

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DESULFURACIÓN PARA
FUNDICIÓN GRIS CON AGITACIÓN DE GAS INERTE**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

**FRANKLIN PATRICIO LARA ROBAYO
MÓNICA SUSANA SALAO REY**

DIRECTOR: Dr. VÍCTOR CÁRDENAS

Quito, Marzo 2007

DECLARACIÓN

Nosotros Franklin Patricio Lara Robayo y Mónica Susana Salao Rey declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Franklin Patricio Lara Robayo

Mónica Susana Salao Rey

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Franklin Patricio Lara Robayo y Mónica Susana Salao Rey, bajo mi supervisión.

Dr. Víctor Cárdenas
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por permitirnos concluir con una etapa más en nuestras vidas, y lograr nuestros objetivos.

El presente Proyecto de Titulación se logró gracias a nuestro Director de Tesis Dr. Víctor Cárdenas por su colaboración incondicional siendo un pilar para la culminación del mismo.

Estamos eternamente agradecidos por la guía, paciencia y por el interés brindado a la investigación además de su valiosa amistad al Ing. Patricio Estupiñán.

A nuestras familias por su ayuda y apoyo en los momentos más difíciles de nuestro largo caminar.

Nuestro agradecimiento a las personas que trabajan en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica por las facilidades brindadas en nuestra investigación. Y a todos nuestros amigos, y en especial a los del laboratorio de fundición, por sus palabras de aliento y colaboración desinteresada.

DEDICATORIA

Especialmente a la mujer que guió mis pasos, me entregó su amor y cariño. Para ti Mamita Anita. Al progenitor de mi ser, que me dio su ejemplo de honestidad sacrificio y lucha, para nunca rendirme. Donde estés siempre te llevaré en el corazón, Papá.

A mi hermano y mis sobrinos que con su apoyo y cariño me dieron aliento en los momentos difíciles. A mi compañera de tesis por su cariño, amor y paciencia.

Patricio

Dedico todo mi esfuerzo a mis padres Agustín y Carmita, que con su amor, orientación y consejo he logrado culminar un sueño.

A mis hermanos Christian y Fernando por su cariño y paciencia para que mi pequeño paso sea un ejemplo para su superación.

Al amigo verdadero por su tolerancia, aprecio y ternura, Patricio este logro es nuestro.

Mónica

CONTENIDO

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	HORNOS PARA PRODUCCIÓN DE HIERRO GRIS.....	1
1.2.1	HORNO DE CUBILOTE.....	1
1.2.1.1	Descripción del Cubilote.....	2
1.2.1.2	Funcionamiento.....	3
1.2.1.3	Cálculo de cargas para el horno Cubilote.....	4
1.2.2.4	Características de las fundiciones obtenidas en el horno de Cubilote.....	5
1.2.2	HORNOS ELÉCTRICOS.....	6
1.2.2.1	Horno de Arco.....	6
1.2.2.2	Horno de Resistencia.....	7
1.2.2.3	Horno de Inducción.....	7
1.2.2.4	Características de las fundiciones obtenidas en los hornos eléctricos.....	8
1.2.3	HORNOS A LLAMA.....	9
1.2.3.1	Hornos Reverberos.....	9
1.2.3.2	Horno de Crisol.....	10
1.2.3.3	Características de las fundiciones obtenidas en los hornos a llama.....	11
1.3	DIAGRAMA HIERRO – CARBONO.....	12
1.3.1	INFLUENCIA DE LOS DIVERSOS ALEANTES.....	14
1.3.1.1	Silicio.....	14
1.3.1.2	Manganeso.....	15
1.3.1.3	Fósforo.....	16
1.3.1.4	Azufre.....	17
1.3.1.5	Carbono.....	19
1.4	MICROCONSTITUYENTES DE LAS FUNDICIONES.....	20

1.4.1	LEDEBURITA.....	20
1.4.2	ESTEADITA.....	21
1.4.3	GRAFITO.....	21
1.4.4	FERRITA.....	21
1.4.5	CEMENTITA.....	23
1.4.6	PERLITA.....	24
1.4.7	AUSTENITA.....	24
1.4.8	MARTENSITA.....	24
1.4.9	BAINITA.....	25
1.5	FUNDICIONES DE HIERRO.....	26
1.5.1	TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS FUNDICIONES DE HIERRO.....	26
1.5.1.1	Fundición Blanca.....	26
1.5.1.2	Fundición Maleable.....	27
1.5.1.3	Fundición Gris.....	28
1.5.1.4	Fundición Dúctil.....	32
1.5.1.5	Fundición Nodular.....	32

CAPÍTULO 2

DESULFURANTES Y

PROCEDIMIENTOS DE DESULFURACIÓN

2.1	INTRODUCCIÓN.....	34
2.2	ORIGEN DEL AZUFRE EN LAS FUNDICIONES.....	34
2.2.1	COMPUESTOS DEL AZUFRE EN EL COQUE.....	35
2.2.2	REACCIONES AZUFRE – HIERRO.....	36
2.3	DESULFURACIÓN.....	37
2.3.1	BENEFICIOS DE LA DESULFURACIÓN.....	37

2.3.2	REACTIVOS DESULFURANTES.....	37
2.3.2.1	Desulfurantes mediante compuestos de Sodio.....	38
2.3.2.1.1	Sosa cáustica.....	38
2.3.2.1.2	Carbonato de sodio.....	38
2.3.2.1.3	Tipos de reacciones.....	39
2.3.2.2	Desulfurantes mediante compuesto de Magnesio.....	41
2.3.2.3	Desulfurantes mediante compuesto de Calcio.....	42
2.3.2.3.1	Carburo de Calcio CaC_2	42
2.3.2.3.2	Óxido de Calcio o Cal quemada CaO	45
2.3.3	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DESULFURACIÓN.....	46
2.3.3.1	Tipo de recipiente desulfurante empleado.....	46
2.3.3.2	Cantidad de agente desulfurante empleado por tonelada de hierro fundido.....	47
2.3.3.3	Tiempo de contacto entre el agente desulfurante y el hierro fundido.....	47
2.3.3.4	Cantidad de azufre presente en el metal base antes de desulfurar.....	47
2.3.3.5	Forma de adición del desulfurante.....	47
2.3.3.6	Tamaño de la partícula del desulfurante.....	48
2.3.3.7	Tipo de horno utilizado para la fundición.....	48
2.3.3.8	Separación de la escoria antes de la operación de desulfuración.....	48
2.3.3.9	Temperatura de tratamiento.....	49
2.3.4	PROCEDIMIENTOS DE DESULFURACIÓN.....	49
2.3.4.1	Proceso Kalling- Domnarfvet.....	49
2.3.4.2	Proceso Wahl.....	50
2.3.4.3	La cuchara de agitación.....	50
2.3.4.4	Aceleración de reacción.....	51
2.3.4.5	Agitador Rheinstahl.....	52
2.3.4.6	Tapón Poroso.....	53
2.3.4.7	Lanza de inmersión.....	54
2.3.4.8	Agitación electromagnética (EMS).....	57

2.3.4.9	Productos encapsulados.....	58
2.3.4.10	Desulfuración con Nitrógeno.....	61
2.3.5	PROCESO DE AGITACIÓN.....	61
2.3.6	ESCORIAS PARA LA DESULFURACIÓN.....	62
2.3.6.1	Escoria de la desulfuración.....	63

CAPÍTULO 3

PROCESO EXPERIMENTAL DE LA DESULFURACIÓN

3.1	EQUIPO DE DESULFURACIÓN.....	65
3.1.1	HORNOS.....	66
3.1.1.1	Selección del horno.....	66
3.1.1.1.1	Operabilidad.....	67
3.1.1.1.2	Costos.....	67
3.1.1.1.3	Capacidad de producción.....	68
3.1.1.1.4	Suministros.....	68
3.1.1.1.5	Disponibilidad de materia prima.....	68
3.1.1.1.6	Control de la temperatura de colado.....	69
3.1.1.2	Características del horno seleccionado.....	69
3.1.2	SISTEMA DE AGITACIÓN.....	70
3.1.2.1	Lanza de inmersión.....	71
3.1.2.2	Selección del gas agitador.....	72
3.1.2.2.1	Costo.....	73
3.1.2.2.2	Conservación de la temperatura en el metal.....	73
3.1.2.2.3	Preservación de la composición química.....	73
3.1.2.3	Características del gas inerte seleccionado.....	74
3.1.3	DESULFURANTES.....	74
3.1.3.1	Selección del desulfurante.....	75
3.1.3.2	Ingreso del desulfurante.....	76

3.1.3.3	Características del desulfurante seleccionado.....	76
3.2	PROCEDIMIENTO PARA LA DESULFURACIÓN.....	76
3.2.1	CARGA Y ENCENDIDO DEL HORNO.....	76
3.2.2	COLOCACIÓN DEL DESULFURANTE.....	77
3.2.3	AGITACIÓN DE LA MEZCLA.....	77
3.2.4	ELIMINACIÓN DE LA ESCORIA.....	78
3.2.5	MOLDEO Y COLADO.....	79
3.2.6	DATOS DEL PROCESO DE DESULFURACIÓN.....	81

CAPÍTULO 4

DATOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1	DATOS OBTENIDOS.....	84
4.1.1	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	84
4.1.2	ENSAYO DE DUREZA.....	86
4.1.3	PRUEBAS METALOGRAFICAS.....	89
4.1.3.1	Preparación.....	90
4.1.3.1.1	Esmerilado burdo o tosco.....	90
4.1.3.1.2	Pulido intermedio.....	90
4.1.3.1.3	Pulido fino.....	90
4.2	ANÁLISIS DE DATOS.....	92
4.2.1	ANÁLISIS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.....	92
4.2.2	ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DUREZA BRINELL.....	93
4.2.3	DUREZA RELATIVA.....	94
4.2.4	ANÁLISIS METALOGRAFICO.....	94
4.2.4.1	Datos del porcentaje de sulfuro de manganeso.....	101
4.2.5	ANÁLISIS QUÍMICO.....	102

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES.....	108
5.2	RECOMENDACIONES.....	109

CONTENIDO DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

FIGURA 1.1	Se observa la parte interna y externa de un Cubilote ¹	2
Figura 1.2	Diagrama hierro-carbono ⁴	12
Figura 1.3	Influencia del contenido en silicio de las fundiciones. ⁴	13
Figura 1.4	Sistema eutéctico ternario Fe, Fe ₃ C, F ₃ P ²¹	17
Figura 1.5	Porcentaje azufre vs. temperatura ²¹	18
Figura 1.6	Mezcla eutéctica S Fe-S Mn ²¹	19
Figura 1.7	Morfología Equiaxial x100 ³	22
Figura 1.8	Estructura Widmanstätten x 100 ³	22
Figura 1.9	Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de ferrita ⁴	23
Figura 1.10	Microestructura del acero 1% C, red blanca de cementita ⁴	23
Figura 1.11	Microestructura de la martensita ⁴	25
Figura 1.12	Microestructura del hierro blanco ⁶	27
Figura 1.13	Microestructura típica de fundición de hierro- maleable ferrítico ⁶	28
Figura 1.14	Micrografía de las hojuelas de grafito. ⁶	29
FIGURA1.15	Fundición gris x100 pulida. ³	30
FIGURA1.16	Fundición gris x200 pulida. ³	30
FIGURA1.17	Fundición gris; matriz perlítica x200 ³	31
FIGURA1.18	Fundición gris; matriz perlítica x400 ³	31
FIGURA 1.19	Fundición nodular x 100 ³	33

CAPÍTULO 2

DESULFURANTES Y

PROCEDIMIENTOS DE DESULFURACIÓN

Figura 2.1	Inclusiones de sulfuro de manganeso ⁹	36
Figura 2.2	Adición de carburo de calcio en la colada ¹⁹	45
Figura 2.3	Proceso Kalling- Domnarfvet ²⁰	49
Figura 2.4	Proceso Wahl ²⁰	50
Figura 2.5	La cuchara de agitación ²⁰	51
Figura 2.6	Aceleración de reacción ²⁰	52
Figura 2.7	Agitador Rheinstahl ²⁰	52
Figura 2.8	Tapón poroso ⁹	54
Figura 2.9	Lanza de inmersión ⁹	55
Figura 2.10	Gráficas de la desulfuración en función al tiempo de agitación ⁹	56
Figura 2.11	Agitación electromagnética ⁹	58
Figura 2.12	Productos encapsulados ^{9,11}	59
Figura 2.13	Productos encapsulados con alambre tubular ⁹	61
Figura 2.14	Metal fundido con escoria ¹³	63
Figura 2.15	Escoria de la desulfuración ⁹	63

CAPÍTULO 3

PROCESO EXPERIMENTAL DE LA DESULFURACIÓN

Figura 3.1	Horno de inducción (capacidad de 5 kg).....	70
Figura 3.2	Panel de control.....	70
Figura 3.3	Lanza de acero inoxidable con recubrimiento	
	refractario.....	71
Figura 3.4	Tanque de argón.....	74
Figura 3.5	Carburo de calcio.....	76
Figura 3.6	Proceso de agitación.....	78
Figura 3.7	Eliminación de la escoria.....	79
Figura 3.8	Moldeo en arena en verde.....	80
Figura 3.9	Probeta de hierro gris desulfurada.....	80
Figura 3.10	Colado del hierro gris desulfurado.....	81

CAPÍTULO 4

DATOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 4.1	Máquina de ensayo de tracción.....	84
Figura 4.2	Probetas de tracción.....	85
Figura 4.3	Resistencia a la tracción vs tiempo de agitación.....	92
Figura 4.4	Dureza Brinell vs tiempo de agitación.....	93
Figura 4.5	Dureza relativa.....	94
Figura 4.6	Microestructura de la probeta A. 100x.....	95
Figura 4.7	Microestructura de la probeta A. 400x.....	95
Figura 4.8	Microestructura de la probeta B. 100x.....	96
Figura 4.9	Microestructura de la probeta B. 400x.....	96
Figura 4.10	Microestructura de la probeta E. 100x.....	97

Figura 4.11	Microestructura de la probeta E.	400x.....	97
Figura 4.12	Microestructura de la probeta F.	100x.....	98
Figura 4.13	Microestructura de la probeta F.	400x.....	98
Figura 4.14	Microestructura de la probeta R.	100x.....	99
Figura 4.15	Microestructura de la probeta R.	400x.....	99
Figura 4.16	Microestructura de la probeta S.	100x.....	100
Figura 4.17	Microestructura de la probeta S.	400x.....	101

CONTENIDO DE TABLAS

CAPÍTULO 2

DESULFURANTES Y

PROCEDIMIENTOS DE DESULFURACIÓN

Tabla 2. 1	Tipos de carburo de calcio.....	45
Tabla 2.2	Encapsulados.....	60

CAPÍTULO 3

PROCESO EXPERIMENTAL DE LA DESULFURACIÓN

Tabla 3.1	Selección del horno.....	66
Tabla 3.2	Selección del gas agitador.....	72
Tabla 3.3	Selección del desulfurante.....	75
Tabla 3.4	Temperatura y caudal de desulfuración	
	primera encendida.....	82
Tabla 3.5	Temperatura y caudal de desulfuración	
	segunda encendida.....	83
Tabla 3.6	Temperatura y caudal de desulfuración	
	tercera encendida.....	83
Tabla 3.7	Temperatura y caudal de desulfuración	
	cuarta encendida.....	83

CAPÍTULO 4

DATOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 4.1	Resistencia a la tracción.....	86
Tabla 4.2	Dureza Brinell.....	87
Tabla 4.3	Dureza relativa.....	89
Tabla 4.4	Tamaño, forma y tipo de grano.....	91
Tabla 4.5	Análisis cuantitativo por área de la probeta A.	95
Tabla 4.6	Análisis cuantitativo por área de la probeta B.....	96
Tabla 4.7	Análisis cuantitativo por área de la probeta E.....	97
Tabla 4.8	Análisis cuantitativo por área de la Probeta F.....	98
Tabla 4.9	Análisis cuantitativo por área de la probeta R.....	99
Tabla 4.10	Análisis cuantitativo por área de la probeta S.....	100
Tabla 4.11	Cantidad de sulfuros de manganeso por área con relación al tiempo.....	101
Tabla 4.12	Cantidad de sulfuros de manganeso por área con relación al carburo de calcio.....	102
Tabla 4.13	Análisis químico.....	106

PRESENTACIÓN

La industria de la producción de hierro fundido es una de las principales a nivel mundial. Anualmente son producidas piezas que son ensambladas y empleadas como componentes de equipos y maquinarias. La producción de hierro fundido es el triple de las producciones de aceros y no ferrosos juntos, superado solo por la producción de acero laminado.

Por esta razón es necesario realizar estudios que mejoren las propiedades mecánicas de las fundiciones, por lo que se invierte una cantidad considerable de dinero en este tipo de investigaciones.

Para la obtención de diferentes tipos de fundiciones se necesita cambiar la composición química como metalurgica de estos, siendo el proceso de desulfuración uno de los primeros pasos a seguir para la obtención de hierro nodular como también para la producción de acero.

Por tal motivo se vio la necesidad de realizar un estudio adecuado tomando en cuenta los factores tales como los tipos de desulfurantes y medios de agitación.

En el presente trabajo se detalla las formas para reducir el contenido de azufre en fundiciones grises y la elección del método aplicable para las necesidades que se presentan en nuestro país. El proceso de desulfuración no es muy aplicado y en ocasiones mal utilizado.

Este proyecto dará las pautas para realizar el proceso de manera correcta, utilizando el desulfurante adecuado y aplicando un sistema de agitación por medio de un gas inerte, el cual cumple con los requerimientos a nivel industrial.

El estudio realizado va destinado al progreso a nivel técnico e industrial de las empresas nacionales dedicadas a la producción de hierros fundidos y por que no a las que fabrican aceros; con el fin de mejorar los sistemas de calidad y poder competir internacionalmente con otras empresas dedicadas al mismo objetivo.

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se realizó un estudio de las fundiciones de hierro en las cuales se dan a conocer las características y su clasificación; se incluye de forma detallada la microestructura, en base al diagrama hierro-carbono y a la influencia de los elementos aleantes dentro de sus propiedades mecánicas.

A partir de la influencia de estos materiales se observa que el azufre es un elemento perjudicial para la fundición, por tal motivo se estudian los procesos de desulfuración existentes y el tipo de desulfurante adecuado para una reducción del porcentaje de este elemento, permitiendo por lo mismo mejorar las propiedades mecánicas.

Por medio de una selección minuciosa se determinó que el método de desulfuración con agitación de gas inerte es el adecuado a nuestras necesidades.

Se utilizaron los instrumentos y equipos que posee la Escuela Politécnica Nacional existentes en el Laboratorio de Fundición para el desarrollo de la parte experimental.

Mediante este proyecto se estableció además del procedimiento correcto, la cantidad de desulfurante y el tiempo necesario de agitación para reducir el contenido de azufre.

Se realizaron ensayos de resistencia a la tracción, dureza, análisis metalográficos y composición química, obteniendo resultados satisfactorios que garantizan la efectividad de este proceso.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

Sin tratar de establecer las grandes diferencias existentes entre los tipos de fundiciones que se tienen en el mercado, se puede decir que al variar sus propiedades ampliamente a un costo moderado, ya sea este por variaciones en la matriz, en el tamaño, en la forma y en la distribución del grafito, y una gran serie de propiedades insospechadas para los primeros fundidores.

Siendo los hornos de inducción y el cubilote los más utilizados para la producción de fundiciones de hierro en este presente estudio es necesario un conocimiento completo de las circunstancias que intervienen en la fusión de estos hornos para poder realizar las variaciones y correcciones necesarias para obtener no sólo las diferentes composiciones químicas indispensables, sino también las mejores propiedades.

1.2 HORNOS PARA PRODUCCIÓN DE HIERRO GRIS

Por lo general la producción de hierro gris se lo realiza en el horno de cubilote principalmente, sin dejar de utilizar los hornos eléctricos y hornos a llama.

1.2.1 HORNO DE CUBILOTE

El cubilote es el horno más utilizado en la obtención de la fundición gris, da un buen rendimiento técnico y permite con los medios sencillos unas temperaturas suficientes.

1.2.1.1 Descripción del Cubilote

En líneas generales, consisten simplemente de un tubo de acero casi siempre cilíndrico y de un espesor de 6 a 12 mm, el cual se encuentra revestido en su parte interior con ladrillos o bloques refractarios y sostenido por cuatro columnas. El diámetro interior de estos hornos varía normalmente entre 50cm y 2m, y la altura alcanza de 4,5 a 8 m, dependiendo su tamaño, por supuesto, de la producción de hierro líquido requerido, éste se eleva en los cubilotes pequeños a 1.000 kg por hora y puede alcanzar hasta 15.000 kg y más por hora en los cubilotes grandes.¹

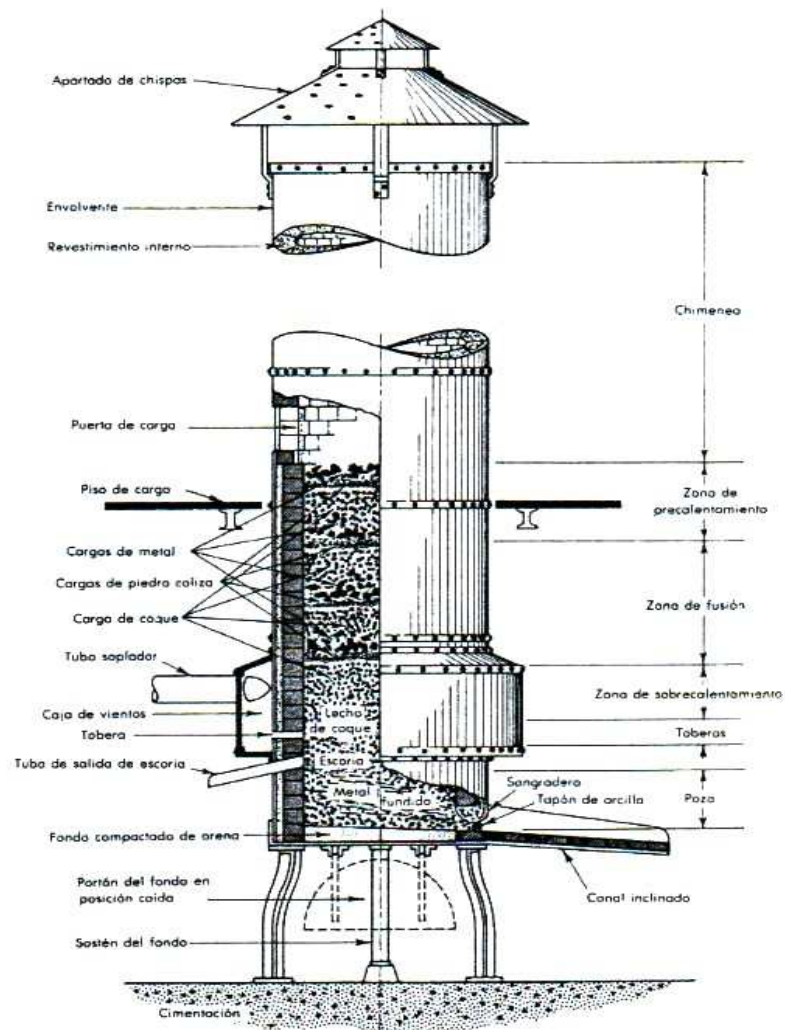


Figura 1.1 Se observa la parte interna y externa de un cubilote.¹

En el presente caso el cubilote del Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional posee un diámetro interior de 450 mm, su altura total es aproximadamente de 5400 mm.

La producción está dada por las relaciones coque-metal las cuales están dadas a continuación:

Relación Coque-Metal	Capacidad de Producción
6:1	530 Kg /hora
8:1	708 Kg /hora
10:1	883 Kg /hora
12:1	1063 kg /hora

1.2.1.2 Funcionamiento

Para poner en marcha el horno debe calentársele cuidadosamente a fin de eliminar paulatinamente la humedad y evitar que las paredes se agrieten. Este caldeo preliminar se obtiene quemando leña en el interior del crisol para evitarse daños. El revestimiento refractario puede ser reparado o remplazado según sea la necesidad del mismo antes de la puesta en marcha, las puertas del fondo se cierran. En el canal de sangrado se coloca un tapón de arcilla (chocoto), se apisona en el fondo una capa de arena con pendiente hacia la tobera de sangrado, sobre esta capa de arena se colocan materiales de combustibles como viruta, maderos o leña, retazos de tela, etc. para proteger la carga inicial de coque, el cual debe tener un espesor de un metro o más para encender el combustible. Cuando la cama de coque esté bien encendida se añade el metal para que el fundente ayude a formar escoria para eliminar las impurezas y retardar la oxidación del metal, por lo común se utiliza piedra caliza y el combustible coque cuyas cargas deben ser en proporciones de peso, pero la más común es de 10:1 que significa 100 Kg de coque para fundir 1 Tonelada métrica de hierro. La relación metal-coque influye en la temperatura del metal líquido en la zona del crisol, generalmente conocida como temperatura de sangrado.¹

A continuación de que la carga y el horno han tenido oportunidad de calentarse con uniformidad en un tiempo determinado, se inicia el tiro forzado.

El aire se sopla a través de la caja de viento y toberas que rodean el hogar dentro del horno, la cantidad de aire a suministrarse está determinada en la cantidad de oxígeno necesaria para combustionar el carbón de coque, por lo tanto es recomendable 950 m³ de aire para fundir una tonelada métrica de hierro.¹

El metal fundido fluye a través del coque y se acumula en el fondo. Se hace el sangrado rompiendo el tapón de arcilla en la bigotera. Puede permitirse el flujo a intervalos o puede ser continuo durante el fundido, para lo cual la velocidad de fusión debe estar en equilibrio con la capacidad del agujero de sangrado.

La escoria flota en la parte superior del metal; si se deja que el metal fundido se acumule en el corazón, la escoria fluye a través de una abertura más alta que el agujero de sangrado, llamada muesca de cenizas que se halla en la parte posterior del horno del cubilote. En otra forma, la escoria puede desnatarse del metal conforme fluya fuera del horno.¹

Cuando se haya fundido suficiente metal, no se añaden cargas adicionales, por ende la altura de los materiales decrece según la combustión, a este tiempo el fondo del cubilote se deja caer para derramar el contenido restante sobre una capa de arena, ubicada en el suelo para que se enfríe se añade agua para que el enfriamiento sea más rápido. Los materiales caídos pueden ser rehusados como chatarra.

1.2.1.3 Cálculo de Cargas para el Horno Cubilote

Cabe aclarar que el cubilote interviene poco para refinar el metal y la composición del producto final, depende principalmente de la chatarra. Las proporciones de metales que van a ser cargados deben calcularse para asegurar un producto predecible, y esto se basa en el conocimiento del porcentaje de carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre en el arrabio y en la chatarra de hierro.¹

La carga metálica del cubilote se realiza colocando alternativamente capas de unos 40 a 50 cm. de espesor o altura y cargas del mismo espesor de coque junto con caliza.²

Las cargas metálicas del cubilote para la producción de de hierro fundido se componen de arrabio, chatarra de fundición de hierro y chatarra de acero. El tamaño de los trozos de chatarra o lingotes debe ser inferior a un tercio del diámetro del cubilote.²

Las cargas de coque dependen de la composición de la carga metálica, pues si ésta contiene mucha chatarra de acero se consumirá más coque. Si suponemos que la composición de chatarra de acero es de un 50%, se carga aproximadamente un 13% de coque. Su tamaño debe ser de 1/10 a 1/12 del diámetro del cubilote.²

El peso de la caliza que se añade junto con la carga de coque varía de 3 a 5% de la carga metálica.²

Por ejemplo, para el encendido del cubilote del Laboratorio de Fundición las cargas son las siguientes:

Coque..... 9,5 Kg

Caliza..... 3,1 Kg

Chatarra Hierro Gris..... 55 Kg

Acero (se puede colocar a partir de la segunda colada y no debe ser mayor a un 20% de carga con relación a la chatarra).

1.2.2.4 Características de las fundiciones obtenidas en el horno de cubilote

Hay que resaltar que una de las principales cualidades para utilizar el horno de cubilote para la producción de hierro gris en grandes cantidades de forma continua es su bajo costo.

Los parámetros que intervienen en la operabilidad del cubilote al no ser debidamente controlados, suelen variar las composiciones de las fundiciones, lo que implica que no existe homogeneidad.

Un parámetro fundamental para la obtención de una buena fundición es lograr altas temperaturas que permitan un afino en el grafito, y el desalojar las influencias nocivas por procedimientos como: desoxidación, desgasación y desulfuración.²¹

Su principal desventaja es que el metal líquido se encuentra en contacto directo con el coque y de este absorbe azufre, lo que le da un porcentaje mayor de azufre con respecto a otros procesos de obtención de fundición gris.

Las mermas suelen variar en 10% de Si, un 20% de Mn y aumentar en un 50% de azufre.²¹

1.2.2 HORNOS ELÉCTRICOS

Algunos hornos eléctricos utilizados en la producción de aceros y fundiciones son los hornos de arco, los de resistencia y los de inducción de baja y alta frecuencia.

