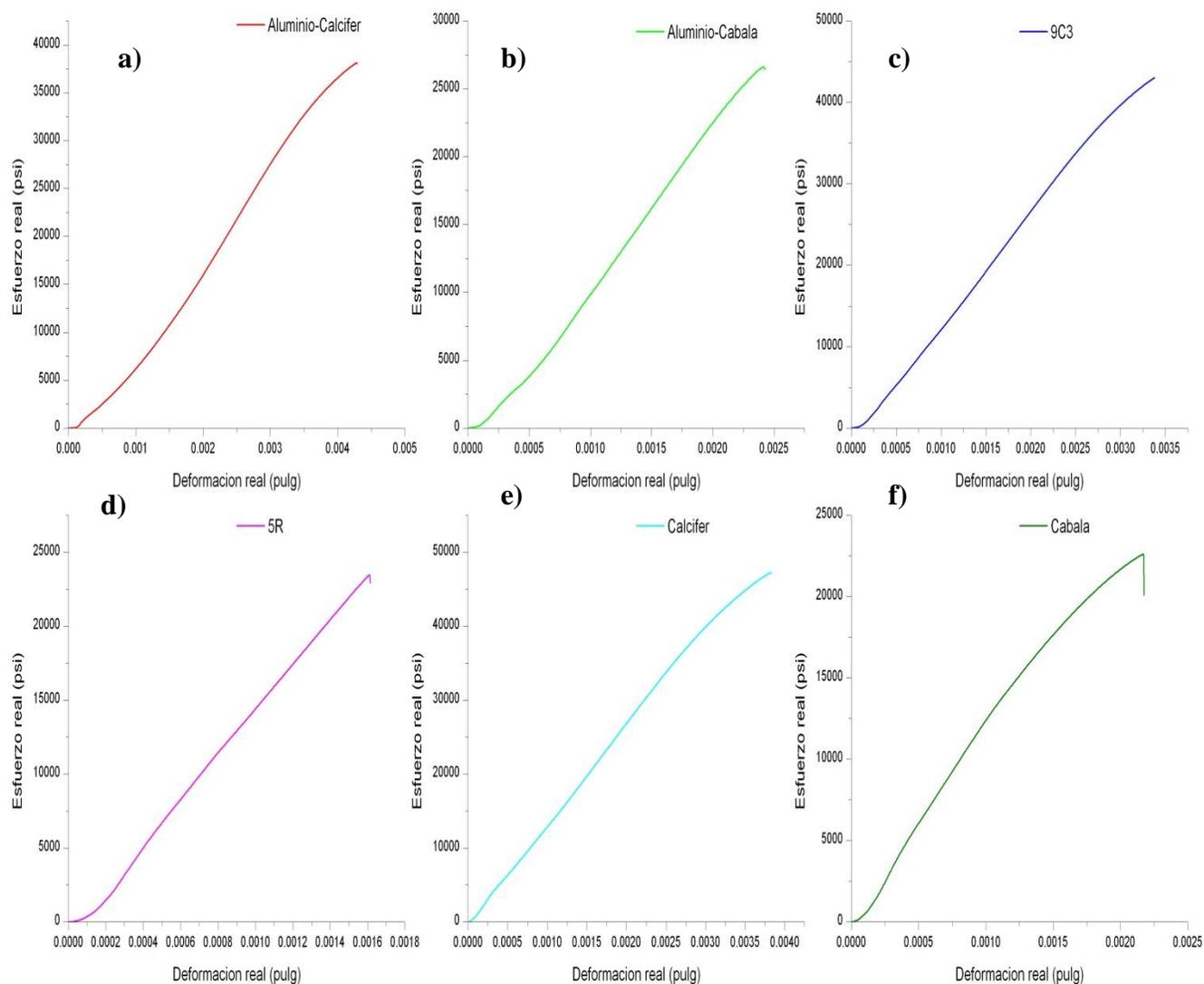
**Figura 77.** Fotomicrografía del hierro gris con la adición de nodulizante 5R y su análisis EDS.