1.2.2.1 Horno de Arco

Este horno utiliza el calor producido por la chispa que salta entre dos o varios electrodos lo que permite clasificar de acuerdo al tipo de electrodos que utiliza, dando lugar a los monofásicos, bifásicos o trifásicos. El arco puede saltar por encima de la atmósfera, del baño metálico en cuyo caso este constituye uno de los electrodos.²¹

- Los hornos de arco directo reciben este nombre, porque el arco salta directamente entre el electrodo y el metal a fundir. Los electrodos son de grafito o de carbón amorfo y los hornos pueden ser monofásicos cuando son muy pequeños (menos de 100Kg de capacidad) o, con más frecuencia, los trifásicos que tienen tres electrodos suspendidos verticalmente sobre la solera refractaria que generalmente es cóncava. Los hornos modernos son casi todos de planta circular, con paredes refractarias y cubiertos con una bóveda con agujeros para el paso de los electrodos.²²
- Los hornos de arco indirecto que reciben este nombre porque el arco salta entre dos electrodos de carbón completamente separados e independientes de la carga y que se calientan solo por radiación. Muchos

de los hornos más antiguos eran de esta clase, pero el único sobreviviente de estos tipos de horno es el horno basculante de arco que se emplea con frecuencia para obtener fundiciones de hierro especiales, bronce y ocasionalmente aleaciones de níquel. Consisten esencialmente en una envuelta revestida con refractarios, cuya forma es esférica o cilíndrica, con dos electrodos montados horizontalmente; el arco salta entre ellos en el centro de la cámara formada por el revestimiento refractario. El horno está montado sobre rodillos; estos son accionados por un motor que gracias a un conmutador de inversión, produce el balanceo del horno.²²

1.2.2.2 Horno de Resistencia

En los tipos más comunes de esta clase de hornos el calor se produce por una resistencia eléctrica de carbón o por un apisonado de carbón que rodea el crisol de material cerámico. El apisonado de carbón evita la carburación del metal fundido por el contacto inmediato con el crisol de carbón.

1.2.2.3 Horno de Inducción

Estos pueden ser de baja frecuencia de 3 a 25 Hertz y de alta frecuencia más de 50 Hertz.

- Horno de baja frecuencia, en este horno la masa a fundir hace de arrollamiento secundario en un transformador. El crisol tiene la forma de uno o varios anillos alrededor del núcleo de hierro; el cierre del núcleo garantiza una transformación completamente económica de la energía tomada de la red cuando el arrollamiento secundario está cerrado en sí, es decir, cuando el metal está fundido. Estos hornos dan un buen rendimiento cuando estos trabajan en forma continua.²²

- Horno de alta frecuencia: este está formado por un crisol refractario que contiene el metal, rodeado de una espiral de tubo de cobre, por el que circula una corriente de alta frecuencia que crea un campo magnético variable, calentándose

la masa del metal contenida en el crisol por las corrientes de Foucault inducidas por el campo magnético. El tubo de cobre de la espiral que rodea el crisol está refrigerado por agua que circula por su interior.²

El calor producido viene dado por la fórmula:

$$Q = 0,24 K.F.v^2.e^2.B^2.t^2$$

En la que K es un coeficiente que depende de la naturaleza del metal. F la frecuencia en ciclos por segundo, v el volumen total del núcleo, es decir del metal, el espesor del núcleo, o sea el diámetro interior del crisol, B el valor de la inducción y t el tiempo que dura la operación.

Como puede verse, el calor producido en estos hornos es proporcional al cuadrado de la frecuencia, por esto se utilizan corrientes de frecuencia elevadas, superiores siempre a los 50 ciclos por segundo que tiene normalmente la corriente eléctrica en red. En general las frecuencias de las corrientes eléctricas para la alimentación de hornos industriales para fusión de metales varían de 300 a 30.000 ciclos por segundo, producidas por osciladores de estado sólido. La potencia del horno y, la temperatura se regula variando la frecuencia.²

1.2.2.4 Características de las fundiciones obtenidas en los hornos eléctricos

La obtención de la fundición gris en el horno eléctrico se caracteriza por la seguridad con que pueden obtenerse las cifras que se desean en las características del metal. Esto se debe al fácil logro de altas temperaturas y a la sencillez y exactitud con que pueden alcanzarse. La obtención de temperatura elevada permite garantizar un afino en el grafito, la adicción de chatarra de acero y el alejamiento de todas las influencias perjudiciales permite una buena desgasación, desoxidación y desulfuración.

Frente a otros hornos posee las siguientes ventajas: un alto rendimiento y fácil regulación. Debe añadirse a estas ventajas lo que puede llamarse su indiferencia química.²¹

1.2.3 HORNOS A LLAMA

Son los de reverbero, los tipos Martin-Siemens, los de crisol y los de tambor rotatorio u oscilante.

1.2.3.1 Hornos Reverberos

En estos hornos se quema el combustible en uno de los extremos de la cámara; la llama y los otros productos de la combustión son dirigidos por la forma de bóveda hacia la carga existente en la solera, que se encuentra en el trayecto de los gases hacia la salida de humos y chimenea.²¹

El horno Martín-Siemens: este tipo de hornos de reverbero se emplean principalmente para la fusión y afino del acero destinado a la fabricación de lingotes; es calentado con aceite, gas de coquería, gas de gasógenos o una mezcla de gas de alto horno y de coquería. Cuando se emplea un gas de poco poder calorífico, como el gas de gasógeno o la mezcla citada, es fundamental precalentar el gas en un regenerador. El aire se recalienta siempre para conseguir la máxima economía térmica y lograr una elevada temperatura de llama.

El horno es un recipiente rectangular con puertas para combustible y gases en ambos extremos. Estas puertas pueden responder a diversos diseños, pero en todo caso deben dirigir los gases hacia abajo, hacia la carga o baño del metal. La llama y los gases calientes pasan por encima del baño y salen por el extremo opuesto del horno. Los gases de la combustión atraviesan uno o dos regeneradores antes de perderse en la chimenea; frecuentemente se colocan calderas después de los regeneradores para recuperar el calor perdido y conseguir la mejor recuperación posible de los productos de la combustión, mediante válvulas refrigeradas con agua y entonces al horno se le calienta desde el extremo opuesto. Si se emplea combustibles de alto poder calorífico, como los aceites o alquitranes y aún el gas de coquería, no suele precalentarse el combustible y solo hay que precalentar el aire en cada uno de los extremos del horno.^{21, 22}

1.2.3.2 Horno de Crisol

Pueden ser hornos de foso, hornos a nivel del suelo o bien hornos levantados respecto al suelo.

- El tipo de foso.- Suele calentarse por coque que se carga alrededor y por encima de los crisoles (que se cierran con una tapa de refractario) para producir la fusión y el sobrecalentamiento sin necesidad de cargar más coque. El tiro puede ser natural o forzado, es decir, producido por una chimenea o mediante un pequeño ventilador. El espacio destinado al coque entre los crisoles y el revestimiento del foso debe ser de por lo menos 75 mm, y entre el fondo de los crisoles y las caras de la parrilla suelen haber aproximadamente 180 mm. El borde de los crisoles debe quedar debajo de la salida de humos. Las parrillas y todas las entradas de aire deben mantenerse libres de productos sintetizados para que el aire pueda circular libremente a fin de conseguir una combustión completa y una atmósfera ligeramente oxidante.

Los hornos calentados por gas o aceite son más fáciles de controlar y funden más rápidamente que los otros, pero imponen condiciones más duras a los crisoles y los refractarios.²²

- Hornos de crisol fijo no basculantes.- Se ha señalado que en estos el crisol está fijo al horno, sus bordes salen fuera de la cámara de caldeo y no hay posibilidad de contacto con los gases de combustión.

Como no pueden bascularse para verter el contenido del crisol, es necesario extraer el caldo con una cuchara; son adecuados cuando se necesita tomar pequeñas cantidades de metal a intervalos frecuentes, cuando se cola en coquillas. Pueden emplearse como hornos de espera con la sola misión de mantener el metal en estado líquido, pero en algunos casos también se efectúa en ellos la fusión. Su rendimiento térmico es más bajo para la fusión, sobretodo cuando se trabaja a temperaturas altas, pero representan una verdadera unidad de fusión, de no mucha capacidad, que sirve para una gran variedad de trabajos.²²

- Hornos basculantes (de crisol fijo).- Se ha indicado anteriormente que estos hornos son análogos a los del tipo anterior, pero con la diferencia de que la

estructura total del horno puede inclinarse alrededor de un eje horizontal para efectuar la colada sin tener que recurrir a la extracción del caldo del crisol mediante cucharas introducidas en él. Lo mismo que los hornos de foso se pueden calentar con coque, con gas o con aceite. El horno no es más que una carcasa de acero suave revestida con materiales refractarios, en forma de ladrillos o apisonados. Algunos hornos basculantes calentados por coque tienen una parrilla con una caja cenicero, y el aire soplado pasa a través de los muñones a una caja de viento que rodea la parte inferior del horno o a veces de conductos en una carcasa de paredes delgadas para producir algún precalentamiento. La capacidad para el coque es importante, especialmente para aleaciones férreas; si es suficiente evita la recarga de coque durante la fusión y las consiguientes pérdidas de calor. Para encender un horno basculante de coque se empieza por un fuego moderado de madera y coque y cuando todo el coque quema uniformemente alrededor de crisol se completa la carga de coque (algunos hornos poseen un quemador anular de gas para iniciar la combustión). Con el aire a un cuarto de soplado, se calienta el crisol al rojo y entonces se carga con el metal. Los hornos calentados por aceite o gas son de diseño parecido, salvo que no necesitan caja de viento ni se precisa la parrilla, por lo que el crisol descansa en un soporte refractario. El quemador se fija en el horno de tal forma que el calentamiento pueda continuar mientras que el horno se bascula. Esto es ventajoso cuando se necesita el metal en cantidades pequeñas cada vez y el período de colocada es prolongado. En los hornos de gas hay que tomar precauciones para evitar explosiones, especialmente durante el encendido. Debe evitarse la acumulación de mezclas explosivas de gases no quemados o de vapores inflamables y aire.²²

1.2.3.3 Características de las fundiciones obtenidas en los hornos a llama

Se puede obtener una gran variedad de fundiciones siempre y cuando estos tipos de hornos de llama alcance elevadas temperaturas, lo que implica que dependerán del tipo de combustible que utilicen, ya sea este coque gas o aceite teniendo en cuenta que los que funcionan con gas son más fáciles de controlar.

1.3 DIAGRAMA HIERRO – CARBONO

El diagrama hierro-carbono que se señala al estudiar los aceros y las fundiciones blancas, se denomina diagrama metaestable y corresponde a las aleaciones hierro-carbono de bajo contenido de silicio.

Las transformaciones que se producen en los calentamientos y enfriamientos en las fundiciones grises deben estudiarse con ayuda de un diagrama hierro-carbono un poco diferente al de los aceros, que se llama hierro-carbono estable (que señala los fenómenos y transformaciones estables correspondientes a las aleaciones hierro-carbono) y que se refiere en general, a las aleaciones de alto contenido en silicio (1 a 4 % generalmente). Una característica de este diagrama estable es que sus constituyentes son grafito y hierro en lugar de cementita y hierro que son los constituyentes del diagrama metaestable.⁴

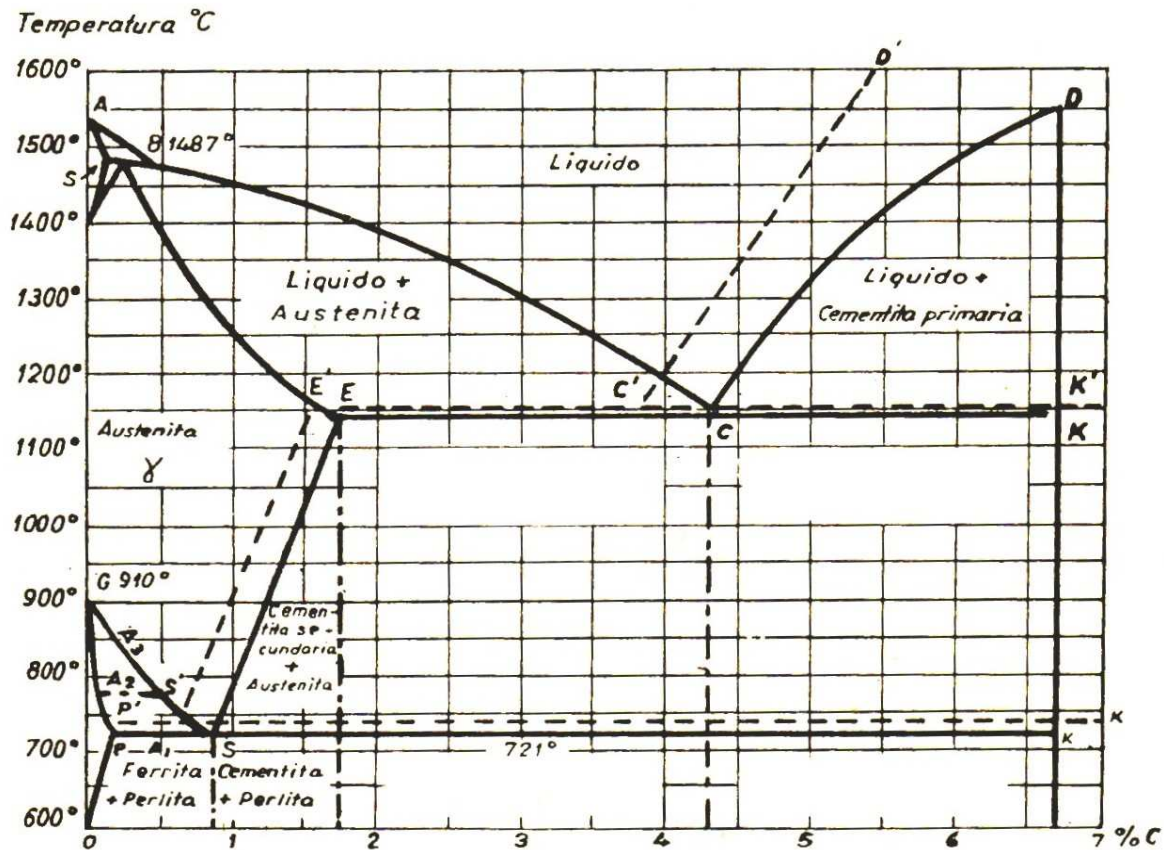


Figura 1.2 Diagrama hierro-carbono estable (líneas segmentadas) y diagrama hierro carbono metaestable (líneas continuas).⁴

En la figura 1.2 se indica el diagrama estable correspondiente a 1,5% de silicio, que es un contenido que se puede considerar como medio entre los utilizados en las fundiciones grises de uso corriente. Se observa que en el diagrama estable las líneas de transformación están desplazadas hacia arriba y hacia la izquierda.⁴

Los contenidos en carbono de las aleaciones eutécticas y eutectoides del diagrama estable, varían con el contenido en silicio de las fundiciones y son inferiores a las que corresponden al diagrama metaestable. En las transformaciones del diagrama estable para una temperatura determinada, la austenita es capaz de disolver menor cantidad de carbono que el que disuelve a la misma temperatura, cuando las transformaciones se hacen de acuerdo con el diagrama metaestable.

En la figura 1.3 se señalan las variaciones que experimenta el contenido en carbono de las composiciones eutécticas y eutectoides al variar el contenido en silicio.

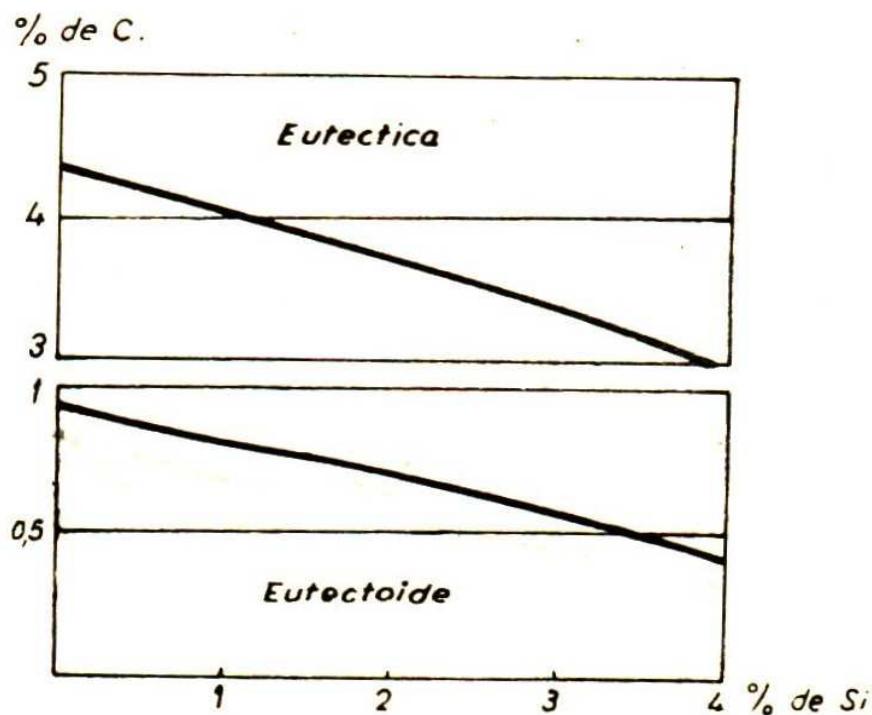


Figura 1.3 Influencia del contenido en silicio de las fundiciones en el porcentaje de carbono de las composiciones eutéctica y eutectoide.⁴

Observando la figura, se ve con cierta aproximación que se puede conocer el contenido de carbono de la aleación eutéctica y de la perlita en las fundiciones de diverso contenido en silicio con las siguientes formulas. ⁴

$$\text{Carbono eutéctico} = 4,3 - (\% \text{Si}/3). \quad ^4$$

$$\text{Carbono eutectoide} = 0,9 - (\% \text{Si}/9). \quad ^4$$

La fundición de hierro se puede considerar, como una aleación de hierro y carbono, cuyas características se influyen más o menos por el mayor contenido en silicio. Este elemento es el responsable de que la fundición solidifique blanca o gris, si suponemos que el hierro tiene una fusión normal y también una solidificación normal, es decir, que no se temple ni tenga la pieza un espesor tan delgado que solidifique inusualmente deprisa.²¹

El silicio entra en la aleación disuelto en el hierro, formando con esto cristales mixtos, por lo cual no es perceptible en el microscopio.

1.3.1 INFLUENCIA DE LOS DIVERSOS ALEANTES

1.3.1.1 Silicio

Es sabido que este elemento estimula la segregación del carbono en forma de grafito. Sin embargo si pasa del 3% retrocede su acción grafitizadora.

El silicio contribuye a la formación de ferrita y austenita, disminuye la solubilidad del carbono en la austenita y ayuda la difusión del carbono, por lo que favorece la formación de grafito a partir de la descomposición de los carburos primarios.

En la fundición gris, el silicio oscila entre 1,5 y 3%, siendo generalmente los valores más altos para las piezas de espesores delgados.

Se añade silicio intencionadamente durante el proceso de fabricación y se lo añade como elemento desoxidante complementario del manganeso con objeto de evitar que aparezcan poros y otros defectos internos. Favorece la precipitación del grafito, su presencia aumenta algo la resistencia del hierro, pero si su

proporción se eleva al 4 %, entonces endurece las piezas hasta tal punto que el hierro se vuelve quebradizo. La presencia de silicio disminuye la contracción del hierro fundido, y en ciertos casos mejora la resistencia a la oxidación.^{4, 21}

1.3.1.2 Manganeso

El manganeso ejerce una acción opuesta a la del silicio, pues favorece la formación de carbono combinado. Dificulta la precipitación del grafito por formar carbono de manganeso, apoderándose del carbono y reduciendo así la separación gráfica; el manganeso actúa también como desoxidante y evita en parte que en la solidificación del hierro se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material.

Este elemento aumenta la resistencia del hierro y provoca asimismo una contracción más elevada de la colada al proceder a su enfriamiento. Entra en combinación con el azufre, mitigando los efectos del azufre al formar sulfuro de manganeso. El manganeso se combina con el azufre en una proporción de 1,77 partes en peso de manganeso, por una parte de azufre, teóricamente, en la práctica se necesita alrededor de tres veces el contenido de azufre para neutralizar su efecto adverso sobre el hierro fundido. El manganeso disminuye la temperatura de transformación eutectoide de la austenita, aumenta el intervalo de la austenita y disminuye la concentración de carbono en la transformación eutectoide y en la transformación eutéctica, un 1% de manganeso disminuye la concentración de carbono en 0,06 – 0,07%, pero aumenta la temperatura de transformación eutéctica, un 1% de manganeso aumenta la temperatura de transformación eutéctica en 3°C aproximadamente. En alto contenido de fósforo P (alrededor de 0,7%) el Mn no debe exceder de 0,5 % y esto para fundiciones de mediana calidad. En fundiciones grises de altas exigencias mecánicas, se mantiene el P muy bajo y el Mn entre 0,8 y 0,9 %. Como regla general, para fundiciones corrientes la suma de Mn + P \leq 1,2% no dejando pasar el P de 0,7%.

Los sulfuros de manganeso forman cristales pequeños redondos, los cuales mejoran las propiedades de la colada.^{4,7,21}

1.3.1.3 Fósforo

Es un elemento perjudicial para la calidad del hierro, resultando este último frágil al sobrepasar la proporción de aquél, un límite de más o menos 1%, cantidades superiores forman un microconstituyente conocido como esteadita, que es un complejo eutéctico de hierro y fósforo de hierro, el cual solidifica en los límites de los granos. Cuando alcanza contenidos de 0,2% en el hierro gris, la esteadita se presenta en los límites de las celdas y asume la forma de un triángulo cóncavo. Cuando llega a contenidos de hasta 1%, forma una red alrededor de los límites de los granos. La eutéctica fosfórica le confiere a la fundición líquida una particular fluidez porque disminuye el punto de solidificación, pero al mismo tiempo aumenta la dureza y la fragilidad, en la mayoría de hierros americanos su porcentaje varía desde 0,1 a 0,9 %; tratándose de una fundición ordinaria, se admite de 0,3 %; en cambio, cuando se trata de piezas coladas de alta calidad, el contenido máximo admisible es sólo de 0,05 %. Como propiedad ventajosa del fósforo hay que mencionar su influencia sobre la fluidez del hierro lo que mejora la facilidad de colado en secciones delgadas, para fundir objetos artísticos, piezas delgadas, radiadores, etc.

El fósforo con una proporción de hasta 0,5 % no tiene influencia sobre la precipitación del grafito; en cambio una proporción más elevada la favorece, la cual le puede dar cierta dureza y resistencia al desgaste pero la debilita.^{4,7}

El fósforo forma fosfuros (Fe_3P) forma el eutéctico ternario Fe, Fe_3C , F_3P , llamado esteadita. El sistema Fe, Fe_3C , F_3P estudiado por Vogel coloca el punto eutéctico en la composición P= 4,78% y C= 1,96%, mientras Goerens y Dobbstein lo habían colocado en la composición P = 1,55%.²¹

En la figura 1.4 se muestra un corte del dominio especial ternario correspondientes a las aleaciones Fe-C con crecientes contenidos en fósforo. Con P = 0,07% se han observado en las micrografías pequeñas inclusiones de ese constituyente, debido a una fuerte segregación de fósforo en los cristales, mediante el cual, en algunos puntos de los mismos, ha podido acumularse el fósforo, hasta quedar en las proporciones necesarias para segregar pequeñas cantidades de eutéctico.²⁰

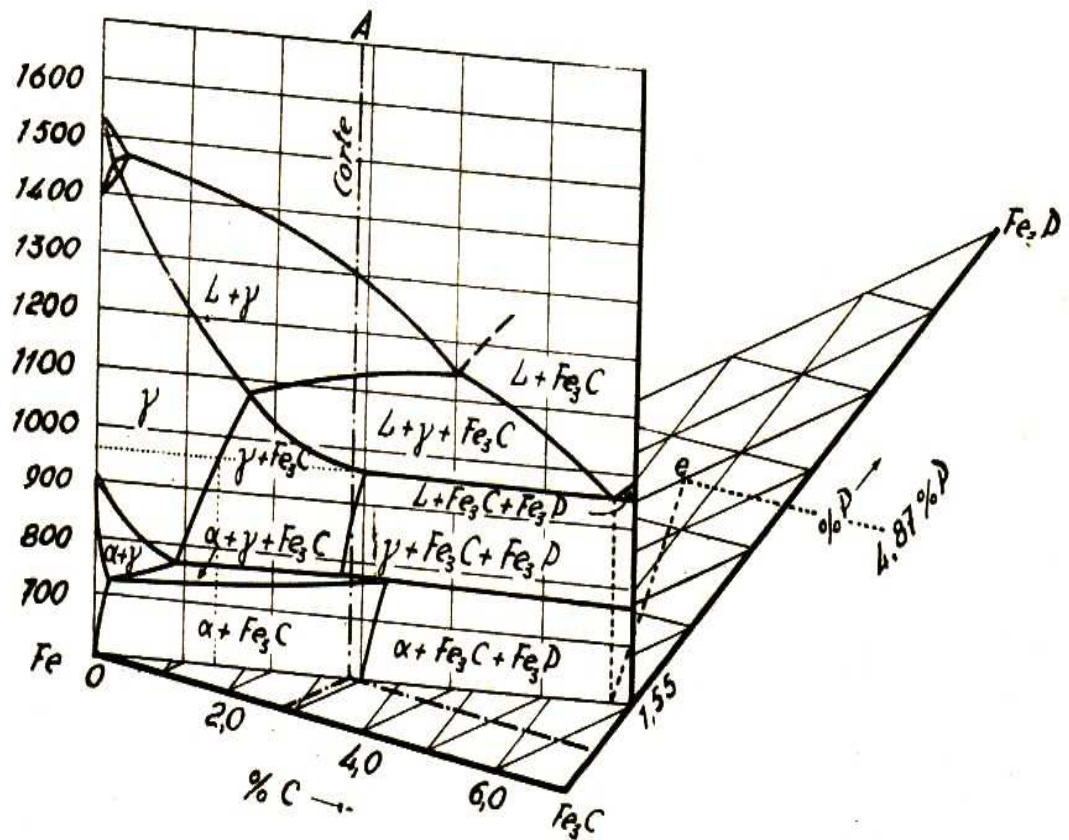


Figura 1.4 Sistema eutéctico ternario Fe, Fe₃C, F₃P ²¹

1.3.1.4 Azufre

La adición de azufre ocasiona algún sacrificio en las propiedades de soldabilidad, forja y conformación en frío, pero mejora la maquinabilidad de las piezas, en general es un elemento perjudicial para la calidad del hierro.

El azufre aparece en las fundiciones como sulfuro de hierro o de manganeso, el primero es perjudicial porque obstaculiza la grafitización, hace la fundición dura y frágil; dificulta su fusión y aumenta considerablemente su dureza y contracción, provocando esta última circunstancia el desarrollo de tensiones internas (sopladuras o coqueras).

La proporción del azufre debe mantenerse tan baja como sea posible, no debiendo exceder en ningún caso de 0,17 % tratándose de piezas pesadas, y 0,08 % en piezas medianas

El sulfuro de manganeso solidifica antes de que lo haga el hierro fundido y lo hace asumiendo diferentes formas geométricas en los límites de los granos, por lo que resulta inofensivo para el metal. Todo hierro producido comercialmente contiene alguna cantidad de azufre. El azufre no es totalmente indeseado, algunos tipos de hierro fundido tienen un contenido mínimo para producir la microestructura y las propiedades deseadas.^{4, 7}

Al solidificar forma una mezcla eutéctica con arreglo al diagrama de la figura 1.5, este eutéctico, S Fe-Fe, de un punto de fusión de 985 °C, rellena los límites de los núcleos cristalinos y forma una red frágil, cuyo efecto se deduce fácilmente. Además se observa en el diagrama que en los puntos 298 °C y 138 °C representan cambio de volumen en esta aleación, los cuales son peligrosos para la resistencia mecánica.²¹

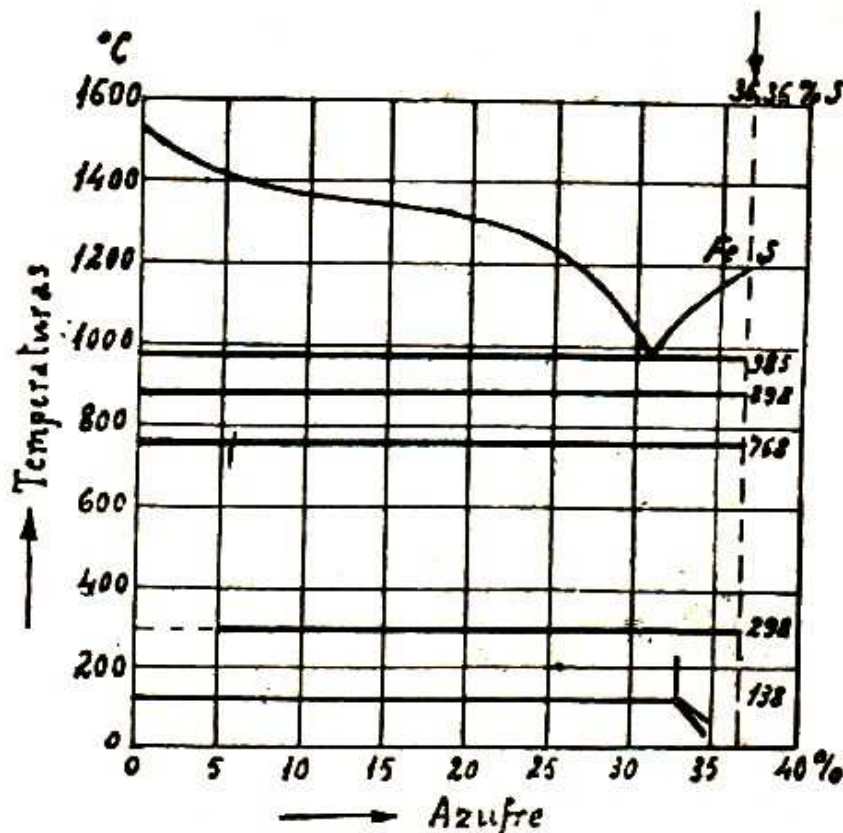


Figura 1.5 Porcentaje Azufre Vs. Temperatura²¹

El azufre tiene gran afinidad con el manganeso. El sulfuro de manganeso que se forma pasa en parte a las escorias y en parte queda como inclusiones pequeñas, no tan nocivas como la red de sulfuro de hierro. Lo ideal sería que todo el azufre se combinara con el manganeso pero en realidad se obtiene una mezcla eutéctica, S Fe-S Mn y de S Mn, tanto más rico en sulfuro de manganeso, cuanto más manganeso posee la masa fundida, tal como se muestra en la figura 1.6²¹

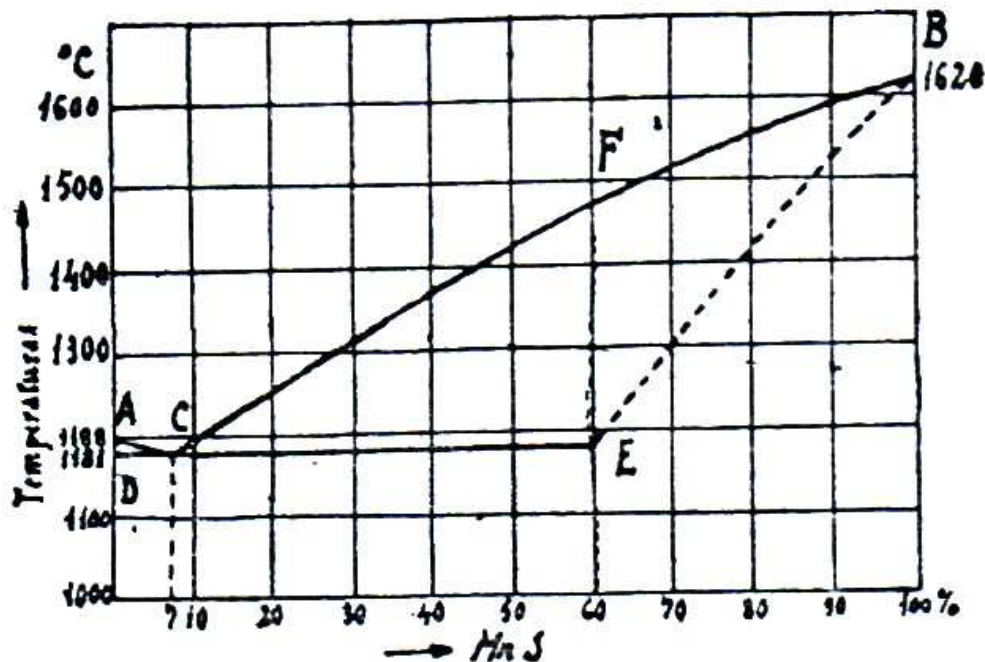


Figura 1.6 Mezcla Eutéctica S Fe-S Mn²¹

1.3.1.5 Carbono

El carbono combinado, como componente del carburo Fe_2C , determina en gran parte las propiedades, la resistencia y dureza de las piezas fundidas.

Cuando el hierro contiene un porcentaje más elevado de carbono, una parte del mismo se cristaliza en el momento de la solidificación, o inmediatamente después de ella, en forma de grafito. Este último interpuesto en el hierro, afloja por decirlo así su consistencia, obteniéndose una estructura disgregada y

esponjosa, y disminuyéndose por lo tanto la resistencia, la dureza y densidad de la fundición, aumentándose por otro lado la posibilidad de su maquinado. Por el contrario, cuando se trata de piezas cuya cantidad de grafito es excesivamente pequeña, las mismas resultan duras y frágiles, no consiguiéndose trabajarlas con las herramientas ordinarias.

Como se ve, la presencia de cantidades mayores o menores de carbono tiene una influencia profunda sobre las propiedades del hierro, además es importante determinar en que forma aparece este elemento en el metal fundido, es decir es necesario examinar su estructura.⁴

La metalografía moderna facilita los medios para verificar la estructura de los metales por medio de un microscopio. Por este método se puede determinar el tamaño y la forma de los granos, así como las posibles fallas de la pieza fundida.

1.4 MICROCONSTITUYENTES DE LAS FUNDICIONES

El análisis de las microestructuras de las fundiciones de hierro deben realizarse en base al diagrama estable Hierro-carbono: hierro - Cementita y hierro- grafito.

Las fundiciones contienen más del 2% de Carbono.³

Las microestructuras que presenta el diagrama de equilibrio para las fundiciones de hierro pueden presentar los mismos constituyentes de los aceros, más el eutéctico ledeburita compuesto de austenita y cementita, el eutéctico ternario de cementita, ferrita y fosforo de hierro (esteadita) y el carbono en forma de láminas, nódulos o esferas de grafito dependiendo de su clasificación.

1.4.1 LEDEBURITA

Es el constituyente eutéctico que se forma al enfriar la fundición líquida de 4.3% C desde 1145°C. Está formada por 52% de cementita y 48% de austenita de 2% C. 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 las agrupaciones de perlita y cementita.⁴

1.4.2 ESTEADITA

Es un constituyente de naturaleza eutéctica duro, frágil (300 a 350 Vickers) y de bajo punto de fusión (960°C), que aparece en las fundiciones de alto contenido en fósforo (más de 0.15 % P).⁴

1.4.3 GRAFITO

La proporción del grafito en la pieza fundida depende del procedimiento adoptado para la colada, de la velocidad de enfriamiento, y por supuesto de la composición química del metal, factores que introducen las variaciones en las propiedades mecánicas de la pieza obtenida. Las láminas de grafito interpuestas en el hierro disminuyen las propiedades mecánicas de la pieza fundida. Por otra parte la resistencia de la pieza depende del tamaño y de la distribución de dichas láminas de grafito, cuanto más pequeño sea el tamaño y cuanto más uniforme la distribución, tanto mayor será la resistencia de la pieza fundida.⁴

1.4.4 FERRITA

Es una solución sólida intersticial de carbono en una red cúbica centrada en el cuerpo de hierro alfa, es hierro puro. Admite hasta un 0,021 % C en solución a la temperatura eutécticoide.³

La morfología y estructura granular de la ferrita es muy variada pudiéndose encontrar hasta 24 términos descriptivos de la misma. Sin embargo, son dos las morfologías que conviene destacar (figura.1.7): Morfología equiaxial y (figura.1.8) estructura de Widmanstätten.³

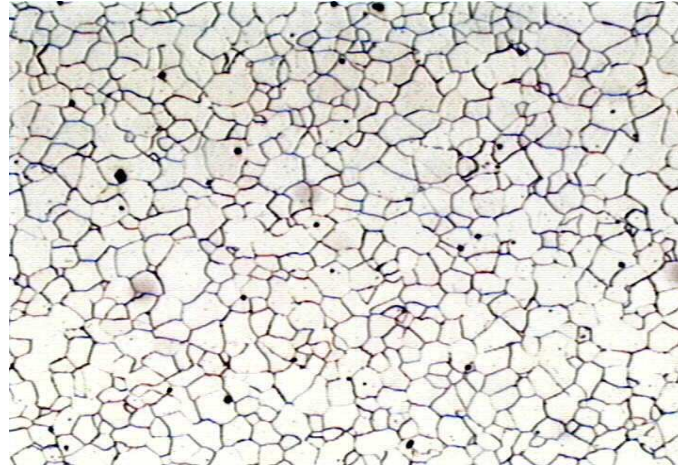


Figura 1.7 Morfología Equiaxial³ x 100

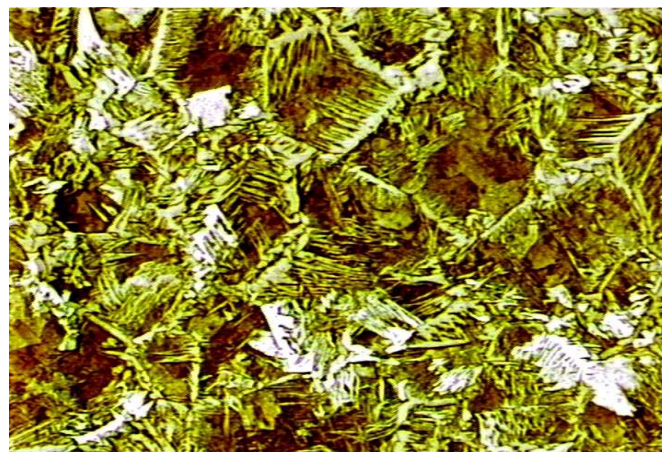


Figura 1.8 Estructura Widmanstätten³ x 100

La morfología equiaxial corresponde a granos poligonales de ejes aproximadamente iguales, que resultan a veces atacados diferentemente en función de su orientación cristalográfica respecto a la superficie de observación. En la estructura de Widmanstätten un enfriamiento rápido desde altas temperaturas obliga a un crecimiento de la ferrita, según ciertas direcciones preferenciales, resultando granos alargados en dichas direcciones del grano de austenita previo.³

La estructura se presenta bajo el microscopio en forma de granos cristalinos irregulares, los cuales están separados entre sí por líneas delgadas como se observa en la figura 1.9. Se trata de un constituyente blando (dureza

Brinell alrededor de 90 y una resistencia a la tracción de 28 kg/mm^2 , llegando hasta un alargamiento del 40%), dúctil y magnético; su solubilidad a la temperatura ambiente es del orden de 0.008% de carbono, la máxima solubilidad de carbono en el hierro alfa es de 0,02% a $723 \text{ }^\circ\text{C}$.

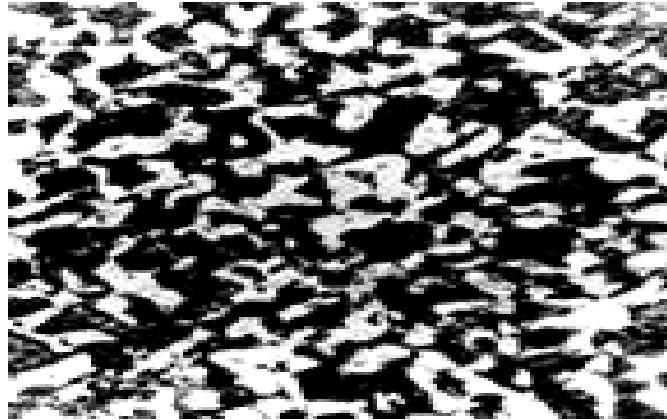


Figura 1.9 Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de ferrita⁴

1.4.5 CEMENTITA

Cementita es un carburo de hierro es una fase dura y frágil de fórmula Fe_3C , contiene 6.67 %C y 93.33 % de hierro, alcanzando una dureza Brinell de 700 (68 RC) y cristaliza en la red ortorómbica.

La cementita no libre, únicamente aparece asociada a la ferrita, como láminas finas alternadas de una y otra, cuyo agregado se conoce como perlita.^{3,4}

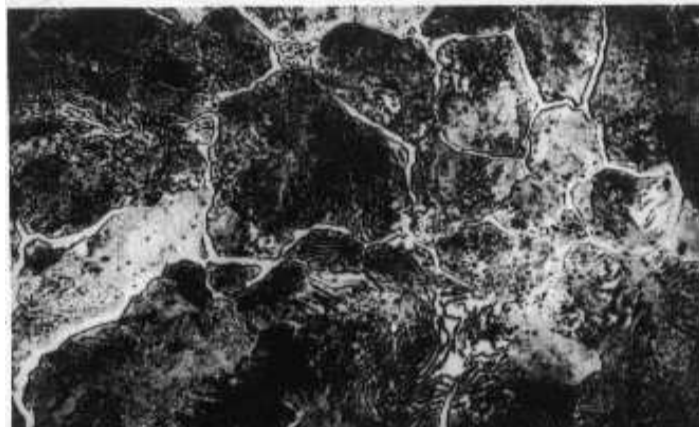


Figura 1.10 Microestructura del acero 1% C, red blanca de cementita⁴

1.4.6 PERLITA

La matriz de la mayoría de los hierros comerciales está compuesta en parte por perlita. Esta se forma a la temperatura eutectoide formado por capas alternadas de ferrita y cementita, compuesta por el 88 % de ferrita y 12 % de cementita, contiene el 0.8 %C. Tiene una dureza de 250 Brinell, resistencia a la tracción de 80 kg/mm² y un alargamiento del 15%; el nombre de perlita se debe a las formas que adquiere al iluminarla, parecidas a las perlas. La perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la austenita y por la transformación isotérmica de la austenita en 723°C. ^{4,5}

1.4.7 AUSTENITA

Es una solución sólida de hierro y de cementita por inserción de carbono en hierro gamma, el porcentaje del carbono varía en este compuesto de 0.8 al 2 % C que es la máxima solubilidad a la temperatura de 1130 °C.; la austenita está formada por cristales cúbicos centrados en las caras, con una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción de 100 kg/mm² y un alargamiento del 30 %, es un material no magnético.

En una pieza de hierro fundido se encuentra a menudo una estructura compuesta de fosfuro de hierro (Fe₃P) y hierro, llamada esteadita. Este tipo de aleación formado por pequeñas láminas de grafito distribuidas uniformemente en una matriz de perlita, es característica de una de las mejores clases de fundición gris.

1.4.8 MARTENSITA

Está conformado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado austenítico a altas temperaturas, sus propiedades físicas varían con su contenido en carbono. La martensita tiene una dureza de 50 a 68 RC,

resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm² y un alargamiento del 0.5 al 2.5 %, muy frágil y presenta un aspecto acicular formando grupos en zigzag con ángulos de 60°.

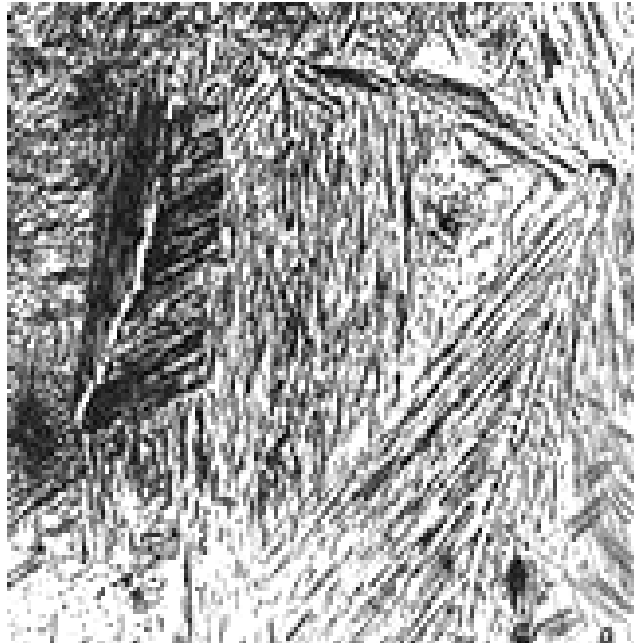


Figura 1.11 Microestructura de la martensita⁴

1.4.9 BAINITA

Es el constituyente que se obtiene en la transformación isotérmica de la austenita cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de 250 a 500°C. Se diferencian dos tipos de estructuras: la bainita superior de aspecto arborescente formada a 500-580°C, compuesta por una matriz ferrítica conteniendo carburos. La otra es la bainita inferior, formada a 250-400 °C tiene un aspecto acicular similar a la martensita y constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos. La bainita tiene una dureza variable de 40 a 60 RC comprendida entre las correspondientes a la perlita y a la martensita.

1.5 FUNDICIONES DE HIERRO

Las fundiciones de hierro también conocidos como hierros colados son aleaciones de hierro carbono del 2 al 5%, cantidades de silicio del 2 al 4%, del manganeso hasta 1%, bajo azufre y bajo fósforo. Se caracterizan por que se pueden vaciar del horno cubilote para obtener piezas de muy diferente tamaño y complejidad pero no pueden ser sometidas a deformación plástica, no son dúctiles ni maleables y poco soldables pero sí maquinables, relativamente duras y resistentes a la corrosión y al desgaste.⁵

Las fundiciones tienen innumerables usos y sus ventajas más importantes son:

- Son más fáciles de maquinar que los aceros.
- Se pueden fabricar piezas de diferente tamaño y complejidad.
- En su fabricación no se necesitan equipos ni hornos muy costosos.
- Absorben las vibraciones mecánicas y actúan como autolubricantes.
- Son resistentes al choque térmico, a la corrosión y de buena resistencia al desgaste.

1.5.1 TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS FUNDICIONES DE HIERRO

1.5.1.1 Fundición Blanca

Son aquellas en las que todo el carbono se encuentra combinado bajo la forma de cementita. Todas ellas son aleaciones hipoeutécticas y las transformaciones que tienen lugar durante su enfriamiento son análogas a las de la aleación de 2,5 % de carbono.

Posee poco carbono alrededor de 1.8% – 3.6%, silicio entre 0.5% – 1.9%, manganeso entre 0.25% - 0.8%, azufre 0.06% - 0.2% y fósforo 0.06% - 0.2% como se observa en la figura 1.12, son hipoeutécticos y se solidifican con la mayor parte del carbono en forma de cementita. Por lo cual este hierro es un

material duro y quebradizo. El nombre de esta fundición se debe por que su fractura es típicamente de color blanco.^{4,5}

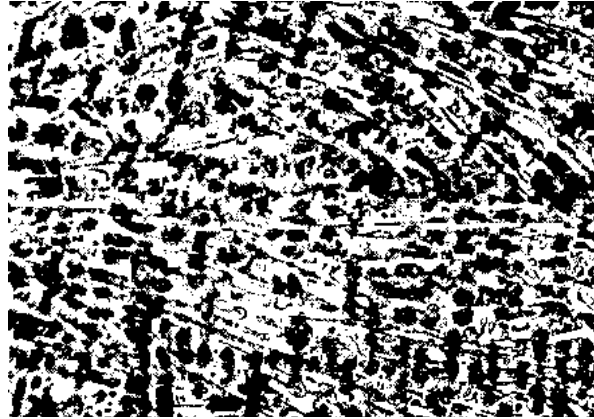


Figura 1.12 Microestructura del hierro blanco: la zona blanca es cementita y las regiones oscuras son perlita no disuelta⁶

Estas fundiciones se caracterizan por su dureza y resistencia al desgaste, siendo sumamente quebradiza y difícil de mecanizar. Esta fragilidad y falta de maquinabilidad limita la utilización industrial de las fundiciones, quedando reducido su empleo a aquellos casos en que no se quiera ductilidad como en las camisas interiores de las hormigoneras, molinos de bolas, algunos tipos de estampas de estirar y en las boquillas de extrusión³

1.5.1.2 Fundición Maleable

La tendencia que presenta la cementita a dejar en libertad carbono, constituye la base de la fabricación de la fundición maleable.

Se caracteriza por que la mayor parte de su carbono 2.2% - 2.9% aparece como nódulos de grafito de forma irregular, los intervalos de su composición son: silicio 0.9% - 1.9%, manganeso 0.15% - 1.2%, azufre 0.02% - 0.2% y fósforo 0.002% - 0.2%. El principal proceso de obtención es a partir de la fundición blanca las cuales son tratadas térmicamente para ser descarburizadas, luego se aplica un tratamiento de templado extenso alrededor de 800 y 970 °C, el tratamiento provoca la disociación de la cementita en austenita y el grafito nodular irregular y

luego pasa a hacer enfriada lentamente a partir de la temperatura de revenido para producir hierro maleable normal como se muestra en la figura 1.13; en el caso de un enfriamiento rápido se puede producir la transformación de austenita en perlita, bainita o martensita, de lo cual se obtiene hierro maleable perlítico.⁵ Las fundiciones de este grupo son utilizadas en la industria como: tuberías y conexiones de aire vapor y gas.

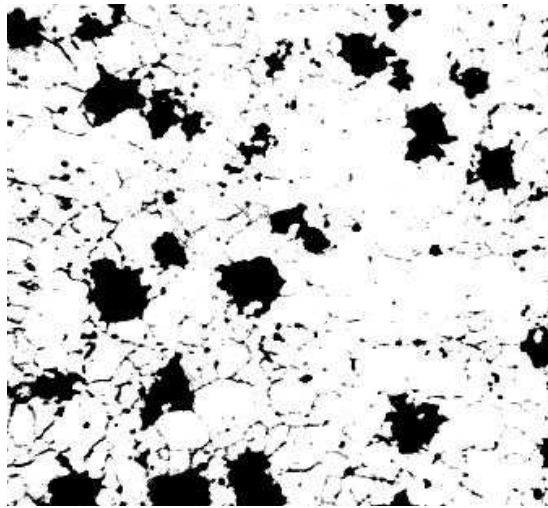


Figura 1.13 Microestructura típica de fundición de hierro-maleable ferrítico⁶

1.5.1.3 Fundición Gris

La mayoría de las fundiciones grises son aleaciones hipoeutécticas que contienen entre 2,5 y 4% de carbono. El proceso de grafitización se realiza con mayor facilidad si el contenido de carbono es elevado a altas temperaturas y si la cantidad de elementos grafitizantes presentes, especialmente el silicio, el proceso es adecuado.

La producción de la fundición se da cuando el carbono se aproxima al eutéctico, es decir que su equivalente en porcentaje es de 4.3%, además que el proceso de solidificación, la velocidad de enfriamiento es pequeña; pero en general las fundiciones grises comprenden los siguientes intervalos de composición en porcentajes: carbono 2.5 – 4.3, silicio 1.0 -3.0, manganeso 0.15 -

1.2, azufre 0.02 – 0.25 y fósforo 0.02 – 1.0. El carbono se forma como hojuelas de grafito entrelazadas a una celda eutéctica como se muestra en la figura 1.14.

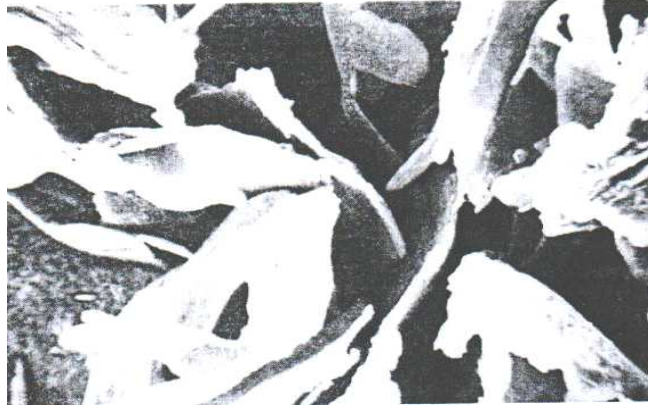


Figura 1.14 Micrografía de la microscopía electrónica de barrido que muestra las hojuelas de grafito interconectadas en el hierro gris. ⁶

En general la fundición gris tiene buena resistencia a la corrosión y puede alcanzar una resistencia a la tensión de 9 o 26 ton/pulg ^{3,5}

La mayoría de las fundiciones grises son aleaciones hipoeutécticas que contienen entre 2,5 y 4% de carbono. Para que grafiticen la cementita eutéctica y la proeutectoide, aunque no la eutectoide, hay que controlar cuidadosamente el contenido de silicio y la velocidad de enfriamiento y así obtener una estructura final perlítica.

El grafito adopta la forma de numerosas laminillas curvadas (figura 1.15), que son las que proporcionan a la fundición gris su característica fractura grisácea o negruzca.

Si la composición y la velocidad de enfriamiento son tales que la cementita eutectoide también se grafitiza presentará entonces una estructura totalmente ferrítica (Figura 1.15, x100 pulida).

Por el contrario, si se impide la grafitización de la cementita eutectoide, la matriz será totalmente perlítica (Figura 1.16, x200).



Figura1.15 Fundición Gris pulida x100. ³



Figura1.16 Fundición Gris pulida x200. ³

Los tipos de matrices que se pueden encontrar en las fundiciones son las mismas que de los aceros, principalmente son: ferrita, perlita, ferrita-perlita, austenita, martensita y bainita.

La fundición gris constituida por mezcla de grafito y ferrita es la más blanda y la que menor resistencia mecánica presenta; la resistencia a la tracción y la dureza aumentan con la cantidad de carbono combinada que existe, alcanzando su valor máximo en la fundición gris perlítica.

Las figuras 1.17 y 1.18 muestran la microestructura de una fundición gris cuya matriz es totalmente perlítica. Además, en la micrografía a 200 aumentos igual que en la figura 1.16 se observan como unos granos blancos, los cuales resueltos a mayores aumentos (figura1.18, x400) son, en realidad, *esteadita*.



Figura1.17 Fundición Gris; Matriz Perlítica x200³

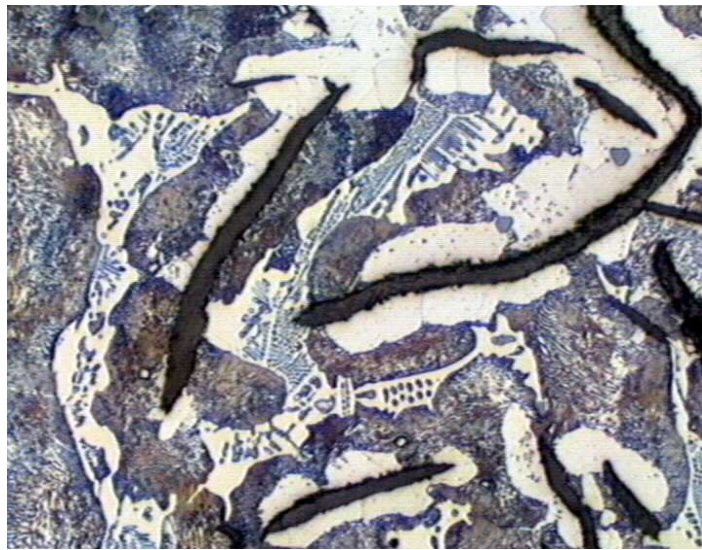


Figura1.18 Fundición Gris; Matriz Perlítica x400³

La mayoría de las fundiciones contienen fósforo procedente del mineral de hierro en cantidades variables entre 0,10 y 0,90%, el cual se combina en su mayor parte con el hierro formando fosfuro de hierro (Fe_3P). Este fosfuro forma un eutéctico ternario con la cementita y la austenita (perlita a temperatura ambiente) conocida como esteatita (figura 1.15), la cual es uno de los constituyentes normales de las fundiciones. La esteadita, por sus propiedades físicas, debe

controlarse con todo cuidado para obtener unas características mecánicas óptimas.³

Cuando las piezas de fundiciones de hierro gris son conservadas en altas temperaturas por largos períodos, su estructura intergranular aumenta de tamaño. A este factor se lo conoce como dilatación y debe tomarse en cuenta según las tolerancias en los tamaños originales. La fundición gris debe ser soldada por procesos de oxiacetilénica y arco.

La fundición gris es usada para diversos procesos, tales como partes de máquinas-herramientas, cigüeñales, platos de presión de embragues, tambores de frenos, monoblocks y componentes eléctricos.⁵

1.5.1.4 Fundición Dúctil

Los intervalos de composición en porcentaje son: carbono 3.0 – 4.0, silicio 1.8 – 2.8, manganeso 0.1 – 1.0, azufre 0.001 – 0.003 y fósforo 0.01 – 0.1. Se clasifican en cinco calidades de fundiciones dúctiles las cuales dependen de sus propiedades de tensión en la A-536 de la ASTM.⁶

1.5.1.5 Fundición Nodular

Se diferencia de las fundiciones grises debido a la forma de colado, el grafito está disperso en el material en forma de nódulos o esferoides, pero esta estructura se produce por adición de elementos como silicatos de calcio o magnesio, o carburo de calcio, litio bario y estroncio. Debido a su ductilidad combinada con su alta resistencia a la tensión suele ser tratada como el acero.

Al encontrarse el carbono en forma esferoidal, la continuidad de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando se encuentra en forma laminar; esto da lugar a una resistencia a la tracción y tenacidad mayores que en la fundición gris ordinaria. La fundición nodular se diferencia de la fundición maleable en que normalmente se obtiene directamente en bruto de fusión, sin necesidad de tratamiento térmico posterior.

La cantidad de ferrita presente en la matriz en bruto de colada depende de la composición y de la velocidad de enfriamiento. Las fundiciones ferríticas (fig1.19) son las que proporcionan la máxima ductilidad, tenacidad y maquinabilidad.^{3,5}

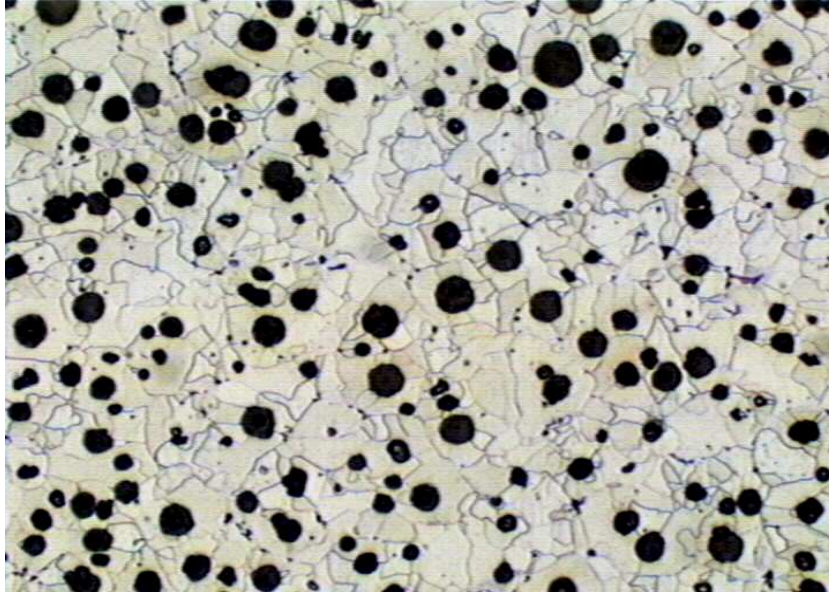


Figura 1.19 Fundición Nodular x 100³

CAPÍTULO 2

DESULFURANTES Y PROCEDIMIENTOS DE DESULFURACIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

El procedimiento de desulfuración fue usado primeramente en una escala comercial en la práctica en fundiciones americanas por el año 1920.

En nuestro país el proceso de desulfuración no es una técnica aplicada de modo científico, al contrario se lo realiza en la industria de forma empírica y muchas veces mal aplicada, además el desconocimiento de una buena desulfuración hacen que este proceso no sea muy común, perdiendo el beneficio de mejorar las propiedades de sus fundiciones.

2.2 ORIGEN DEL AZUFRE EN LAS FUNDICIONES

El origen del azufre en las fundiciones radica de su materia prima para su producción que en este caso son: chatarra y arrabio los cuales implícitamente poseen este elemento químico en su composición, pero otra forma de originarse el azufre es por su forma de producción, es decir el tipo de horno que se utilice.