### 4.7. Resultados pruebas mecánicas.

#### 4.7.1 Ensayo de tensión.

De las seis fundiciones fabricadas se maquinaron probetas de tensión de la piezas Y-block fabricadas para el ensayo de tensión de acuerdo a la norma ASTM A395 y el ensayo de tensión se realizó de acuerdo a la norma ASTM E8. Con los resultados de los ensayos de tensión se obtuvieron curvas esfuerzo deformación real para cada una de las seis fundiciones. En la figura 78 se muestra el comportamiento que presento de manera general cada una de las pruebas.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

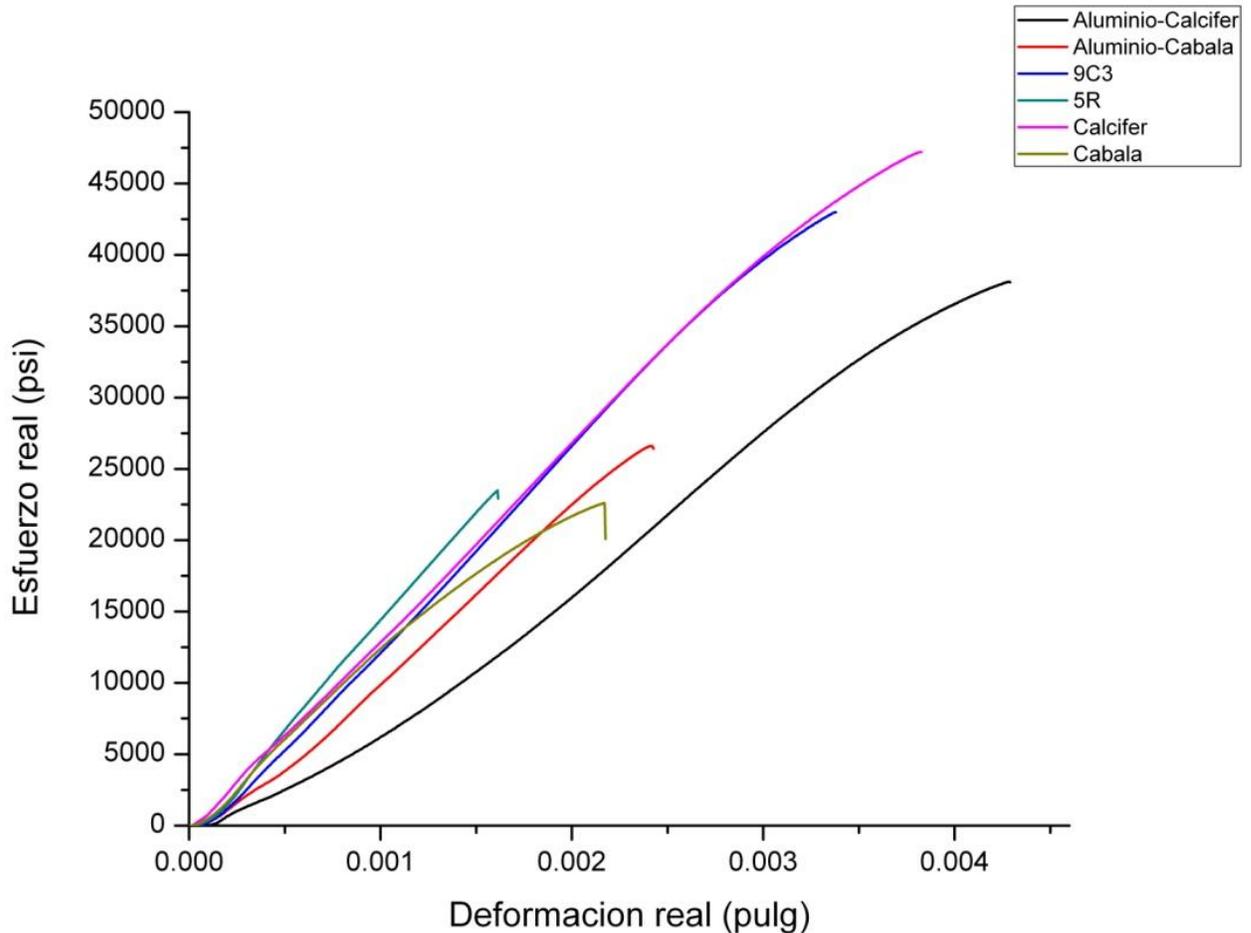


**Figura 78.** Curvas  $\sigma$  vs.  $\epsilon$  Real de las probetas obtenidas en todas las pruebas, a) aluminio-calcifer, b) aluminio-cabala, c) 9C3, d) 5R, e) calcifer, y f) cabala.