En el laboratorio de fundición de la E.P.N. se puede utilizar dos tipos de horno para producir hierro gris, el horno de inducción, el cual no contamina la fundición con azufre y el horno de cubilote, siendo este el que por su combustible que es el coque genera el origen de la principal fuente de absorción de azufre de una fundición.

El metal fundido absorbe azufre del gas sulfuroso producido por el coque de dos maneras :

- La porción del metal fundido se halla en estrecho contacto con el coque, absorbe azufre del gas S_2 , mientras las porciones alejadas del coque lo hacen del SO_2 .
- Cuando empiezan a desprenderse gotitas del metal fundido, se inicia la absorción de azufre, tan intensa que llega a ser del 60 al 65% de la ganancia total. A esta transferencia de azufre contribuye especialmente la alta temperatura, así como el factor masa.⁸

Cuando más alto es el porcentaje de adición de coque, mayor es la absorción de azufre. Si el solapado se realiza en condiciones que intensifican la acción oxidante de la atmósfera del horno, sea por que se sople una cantidad excesiva de aire o por que esta contenga humedad, la absorción de azufre se hace más intensa. Al contrario, en el caso de un cubilote de soplado caliente, se frena considerablemente la tendencia de absorción de azufre.⁸

La cantidad total de azufre de la fundición líquida depende:

- Del porcentaje de azufre que contiene la carga metálica.
- Del porcentaje de azufre y su estado de combinación con el coque.
- De la temperatura del metal fundido.⁸

2.2.1 COMPUESTOS DEL AZUFRE EN EL COQUE

El azufre existe en el coque por lo menos en tres formas diferentes:

- Como sulfato alcalino (sulfato de Calcio): durante la combustión pasa a la escoria.
- Como sulfuro metálico (Sulfuro de hierro): pasa a la fundición líquida.
- Como azufre orgánico (compuestos de azufre hidrocarburo): pasa a los gases de la combustión, determinando dos modos de sulfuración.
 - a) Sulfuración por difusión, por contacto del metal con coque.
 - b) Sulfuración gaseosa, por contacto de los gases del horno con el metal⁸

2.2.2 REACCIONES AZUFRE – HIERRO

El azufre con el hierro forma el sulfuro ferroso (FeS) el cual es soluble en el hierro fundido, pero relativamente insoluble en austenita. El FeS permanece disuelto en el hierro líquido desde el principio hasta el fin de la mayoría de los procesos de solidificación. Además el FeS luego de concentrarse dentro del último metal a enfriarse se precipita como inclusiones de FeS en los límites de grano.⁸

La fundición debe tener suficiente manganeso para evitar la formación de sulfuro de hierro que es altamente nocivo para el trabajo y conduce a un agrietamiento severo durante la laminación en caliente.¹²

Además en las fundiciones como en los aceros existe la presencia de azufre como inclusiones de sulfuro de manganeso (MnS). El volumen, el tamaño, la forma y la distribución de las inclusiones dependen de la concentración de azufre, concentración de oxígeno y velocidad de solidificación¹³

Estas inclusiones de MnS (figura. 2.1) tienen diversos efectos en el procesamiento y las propiedades. Dichos efectos son fundamentalmente nocivos ya que estas inclusiones son más bien maleables y no metálicas. Por lo tanto, durante la deformación actúan como sitios de inicio de fisuras y zonas débiles.

El azufre afecta la ductilidad, tenacidad, conformabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión. Sin embargo, el azufre beneficia la maquinabilidad.⁹

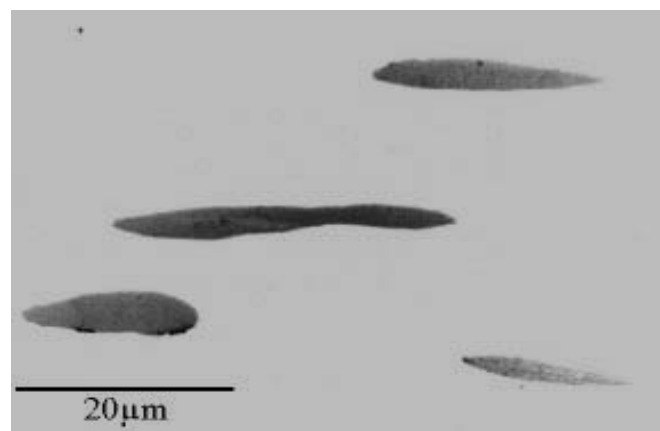


Figura 2.1 Inclusiones de sulfuro de manganeso situadas en una franja alargada de ferrita⁹

2.3 DESULFURACIÓN

2.3.1 BENEFICIOS DE LA DESULFURACIÓN

Algunos de los beneficios de la desulfuración son:

- Reducción del contenido de azufre en el hierro, haciendo posible con ello el uso de más chatarra de colado en la carga del cubilote.
- Mejora en la fluidez y pureza del hierro resultante de la remoción de silicatos incorporados y gases disueltos.
- Reducción en la tendencia al endurecimiento superficial del hierro, resultante de una relación inapropiada entre el manganeso y el azufre.
- Necesidad de menos manganeso en el hierro, como resultado de mantener el contenido de azufre a un nivel más bajo que el que podría mantenerse sin el tratamiento de desulfuración.⁸

2.3.2 REACTIVOS DESULFURANTES

Existen varios tipos de elementos químicos que nos pueden servir para el propósito de retirar del azufre en las fundiciones de los cuales algunos desulfurantes disponibles para empleo en este procedimiento son:

- Desulfurantes mediante compuestos de Sodio
- Desulfurantes mediante compuestos de Magnesio
- Desulfurantes mediante compuestos de Calcio

Existen productos que tratan fundamentalmente de lograr la desulfuración y la estabilidad de las fundiciones. Por oxidación con compuestos de sodio, los compuestos sulfurados corrosivos se convierten en compuestos neutros. La acción de la sosa cáustica sobre los compuestos sulfurados ligeros refleja la posibilidad de extraer los derivados de azufre. Por último, el ácido sulfúrico posee una acción muy intensa sobre todas las moléculas que contienen azufre; haciendo posible una reducción muy sensible del contenido en azufre, mejorando la

estabilidad y el calor. No obstante, este tratamiento es costoso y se utiliza únicamente para productos especiales.¹⁶

2.3.2.1 Desulfurantes mediante compuestos de Sodio

Entre los desulfurantes que contienen sodio existen los siguientes:

- La sosa cáustica o hidróxido de sodio (NaOH)
- La sosa calcinada o carbonato de sodio (Na₂CO₃).

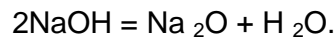
El agente desulfurante activo en ambos es el óxido de sodio (Na₂O), del que la sosa cáustica contiene un 76% y la sosa calcinada un 58%⁸

2.3.2.1.1 Sosa cáustica

La sosa cáustica absorberá humedad del aire si no es embarcada en recipientes cerrados. Como implica su nombre, es altamente corrosiva y debe ser manejada con guantes. Está disponible en forma "granular" o en "escamas".

Además de las dificultades en su manejo, la sosa cáustica produce un gran volumen de humos que son dañinos a la piel y a las membranas de la garganta, y, por tales razones, su empleo está limitado a aplicaciones especiales que requieren azufres muy bajos, y en tales casos solamente si puede preverse el acarreo de los gases al exterior para lo cual se debe utilizar el equipo recomendado.⁸

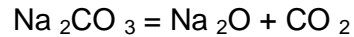
En contacto con el hierro fundido, la sosa cáustica se desdobla a óxido, liberando vapor de agua.



2.3.2.1.2 Carbonato de sodio

El carbonato de sodio (sosa calcinada, o soda ash) se emplea para desulfurar y refinar el hierro fundido.

El carbonato de sodio es desóxido de sodio, liberando bióxido de carbono:



El óxido de sodio, así liberado es el agente activo que entra en las reacciones de desulfuración.

Los gases liberados, vapor de agua (H_2O) y bióxido de carbono (CO_2), causan turbulencias en el baño de escoria y metal, con lo cual al aumentar la superficie de contacto entre la escoria y el metal, se activan las reacciones de desulfuración.⁸

El Carbonato de Sodio está disponible en diversas formas, algunas de las cuales se detallan a continuación:

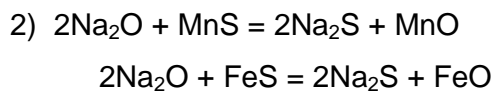
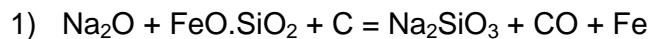
- 1) Granular, conteniendo un 58% de Na_2O , y entre 1 y 20% de impurezas.
- 2) Briquetas de sosa, con un 58% de sosa calcinada y aglomerada con agua, prensada en bolas de 1/3 de onza (9.45 gramos) conteniendo aproximadamente 52% de Na_2O .
- 3) Purificador de Henning, con 58% de sosa mezclada con otros ingredientes, aglutinada con aguacola, y prensada en bolas de 1 onza (28.35 gramos) conteniendo alrededor de un 45% de Na_2O .
- 4) Purita, carbonato de sodio fundido comercialmente puro, o igual clase en lingotillos fundidos con peso aproximado de 907 gramos, conteniendo un 58% de Na_2O .
- 5) Tabletas de purita, carbonato de sodio comercialmente puro, fundido y vaciado en tabletas cónicas que pesan aproximadamente 57 gramos, conteniendo un 58% de Na_2O .
- 6) Carbonato de sodio fundido, conteniendo otros materiales formadores de escoria.³:

2.3.2.1.3 Tipos de reacciones

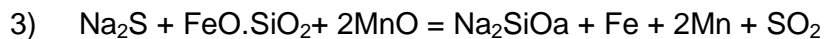
El efecto inicial de las escorias de sosa se describe mejor como "refino" o lavado de escoria arrastrada (silicatos) y sulfuros de manganeso, los que son absorbidos por la escoria de sosa. Las reacciones químicas entre el óxido de sodio, los componentes del hierro y la escoria que forman el baño pueden ser

clasificados como (1) primarias, es decir, aquellas en las que el óxido de sodio reacciona directamente en los silicatos arrastrados, sulfuros de manganeso, sulfuros de hierro y siliciuros de hierro, en el orden descrito; (2) secundarias, aquellas en las que los componentes formados originalmente reaccionan con sulfatos, óxidos y silicatos en el baño de hierro y escoria, y (3) una reacción de reversión del azufre, por medio de la cual éste es regresado del baño de escoria sódica al hierro. Estas reacciones se efectúan como sigue:

Reacciones primaria:



Reacciones secundaria:



Reacciones de reversión del azufre:



Las reacciones primarias continúan en tanto quede algún álcali libre en el baño de escoria sódica. La reacción secundaria comienza con la formación inicial de los compuestos primarios y continúa en intensidad que disminuye gradualmente según baja la temperatura de la escoria. La velocidad de la reacción de reversión para el azufre aumenta según cae la temperatura, y el contenido libre de álcalis en la escoria se reduce por la reacción con compuestos silicios.

Deberá entenderse que todas las reacciones se efectúan en la escoria y entre la escoria y el baño de metal, al mismo tiempo. ⁸

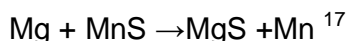
En la práctica promedio, 1.650 kg de sosa por tonelada métrica de metal, añadida junto con la carga de caliza, bajará por lo general el azufre en el hierro obtenido en la sangría entre 12 y 15%, o sea, desde 0.110 hasta 0.095%. El efecto en el cubilote es más el de retardar la absorción de azufre que la desulfuración real.⁸

Cuando se desulfura y refina hierro en cucharas comunes, la sosa deberá ser añadida en la cuchara antes de la primera sangría, para permitir el máximo de tiempo para la cumplimiento del afinado con un mínimo de pérdida de temperatura. El tiempo requerido para que se complete la reacción, el que estará indicado por la quietud de la escoria, variará de unos 10 minutos después del sangrado en cucharas de 900 kg, hasta más de 25 minutos en cucharas de mayor capacidad. La escoria deberá ser perfectamente espumada cuando ha cesado la reacción de la sosa, antes de que el metal sea vaciado en piezas. Las escorias de sosa son muy fluidas; es un tanto difícil espumar por completo toda la escoria de la superficie del hierro.⁸

2.3.2.2 Desulfurantes mediante compuesto de Magnesio

El magnesio tiene un punto de ebullición más bajo que el punto de fusión del hierro, por tanto cualquier reacción entre el magnesio y el hierro será entre un gas y un líquido y tendrá lugar dentro del baño del metal. Una evaluación del magnesio como desulfurante es complicada, debido a su amplio uso como nodulizante, después de los procesos desulfurantes. Se añade al hierro líquido como una aleación de Mg-Fe-Si o como magnesio metálico directamente. Las adiciones de magnesio con níquel son lo suficiente pesadas para hundirse en el hierro fundido, de esta manera existe una columna de hierro con la que va a reaccionar el vapor de magnesio cuando se eleve a la superficie.

El magnesio ya sea puro o en aleación, reacciona con el azufre presente en el hierro, de la siguiente manera



El método de desulfuración del convertidor de magnesio permite reducir hasta un 0.3% de azufre. Las ventajas que presenta la utilización de estos compuestos son:

- Recuperación del magnesio, hasta del 80%
- Tiempo de tratamiento de 60 a 90 segundos

Las desventajas que presentan los compuestos de magnesio son:

- Equipos y mantenimiento costosos
- El uso de aleaciones Mg-Fe-Si puede elevar excesivamente el porcentaje de silicio ¹⁸

2.3.2.3 Desulfurantes mediante compuesto de Calcio

Los desulfurantes que contienen calcio son:

- Carburo de calcio CaC_2
- Óxido de Calcio o Cal quemada CaO

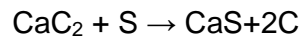
2.3.2.3.1 Carburo de calcio CaC_2

El método de inyección de carburo de calcio, ahora en proceso de desarrollo, parece ofrecer una gama de propiedades físicas para el hierro colado. El proceso consiste en inyectar partículas de carburo de calcio finamente divididas en un baño de hierro fundido. El efecto primordial es una reducción de azufre hasta cualquier nivel deseado⁸.

La combinación de un elemento desulfurante como el calcio y un desoxidante reductor como el carbono, hacen del carburo de calcio un gran agente desulfurante.

El carburo cálcico ha demostrado ser muy eficiente permitiendo descender los niveles de azufre hasta los valores admisibles para la obtención de fundición nodular, por lo que aquellas fundiciones que trabajan con caldo procedente de cubilote, y que desean obtener fundición nodular, son un campo de aplicación claro para el carburo de calcio.¹⁹

La reacción química que se produce con CaC_2 se puede describir así:



En teoría para remover 0.1% de azufre S tan solo 0.2% de CaC_2 son necesarios. Puesto que parte del desintegrado CaC_2 formará CaO en vez de CaS y se disolverá en la escoria, de 5 a 10 veces de la cantidad teórica deben ser utilizados, es decir de 1 a 2 %.¹⁸

Existen cuatro formas de desulfurar :

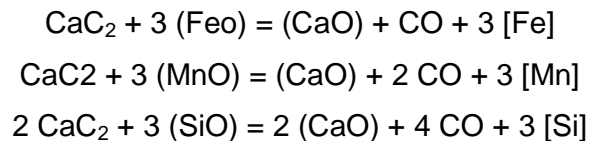
- 1) Desulfuración desde 0.1- 0.2 % de azufre hasta 0.07. 0.08 % .En esta zona de desulfuración convencional, la inyección de carburo de calcio proporciona un medio de control dentro de límites estrechos y una reducción en los costos de refractarios. Bajo condiciones normales, 10 Kg de carburo de calcio inyectado eliminará 1 Kg de azufre.
- 2) Desulfuración desde 0.10-0.20% de azufre a menos de 0.02%. La inyección de carburo de calcio hace posible la reducción de azufre a niveles más bajos que los agentes convencionales de desulfuración y permite el uso de aleaciones relativamente baratas, para fabricación de hierros de alta resistencia, a causa de la reducción en el endurecimiento superficial que acompaña al tratamiento con carburo de calcio. Un ejemplo de esto sería la sustitución de cromo en lugar del molibdeno, níquel, cobre, o vanadio (más caros) empleados en la manufactura de hierro colado de clase 40 o de clase 45.
- 3) Desulfuración a menos del 0.02% en azufre, como un metal base para la conversión a hierro de grafito esferoidal. Empleando un hierro base de muy bajo contenido en azufre, hay un ahorro en aleación esferoidizante, que no es consumida al reducir el azufre. Hay evidencias de que se necesita menos magnesio residual para obtener estructuras satisfactorias en hierros

con grafito esferoidal, previamente tratados con carburo de calcio, así como una reducción en la tendencia a formar carburos.

- 4) Para mejorar la clase y esferoidizar por inyección de carburo de calcio o de una mezcla de carburo y otros agentes esferoidizantes. Es posible, bajo algunas condiciones mejorar hierros de esfuerzos de tracción bajos, hasta tan altos como 4670 kg por cm², teniendo un grafito totalmente esferoidal por medio de la inyección de carburo de calcio y óxidos de tierras raras. Es también posible fabricar hierros de resistencias a la tracción de 2 812, 3 515, 4 220 y 4 920 kg por cm², conteniendo diferentes porcentajes de grafito esferoidal, por medio de variaciones en los agentes esferoidizantes. Estos agentes consisten de carburo de calcio, óxido de magnesio, óxidos de tierras raras, aleaciones de magnesio, etc.⁸

Se adiciona el carburo de calcio en lugar de aluminio (30 %), da mejores condiciones de desoxidación y una mejor escoria sintética formada. Existe optimización en el uso de ferro aleaciones al realizar una buena desoxidación de la escoria; el calcio desplazara al oxígeno generando una recuperación de elementos metálicos que regresarán al baño metálico.

Reacciona con estos elementos de la siguiente manera:



Mediante la reducción de estos óxidos, el oxígeno contenido en esta nueva escoria resultante, es de niveles bajos (2%), con esta condición de escorias básicas creadas por el carburo de calcio la capacidad de desulfuración aumenta considerablemente en el acero, lográndose niveles de azufre de hasta el 0.003%

El carburo de calcio se presenta en el mercado en forma de granos o en polvo como se indica en la Tabla 2.1



Figura 2.2 Adición de Carburo de calcio en la colada¹⁹

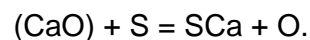
Tamaño	% C ₂ Ca	Envase
0,5-1.6 mm	64 / 81	Bolsa 10 ó 15 kg.
0,5-3 mm	68 / 81	Bidón de 10,15,20,50,60,100 kg Contenedor 1.500 kg
2-10 mm	68 / 81	
7-25 mm	68 / 81	

Tabla N°-2. 1 Tipos de carburo de calcio

2.3.2.3.2 Óxido de Calcio o Cal quemada CaO

Los desulfurantes son escorias sintéticas que se adicionan en la cuchara, cuando se inicia el ajuste de composición química y temperatura, a fin de lograr una eficaz desulfuración.

La reacción puede utilizarse de la siguiente forma:



La desulfuración es un intercambio de Oxígeno y Azufre entre metal y escoria. Factores tales como el contenido inicial de azufre en el metal, volumen de escoria, el grado de saturación en CaO y MgO, la superficie de contacto con el

acero y el nivel de agitación (habitualmente con Argón) influyen en la eficacia del proceso.

Generalmente el paso más difícil en el proceso de desulfuración es evitar que la escoria del horno pase a la cuchara. La escoria del horno suministra una lenta pero continua transferencia de oxígeno de la escoria hacia el metal. Todo ello genera impurezas de óxidos y limita o evita la reacción de desulfuración.

Al final del proceso, la suma de % de FeO más % de MnO en la escoria, nunca debe de ser mayor del 1 %.¹²

2.3.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DESULFURACIÓN

En el proceso de desulfuración influyen muchas variables las cuales afectan a la composición y micro estructuras del material a obtener, algunos de los cuales están listados a continuación:

2.3.3.1 Tipo de recipiente desulfurante empleado.

En los diferentes tipos de recipientes empleados para este proceso de desulfuración lo importante es conocer el tipo de revestimiento que posee, sea ácido o básico donde los de revestimiento ácido casi no necesitan tratamiento de desulfuración, mientras que en los de revestimiento básico es indispensable desulfurar.

Así como se necesita una escoria de alta basicidad para la desulfuración también se necesita un refractario básico. La arcilla refractaria es rica en sílice, la dolomita es en cal. La escoria turbulenta y el fluido desulfurante ideales son agresivos para los materiales refractarios y frecuentemente se utiliza un revestimiento de carbono magnesita en la línea de escoria para minimizar el daño.⁹

La forma del recipiente también influye debido a la facilidad que presente para realizar una agitación homogénea en la colada y la capacidad de mantener la temperatura de la misma

2.3.3.2 Cantidad de agente desulfurante empleado por tonelada de hierro fundido.

La cantidad de desulfurante permite realizar un proceso óptimo ya que en menor cantidad no se logra reducir adecuadamente el porcentaje de azufre y en exceso los materiales obtenidos van a poseer en su interior desulfurante sin haber actuado.

2.3.3.3 Tiempo de contacto entre el agente desulfurante y el hierro fundido.

La cantidad del metal desulfurado que se obtenga es directamente proporcional al tiempo permitido de contacto entre metal líquido y agente desulfurante; así para lograr el contenido inicial de 0.12 a 0.02% se requiere un mínimo de 10 minutos de contacto entre desulfurante y metal líquido. Si no se permite desulfurar los 10 minutos mencionados se conseguirá contenidos de azufre mayores a 0.02% que no conviene a la inoculación del nodulizante. El tiempo de desulfurante es más corto en el método de recipiente poroso (2 a 5 min), y mayor con el de cuchara de agitación (8 a 12 min)⁸

2.3.3.4 Cantidad de azufre presente en el metal base antes de desulfurar.

La cantidad de azufre en el hierro líquido base depende de la calidad y del tipo de chatarra de la cual se parte.

2.3.3.5 Forma de adición del desulfurante

Se puede adicionar el desulfurante simplemente añadiéndole al metal líquido manualmente o empleando un gas a presión como agente inyector o proporcionando al metal líquido de alguna forma movimiento que acelere la

reacción con el desulfurante. De cualquier manera, lo que se logra es ocasionar que la reacción del desulfurante y el metal líquido, sea provocado por el movimiento del metal líquido, simplemente por convección forzada encontrándose como la más efectiva.⁸

2.3.3.6 Tamaño de la partícula del desulfurante

Buscando lograr una reacción más rápida, es preferible que el área de contacto entre el desulfurante y metal líquido sea el mayor posible, lo que implica un desulfurante de menor tamaño de partícula, pero evitando que por ser tan pequeña salga a la superficie del metal líquido antes de reaccionar.

2.3.3.7 Tipo de horno utilizado para la fundición

Existen diferentes tipos de hornos en los que se pueden obtener hierro gris entre los principales están el horno de cubilote y los hornos eléctricos.

El horno de cubilote es el horno principal para la producción de hierro gris en altas cantidades pero la existencia de azufre en el coque permite que se eleven los porcentajes de este compuesto en el producto final por lo que el régimen de fusión del cubilote es muy importante tomar en consideración para controlar la absorción de azufre del metal fundido.

En los hornos eléctricos como el de inducción el azufre existente proviene solo de la chatarra utilizada además que estos tipos de hornos facilitan el control de varias variables para el proceso de desulfuración como por ejemplo la temperatura.

2.3.3.8 Separación de la escoria antes de la operación de desulfuración.

El retirar la escoria antes de la desulfuración facilita que la reacción entre desulfurante y metal líquido sea la óptima.

2.3.3.9 Temperatura de tratamiento

A temperatura más elevada la velocidad de reacción entre el desulfurante y metal líquido tratado es mayor, provocando igualmente mayor velocidad de pérdida de calor al existir más diferencia entre la temperatura del metal líquido tratado y la temperatura del desulfurante añadido. Por otro lado, a mayor temperatura de sobrecalentamiento se consigue mayor temperatura al concluir el tratamiento de desulfuración.²⁰

2.3.4 PROCEDIMIENTOS DE DESULFURACIÓN

2.3.4.1 Proceso Kalling- Domnarfvet

Este proceso fue desarrollado en Suecia para desulfurar fundición de hierro, utiliza un horno cilíndrico que rota rápidamente y requiere de 15 a 30 minutos para un tratamiento con 2% de CaO. A causa del tiempo requerido, esta operación obviamente no es apropiada para usarla en fundiciones medias o pequeñas, a pesar de que se obtiene hierro con un contenido final de azufre en el rango del 0.005%.²⁰

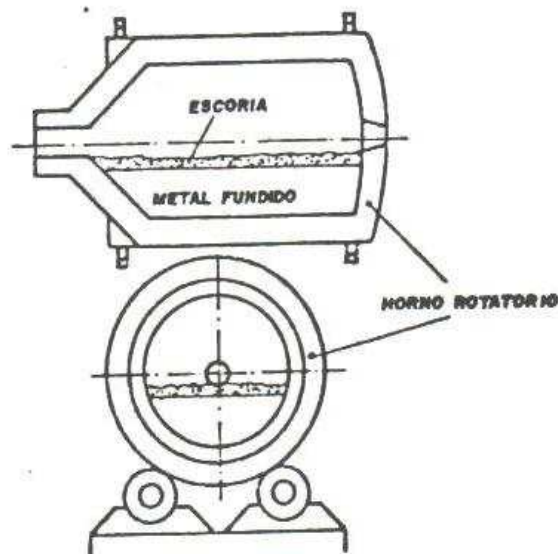


Figura 2.3 Proceso Kalling- Domnarfvet²⁰

2.3.4.2 Proceso Wahl

En Francia se desarrolló el proceso Wahl, es una especie de convertidor de volteo en el cual, el CaO finamente pulverizado es forzado a través del fondo del convertidor hacia arriba por medio de un gas no oxidable, los contenidos finales de azufre son del orden del 0.006, con una adición del 2% de CaO y con un tiempo de soplado de tres minutos.²⁰

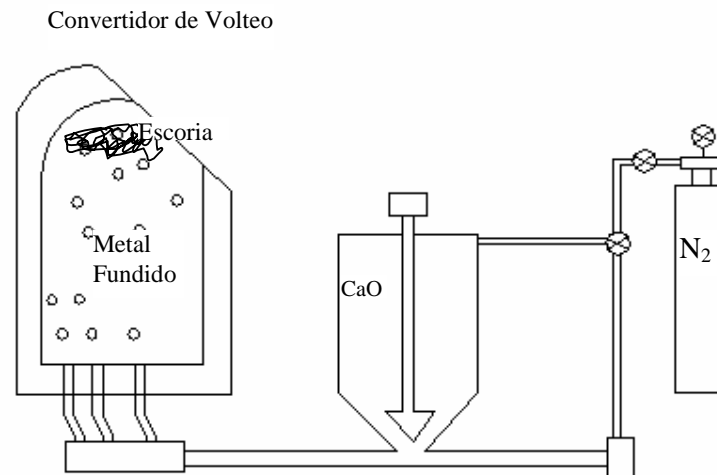


Figura 2.4 Proceso Wahl²⁰

2.3.4.3 La cuchara de agitación

Originalmente desarrollada en Suecia, mediante una rotación excéntrica, agita el metal. Esta rotación crea una cresta de onda de metal fundido la cual se rompe y envuelve el agente desulfurante colocado en la superficie del metal. La acción de agitación, se obtiene controlando la excentricidad y la velocidad. Las fundiciones que emplean este método. Han reportado la reducción de azufre desde aproximadamente 0.075 a 0.012%.²⁰

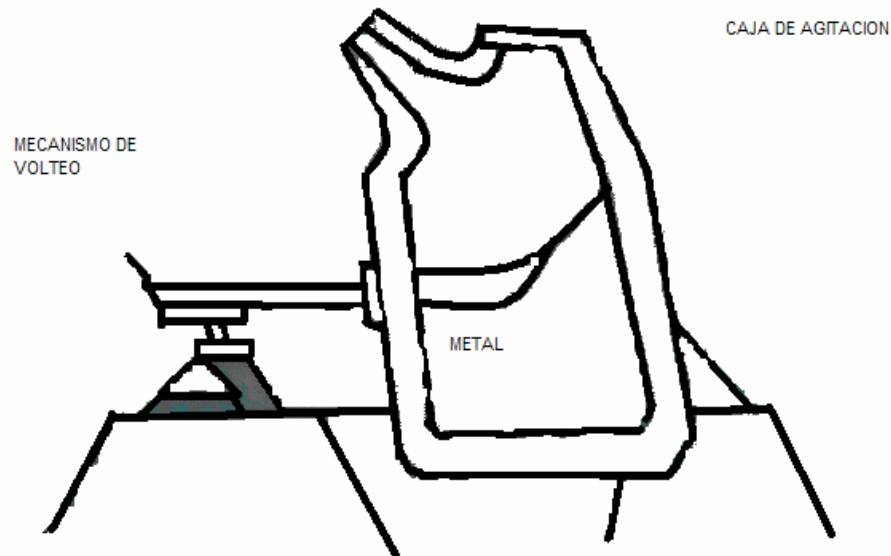


Figura 2.5 La cuchara de agitación²⁰

2.3.4.4 Aceleración de reacción

Existen varios métodos para conseguir un contacto metal-escoria por medios mecánicos, los cuales implican movimientos de las cucharas o recipientes de reacción como en los casos ya descritos. Tal es el método llamado aceleración de reacción que utiliza la fuerza centrífuga de un sifón, para elevar el hierro de alto azufre del fondo de la cuchara y forzarlo al contacto con la escoria de carburo que flota en la superficie. Este aparato emplea un tubo en forma de T, el cual rota a 70 rpm, impulsando al hierro del fondo de la cuchara hacia arriba a través de la parte de la T y descarga a través de los brazos. Se indica una reducción desde 0.07 a 0.005% en cuatro minutos, añadiendo de 0.5 a 0.75% de carburo de calcio.²⁰

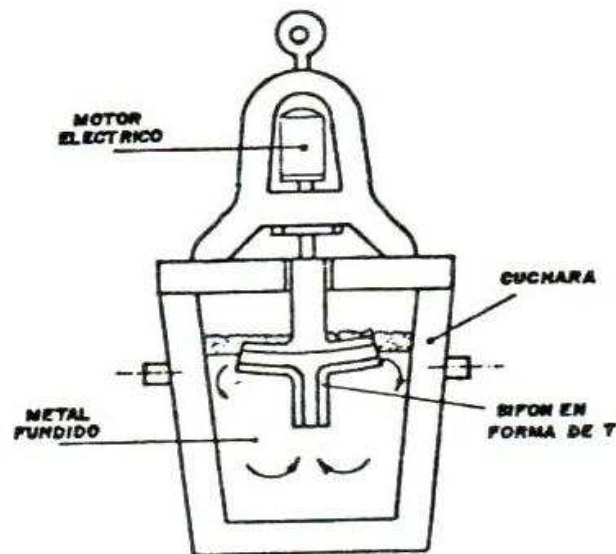


Figura 2.6 Aceleración de reacción²⁰

2.3.4.5 Agitador Rheinstahl

Similar al acelerador de reacción rota en la interfase hierro carburo a 100RPM. Se ha reportado una reducción de azufre desde 0.08 a 0.009% en cuatro minutos, con una adición de 0.66% de carburo.²⁰

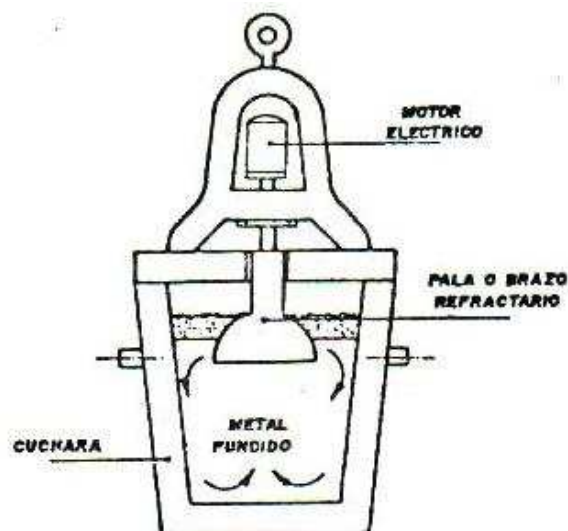


Figura 2.7 Agitador Rheinstahl²⁰

2.3.4.6 Tapón Poroso

El método del tapón poroso utiliza un tapón refractario instalado en el fondo de la cuchara y conectado al suministro de gas. A causa de la textura del refractario poroso las burbujas que se elevan desde el fondo de la cuchara, son bastante pequeñas, por lo que no producen grandes salpicaduras.

El agitador del tapón poroso con el empleo del carburo de calcio, puede proveer una reducción del contenido de azufre desde 0.1% con un reacción de 3 a 4 minutos y una adición de carburo de 0.75%.

Actualmente, la mayoría de las cucharas poseen tapones porosos (situados en el fondo de la misma) para la inyección de argón.

VENTAJAS

- “Zona muertas” minimizadas (las zonas muertas son las áreas del baño de acero donde existe escasa o nula circulación).
- Acción de agitación uniformemente dispersa.
- Efecto de presión ferrostática maximizado.
- Fuerte circulación descentrada.
- Excelente contacto entre la escoria y el metal, por lo que existe una buena eliminación de azufre y fósforo.
- Absorción de hidrógeno y nitrógeno moderada.
- Metal fundido más limpio.
- Posibilidad de agitar continuamente la cuchara en cualquier parte.
- Menor inversión y costos de operación.⁹

DESVENTAJAS

- Fuerte desgaste localizado en el material refractario.
- Régimen de construcción más riguroso.
- Riesgo de “roturas”.⁹

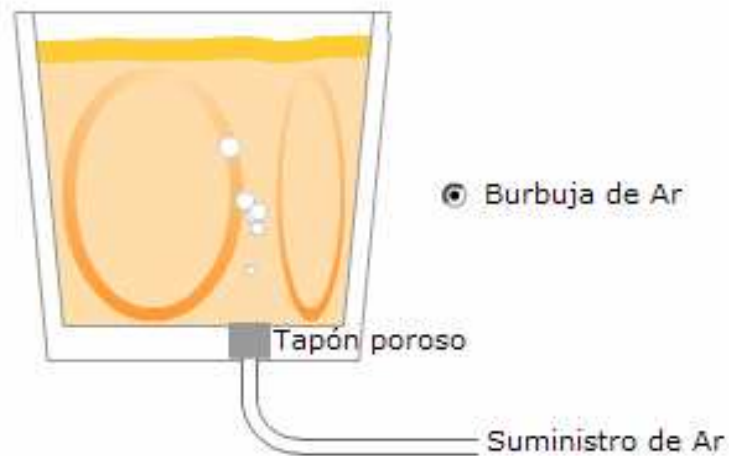


Figura 2.8 Tapón poroso⁹

2.3.4.7 Lanza de inmersión

Otro grupo de métodos desulfurantes depende de la agitación del metal con gas. Uno de estos sistemas es el proceso de lanza de inmersión.

Dos son los fines que cumple la lanza; el primero, es introducir el agente desulfurante que generalmente es carburo de calcio, para que el tiempo de permanencia dentro del baño y la superficie de reacción en su camino a la superficie libre del baño, sea el mayor posible; el segundo es crear una agitación que se efectúa mediante un gas agitador, el cual intensifica la reacción de desulfuración. Se reporta que el metal de 0.04% de azufre, puede ser reducido a 0.01% en siete minutos.

Otros de los procesos es Volianik, en el cual se introduce gas cerca del fondo del recipiente de reacción por medio de una lanza de grafito. Se utiliza aire, nitrógeno o gas natural para la agitación. Reduce el azufre de 0.1 a 0.001 usando una adición de 1% de carburo.

La inyección de gas para agitar el metal fundido mejora la homogeneización de la composición y temperatura de la aleación. Esto aumenta el rendimiento metalúrgico, reduce las necesidades de metales de aleación,

reduce los rechazos de producción y genera una mayor calidad y consistencia del producto.⁷

VENTAJAS

- Simple.
- Buen contacto entre la escoria y el metal, por lo que existe una buena eliminación de azufre y fósforo.
- Protege el revestimiento de la cuchara.
- Menor inversión y costos de operación.⁹

DESVENTAJAS

- Capa superficial turbulenta.
- Absorción de nitrógeno y oxígeno.
- Pérdida y oxidación de aleantes.
- Reducida limpieza de la aleación.
- Agitación sólo en la estación de agitación.
- Efecto de la presión ferrostática levemente menor que la inyección a través del tapón poroso en el fondo de la cuchara.
- Importantes “zonas muertas” (las zonas muertas son las áreas del baño de acero donde la circulación es escasa o nula).⁹

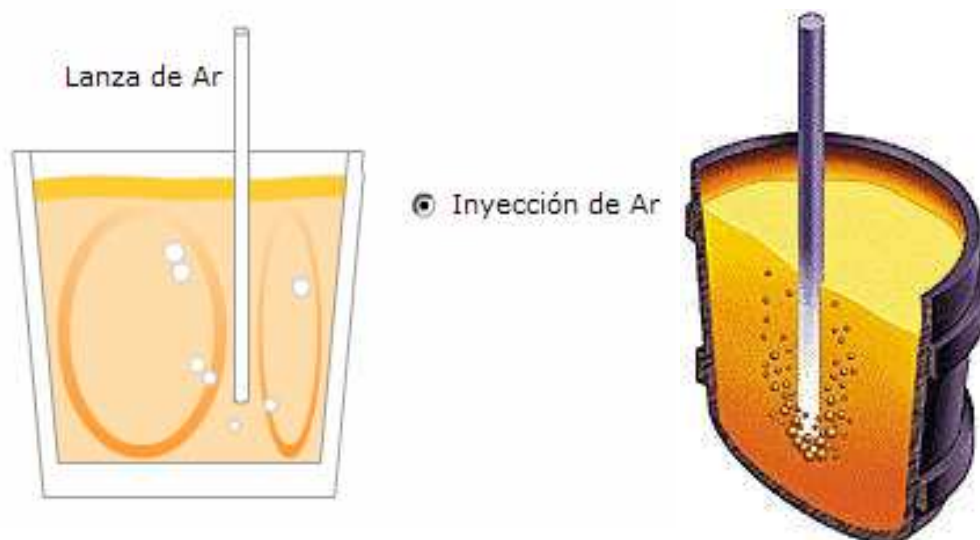


Figura 2.9 Lanza de inmersión⁹

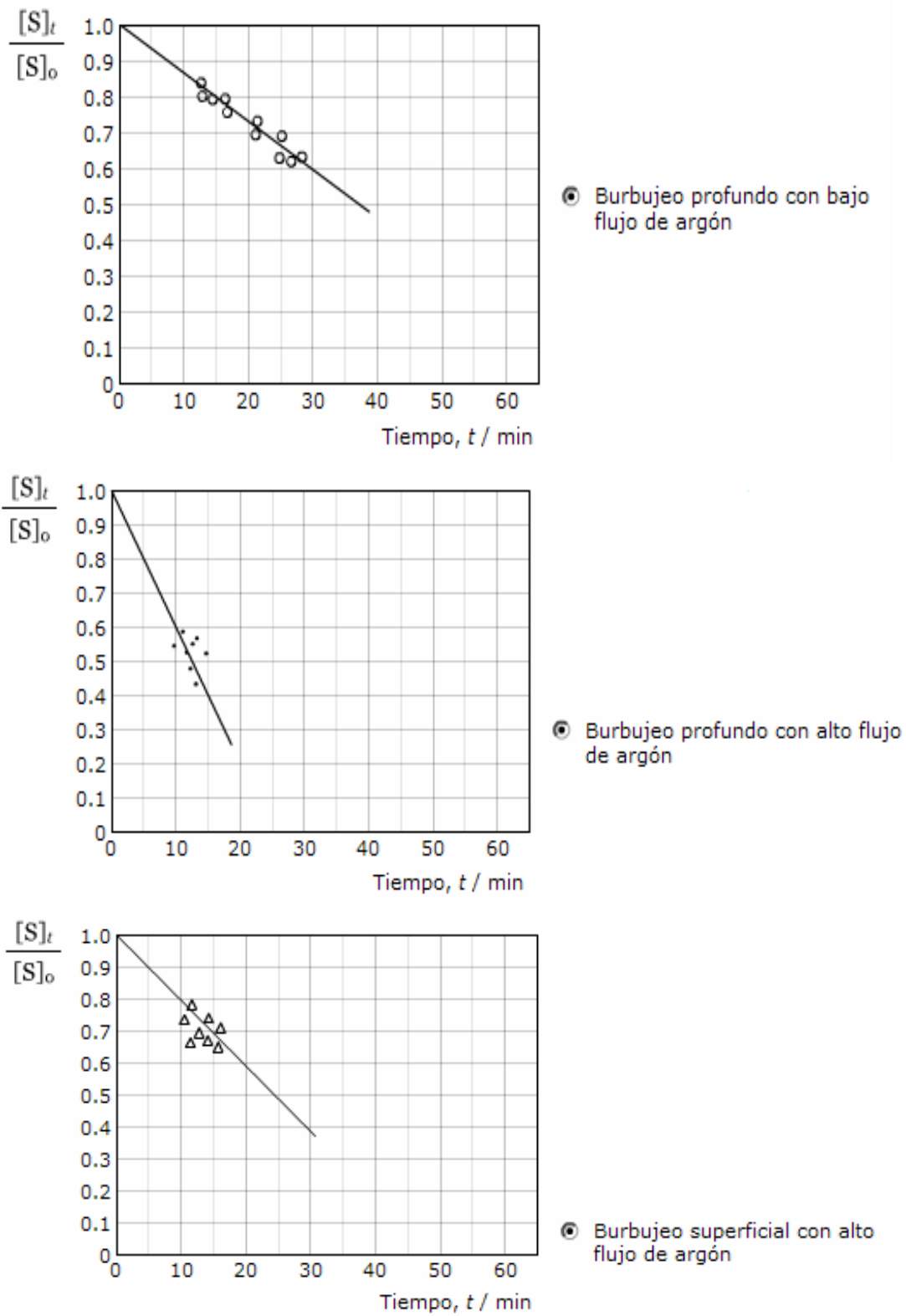


Figura 2.10 Gráficas de la desulfuración en función al tiempo de agitación⁹

2.3.4.8 Agitación electromagnética (EMS)

VENTAJAS

- Salpicadura mínima, lo que implica una menor exposición del acero a la atmósfera y reducción del borde libre (ej. la altura de la pared de la cuchara por encima de la superficie del baño).
- Flujo uniforme suave.
- Flujo reversible de gran utilidad cuando se efectúan adiciones de aleación.
- “Zona muerta” minimizada (las zonas muertas son las áreas del baño de acero donde existe escasa o nula circulación).
- Mínima absorción de nitrógeno e hidrógeno .
- Acero más limpio .
- Bajo índice de pérdida y oxidación de aleantes.
- Capacidad de agitar en cuchara continuamente utilizando el carro portacuchara EMS.
- Poco desgaste del material refractario
- Máxima seguridad y facilidad de construcción ⁹

DESVENTAJAS

- Altos costos de operación y capital
- Poco contacto entre la escoria y el metal, por lo que habrá una menor eliminación de azufre y fósforo si se lo compara con el burbujeo de argón. ⁹

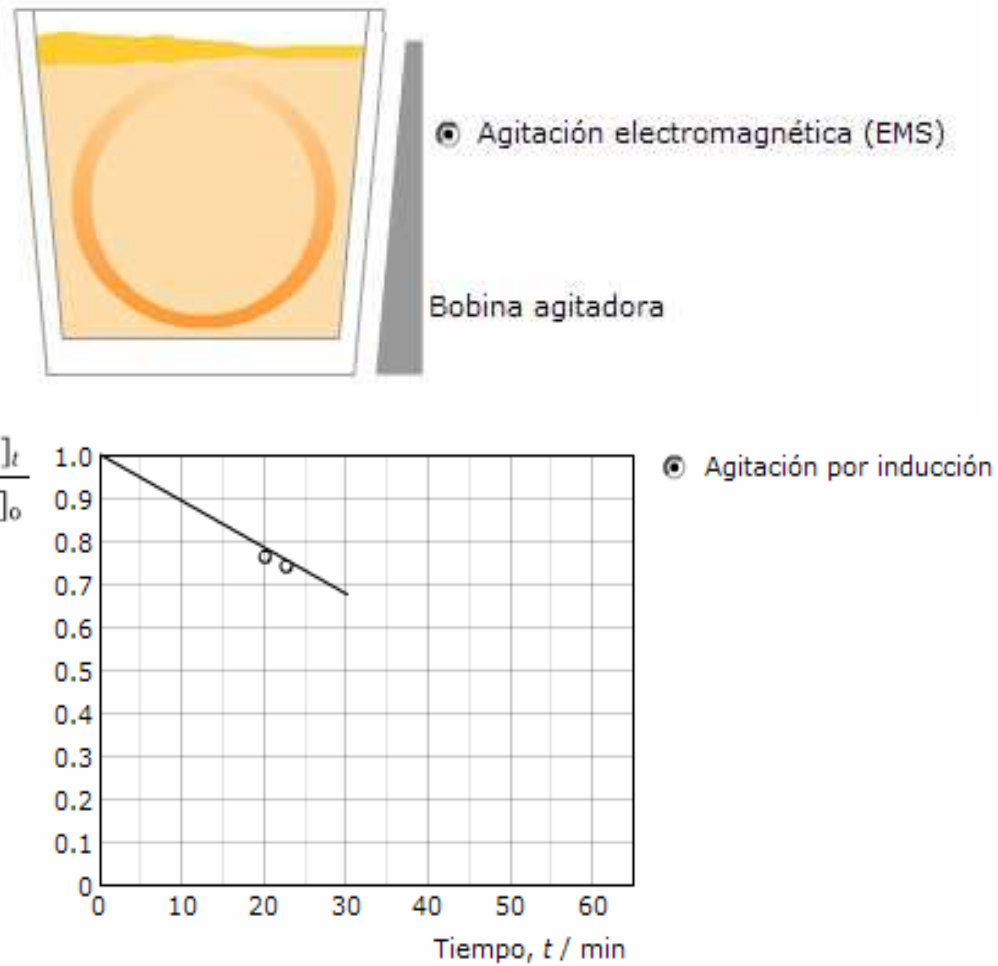


Figura 2.11 Agitación electromagnética⁹

2.3.4.9 Productos encapsulados

Durante los últimos 15 años la aplicación de la tecnología de productos encapsulados a la industria mundial de las fundiciones, se ha incrementado notablemente como consecuencia de los beneficios metalúrgicos derivados del uso de los encapsulados en operaciones como la desoxidación, desulfurización y micro aleación.

Los beneficios como resultado del uso de estos productos son claros:

- Mayor recuperación de elementos.
- Mejora en la calidad de la colada.

- Menor impacto medio ambiental.
- Reducción de los riesgos de salud.

La tecnología de encapsulados ha sido aplicada a la producción de hierro fundido mediante la realización de las siguientes operaciones metalúrgicas:

- Desulfuración.
- Tratamiento con Magnesio.
- Aleación.
- Inoculación.
- Recarburación.

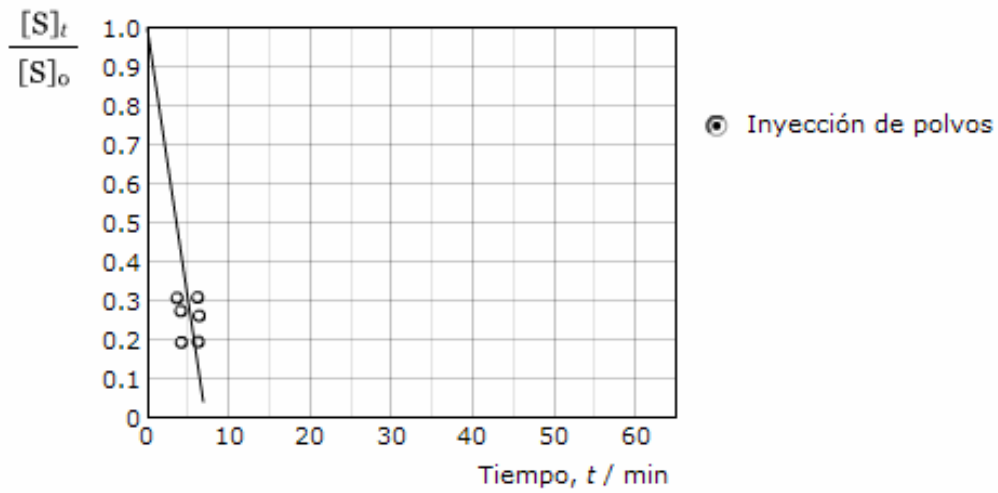
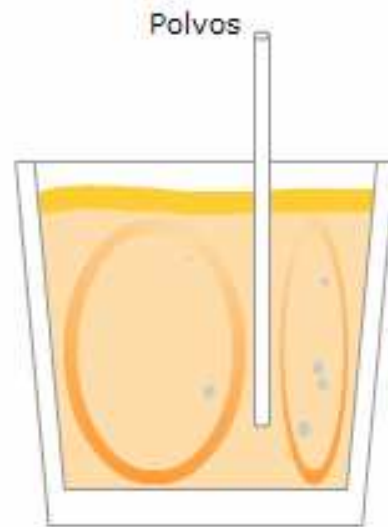


Figura 2.12 Productos encapsulados^{9,11}

Las características de bobinas de los encapsulados se detallan en la Tabla 2.2

Diámetro Hilo	Diámetro interior	Diámetro exterior	Longitud	Ancho
5 mm	-	-	8.000 m	-
9 mm	700 mm	1.500 mm (max)	10.000 m	780 mm
13 mm	700/1000 mm	1.500 mm (max)	5.500 m	780/1050 mm
16 mm	700 mm	1.500 mm (max)	3.500 m	780 mm

Tabla N°- 2.2 Encapsulados¹¹

Se insuflan estos productos en polvo, a través de una lanza, por medio de un gas inerte. Los productos más frecuentes para insuflar son el silicio-calcio "Si-Ca" y diversas escorias sintéticas. La agitación del metal por el paso del gas produce excelente homogeneidad de composición y temperatura del baño y una mejora de la limpieza.¹²

El calcio tiene un punto de ebullición menor al punto de fusión del acero, por consiguiente se vuelve un vapor. Por lo tanto es necesario introducir el calcio o sus compuestos lo más profundamente posible en la cuchara cuando se lo agrega al acero, a fin de que la presión ferrostática evite su vaporización.⁸

Mediante un proceso de molienda muy preciso se obtiene un producto con una distribución granulométrica que asegura un excelente comportamiento en el proceso de inyección.¹¹

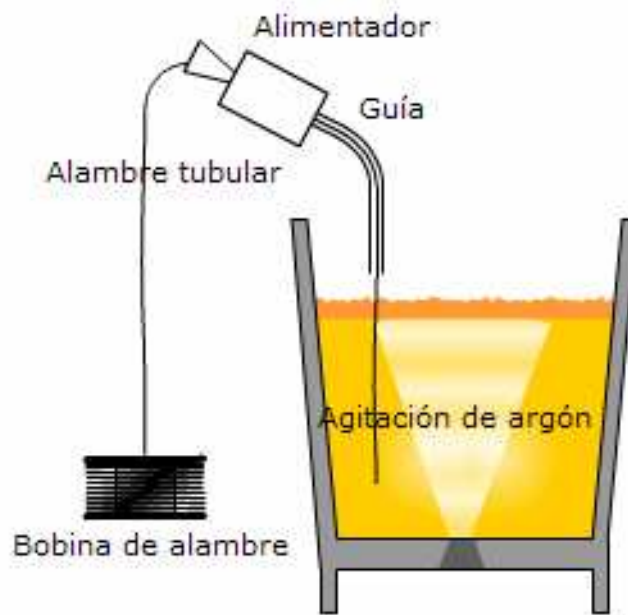


Figura 2.13 Productos encapsulados⁹

2.3.4.10 Desulfuración con Nitrógeno

Se emplea nitrógeno para inyectar polvos de metales de aleación en el hierro fundido. El efecto de las aleaciones sumergidas y una mayor turbulencia aumenta el rendimiento metalúrgico, reduce las necesidades de metales de aleación, reduce los rechazos de producción y genera una mayor calidad y consistencia del producto.⁹

Se emplea nitrógeno para inyectar agentes desulfurantes en el hierro fundido y eliminar el azufre del hierro. Esto es especialmente útil en la producción de hierro esferoidal¹⁰

2.3.5 PROCESO DE AGITACIÓN

El proceso de agitación en cuchara es una operación fundamental durante la metalurgia secundaria a fin de:

- Homogeneizar la composición química del baño.
- Homogeneizar la temperatura del baño.
- Facilitar los intercambios entre la escoria y el metal que son esenciales para los procesos tales como la desulfuración.
- Acelerar la remoción de inclusiones en el acero.

En la práctica, la agitación se logra mediante:

- Inyección de argón a través del acero líquido, ya sea mediante una lanza sumergida o por tapones porosos en el fondo de la cuchara.
- Agitación electromagnética - EMS⁹

2.3.6 ESCORIAS PARA LA DESULFURACIÓN

La escoria es una solución iónica de varios óxidos y fundentes. Tiene diversas funciones:

- Protege el metal líquido de las reacciones con la atmósfera.
- Reoxidación.
- Reduce la absorción del nitrógeno e hidrógeno.
- Es aislante térmico.
- Actúa como reservorio de inclusiones.
- Es un medio de refinamiento para la desulfuración, desoxidación y defosforación.

Sin embargo, también reacciona a los materiales refractarios provocando el desgaste del refractario.

La composición de la escoria durante la metalurgia secundaria debe ser controlada muy cuidadosamente para lograr las inclusiones y la composición del acero requeridos. Además la densidad, el volumen (profundidad), el punto de fusión, la viscosidad y la energía interfacial de la escoria, son todos factores importantes que controlan las reacciones con el acero y los materiales refractarios.⁹

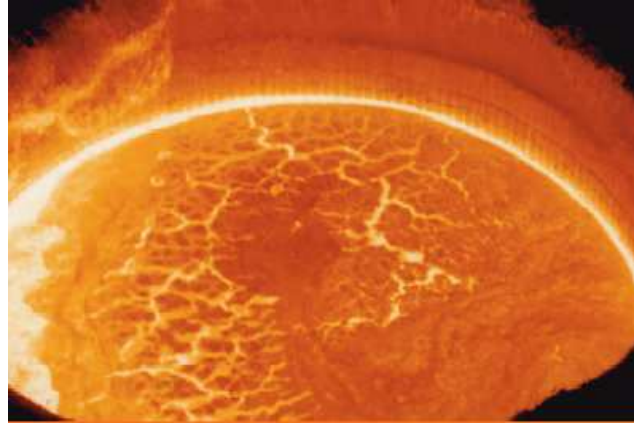


Figura 2.14 Metal fundido con escoria¹³

2.3.6.1 Escoria de la desulfuración

La escoria resultante del proceso es típicamente 45% CaO, 23% FeO, 15% SiO₂, 8% MnO, 7% MgO, 2% P₂O₅.

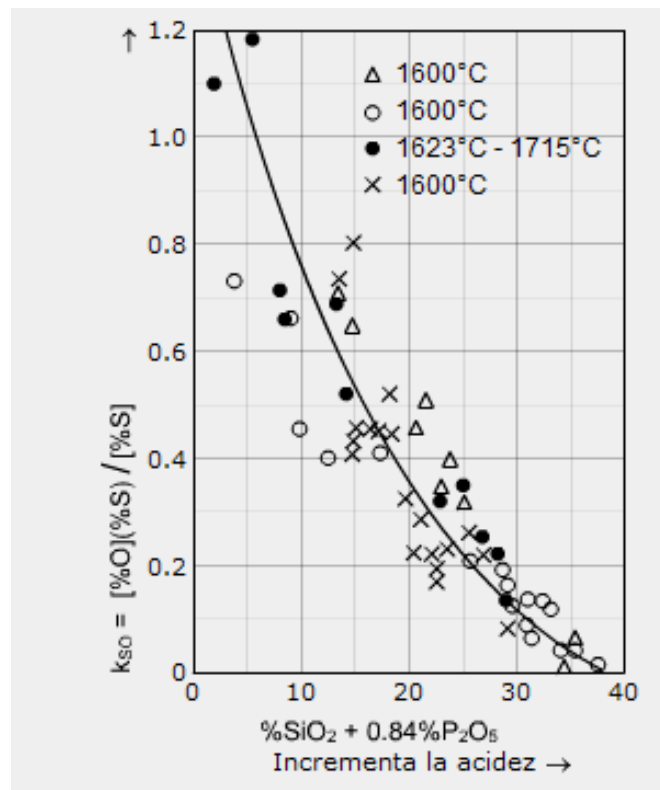


Figura 2.15 Escoria de la desulfuración⁹

La escoria básica es aquella que contiene iones libres de oxígeno, alimentada por la presencia de CaO y MgO.

La escoria ácida es aquella con escaso O₂ y que contiene SiO₂ y P₂O₅.
La basicidad (B) de la escoria se define como:

$$\mathbf{B} = \frac{(\% \text{CaO} + 1.4\% \text{ MgO})}{(\text{SiO}_2 + 0.84\% \text{ P}_2\text{O}_5)}$$

CAPÍTULO 3

PROCESO EXPERIMENTAL DE LA DESULFURACIÓN

3.1 EQUIPO DE DESULFURACIÓN

Este capítulo trata detalladamente todas las alternativas posibles, para cada una de las fases del proceso de desulfuración antes determinadas, realizando una selección correcta para los parámetros elegidos; con el fin de hallar los diferentes elementos y acoplamientos necesarios en las soluciones consideradas para una efectiva desulfuración.

En base a la teoría de los capítulos anteriores se pueden determinar las ventajas y desventajas de cada uno de los elementos que conformarán el equipo de desulfuración.

Anteriormente se describió los procesos de desulfuración que se pueden aplicar escogiendo de todos la lanza de inmersión, como uno de los mejores métodos para la desulfuración del hierro gris. Se eligió este proceso por ser el que disminuye al azufre en un buen porcentaje, además de ser de fácil aplicación, se presta para controlar la mayoría de los factores que afectan la desulfuración.

Este proceso permite dar tiempo para realizar la desulfuración sin que se enfríe la colada y poder alimentar a los moldes a la temperatura requerida, además de controlar otros factores como tiempos de operación.

Este equipo constará de tres partes específicas:

- Horno para producción de Hierro Gris.
- Sistema de Agitación.
- Desulfurante

3.1.1 HORNOS

Como hornos se tiene las dos únicas alternativas donde se produce hierro gris en la Escuela Politécnica Nacional, el horno de inducción y el cubilote.

El horno de inducción tiene dos crisoles el primero con una capacidad de 100 Kg de hierro fundido, pero el mismo es descartado por su dificultad de operabilidad para esta experimentación y el segundo de 5Kg se utilizó por las facilidades que prestó.

3.1.1.1 Selección del horno

Para la selección del horno se aplicó el método de pesos desiguales de los factores para su selección, porque se tiene dos únicas alternativas.

A 1 = Horno de Inducción.

A 2 = Horno Cubilote

Factores	X	A1	A2	xA1	xA2
Operabilidad	1.0	0.92	0.40	0.92	0.40
Costos	0.9	0.70	0.65	0.63	0.585
Capacidad de producción	0.8	0.71	0.62	0.568	0.496
Suministros	0.7	0.64	0.71	0.448	0.497
Disponibilidad de materia prima	0.6	0.68	0.78	0.408	0.468
Control de la temp. De colado	0.8	0.90	0.65	0.720	0.520
Σ	4.8			3.694	2.966

Tabla N°- 3.1 Selección del horno

Criterio

$$\frac{\sum x A1}{\sum x Ideal}$$

$$\frac{3.694}{4.8} = 0.77$$

$$\frac{\sum x A2}{\sum x Ideal}$$

$$\frac{2.966}{4.8} = 0.62$$

Alternativa	A 1	A 2
Prioridad	1	2

A continuación se detalla los factores por los que se escogió el horno eléctrico para realizar la experimentación.