Los resultados obtenidos presentan variación, tres casos presentan las mejores propiedades mecánicas, estas son: calcifer, calcifer-aluminio y nodulizante 9C3. Estas propiedades se relacionan con el tipo de distribución del grafito, la matriz y composición química, en estos casos en particular, se obtuvo una matriz perlítica, con bajas zonas de ferrita, en la prueba con calcifer se obtuvo en porcentaje de ferrita del 2%, en la prueba calcifer-aluminio 5-13% y el prueba con nodulizante 9C3 se obtuvo un porcentaje de 15-20%. Comparando las propiedades de resistencia a la tensión obtenidas en estas pruebas con las reportadas en la norma ASTM A159, donde se indica la clasificación de los hierros, los valores de resistencia a la tensión se encuentran dentro de las

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

propiedades de los hierros grado G3000 y G3500. La figura 79 presenta una gráfica de todas las pruebas realizadas y se observa mejor como las mejores propiedades en cuanto a la resistencia a la tensión se obtiene en los casos mencionados anteriormente.



**Figura 79.** Curvas  $\sigma$  vs.  $\epsilon$  real obtenidas en todas las pruebas.

Cabe resaltar que se observa un comportamiento lineal en los resultados obtenidos durante el ensayo de tensión, lo que indica una baja deformación en las probetas ensayadas.

En la tabla 17 se muestran los datos obtenidos durante las pruebas de tensión, realizada a cada una de las pruebas consideradas como aceptables, se presentan datos como fuerza máxima, UTS, carga de cedencia y límite de cedencia.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

**Tabla 17.** Propiedades de resistencia de las aleaciones fabricadas,

Prueba	Fuerza máxima (kN)	UTS (psi)	Carga de cedencia (kN)	Límite de cedencia (psi)
AL-CAL	32.175	38026.71	28.27	33417.42
AL-CAB	22.475	26562.50	22.07	26089.82
9C3	36.3	42901.87	31.9	37701.69
5R*	19.85	-----	----	-----
CAL	39.85	47097.52	33.12	47097.52
CAB	19.1	22573.67	14.07	16634.81

*\*No se pudo llevar a cabo el análisis para esta prueba debido a que presento muchas fluctuaciones durante la prueba esto probablemente a la presencia de porosidades.*

En general, si comparamos las propiedades mecánicas obtenidas y las relacionamos con el tipo de distribución, tamaño de la hojuela, y matriz, las pruebas 2 y 3, debieron obtener las mejores propiedades ya que presentaron la mejor distribución y un tamaño homogéneo, sin embargo, las pruebas 1 y 4 obtuvieron las mejores propiedades de resistencia a la tensión, estas pruebas presentaron distribución y tamaños de hojuelas aceptables, así como un tipo de matriz perlítica y perlítico-ferrítica sucesivamente. Todos estos factores influyeron en las propiedades mecánicas de las pruebas fabricadas con inoculantes comerciales y con adiciones de aluminio.