3.1.1.1.1 Operabilidad

Este factor es indispensable para el número de pruebas que se realizarán.

En el Horno de Inducción el número de operarios mínimos para la prender es de 2 personas, las cuales deben conocer detalladamente el funcionamiento del equipo y no requiere de una preparación previa para la encendida.

En el Cubilote se requiere de 10 personas para su manejo, además de una previa preparación de pre-encendido con 12 horas de anticipación.

3.1.1.1.2 Costos

El costo estará directamente relacionado con la capacidad de producción.

En el horno de inducción su costo es alto debido al tiempo que opera y al consumo de energía eléctrica, para lo poco que produce con relación al Cubilote.

3.1.1.1.3 Capacidad de producción

En el horno de cubilote se puede producir 530 Kg / h de hierro gris siendo esto una cantidad excesiva y de difícil manejo para la experimentación ya que no se puede realizar varias pruebas debido a la falta de tiempo que se necesita para cada una de ellas.

En el horno de Inducción se tomó como alternativa al horno pequeño ya que se lo reparó y se puso en óptimo funcionamiento, este produce 3200 a 5000 gramos de metal fundido, el cual es el más indicado.

3.1.1.1.4 Suministros

Los suministros para el horno de inducción no tienen un elevado costo debido que para su encendido solo necesita de agua potable y destilada para el sistema de refrigeración.

Para el cubilote el subministro más costoso y de difícil adquisición es principalmente el combustible (coque) por lo que para reducir este costo se debe producir en grandes cantidades lo cual no es aplicable para la parte experimental.

3.1.1.1.5 Disponibilidad de materia prima

En realidad existe un excedente de materia prima que es la chatarra de hierro gris, se toma en cuenta este factor por las dimensiones predeterminadas que se deben tener para cada uno de los hornos.

3.1.1.1.6 Control de la temperatura de colado

Este factor es indispensable para el proceso de desulfuración en vista de que la temperatura de colado, puede variar la microestructura de la fundición y únicamente puede ser controlado en el horno de inducción con mayor facilidad que en el cubilote.

3.1.1.2 Características del horno seleccionado

El horno de inducción posee una capacidad aproximada de 5Kg, el crisol es de óxido de zirconio ZrO, el cual permite que el desgaste por efecto del ataque que otorga el desulfurante sea mínimo y prolongue la vida útil de este crisol.

Las dimensiones de este crisol y su capacidad se detalla a continuación:

Altura= 175 mm

Diámetro exterior = 108 mm

Espesor=13 mm

Por las razones de fácil operabilidad, manejo apropiado de las variables que influyen en la desulfuración y de baja capacidad de producción el horno de inducción es el más adecuado para este proceso, permitiendo así la realización de varias pruebas además de los bajos costos.

Un hecho fundamental es que en la actualidad las empresas fundidoras que existen en el país utilizan este tipo de hornos para su producción por las diferentes facilidades que presentan.

El volumen del crisol del horno seleccionado hace que la chatarra a utilizar sea de dimensiones pequeñas, ya que se recomienda que el tamaño no pase de 1/3 del diámetro del crisol.

Se escogió como materia prima a utilizar pedazos de chatarra de tubo de hierro gris el cual permite fragmentarlo con facilidad logrando así que esta se vuelva de forma más compacta.



Figura 3.1 Horno de inducción (capacidad de 5 Kg)



Figura 3.2 Panel de control.

3.1.2 SISTEMA DE AGITACIÓN.

El sistema de agitación realizará una correcta desulfuración para lo cual se necesita que el metal fundido se mezcle de forma adecuada con el desulfurante, por esto es importante que exista un buen tipo de agitación motivo por el cual se escogió el sistema de inmersión que consta de una lanza más el gas de agitación.

3.1.2.1 Lanza de inmersión.

La lanza de agitación es de fácil construcción, representa un bajo costo y permite que se mezcle adecuadamente el metal con el desulfurante siendo un buen agitador por lo que se seleccionó como parte del equipo de desulfuración a utilizar.

La lanza de inmersión tiene como finalidad sumergirse dentro del metal líquido para insuflar gas inerte el cual agitará la mezcla metal-desulfurante.

Esta lanza debe soportar temperaturas sobre la de fusión del hierro gris por lo que se recomienda utilizar tubos de tungsteno. Esta clase de tubos no se encuentran disponibles en el mercado nacional, por lo que se vio la necesidad de adecuar un tubo que cumpla con el requerimiento de resistencia a altas temperaturas.

Se adecuó un tubo de acero inoxidable cuyo punto de fusión esta por los 1600 °C, al cual se le soldó algunos clavos para que se adhiriera un recubrimiento refractario, el que fue colocado para alargar la vida útil y especialmente para no alterar las propiedades de la fundición. El material con el que se le recubrió es un cemento refractario que soporta hasta 1700 °C (Concrax 1700).

A esta lanza se le acopló una manguera de 30 psi de presión para insuflar el gas agitador.



Figura 3.3 Lanza de acero inoxidable con recubrimiento refractario.

3.1.2.2 Selección del Gas Agitador

Como propiedades para un gas agitador se debe tomar en cuenta de que sus componentes no alteren a la fundición, por lo que se decidió utilizar gas inerte, que no afectarán en gran medida.

Se tienen las siguientes alternativas más usuales:

- Aire
- Nitrógeno
- Argón

Para la selección del gas inerte se aplica el criterio de evaluación según escala de valores, teniendo como alternativas:

A 1 = Aire

A 2 = Nitrógeno N₂

A 3 = Argón

Factores	Calificación	A 1	A 2	A 3
Costo	70	49	70	69
Conservación de la temp. del metal	90	68	70	73
Preservación de la composición química	60	23	58	58
Σ	220	140	198	200

Tabla N^o- 3.2 Selección del gas agitador

$$\text{Criterio} \frac{\Sigma A_n}{\Sigma \text{Calificación}}$$

Criterio		0.64	0.90	0.91
Prioridad		3	2	1

La alternativa seleccionada es A 3 Argón.

3.1.2.2.1 Costo

Para insuflar aire es necesario adquirir un compresor el cual eleva su costo excesivamente.

El nitrógeno y el argón tienen un costo similar en el mercado nacional, pero cabe aclarar que los flujómetros para el argón son más costosos que el nitrógeno.

Ninguna de las alternativas posee inconveniente de adquisición en el mercado.

3.1.2.2.2 Conservación de la temperatura en el metal

Debido a la selección del proceso para realizar la desulfuración existe una pérdida de temperatura con todas las alternativas debido a la presión con la que va a insuflar el gas, datos experimentales determinaron que con el argón la disminución de la temperatura es menor que con el nitrógeno y el aire, en este último la temperatura disminuye considerablemente debido a la presencia de humedad.

3.1.2.2.3 Preservación de la composición química

Tanto el argón como el nitrógeno por ser gases inertes no influyen teóricamente a la composición química del metal fundido.

Caso contrario pasa con el aire ya que uno de los componentes es el oxígeno el cual disminuye el contenido de carbono, cambiando su composición y microestructura además de la humedad que atrae y perjudica al metal fundido.

3.1.2.3 Características del gas inerte seleccionado

El argón es un elemento químico o elemento inerte, cuyo número atómico es 18, masa atómica 39,95 y valencia 0; Se encuentra en la atmósfera en la proporción de 0,94% en volumen.

El tanque a utilizar tiene una capacidad de: 6m³.



Figura 3.4 Tanque de argón

3.1.3 DESULFURANTES

Entre todos los tipos de desulfurantes existentes en el mercado se escogerá el que brinde mayor eficiencia en el proceso de desulfuración tomando en cuenta el costo y la existencia en el mercado.

3.1.3.1 Selección del desulfurante

Para la selección del desulfurante se aplica el criterio de evaluación según escala de valores.

A 1 = Sosa Caústica NaOH

A 2 = Sosa Calcinada Na₂CO₃

A 3 = Carburo de Calcio CaC₂

A 4 = Cal Quemada CaO

A 5 = Magnesio Mg-Fe-Si

Factores	Calificación	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5
Efectividad	70	60	48	65	65	52
Adquisición	50	35	40	45	48	10
Mínimo tiempo de reacción	30	21	15	28	22	30
Menos tóxico	60	10	8	49	5	50
Σ	210	126	111	187	140	142

Tabla N°- 3.3 Selección del desulfurante

$$\text{Criterio} = \frac{\Sigma A_n}{\Sigma \text{Calificación}}$$

	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5
Criterio	0.60	0.5286	0.8905	0.6666	0.5619
Prioridad	4	5	1	2	3

La alternativa seleccionada es A 3 Carburo de Calcio

3.1.3.2 Ingreso del desulfurante

La forma correcta como se ingresa el desulfurante influye en el proceso de desulfuración.

Para el proceso de lanza de inmersión el indicado es colocar el desulfurante encima del metal en fase líquida y sumergir el desulfurante progresivamente con ayuda de la lanza.

3.1.3.3 Características del desulfurante seleccionado

Se seleccionó el carburo de calcio en polvo que como una regla CaC_2 es de menor tamaño que el de malla US Standard 20 para conseguir una apropiada superficie de contacto.¹⁸



Figura 3. 5 Carburo de calcio

3.2 PROCEDIMIENTO PARA LA DESULFURACIÓN

3.2.1 CARGA Y ENCENDIDO DEL HORNO

En la práctica diaria puede emplearse el siguiente procedimiento para la carga y encendida del horno.

Primero se revisa el que todos los sistemas de refrigeración del horno estén funcionando adecuadamente.

Luego la chatarra previamente seleccionada y del tamaño adecuado se coloca con cuidado dentro del crisol de la forma más compacta posible, evitando que existan puentes entre la chatarra ya que esto produce el deterioro del crisol del horno. A continuación se prende el horno de inducción para comenzar el proceso de fundición controlando la frecuencia para que el calentamiento del metal sea progresivo y evitar cambios bruscos de temperatura protegiendo así al crisol que no se trice por el choque térmico.

3.2.2 COLOCACIÓN DEL DESULFURANTE

Cuando se tiene el metal líquido a una temperatura aproximada de 1400 °C se procede a retirar la escoria existente en la parte superficial del metal, procediendo inmediatamente con la forma de ingreso del desulfurante que es carburo de calcio con ayuda de una cuchara. Se alteró los porcentajes de carburo de calcio para realizar la parte experimental del estudio y determinar la cantidad adecuada de desulfurante. Los valores variaron dentro del rango de la teoría fueron de 2%, 1.8%, 1.7% y 1.5% con respecto a la carga. En ese momento se observa una reacción previa de la parte superficial. Se coloca una tapa en la boca del crisol para evitar peligro de accidentes por las salpicaduras de metal durante el proceso de desulfuración.

3.2.3 AGITACION DE LA MEZCLA

El tanque de argón debe estar previamente conectado a la lanza de inmersión la cual se introdujo con cuidado tratando de sumergir el desulfurante hasta el fondo del crisol (figura 3.6), con una presión del gas variable desde 0.566m³/h (2 pies³/h) hasta 0.3398m³/h (12 pies³/h), se introduce progresivamente para evitar que exista muchas salpicaduras. El tiempo de agitación que se realizó

es de 2, 4, 6 y 8 minutos con los respectivos porcentajes de carburo de calcio para analizar a tiempos diferentes.

Después de que se ha completado el tiempo establecido de desulfuración se extrae la lanza y la tapa del horno.



Figura 3.6 Proceso de agitación.

3.2.4 ELIMINACIÓN DE LA ESCORIA

En la superficie del metal después del procedimiento antes mencionado se habrá formado una capa de escoria. Esta escoria exhausta, deberá ser "espumada" y extraída (figura 3.7), se ha notado que la desulfuración más eficiente es obtenida cuando se deja sobre la superficie del hierro una delgada capa de escoria.

El horno debe estar operando a baja frecuencia para evitar la pérdida de temperatura y la solidificación violenta del metal en el momento de escoriar.



Figura 3.7 Eliminación de la escoria

Después de sacar la escoria se sobrecalienta al metal hasta a $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente para que tenga buena fluidez en el rato del colado en los moldes.

3.2.5 MOLDEO Y COLADO

El moldeo se realizó en arena en verde, utilizando los modelos que se elaboraron previamente en madera de dos piezas.

Se realizó los moldes con un día de anterioridad al de las pruebas dando tiempo para que la arena de moldeo no tenga mucha humedad y evitando así las deformidades en el producto final a obtenerse.

Luego se los pintó con una mezcla de grafito con alcohol como muestra la figura 3.8, con el fin de impermeabilizar y obtener un producto sin poros y un buen acabado en la parte exterior, es decir que el área quede liza reduciendo las incrustaciones de arena en las probetas obtenidas como se indica en la figura 3.9.



Figura 3.8 Moldeo en arena en verde



Figura 3.9 Probeta de Hierro Gris Desulfurada

En el proceso de desulfuración con la presión de gas se pierde temperatura lo cual hace indispensable elevar la misma para poder colar (figura 3.10).



Figura 3.10 Colado del hierro gris desulfurado.

Cualquier retraso en este proceso puede significar la pérdida de una fracción relativamente grande del tiempo de contacto disponible y, por consiguiente, la eficiencia del equipo de desulfuración se ve reducida.

Este procedimiento se efectuó por varias ocasiones para obtener datos que sirvan para este estudio.

El carburo de calcio deberá ser guardado en lugares secos ya que absorberá algo de humedad de la atmósfera. Si este material se añade al baño en este estado húmedo, resultará en excesivo salpicado y generación de chispas.

3.2.6 DATOS DEL PROCESO DE DESULFURACIÓN

Para tomar datos durante el proceso de desulfuración se utilizó el pirómetro óptico, este instrumento utiliza una longitud de onda o una banda angosta de longitudes correspondientes a la parte visible del espectro. El pirómetro óptico mide la temperatura comparando el brillo de la luz emitida por la fuente con la de

una fuente estándar, para facilitar la comparación de color, se utilizan un filtro de color rojo que restringe la radiación visible a la longitud de onda de la radiación roja. Este pírómetro puede calibrarse para el intervalo de mayor temperatura usando las menores temperaturas del filamento. Este equipo debido al deterioro emite valores de temperaturas aproximadas. En el proceso de fabricación, las principales mediciones de temperaturas realizadas fueron:

- Temperatura del baño antes de desulfurar.
- La temperatura del baño después del afino en la salida del metal del horno.

El caudal se tomó por medio de una válvula que posee un medidor de flujo conectado a la salida del tanque de argón.

A continuación se detalla los datos de temperaturas y caudales que se manejó en el proceso.

Primera encendida

Con un porcentaje de adición del 1.7 % de CaC_2

Tiempo	Temperatura de desulfuración	Caudal de ingreso de la lanza	Caudal de la lanza sumergida	Temperatura de colado
1	1350	12	10	1350
2	1355	10	8	1350
4	1345	11	8	1350
6	1350	10	6	1350

Tablas 3.4 Temperatura y caudal de desulfuración primera encendida.

Segunda encendida

Con un porcentaje de adición del 2 % de CaC_2

Tiem.	Temperatura de desulfuración	Caudal de ingreso de la lanza	Caudal de la lanza sumergida	Temperatura de colado
2	1300	10	8	1350
4	1300	9	7	1350
6	1350	10	6	1350

Tablas 3.5 Temperatura y caudal de desulfuración segunda encendida.

Tercera Encendida

Con un porcentaje de adición del 1.8 % de CaC_2

Tiem.	Temperatura de desulfuración	Caudal de ingreso de la lanza	Caudal de la lanza sumergida	Temperatura de colado
2	1300	9	8	1350
4	1350	5	3	1350
6	1350	5	2	1350
8	1300	8	6	1350

Tablas 3.6 Temperatura y caudal de desulfuración tercera encendida.

Cuarta Encendida

Con un porcentaje de adición del 1.5 % de CaC_2

Tiem.	Temperatura de desulfuración	Caudal de ingreso de la lanza	Caudal de la lanza sumergida	Temperatura de colado
2	1300	5	2	1350
4	1350	7	6	1350
6	1320	8	3	1350
8	1370	7	5	1350

Tablas 3.7 Temperatura y Caudal de desulfuración Cuarta encendida.

CAPÍTULO 4

DATOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 DATOS OBTENIDOS

En total se efectuaron cuatro ensayos, a una fundición gris obtenida en el horno de inducción, previamente desulfurada con mezclas a base de carburo de calcio, se inyectó argón como agitador bajo condiciones de presión y caudal establecidas, para evaluar la variación de la temperatura, de las microestructuras y de los contenidos de carbono, silicio, manganeso y azufre.

Los ensayos realizados se explican a continuación.

4.1.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

Para conocer las cargas que pueden soportar los materiales, se efectúan ensayos destructivos como es el de tracción, en donde se coloca una probeta en una máquina de ensayo consistente de dos mordazas, una fija y otra móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil. Un esquema de la máquina de ensayo de tracción se muestra en la Figura 4.1.²³

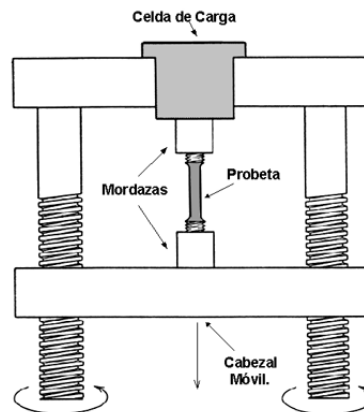


Figura 4.1 Máquina de Ensayo de Tracción²³

La figura 4.2 indica la forma de la probeta al inicio, al momento de llegar a la carga máxima y luego a la ruptura.

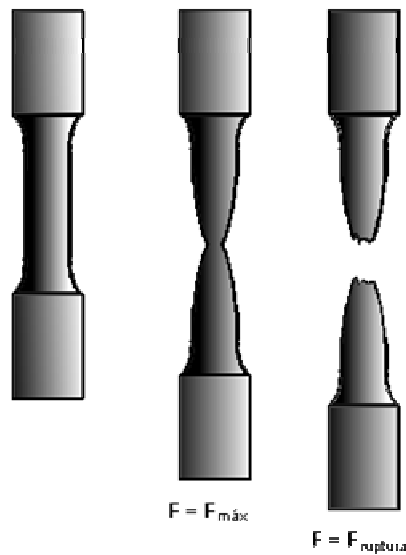


Figura 4.2 Probetas de Tracción ²³

Para expresar la resistencia en términos independientes del tamaño de la probeta, se dividen las cargas por la sección transversal inicial A_0 , obteniéndose:

Resistencia a la tracción:

$$\sigma_{ULT} = \frac{F_{\text{max}}}{A_0}$$

Unidades : Kg/mm² o Mpa o Kpsi

Considerando una probeta cilíndrica el área es:

$$A_0 = \frac{\pi D_0^2}{4}$$

Los datos obtenidos en el ensayo de tracción se muestran en la Tabla 4.1, realizados según la norma ASTM A 48 (Anexo N.-1) para fundiciones grises.

PROBETA				TRACCIÓN			Clase de Fundición
Código	% CaC ₂	CaC ₂ (gramos)	Tiempo (minutos)	Diámetro	(lb/pulg ²)	Resistencia (Psi)	
A	1.5	75	2	12,68	5000	25545.1800	25
B	1.5	75	4	12,62	6150	31720.0560	30
C	1.5	75	6	12,6	6700	34666.6011	30
D	1.5	75	8	12,62	7900	40746.0890	40
E	1.8	90	2	12,66	6950	35620.0844	35
F	1.8	90	4	12,66	6600	33826.2672	30
H	1.8	90	6	12,62	5800	29914.8500	25
I	1.8	90	8	12,66	6700	34338.7865	30
J	2	64	2	0	0	N/A	
K	2	64	4	12,68	3700	18903.39	15
L	2	64	6	12,7	5000	25464,73	25
N	1.7	53	1	0	0	N/A	
O	1.7	53	2	12,7	0	N/A	
P	1.7	53	4	12,7	7100	36159,92	35
R	1.7	53	6	12,7	6600	33613,94	30
S	0	-----	-----	12,7	3400	17316,02	15

N/A Significa que no pudo ser cuantificable

Tabla 4.1 Resistencia a la Tracción

4.1.2 ENSAYO DE DUREZA

Los carburos son constituyentes de elevada dureza y tienen un efecto muy dañino para la vida de las herramientas de corte.

Este método de prueba cubre la determinación de la dureza Brinell de materiales metálicos. Dentro de las propiedades que se relacionan con la dureza, figura la resistencia mecánica.

A nivel de la metalurgia mecánica, por medio de técnicas de endurecimiento se puede aumentar el número de obstáculos al movimiento de dislocaciones, por lo tanto el esfuerzo, necesario para el desplazamiento de éstas, aumenta confiriéndole al material una resistencia que se traduce en el aumento de la dureza, ya que esta propiedad de alguna manera es la carga necesaria para que el indentador penetre en la superficie.

El ensayo de dureza Brinell se realizó según las normas E10 (Anexo N.-2) y los datos obtenidos se muestran en la Tabla 4.2.

PROBETA				DUREZA				
Código	% CaC ₂	CaC ₂ (gramos)	Tiempo (minutos)	Kgr1	Kgr2	Kgr3	Kgr4	Kgr promed
A	1.5	75	2	207	217	207	197	207
B	1.5	75	4	197	197	197	207	199,5
C	1.5	75	6	241	241	241	255	244,5
D	1.5	75	8	255	241	241	217	238,5
E	1.8	90	2	248	248	241	241	244,5
F	1.8	90	4	255	255	241	248	249,75
H	1.8	90	6	229	235	241	248	238,25
I	1.8	90	8	223	223	241	229	229
J	2	64	2	255	255			255
K	2	64	4	235	241			238
L	2	64	6	269	229			249
N	1.7	53	1					
O	1.7	53	2	269	262			265,5
P	1.7	53	4	241	255			248
R	1.7	53	6	201	207			204
S	0			269	241			255

Tabla 4.2 Dureza Brinell

La maquinabilidad teóricamente está relacionada con la dureza Brinell, pero la dureza depende de la microestructura, aunque se evalúa por la vida útil de las herramientas de corte y el acabado de las superficies. Por ejemplo la presencia del grafito (estructura suave) favorece la maquinabilidad, aunque la forma y tamaño de este influye en el acabado superficial. La microestructura alrededor del grafito influye en la vida de la herramienta del corte y permite mayores velocidades de corte. La ferrita y la austenita son estructuras de fácil maquinabilidad, a diferencia de la martensita y en menor grado de la bainita que son más difíciles de maquinar.

(Form y Wallace, 1962) propusieron una relación para calcular un índice de calidad llamado dureza relativa (HR), para evaluar la maquinabilidad de un hierro fundido:

$$HR = HB / (100 + (3,03 \cdot 10^{-3} R_t))$$

Donde:

HB= dureza Brinell

R_t = resistencia a la tracción.

Valores inferiores a 1,0 indican que los hierros fundidos tienen buena maquinabilidad.

En la tabla 4.3 se observan los datos de dureza relativa, calculados según Form y Wallace para estimar la maquinabilidad de las probetas desulfuradas con la muestra.

<i>Probeta</i>	<i>CaC₂</i>		<i>Tiempo</i>	<i>Resistencia</i>	DUREZA	<i>DUREZA</i>
						<i>RELATIVA</i>
A	75g	1.5 %	2	25545.1800	207	0.62
B	75g	1.5 %	4	31720.0560	199.5	0.51
C	75g	1.5 %	6	34666.6011	244.5	0.59
D	75g	1.5 %	8	40746.0890	238.5	0.51
E	90g	1.8 %	2	35620.0844	244.5	0.58
F	90g	1.8 %	4	33826.2672	249.75	0.61
H	90g	1.8 %	6	29914.8500	238.25	0.64
I	90g	1.8 %	8	34338.78647	229	0.56
J	64g	2%	2	-----	255	N/A
K	64g	2%	4	18903.39	238	0.88
L	64g	2%	6	25464.73	249	0.75
N		1.7%	1	-----	-----	N/A
O	53g	1.7%	2	-----	265.5	N/A
P	53g	1.7%	4	36159.92	248	0.58
R	53g	1.7%	6	33613.94	204	0.50
S		testigo	0	17316.02	255	0.99

N/A Significa que no pudo ser cuantificable

Tabla 4.3 Dureza relativa

4.1.3 PRUEBAS METALOGRAFICAS

Las técnicas de preparación metalográfica dejan una superficie limpia y pareja, las cuales son aptas para el ataque por el reactivo químico, por ejemplo nital al 2% en el caso de los aceros o fundiciones, de tal manera se hacen visibles las características estructurales del material metálico o aleación. El ataque químico, revela las fronteras de grano que aparecen como valles, en la superficie pulida.

En los materiales metálicos analizados se pueden encontrar estructuras de una o más fases, en los cuales es posible la obtención de contrastes

específicamente; la visión de fronteras de granos, producto de las diferencias en la rapidez a que los diversos granos son atacados por el reactivo. Esta diferencia en la rapidez de ataque guarda relación con el ángulo que se forma entre las diferentes secciones de grano con el plano de la superficie pulida (valles). La luz del microscopio se reflejará fuera de él al chocar con la orilla de estos valles, haciendo que las fronteras de grano aparezcan como líneas oscuras.

El límite de grano comúnmente es preferible ser observado a 100 aumentos, ya que se entrega una importante información del material respecto a sus posibles propiedades mecánicas, tratamientos térmicos, etc.

4.1.3.1 Preparación

4.1.3.1.1 Esmerilado burdo o tosco.

Las muestras obtenidas deben tener un tamaño de fácil manipulación. La muestra plana o dura puede esmerilarse sobre una lija de banda, manteniendo la muestra fría sumergiéndola frecuentemente en agua durante la operación de esmerilado, con lo cual no se altera su estado con el calor que se produce en el acto de pulido para mantener una misma fase.

En todas las operaciones de esmerilado, la muestra debe moverse en sentido perpendicular a la ralladura existente. El esmerilado continúa hasta que la superficie quede plana y todas las ralladuras debidas al corte manual o al disco cortador no sean visibles, emulando la superficie a un espejo.

4.1.3.1.2 Pulido Intermedio.

Luego del paso anterior la muestra se pule sobre una serie de lijas que contienen abrasivos finos. Generalmente se utilizan lijas número 240, 320, 400,600. Antes de pulir con la siguiente lija se debe girar en 90° la muestra, a fin de eliminar el rayado realizado con la lija anterior. Las operaciones de pulido se hacen en húmedo.

4.1.3.1.3 Pulido Fino.

Esta etapa representa una de los pasos de mayor cuidado, el pulido fino se realiza mediante un disco giratorio cubierto con un paño especial húmedo

cargado con partículas abrasivas, como es el óxido de aluminio para pulir materiales ferrosos y los de base cobre, y óxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones.

La selección del paño para pulir depende del material y del propósito del estudio metalográfico. Se pueden encontrar paños de lanilla, similares a los que se utilizan en las mesas de pool.

Al observar en el microscopio las probetas sin ataque se determinó el tipo, tamaño y forma de grano que tienen según la norma ASTM A 24 (Anexo N.- 4), siendo los resultados los que se detallan a continuación en la Tabla 4.4

PROBETA				MICROESTRUCTURA		
<i>Código</i>	<i>% CaC₂</i>	<i>CaC₂ (gramos)</i>	<i>Tiempo (minutos)</i>	<i>Tamaño</i>	<i>Tipo</i>	<i>Forma</i>
A	1.5	75	2	6	A	VII
B	1.5	75	4	5	A	VII
C	1.5	75	6	4	A	VII
D	1.5	75	8	3	A	VII
E	1.8	90	2	4	A	VII
F	1.8	90	4	4	A	VII
H	1.8	90	6	5	A	VII
I	1.8	90	8	3	A	VII
J	2	64	2	4	A	VII
K	2	64	4	4	A	VII
L	2	64	6	3	A	VII
N	1.7	53	1	3	A	VII
O	1.7	53	2	4	A	VII
P	1.7	53	4	5	A	VII
R	1.7	53	6	3	B	VII
S	0			5	A	VII

Tabla 4.4 Tamaño, forma y tipo de grano

4.2 ANÁLISIS DE DATOS

4.2.1 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

De los datos obtenidos se pueden graficar

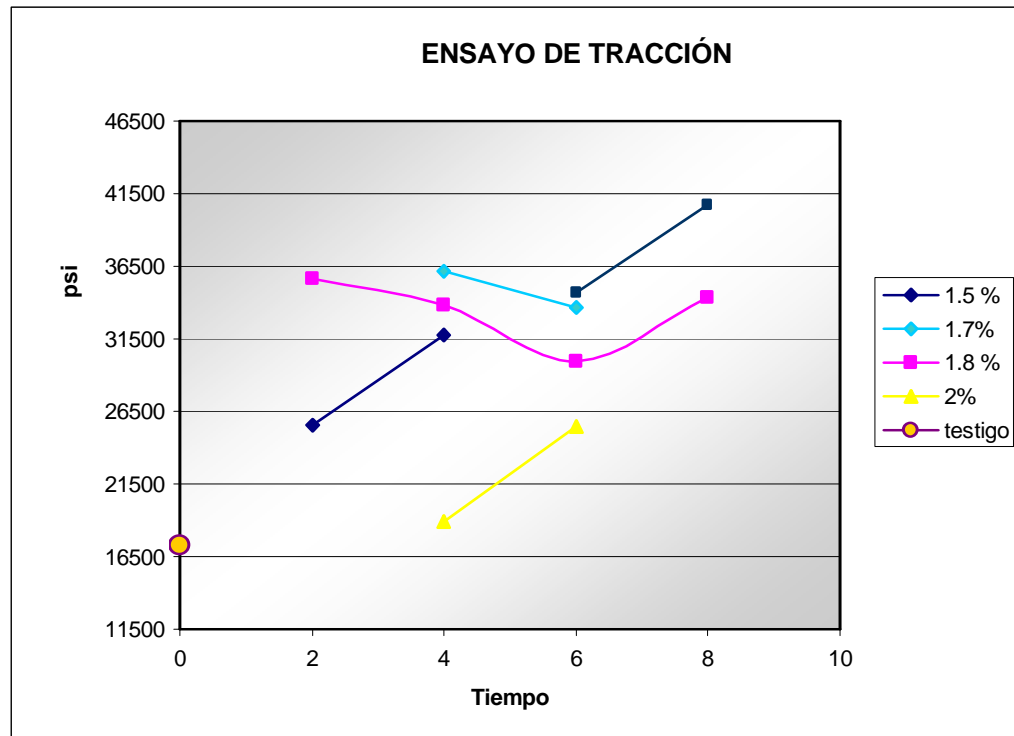


Figura 4.3 Resistencia a la tracción vs tiempo de agitación

Con el ensayo de tracción se observa que se ha mejorado las fundiciones con el proceso de desulfuración ya que todas las probetas tratadas superan a la probeta muestra (S) mientras la probeta (D) adquiere mayor resistencia a la tracción con respecto a las demás, siendo esta de 1.5 % de CaC₂ y un tiempo de agitación de 8 minutos consiguiendo a ser de clase 40. Este valor se da por la existencia de perlita y una cantidad considerable de ferrita con una buena distribución de grafito y en poca cantidad lo que mejora la resistencia.