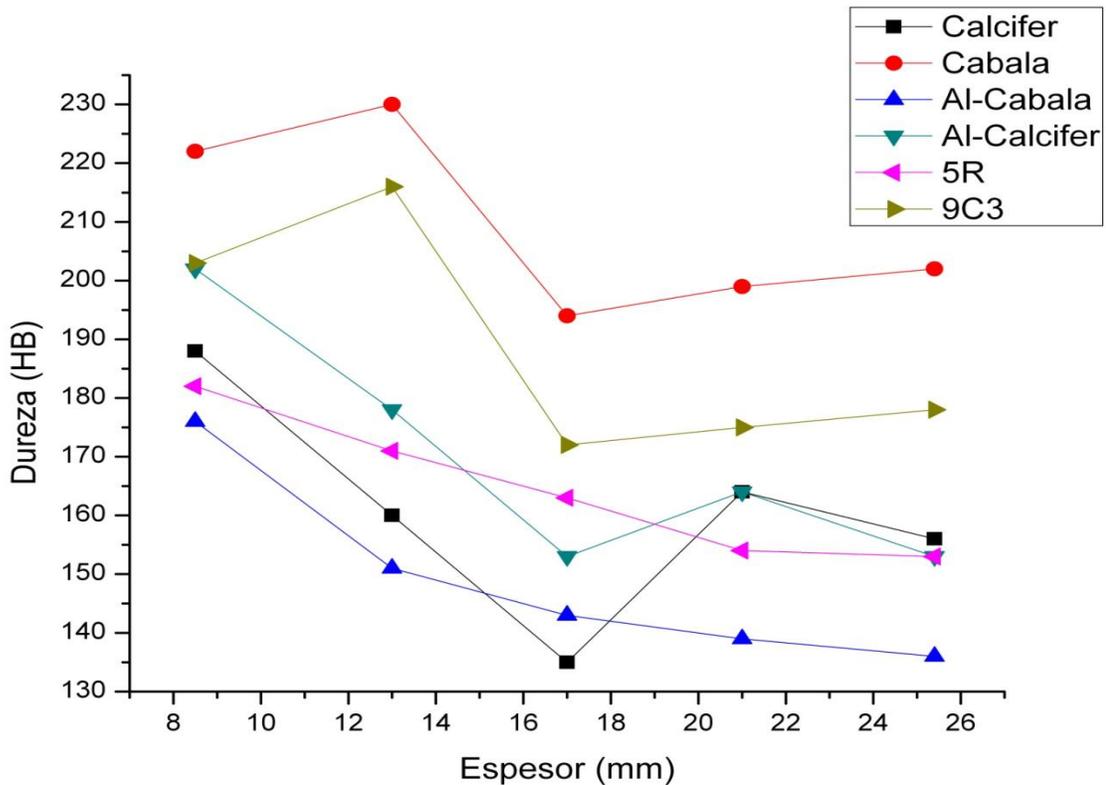
En los casos con resulfuración y posterior desulfuración con agentes nodulizantes que contienen magnesio, se observó que las mejores propiedades mecánicas las obtuvo la prueba 6 realizada con inoculante 9C3, debido a que en esta prueba a diferencia de la prueba 5 con nodulizante 5R, se obtuvo mayor presencia de hojuelas de grafito y en la prueba 5 solo se obtuvieron nódulos, ambas pruebas con una matriz perlítica-ferrítica, cabe resaltar que la baja resistencia a la tensión de la prueba 5 también se debió a que esta presentó poros en la probeta, los cuales actuaron como concentradores de esfuerzos, reduciendo su resistencia.

### 4.7.2 Dureza

En la figura 80 se observa la tendencia de la dureza promedio para las seis pruebas realizadas en los diferentes espesores, se observa en general la misma tendencia en todas las pruebas, esto es que las muestras con el espesor más delgado de 8.5 mm, se tienen valores de dureza elevados y conforme se incrementa el espesor, la dureza disminuye, esto se relaciona con las características microestructurales de las pruebas, ya que estas influyen mucho en las

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

propiedades mecánicas. También podemos decir que los valores promedio reportados en la gráfica, para el espesor más delgado, se encuentra dentro del intervalo señalado por la norma ASTM A159, mientras que conforme aumenta el espesor estos disminuyen hasta quedar fuera del rango establecido por la norma.



**Figura 80.** Perfil de durezas de las aleaciones producidas

Los resultados de dureza también se relacionan con el ensayo de tensión, la prueba realizada con cabala presentó los valores más altos de dureza, lo que la hace más frágil, esto se pudo constatar con el ensayo de tensión ya que esta prueba fue una de las cuales obtuvo una menor resistencia, en comparación con la prueba realizada con cabala mas adiciones de aluminio, se puede apreciar como esta prueba tuvo una dureza en los espesores más chicos superior a la de los espesores más grandes, debido a que el aluminio promovió la formación de ferrita la cual es una fase más blanda, por lo que el ensayo de tensión presentó un valor más elevado de resistencia en contraste con la prueba realizada sin adición de aluminio. Para las pruebas realizadas con agente calcifer y calcifer mas aluminio, se obtuvieron en ambas pruebas valores de dureza dentro