Existen probetas en la que los datos obtenidos no son confiables debido a las porosidades existentes y a la escoria retenida dentro de las misma como es el caso de la probeta R, por este mismo motivo no se pudo cuantificar probetas como J, N y O cuyos datos no son reportables.

4.2.2 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DUREZA BRINELL

Con los datos de dureza se obtuvieron los siguientes resultados:

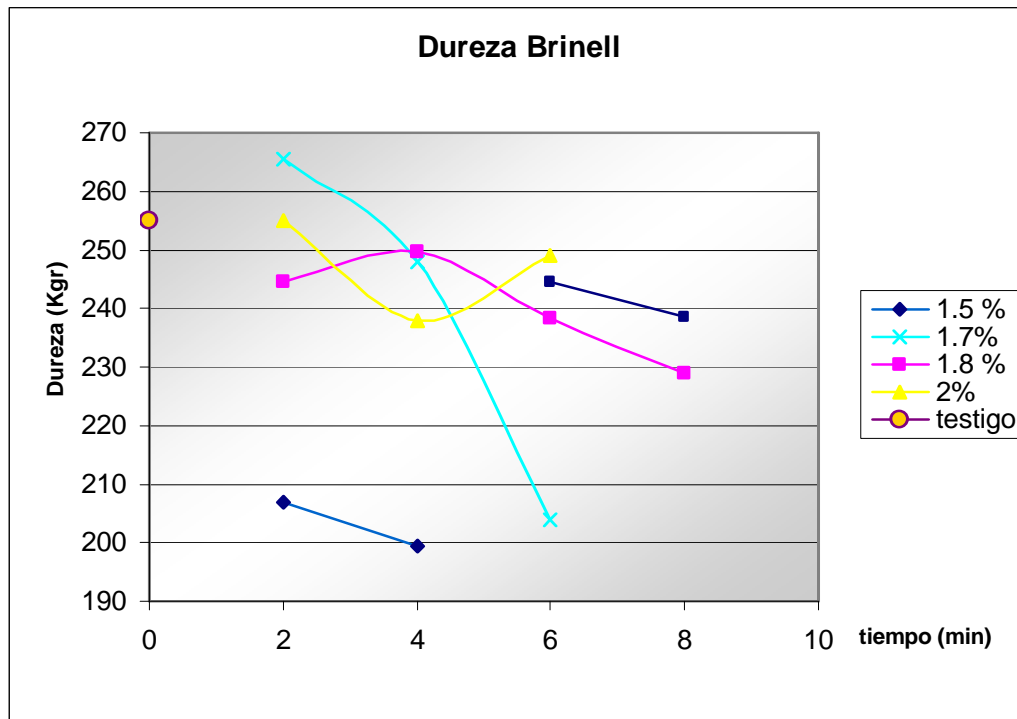


Figura 4.4 Dureza Brinell vs tiempo de agitación

La curva de 1.5 % CaC_2 existen diferentes microestructuras ya que la probeta A y C tienen mayor presencia de ferrita en relación de las probetas B y D respectivamente, por esta razón la forma de la curva.

La existencia de ferrita se debe a la velocidad de enfriamiento.

Las probetas A y B tienen muy baja dureza debido al porcentaje alto de carbono que se presenta como concentraciones de grafito.

La probeta R tiene baja resistencia debido a las porosidades.

4.2.3 DUREZA RELATIVA

Con la fórmula aplicada se tiene una idea de la dureza relativa (maquinabilidad) que tienen las probetas, en la práctica se tuvo problemas de maquinado con las probetas E y H así como la K y S, las cuales desgastaron la herramienta de corte.

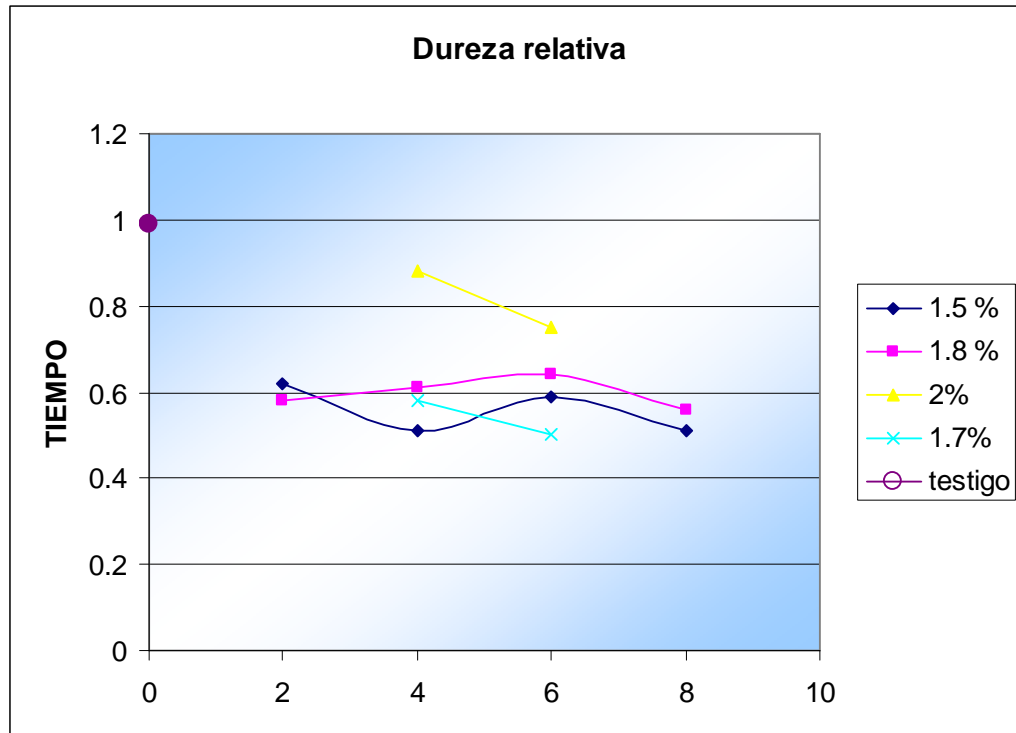


Figura 4.5 Dureza relativa

Con la gráfica se nota que todas las probetas desulfuradas son maquinables ya que no superan el valor adimensional de 1, excepto la testigo que se acerca a este valor.

4.2.4 ANÁLISIS METALOGRAFICO

Para el análisis metalográfico, las probetas se examinaron a 100 y 400 aumentos en donde se tomó datos por medio de la observación de un área determinada, lo que porcentualmente da una idea aproximada de los tipos de las

microestructuras existentes en las probetas analizadas, estas se indican en el Anexo N.-5.

PROBETA A

A	MnS	Ferrita	Grafito	Perlita	Fosforo de hierro
%	0.67	6.78	37.33	49.89	0.33

Tabla 4.5 Análisis cuantitativo por área de la probeta A

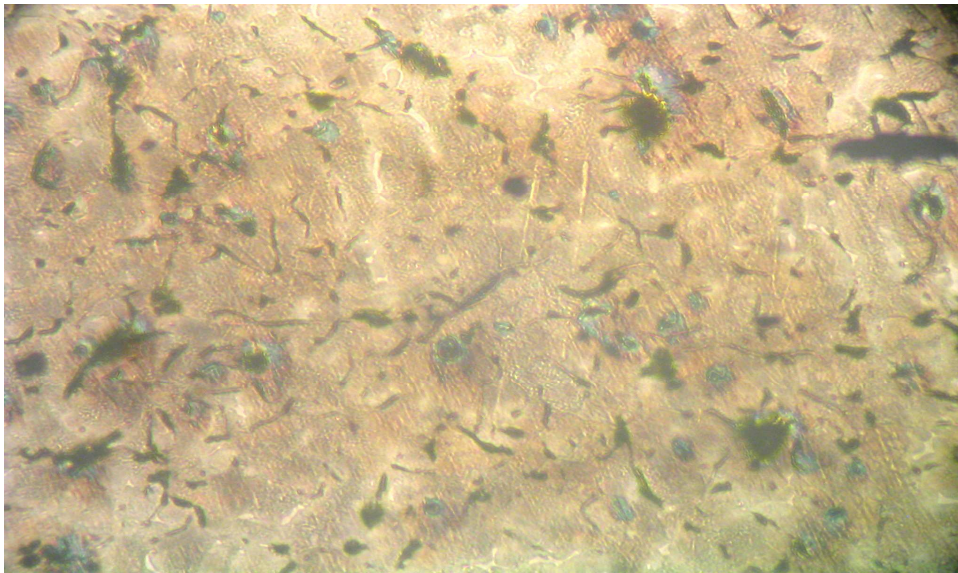


Figura 4.6 Microestructura de la probeta A. 100x

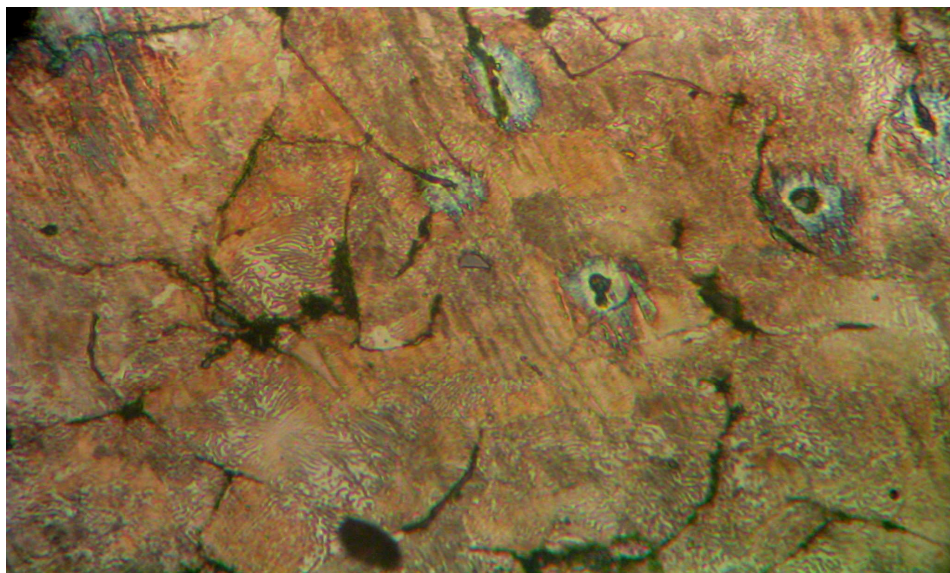


Figura 4.7 Microestructura de la probeta A. 400x

La probeta A tiene concentraciones de alto contenido de carbono y existe presencia de sulfuro de manganeso así como en poca cantidad de ferrita.

PROBETA B

B	MnS	Ferrita	Grafito	Perlita	Fosforo de hierro
%	0.8	4.1	33.6	59.6	1.2

Tabla 4.6 Análisis cuantitativo por área de la probeta B

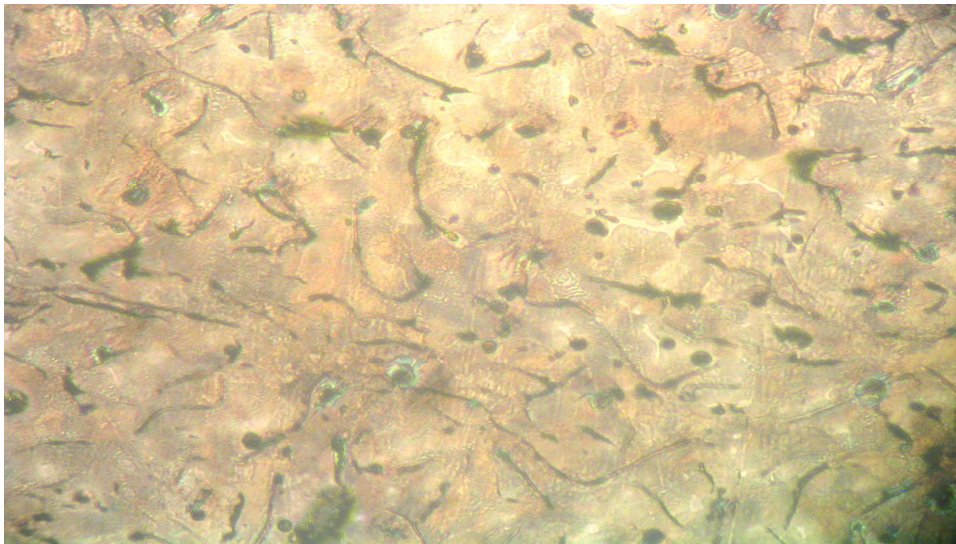


Figura 4.8 Microestructura de la probeta B. 100x

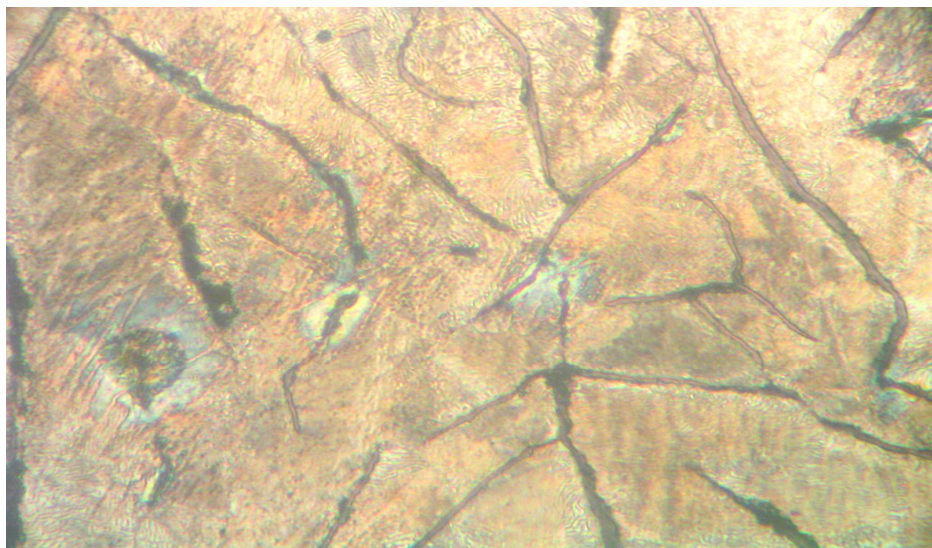


Figura 4.9 Microestructura de la probeta B. 400x

La probeta B tiene un alto contenido de carbono y existe presencia de sulfuro de manganeso.

PROBETA E

E	MnS	Ferrita	Grafito	Perlita	Fosforo de hierro
%	0.6	0.4	31.1	67.0	0.9

Tabla 4.7 Análisis cuantitativo por área de la probeta E

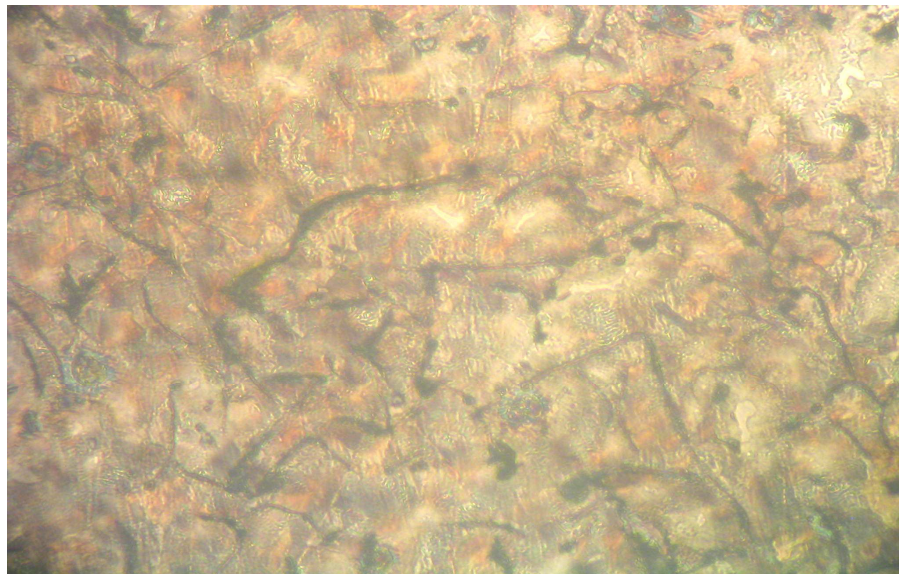


Figura 4.10 Microestructura de la probeta E. 100x

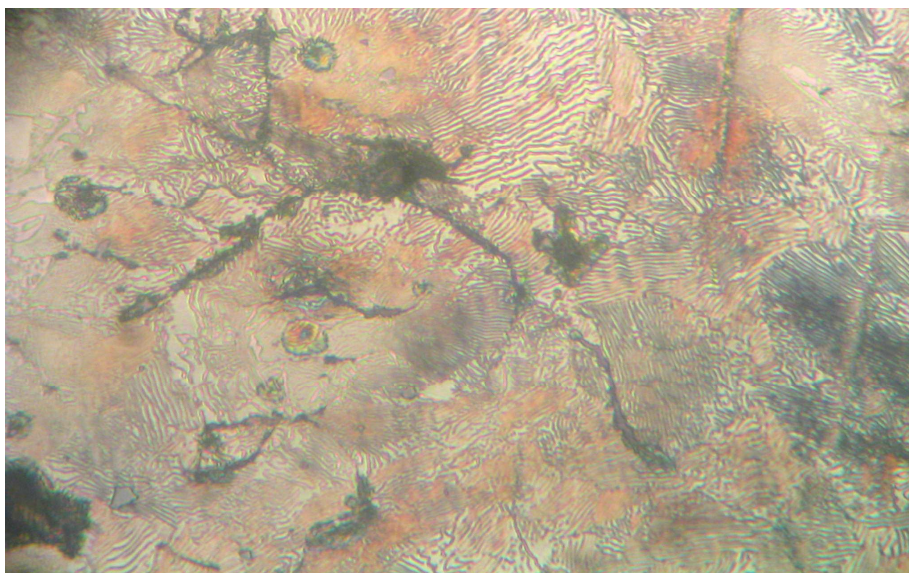


Figura 4.11 Microestructura de la probeta E. 400x

PROBETA F

F	MnS	Ferrita	Grafito	Perlita	Fosfuro de hierro
%	0.8	0.0	30.6	68.1	0.6

Tabla 4.8 Análisis cuantitativo por área de la probeta F

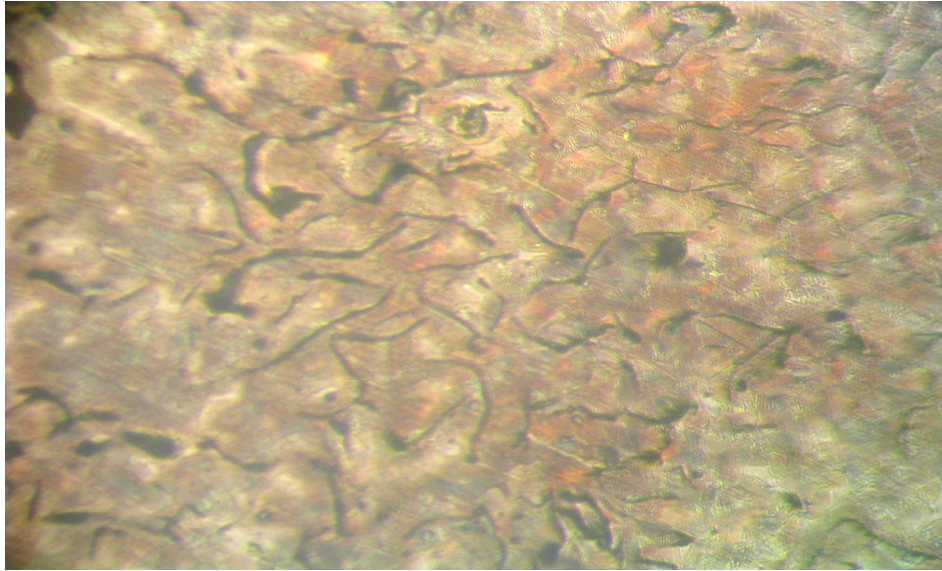


Figura 4.12 Microestructura de la probeta F. 100x

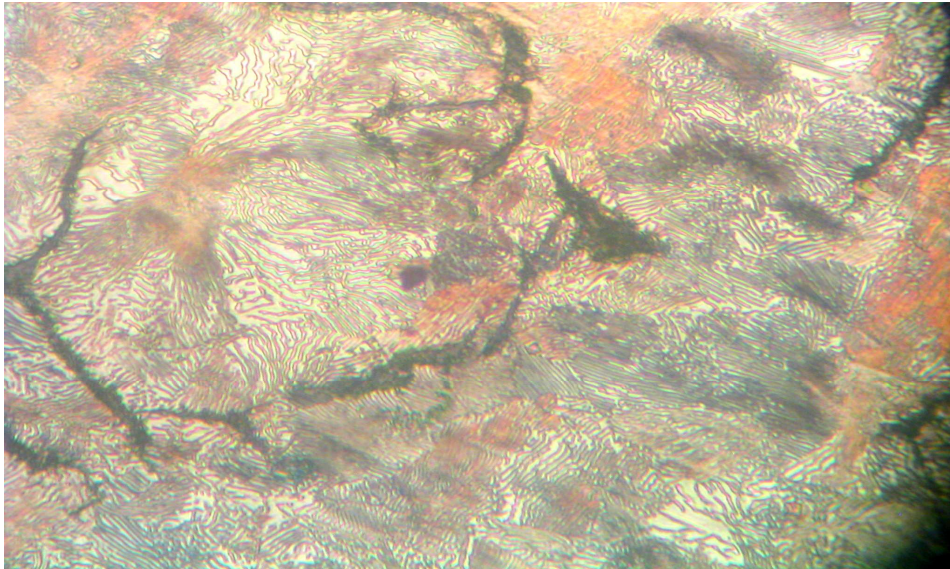


Figura 4.13 Microestructura de la probeta F. 400x

PROBETA R

R	MnS	Ferrita	Grafito	Perlita	Fosfuro de hierro
%	0.1	0.4	37.4	61.5	0.6

Tabla 4.9 Análisis cuantitativo por área de la probeta R

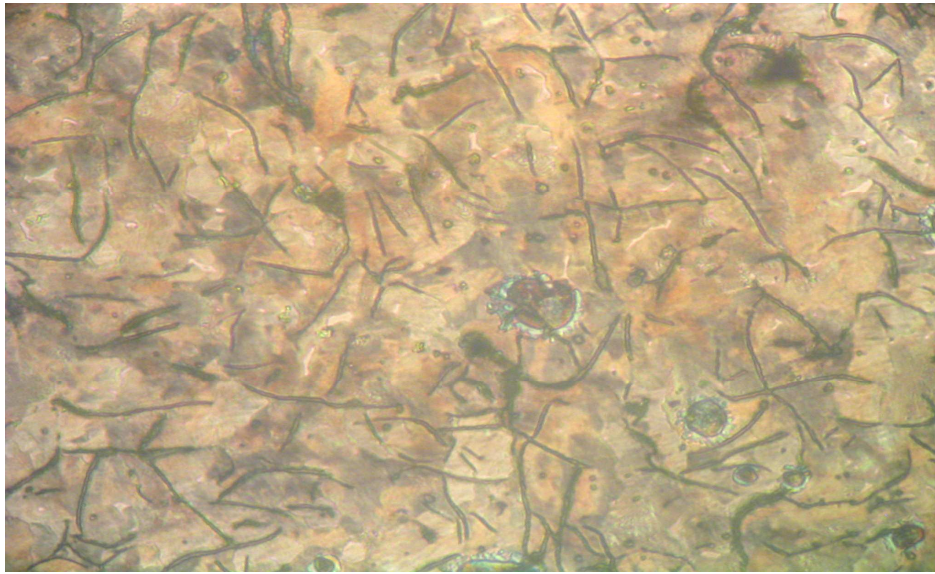


Figura 4.14 Microestructura de la probeta R. 100x



Figura 4.15 Microestructura de la probeta R. 400x

Esta probeta presentó muchas porosidades debido al mal procedimiento en el moldeo. Además presenta un cambio en su microestructura obteniendo de tipo B, debido a su alto contenido de perlita y grafito, el cual se solidificó hasta el último en forma de pequeñas hojillas y uniformemente distribuidas. Igualmente posee una cantidad mínima de sulfuros de manganeso por área.

PROBETA S

S	MnS	Ferrita	Grafito	Perlita	Fosforo de hierro
%	0.6	4.5	38.3	55.9	0.7

Tabla 4.10 Análisis cuantitativo por área de la probeta S

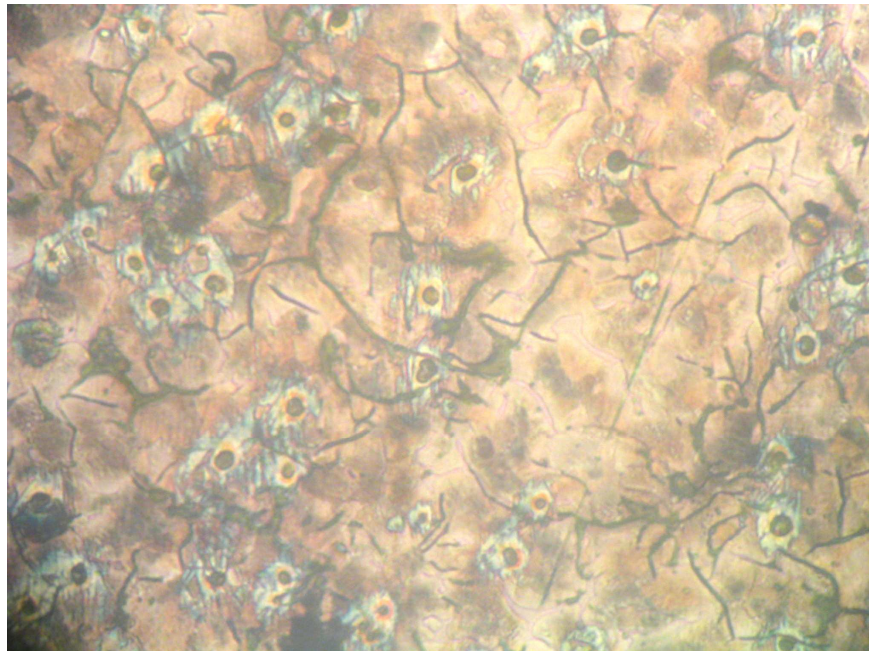


Figura 4.16 Microestructura de la probeta S. 100x

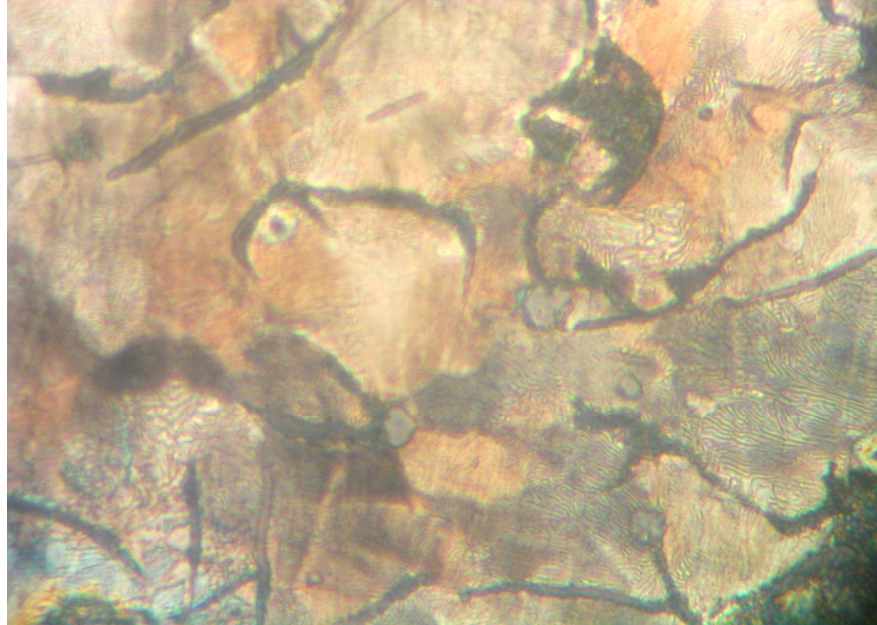


Figura 4.17 Microestructura de la probeta S. 400x

En la gráfica se ubica la existencia de sulfuros de manganeso.