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

de norma a excepción de la muestra que tiene 17 mm de espesor en las que se tiene la menor dureza y en las muestra de 24 mm y de 25.4 mm se tienen valores similares, se observa como en caso contrario a la prueba realizada con cabala mas aluminio esta tiende incrementar la dureza al adicionar aluminio, obteniendo valores elevados en el ensayo de resistencia a la tensión superiores a los 30000 psi, las pruebas realizadas con agentes desulfurantes noduloy 5R y 9C3, presentaron valores de dureza dentro de los que marca la norma ASTM A159, y se puede ver el efecto al igual que las demás pruebas se observa como la tendencia de la dureza tiende a descender conforme aumenta el espesor, la prueba realizada con el desulfurante noduloy 9C3 fue la que presento los valores más altos y las mejores propiedades en el ensayo de resistencia, mientras que la prueba realizada con noduloy 5R presentó los valores más bajos de dureza con una baja resistencia a la tensión. En este caso la prueba con menor dureza no presentó resultados óptimos en la prueba de tensión debido a que la prueba con noduloy 5R no presento la formación de hojuelas y en su matriz no solo presento perlita y ferrita, además de la presencia de cementita, lo cual la hizo más frágil, a diferencia de la prueba realizada con el noduloy 9C3, el cual presentó una mayor formación de hojuelas y una matriz perlitico-ferrítica.

La variación en las propiedades mecánicas de las pruebas evaluadas, están directamente relacionadas con las características microestructurales, obtenidas en cada una de las pruebas, lo que nos quiere decir que el tipo de distribución, tamaño de la hojuela, así como la matriz de la microestructura tienen una gran influencia en las pruebas de tensión y dureza, por lo que la microestructura no solo depende del tipo de agente inoculante, desulfurante o desoxidante, sino también del control en los parámetros de fabricación.

Los agentes inoculantes, desulfurantes y desoxidantes demostraron tener un efecto directo en las características microestructurales de todas las aleaciones fabricadas. El efecto de cada agente utilizado en este trabajo fue muy diverso, debido a que los agentes inoculantes comerciales (cabala y calcifer) demostraron tener buen efecto en promover los sitios de nucleación heterogénea, ya que las pruebas 1 y 2 que se realizaron con estos agentes, mostraron tener un tipo de distribución de hojuela tipo A, con tamaños que van de 3 a 4 según ASTM A 247, dentro de una matriz perlítica, esto se ve reflejado en las propiedades mecánicas en especial la de resistencia a la tensión ya que el agente inoculante cabala obtuvo una distribución y tamaño más homogéneo de

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

grafito, no obtuvo buena resistencia, en cambio el agente inoculante calcifer reporto una gran resistencia, aunque este tuvo una variación en cuanto al tamaño de las hojuelas de grafito ya que como se reportó anteriormente en esta prueba se pudo observar como conforme aumenta el espesor aumenta el tamaño de la hojuela de grafito.

En las pruebas 3 y 4 que se utilizó los agentes inoculantes comerciales con adiciones de aluminio como desoxidante, en la prueba 3 (cabala-1.5% de aluminio) se obtuvo una distribución y tamaño aceptable dentro de una matriz perlítico-ferrítica, aunque en esta prueba se obtuvo un valor bajo en cuanto a la resistencia a la tensión, en comparación con la prueba 4 (calcifer-1% de aluminio), que aunque no obtuvo el mejor tamaño, ni la mejor distribución dentro de lo que es una matriz perlítico-ferrítica, esta obtuvo una aceptable resistencia a la tensión.

En las pruebas 5 y 6 realizadas con agentes nodulizantes base Mg (Noduloy 5R y 9C3), a las cuales se les agrego un exceso de azufre de 0.0122 gr., mostraron tener una gran influencia en la generación de sitios de nucleación heterogénea para el grafito. Ya que aunque en la prueba 5 no se generaron hojuelas se pudo ver el efecto del azufre en combinación con el magnesio, ya que se apreció el efecto de cómo los nódulos se interconectan para formar la hojuela de grafito, mientras que en la prueba 6, si se logro obtener hojuelas aunque con la distribución y tamaño menos aceptable, esto se atribuye a una mejor eficiencia en la reacción con el magnesio que en la prueba 5, generando sitios de nucleación para el grafito, ambas pruebas con una matriz perlítico-ferrítica, estas características microestructurales se reflejaron en las propiedades mecánicas, ya que se logró obtener una mejor resistencia en la prueba 5 que fue en donde se formaron las hojuelas de grafito.

En todas las pruebas se observo el efecto de los agentes inoculantes comerciales, desoxidantes y desulfurantes, en la generación de los sitios de nucleación para el grafito ya que el análisis mediante MEB/EDS apporto gran información, debido a que se detectaron zonas en específico donde la concentración de elementos tales como Mg, S, Mn, O, Si y Al, predominaban lo que nos confirmaba que estos elementos promovían la formación de inclusiones que actúan como sitios de nucleación para el grafito.

De manera general y a lo largo del estudio realizado podemos decir que el agente inoculante comercial calcifer, por si solo y con adiciones de aluminio, promueve la formación de hojuelas del tipo A con tamaños 3 y 4, dentro de una matriz perlítico-ferrítica, según ASTM A247,

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

---

obteniendo valores de dureza y de resistencia a la tensión dentro de los rangos establecidos en la norma ASTM A159.

En el caso de los agentes desulfurantes se obtuvieron mejores propiedades en las piezas fabricadas con el agente noduloy 9C3, tanto de dureza como de resistencia a la tensión, aunque no se obtuvieron hojuelas de un tipo y tamaño aceptable, la resistencia pudo propiciarse debido a la matriz del material que es ferrítico-perlítica.

En ambos casos sumando las propiedades que nos aportan el agente inoculante calcifer, y calcifer con adiciones de aluminio, al igual que el agente desulfurante noduloy 9C3, en cuanto a las propiedades mecánicas y microestructurales, si las asociamos con unas condiciones óptimas de fabricación podemos decir que se puede mejorar en muchos aspectos y superar los valores establecidos por la norma ASTM A159 y A247.

## 5. CONCLUSIONES

---

### 5. Conclusiones

1. Se caracterizó un disco de freno reciclado y se determinó que corresponde a hierro gris grado G3000, de acuerdo a norma ASTM A159.
2. Se fabricaron 6 aleaciones de hierro gris grado G3000, mediante inoculación con inoculantes comerciales, inoculantes comerciales y adición de aluminio y sin inocular adicionando magnesio como desulfurante.
3. Las pruebas correspondientes a los inoculantes comerciales y con adiciones de aluminio, presentaron matrices de perlita y perlita-ferrita, respectivamente. Las adiciones de magnesio obtuvieron hierros nodulares, los cuales se interconectaron para formar hojuelas en espesores gruesos para el nodulizante 5R y en espesores delgados para el 9C3, ambos presentaron una matriz perlítica-ferrítica.
4. El inoculante calcifer favorece una distribución de grafito tipo A con hojuelas grandes para el mayo espesor, el inoculante cabala promueve distribuciones tipo A y tamaño homogéneo de hojuela en la mayoría de los espesores. La adición de aluminio promovió la grafitización, la formación de ferrita y el incremento del espesor de la hojuela, se obtuvo grafitos tipo B con el cabala y tipo E con ambos inoculantes en espesores delgados.
5. Se determinó mediante MEB/EDS, la presencia de partículas con altas concentraciones de aluminio, magnesio, manganeso y azufre, las cuales formaron óxidos y sulfuros que actuaron como sitios de nucleación para el grafito.
6. El ensayo de tensión demostró que las fundiciones fabricadas con calcifer, calcifer mas aluminio, y nodulizante 9C3 presentaron resultados de resistencia a la tensión por encima del valor mínimo que señala norma para este grado de hierro.
7. La dureza disminuyo con el incremento del espesor para las 6 pruebas fabricadas.y se compararon con las propiedades mecánicas y se logró encontrar la relación de la dureza con el de resistencia a la tensión.

## 6. BIBLIOGRAFIA

---

### 6. Bibliografía

1. Introduction to Gray Iron Production Practice, AFS' Cast Iron Division (Gray Iron Research Committee 5-H) 2000
2. José Apraiz Barreiro, Fundiciones, segunda edición ,editorial Dossat, Madrid
3. ASM Metals HandBook, Casting vol. 15, 9th Edition, (1988).
4. S. Avner, Introducción a la Metalurgia Física segunda edición ,McGraw-Hill, (1979)
5. ASTM A 48, standar specification for gray iron castings, 2000
6. ASTM A 247, Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings designed, 1998
7. ING. Azael Leonel Trujano Galicia, tesina “coeficientes tribológicos para acero al carbono ANSI 1045 y acero aleado AISI 4140” Instituto Politécnico Nacional, México 2011.
8. Apunte de “vaciado y solidificación de ferrosos”
9. Hans Berns, Werner Theisen, Ferrous materials “Steel and Cast Iron”, edit Springer, Alemania 2008.
10. John R. Brown, Ferrous Foundryman’s, Handbook, Ed. Planta Tree, 2000.
11. Madeleine Durand-Charre, Microstructure of Steels and Cast Irons, editorial Springer, Paris 2003.
12. W. Xu, M. Ferry, Y. Wang. Influence alloying Elements on as-cast microstructure and strength of gray iron, Materials Science and Engineering, A 390, (2005), pp326-333
13. H. Nakae, Influence of inoculation on solidification In cast iron, International Journal of Cast Metals Research, vol. 21, (2008), pp 7-10.
14. Aravind Vadiraj, G. Balachandran, M. Kamaraj, effect of misch metal inoculation on microstructure, mechanical and wear properties of hypoeutectic gray cast iron, Materials and Desing, 30 (2009), pp 4488-4492.
15. M. Chisamera, I. Riposan, S. Stan, Graphite nucleation control in grey cast iron, International Journal of Cast Metals Research, vol.21 (2008), pp, 39-44.

## 6. BIBLIOGRAFIA

---

16. M. Hillert, Comments on "Eutectic Solidification Of Gray Cast Iron", Scripta Materialia, 52 (2005), 249-250
17. G.L. Rivera, R.E. Boeri, J.A. Sikora, solidification of gray cast iron, Scripta Materialia, 50 (2004), 331-335.
18. A. Sommerfeld, B. Tonn. Nucleation Of Graphite In Cast Iron Melts Depending On Manganese, Sulphur And Oxygen. International Journal of Cast Metals Research, 21(2008), pp 23-26.
19. K. Edalati, F. Akhlaghi, M. Nili-Anhmadabadi, Influence of SiC And FeSi addition on the characteristics of gray cast iron melts poured at different temperatures, Journal of Materials Processing Technology, 160 (2005) pp 183-187.
20. F. Sanchez, M. Hinojosa, V. Gonzales, Hojuelas de grafito en un hierro fundido gris, Ingenierías vol VI, No 10, (2001) pp 7-12.
21. J.W. Steller, W. Stets, J. Ohser, D. Hartmann, Computer-Aided Graphite Classification: an Approach For International Standardization. AFS Transactions (2005).
22. T. Kanno, T. Kikuchi, I Kang, H. Nakae. effect of alloying elements on eutectic temperatures in cast iron. AFS Transaction 2005, American Foundry Society, pp:7-10
23. B. Cantor, K. O'Reilly, solidification and casting, edit. IOP, 2003.
24. ASTM A 159, standard specification for automotive gray Iron castings. 1983
25. ASTM A 395, standard specification for ferritic ductile iron pressure-retaining castings for use at elevated temperatures, 1999
26. Joanna R. Greza. Materials Processing, HandBook, CRC Press, 2007
27. ASM Metals HandBook, Casting vol. 9, 9th Edition, (1988).
28. I. Minkok, the physical metallurgy of cast iron, john wiley and sons, 1983.
29. H.R. Abbsi, M. Bazdar, A. Halvace, effect of phosphorus as an alloying element on microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron, materials science & engineering, (2006), pp 314-317.

## 6. BIBLIOGRAFIA

---

30. A. Sommerfeld, B. Tonn, nucleation of graphite in cast iron melts depending on manganese, sulphur and oxygen, internal journal of cast metals research, vol 21 (2008), pp23-26,
31. John R. Brown, ferrous foundryman's hand book, buherworth heinemann, año 2000.
32. Boyles A. trans AIME 1937;125:141
33. Hultgren M, Subba Rao W, gray and white solidification of cast iron. In the solidification of metals, ISI P110, iron steel inst: 1968.p.204-12
34. Nanstand, R. K., F. J. Worzala, and C. R. Loper, the metallurgy of cast iron, eds. B. Lux, F. Mollard and I. Minkoff, geogi publ. co., Switzerland, 1975