4.2.4.1 Datos del porcentaje de sulfuro de manganeso

Estos datos son de la observación metalográfica, los cuales determinan la mínima cantidad de sulfuros de manganeso que existen al tiempo de agitación de 6 minutos y el mejor porcentaje de desulfurante es 2 % de CaC_2

TIEMPO

Probeta	Tiempo	MnS	CaC_2	Probeta	Tiempo	MnS	CaC_2
A	2	0.7	1.5	E	2	0.6	1.8
B	4	1.6	1.5	F	4	0.8	1.8
C	6	0.4	1.5	H	6	0.7	1.8
D	8	0.9	1.5	I	8	0.8	1.8

Tabla 4.11 Cantidad de sulfuros de manganeso por área con relación al tiempo.

CARBURO DE CALCIO

Probeta	Tiempo	MnS	CaC ₂	Probeta	Tiempo	MnS	CaC ₂
J	2	0	2	K	4	0	2
E	2	0.6	1.8	F	4	0.8	1.8
O	2	0	1.7	P	4	0.1	1.7
A	2	0.7	1.5	B	4	1.6	1.5

L	6	0	2			0	2
H	6	0.7	1.8	I	8	0.8	1.8
R	6	0.1	1.7			0	1.7
C	6	0.4	1.5	D	8	0.9	1.5

Tabla 4.12 Cantidad de sulfuros de manganeso por área con relación al porcentaje de carburo de calcio

4.2.5 ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis se lo realizó en la empresa HAMSA utilizando un espectrómetro cuyos resultados textuales se muestran a continuación.

Muestra A

%CaC₂ = 1.5; Tiempo de Agitación = 2 minutos

Program: FE-25						01-02-2007 16:59:16			
Comment: Cast iron		FE-115318							
Average (n=1)						Elements: Concentration			
Sample No: Muestra A						Quality:			
Sample Id:									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	>5.04	1.99	0.303	0.101	>0.192	0.075	0.015	0.080	0.005
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	0.005	0.142	<0.003	0.018	0.006	<0.007	<0.004	0.015	0.001
	As	Zr	Ca	Ce	B	Zn	La	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	
\bar{x}	<0.003	<0.001	>0.008	<0.003	0.008	<0.001	-0.028	<85.718	

Muestra B

%CaC₂ = 1.5; Tiempo de Agitación = 4 minutos

Program: FE-25						01-02-2007 16:57:14			
Comment: Cast iron		FE-115318							
Average (n=1)						Elements: Concentration			
Sample No: Muestra B						Quality:			
Sample Id:									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	>5.04	2.10	0.356	0.141	0.120	0.091	0.013	0.076	0.005
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	0.002	0.163	<0.003	0.020	0.007	<0.007	<0.004	0.016	<0.000
	As	Zr	Ca	Ce	B	Zn	La	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	
\bar{x}	<0.003	<0.001	<0.000	<0.003	0.005	<0.001	0.010	<88.620	

Muestra E

%CaC₂ = 1.8; Tiempo de Agitación = 2 minutos

Program: FE-25		FE-115318		01-02-2007 17:01:37					
Comment: Cast iron				Elements: Concentration					
Average (n=1)									
Sample No: Muestra E				Quality:					
Sample Id:									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	3.69	2.48	0.209	0.133	0.067	0.112	0.019	0.110	0.005
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	0.008	0.253	<0.003	0.015	0.009	<0.007	<0.004	0.018	0.001
	As	Zr	Ca	Ce	B	Zn	La	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	
\bar{x}	<0.003	<0.001	<0.000	<0.003	0.003	<0.001	0.002	92.859	

Muestra F

%CaC₂ = 1.8; Tiempo de Agitación = 4 minutos

Program: FE-25		FE-115318		01-02-2007 17:04:36					
Comment: Cast iron				Elements: Concentration					
Average (n=1)									
Sample No: Muestra F				Quality:					
Sample Id:									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	3.15	2.37	0.208	0.176	0.078	0.123	0.024	0.110	0.005
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	0.008	0.253	<0.003	0.017	0.011	<0.007	<0.004	0.019	0.000
	As	Zr	Ca	Ce	B	Zn	La	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	
\bar{x}	<0.003	<0.001	<0.000	<0.003	0.003	<0.001	0.001	93.445	

Muestra R

%CaC₂ = 1.7; Tiempo de Agitación = 6 minutos

Program: FE-25										01-02-2007 17:48:24
Comment: Cast iron		FE-115318								
Average (n=1)										Elements: Concentration
Sample No: Muestra R										Quality:
Sample Id:										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	
\bar{x}	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
	3.67	2.11	0.54	0.144	0.035	0.228	0.042	0.170	0.007	
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg	
\bar{x}	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
	0.004	0.294	<0.003	0.022	0.011	<0.007	<0.004	0.009	<0.000	
	As	Zr	Ca	Ce	B	Zn	La	Fe		
\bar{x}	%	%	%	%	%	%	%	%		
	<0.003	<0.001	<0.000	<0.003	0.003	0.004	0.002	<92.706		

Muestra S

Muestra sin desulfurar

Program: FE-25										01-02-2007 17:40:21
Comment: Cast iron		FE-115318								
Average (n=1)										Elements: Concentration
Sample No: Muestra S										Quality:
Sample Id:										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	
\bar{x}	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
	3.51	2.17	0.339	0.231	0.108	0.107	0.024	0.107	0.014	
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg	
\bar{x}	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
	0.009	1.46	<0.003	0.022	0.013	<0.007	<0.004	0.014	0.001	
	As	Zr	Ca	Ce	B	Zn	La	Fe		
\bar{x}	%	%	%	%	%	%	%	%		
	<0.003	<0.001	<0.000	<0.003	0.005	>0.050	0.002	91.775		

En la tabla 4.13 se detallan los porcentajes de los elementos más importantes para el análisis.

	A	B	E	F	R	S
C	5.04	5.04	3.69	3.15	3.67	3.51
S	0.192	0.12	0.067	0.078	0.035	0.108
Si	1.99	2.1	2.48	2.37	2.11	2.17
Mn	0.303	0.356	0.209	0.208	0.54	0.339
Cr	0.075	0.091	0.112	0.123	0.228	0.107
Ni	0.08	0.076	0.11	0.11	0.17	0.107
Cu	0.142	0.163	0.253	0.253	0.294	1.46
Ti	0.018	0.02	0.015	0.017	0.022	0.022
Fe	85.72	88.62	92.86	93.445	92.706	91.78
Ca	0.008	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00

Tabla 4.13 Análisis químico

Mediante el análisis químico se determinó que a pesar del cuidado que se dio para mantener un mismo tipo de chatarra existió una variabilidad en la composición química de cada colada, esta diferencia es muy amplia por lo que no es comparable entre probetas de diferentes coladas por esta razón se compara entre las probetas A y B; E y F; R y S. La variación entre cada colada hace que existan diferentes microestructuras en cada probeta.

Las probetas A y B tienen una diferencia pronunciada en el contenido de carbono y azufre así como en otros elementos en relación con el resto de probetas, siendo estas provenientes de una misma colada, en la que se obtiene una reducción del azufre de 0,192 % a 0,12% en tiempos de agitación de 2 a 4 minutos, demostrando de esta manera que el proceso de desulfuración es efectivo.

Por otro lado la existencia de Calcio en la probeta A indica la falta de agitación al tiempo de 2 minutos lo que no ocurre con una agitación de 4 minutos. Al analizar las probetas S (sin desulfurar) y R en las cuales se observa una reducción de azufre de 0.108% a 0.035 % en un tiempo de 6 minutos con un porcentaje de 1.7 % de CaC_2 reafirma que el proceso de desulfuración con agitación de gas inerte es efectivo.

Se observa que en las muestras E y F existe una reducción en la cantidad de azufre con respecto a la probeta base S, en la probeta F con relación a la E el proceso de desulfuración no mejora al aumentar el tiempo de agitación debido a la refosforación y resulturación que sufre la colada. En esta probeta existe un fuerte cambio químico que produce el quemado de carbono y silicio, y la absorción de fósforo y azufre produciendo otro tipo de grafito.

La resulturación comienza cuando la escoria disminuye su viscosidad por el aumento de temperatura en el instante que se prende el equipo por segunda vez, para sacar una probeta muestra. La probeta E por su mayor cantidad de carbono y silicio presenta flóculos de mayor dimensión, siendo esta la razón para que su dureza sea mayor que F.

La probeta S y R tiene presencia de Titáneo el cual es un buen grafitisante.

Existe fósforo y cobre en la probeta S siendo el cobre un buen endurecedor por esto la probeta S tiene buena dureza.

La cantidad de desulfurante y el modo de ingresarlo a la colada es un punto de importancia. Siendo el 1.5% de Carburo de calcio la cantidad necesaria para empezar a desulfurar. Notándose por medio de la experimentación que a mayor cantidad de carburo de calcio existe mayor escoria la cual dificulta en el proceso de desulfuración y de colado.

El grosor del tipo de pieza a realizarse es importante debido a que si es de un espesor muy pequeño el enfriamiento es muy brusco y su microestructura cambia volviéndole débil, esto concuerda con la teoría según el diagrama de HEINBAUER (Anexo 6).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La desulfuración con agitación de argón permite tener una buena reacción entre el desulfurante y el metal fundido, eliminando la existencia de calcio dentro del metal. El tiempo necesario que se debe agitar esta entre los 4 a 8 minutos dependiendo de la cantidad de material fundido, debe estar determinado el caudal con el que se agite siendo este el suficiente para que no existan demasiadas salpicaduras. En el estudio la cantidad de material fundido es de 5Kg por esta razón el tiempo recomendable es de 4 minutos y un caudal promedio de $0.1982 \text{ m}^3/\text{h}$ ($7 \text{ pies}^3/\text{h}$).
- No debe existir procesos intermedios de desulfuración, para evitar la resulfuración y refosfuración que se produce el instante que el metal comienza a recuperar la temperatura de fusión, por el principio que en el proceso de desulfuración se produce una gran cantidad de escoria, esta empieza nuevamente a fundirse y mezclarse con el metal logrando que se produzca una fuerte actividad química entre la escoria remanente y el metal, logrando así que la cantidad de azufre se reabsorba.
- El carburo de calcio es un excelente desulfurador, ya que permite eliminar 3.65 gramos de azufre (0.073%) con 85 gramos(1.5%) de desulfurante en un tiempo de 4 minutos con un contenido de 5.4gramos de azufre (0.108), obteniendo valores de azufre menores a 0.035%.
- Las temperaturas a las que se afina el material y las del colado son muy importantes para controlar el proceso de desulfuración.
- Se determina que el tiempo de desulfuración debe ser único y no se puede detener la agitación antes de concluir con el proceso.

- El proceso de desulfuración por el método de agitación utilizado, causa una sensible disminución de la temperatura y por lo tanto, para el colado la fundición requiere subir la temperatura para mejorar la colabilidad.
- La inyección de argón a un caudal promedio de 0,1982 m³/h, en un tiempo de 6 minutos se obtuvo una disminución de los porcentajes de azufre y fósforo del 0,09% y 0,073% respectivamente.
- Con el proceso de desulfuración se mejoró la resistencia a la tracción y la maquinabilidad de las piezas fundidas, eso se debe a la reducción de sulfuros existentes y a la presencia de concentraciones de perlita y ferrita.
- La elección de la chatarra influye en el porcentaje de desulfurante a utilizar. Si la chatarra utilizada posee mayor contenido de azufre, debe ser mayor el porcentaje de desulfurante como muestra los resultados del análisis químico de las probetas A y B.
- En la literatura el proceso de desulfuración se encuentra descrito con las respectivas estructuras y propiedades de los hierros desulfurados de un modo cualitativo, no se muestran modelos matemáticos que permitan cuantificar este efecto sobre las propiedades mecánicas y tribológicas, así como para algunos elementos cuantificables de la microestructura.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para un buen proceso de desulfuración se debe usar un analizador químico, con el cual se pueda determinar la composición química de la colada antes del proceso de afino, con lo cual se hallará la cantidad adecuada y correcta de carburo de calcio a utilizarse.
- El uso del equipo adecuado para obtener temperaturas.

- El molde de las piezas deben ser realizadas con control de la humedad para evitar que existan poros y afecte a los ensayos de tracción y dureza.
- Se debe realizar el moldeo con buenos montantes con lo que se evita los problemas de rechupes en la pieza y la escoria quede retenida en estos.
- Se debe agregar el desulfurante de forma lenta y en pocas cantidades para evitar que al reaccionar con el metal, se forme el efecto volcán desperdiándose buena cantidad de desulfurante, ya que por la reacción trata de salir gases que hacen que se desborde para los alrededores del horno especialmente cuando se trabaja con crisoles pequeños.
- La agitación con la lanza de inmersión se debe tratar de introducir hasta el fondo del crisol o de la cuchara, la mayor cantidad de carburo de calcio (desulfurante) para que la reacción sea la más adecuada.
- Se recomienda colocar una tapa con la perforación para el ingreso de la lanza de agitación en el horno o cuchara de afinado para evitar accidentes por salpicaduras de metal fundido.
- El retiro de la escoria enseguida de la desulfuración es muy importante, para evitar que el azufre ingrese nuevamente al metal como sucedió con las probetas en el análisis anterior las que se aumentó el contenido de sulfuros de manganeso. Este aumento se debió también por exceso de tiempo de agitación con la cual se le dio tiempo al material para que absorba azufre de la escoria y comience la oxidación.
- Es importante mantener el azufre en los valores mínimos permitidos por la especificación, ya que se pudo observar que la colabilidad empeora a mayor contenido de azufre.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- DOYLE Lawrence E.; Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros; Editorial Prentice Hall; México; 2001
- 2.- DUPONCHELLE L.; Manual del Fundidor; Edición Gustavo GILL S.A.; EEUU; 1972
- 3.- <http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-tml/estructuras%20de%20fundiciones.html>
- 4.- APRAIZ B. José; Fundiciones; Tercera Edición Editorial Dossat; Madrid; 1971.
- 5.- MANTILLA Wilson; Texto guía; Quito; Septiembre de 1998
- 6.- MANGONON Pat. L. Phd., PE, FASMAN; Ciencia de Materiales Selección y Diseño; Editorial Assistant Meg Weist; México; 2001
- 7.- <http://www.turkdokum.com/turkishfoundryindustry.htm>
- 8.- AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY; El horno de cubilote y su Operación; Compañía editorial Continental; México; 1980
- 9.- <http://www.steeluniversity.org/content/html/spa/default.asp?catid=123&pageid=-1733157149>
- 10.- http://www.carbuos.com/htm/your_business/Metals_Production_Refining.htm#03
- 11.- <http://www.cedie.com/fundiciones/carbuos.htm>
- 12.- [http://www .Sideral minerales s.a.](http://www.Sideral.minerales.s.a.)
- 13.- <httpwww.metaloides.com.mxaplicaciones.htm#acero1>
- 14.- <http://www .Wikipedia la enciclopedia libre>
- 15.- http://www.aprendizaje.com.mx/Curso/Proceso1/Temario1_III.html

- 16.- <http://energía3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=495>
- 17.- CLOW, The Effect and Control of Sulfur in Iron, Transactions of the American Foundrymen 's Society, Vol 87, 1979
- 18.- KARSAY, Stephen Istvan; Ductile Iron Production Practices; American Foundrymen's Society; EEUU; 1979.
- 19.- [http:// MineraNet.com.ar](http://MineraNet.com.ar)
- 20.- BÉJAR, Marcelo; Obtención de hierro nodular en horno para crisol; Tesis EPN; 1981.
- 21.- NAVARRO ALCACER, José; Fundición de hierro Fundición gris de alto valor; Editorial Dossat; España – Madrid; 1947
- 22.- http://html.monografias.com/fundición_1.html
- 23.- <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials4.html>
- 24.- <http://www.plazatecnologica.com/pt/php/foro.php?topic=021&sid=29category=Hornos%20de%20Induccion>
- 25.- <http://www.monografias.com/trabajos15/hierros-aleados/hierros-aleados.shtml>

ANEXOS

INDICE DE ANEXOS

- ANEXO 1
NORMAS ASTM A48
- ANEXO 2
NORMAS ASTM E10
- ANEXO 3
NORMAS ASTM A27
- ANEXO 4
TAMAÑO TIPO Y FORMA DE LAS FUNDICIONES GRISES
- ANEXO 5
MICROESTRUCTURAS
- ANEXO 6
DIAGRAMA DE HEINBAUER

ANEXO 1

NORMAS ASTM A48

Standard Specification for GRAY IRON CASTINGS¹

This standard is issued under the fixed designation A 48; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

The specification has been approved for use in place of QQ-1-652 by agencies of the Department of Defense and for listing in the DOD index of Specifications and Standards.

1. Scope

1.1 This specification covers gray iron castings intended for general engineering use where tensile strength is a major consideration. Castings are classified on the basis of the tensile strength of the iron in separately cast test bars.

1.1.1 This specification subordinates chemical composition to tensile strength.

1.2 No precise quantitative relationship can be stated between the properties of iron in the various locations of the same casting and those of a test bar cast from the same iron (see Appendix).

1.3 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

2. Applicable Documents

2.1 ASTM Standards:

A 644 Definitions of Terms Relating to Iron Castings²

2.2 Military Standard:

MIL-STD-129 Marking for Shipment and Storage³

2.3 Federal Standard:

Federal Standard No. 123 Marking for Shipment (Civil Agencies)³

3. Classification

3.1 Castings ordered and produced in accordance with this specification are classified into a number of grades based on the properties of separately cast test bars (Table 1). Each class is designated by a number followed by a letter. The number indicates the minimum tensile strength of the separately cast test bar, and the letter indicates the size of the test bar. Examples of proper designations are as follows:

Gray Iron Castings, ASTM Specification A 48, Class 30B.

Gray Iron Castings, ASTM Specification A 48, Class 40C.

4. Terminology

4.1 Definitions for many terms common to gray iron castings are found in Definitions A 644.

5. Ordering Information

5.1 Orders for material to this specification shall include the following information:

5.1.1 ASTM designation number and year of issue.

5.1.2 Class of iron required (see 3.1 and Table 1).

5.1.3 The size of the separately cast test bar (letter classification—A, B, C, or S) that best represents the thickness of the controlling section of the casting (see Table 2).

5.1.4 The tension test specimen (B or C) to be machined from test bar C (see 9.3, Table 3, and Fig. 2).

5.1.5 The tension test specimen to be machined from test bar S (see 9.4, Table 3, and Fig. 2).

5.1.6 Lot size (see Section 12).

5.1.7 Special requirements (see Section 13).

5.1.8 Saving tested specimens or unbroken test bars (see 17.1).

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee A-4 on Iron Castings and is the direct responsibility of Subcommittee A04.01 on Gray Iron Castings.

Current edition approved Feb. 25, 1983. Published October 1983. Originally published as A 48-4. Last previous edition A 48-76.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02.

³ Available from Naval Publications and Forms Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120.

TABLE 1 Requirements for Tensile Strength of Gray Cast Irons in Separately Cast Test Bars

Class	Tensile Strength, min, ksi (MPa)	Nominal Test Bar Diameter, in. (mm)
No. 20 A	20 (138)	0.88 (22.4)
No. 20 B		1.2 (30.5)
No. 20 C		2.0 (50.8)
No. 20 S		Bars S ⁴
No. 25 A	25 (172)	0.88 (22.4)
No. 25 B		1.2 (30.5)
No. 25 C		2.0 (50.8)
No. 25 S		Bars S ⁴
No. 30 A	30 (207)	0.88 (22.4)
No. 30 B		1.2 (30.5)
No. 30 C		2.0 (50.8)
No. 30 S		Bars S ⁴
No. 35 A	35 (241)	0.88 (22.4)
No. 35 B		1.2 (30.5)
No. 35 C		2.0 (50.8)
No. 35 S		Bars S ⁴
No. 40 A	40 (276)	0.88 (22.4)
No. 40 B		1.2 (30.5)
No. 40 C		2.0 (50.8)
No. 40 S		Bars S ⁴
No. 45 A	45 (310)	0.88 (22.4)
No. 45 B		1.2 (30.5)
No. 45 C		2.0 (50.8)
No. 45 S		Bars S ⁴
No. 50 A	50 (345)	0.88 (22.4)
No. 50 B		1.2 (30.5)
No. 50 C		2.0 (50.8)
No. 50 S		Bars S ⁴
No. 55 A	55 (379)	0.88 (22.4)
No. 55 B		1.2 (30.5)
No. 55 C		2.0 (50.8)
No. 55 S		Bars S ⁴
No. 60 A	60 (414)	0.88 (22.4)
No. 60 B		1.2 (30.5)
No. 60 C		2.0 (50.8)
No. 60 S		Bars S ⁴

⁴ All dimensions of test bar S shall be as agreed upon between the manufacturer and the purchaser.

TABLE 2 Separately Cast Test Bars for Use When a Specific Correlation Has Not Been Established Between the Test Bar and the Casting

Thickness of the Wall of the Controlling Section of the Casting, in. (mm)	Test Bar
Under 0.25 (6)	S
0.25 to 0.50 (6 to 12)	A
0.51 to 1.00 (13 to 25)	B
1.01 to 2 (26 to 50)	C
Over 2 (50)	S

ANEXO 2

NORMAS ASTM E10

Standard Test Method for BRINELL HARDNESS OF METALLIC MATERIALS¹

This standard is issued under the fixed designation E 10; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This method has been approved for use by agencies of the Department of Defense to replace method 242.1 of Federal Test Method Standard No. 151b and for listing in DoD Index of Specifications and Standards.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the Brinell hardness of metallic materials, including methods for the verification of Brinell hardness testing machines (Part B) and the calibration of standardized hardness test blocks (Part C). Two general classes of standard tests are recognized:

1.1.1 *Verification, Laboratory, or Referee Tests*, where a high degree of accuracy is required, and

1.1.2 *Routine Tests*, where a somewhat lower degree of accuracy is permissible.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Applicable Documents

2.1 *ASTM Standards:*

E 4 Practices for Load Verification of Testing Machines²

E 140 Hardness Conversion Tables for Metals (Relationship Between Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Rockwell Superficial Hardness, and Knoop Hardness)²

3. Definitions

3.1 *Brinell hardness test*—an indentation hardness test using calibrated machines to force

a hard ball, under specified conditions, into the surface of the material under test and to measure the diameter of the resulting impression after removal of the load.

3.2 *Brinell hardness number, HB*—a number related to the applied load and to the surface area of the permanent impression made by a ball indenter computed from the equation:

$$HB = 2P/[\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})]$$

where:

P = applied load, kgf,

D = diameter of the ball, mm, and

d = mean diameter of the impression, mm.

NOTE 1—It is a recognized experimental fact that the Brinell hardness number of nearly all materials is influenced by the magnitude of the indenting load, the diameter of the ball indenter, and the elastic characteristics of the ball. In general, a ball 10 mm in diameter of suitable composition should be used with applied loads 3000, 1500, or 500 kgf, depending upon the hardness of the material to be tested. Although Brinell hardness numbers may vary with the test load used with the 10-mm ball, when smaller balls are used for tests on thin specimens, test results will generally be in agreement with the 10-mm ball test when the ratio of the test load to the square of the ball diameter is held constant (see 3.2 and 6.1).

In Table 1 are given the Brinell hardness numbers corresponding to various diameters of impression for 3000, 1500, and 500-kgf loads, making it unnecessary to calculate for each test the value of the Brinell hardness number by the above equation when these loads are used with a ball 10 mm in diameter.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E-28 on Mechanical Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E 28.06 on Indentation Hardness Testing.

Current edition approved April 27, 1984. Published June 1984. Originally published as E 10 - 24 T. Last previous edition E 10 - 78.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

17. Standardizing Procedure

17.1 The standardized blocks shall be calibrated on a Brinell hardness testing machine verified in accordance with the requirements of 14.1.

17.2 The mechanism that controls the application of the load shall ensure that the speed of approach immediately before the ball touches the specimen and the speed of penetration does not exceed 1 mm/s.

17.3 The full load shall be applied for 15 s.

18. Indenter

18.1 A new steel ball conforming to the requirements of 14.1.2 shall be used for calibrating standardized hardness test blocks.

Tabla 1 Brinell Hardness Numbers.

TABLE 1 Continued

Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number			Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number			Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number						
	500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load		500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load		500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load				
3.20	60.5	182	363	3.50	50.3	151	302	3.80	42.4	127	255	4.10	36.2	109	217
3.21	60.1	180	361	3.51	50.0	150	300	3.81	42.2	127	253	4.11	36.0	108	216
3.22	59.8	179	359	3.52	49.7	149	298	3.82	42.0	126	252	4.12	35.8	108	215
3.23	59.4	178	356	3.53	49.4	148	297	3.83	41.7	125	250	4.13	35.7	107	214
3.24	59.0	177	354	3.54	49.2	147	295	3.84	41.5	125	249	4.14	35.5	106	213
3.25	58.6	176	352	3.55	48.9	147	293	3.85	41.3	124	248	4.15	35.3	106	212
3.26	58.3	175	350	3.56	48.6	146	292	3.86	41.1	123	246	4.16	35.1	105	211
3.27	57.9	174	347	3.57	48.3	145	290	3.87	40.9	123	245	4.17	34.9	105	210
3.28	57.5	173	345	3.58	48.0	144	288	3.88	40.6	122	244	4.18	34.8	104	209
3.29	57.2	172	343	3.59	47.7	143	286	3.89	40.4	121	242	4.19	34.6	104	208
3.30	56.8	170	341	3.60	47.5	142	285	3.90	40.2	121	241	4.20	34.4	103	207
3.31	56.5	169	339	3.61	47.2	142	283	3.91	40.0	120	240	4.21	34.2	103	205
3.32	56.1	168	337	3.62	46.9	141	282	3.92	39.8	119	239	4.22	34.1	102	204
3.33	55.8	167	335	3.63	46.7	140	280	3.93	39.6	119	237	4.23	33.9	102	203
3.34	55.4	166	333	3.64	46.4	139	278	3.94	39.4	118	236	4.24	33.7	101	202
3.35	55.1	165	331	3.65	46.1	138	277	3.95	39.1	117	235	4.25	33.6	101	201
3.36	54.8	164	329	3.66	45.9	138	275	3.96	38.9	117	234	4.26	33.4	100	200
3.37	54.4	163	326	3.67	45.6	137	274	3.97	38.7	116	232	4.27	33.2	99.7	199
3.38	54.1	162	325	3.68	45.4	136	272	3.98	38.5	116	231	4.28	33.1	99.2	198
3.39	53.8	161	323	3.69	45.1	135	271	3.99	38.3	115	230	4.29	32.9	98.8	198
3.40	53.4	160	321	3.70	44.9	135	269	4.00	38.1	114	229	4.30	32.8	98.3	197
3.41	53.1	159	319	3.71	44.6	134	268	4.01	37.9	114	228	4.31	32.6	97.8	196
3.42	52.8	158	317	3.72	44.4	133	266	4.02	37.7	113	226	4.32	32.4	97.3	195
3.43	52.5	157	315	3.73	44.1	132	265	4.03	37.5	113	225	4.33	32.3	96.8	194
3.44	52.2	156	313	3.74	43.9	132	263	4.04	37.3	112	224	4.34	32.1	96.4	193
3.45	51.8	156	311	3.75	43.6	131	262	4.05	37.1	111	223	4.35	32.0	95.9	192
3.46	51.5	155	309	3.76	43.4	130	260	4.06	37.0	111	222	4.36	31.8	95.5	191
3.47	51.2	154	307	3.77	43.1	129	259	4.07	36.8	110	221	4.37	31.7	95.0	190
3.48	50.9	153	306	3.78	42.9	129	257	4.08	36.6	110	219	4.38	31.5	94.5	189
3.49	50.6	152	304	3.79	42.7	128	256	4.09	36.4	109	218	4.39	31.4	94.1	188

* Prepared by the Engineering Mechanics Section, National Bureau of Standards.

ANEXO 3

NORMAS ASTM A27

Standard Method for EVALUATING THE MICROSTRUCTURE OF GRAPHITE IN IRON CASTINGS¹

This standard is issued under the fixed designation A 247; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

¹NOTE—Section 2 was editorially added and subsequent sections renumbered in February 1984.

1. Scope

1.1 This method covers the classification of graphite in cast irons in terms of type, distribution, and size. This method is intended to be applicable for all iron-carbon alloys containing graphite particles, and may be applied to gray irons, malleable irons, and the ductile (nodular) irons.

1.2 The reference standards included in this method are in no way to be construed as specifications. In an appropriate specification for a specific material where graphite microstructure is an important consideration this method may be used as a reference to define concisely the graphite microstructure required.

1.3 These standards are offered primarily to permit accurate reporting of microstructures of cast irons and to facilitate the comparison of reports by different laboratories or investigators.

1.4 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Applicable Document

2.1 ASTM Standard:

E 3 Methods for Preparation of Metallographic Specimens²

3. Summary of Method

3.1 The reference diagrams included in this standard form the basis for classification. Char-

acteristic features of graphite particles are designated by numerals and letters. Type, distribution, and size of observed graphite are compared with the idealized microstructures in the standard charts and rated accordingly as closely as possible to the equal or similar microstructures in the charts.

4. Significance and Use

4.1 The comparison of observed graphite particles with the structures shown in the charts give only purely descriptive information on the type, distribution, and size of the graphite in the sample being evaluated. It does not indicate except in a very broad way the origin of the graphite, or the suitability of the iron-carbon alloy for a particular service.

5. Test Specimens or Samples

5.1 The preferred sample is a section cut from an actual casting that is being evaluated. When this is impractical, a test lug or projection often can be cast attached to the casting and sawed or broken off to be used as the sample. If neither of these methods is convenient, microscopical test coupons, such as that recommended by the Ductile Iron Research Committee (12K) of the American Foundrymen's Society³ should be cast from metal representative of the castings poured.

¹ This method is under the jurisdiction of ASTM Committee A-4 on Iron Castings and is the direct responsibility of Subcommittee A04.21 on Testing.

Current edition effective Aug. 25, 1967. Originally issued 1941. Replaces A 247 - 47.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.03.

³ *Transactions*, American Foundrymen's Society, 1960, p. 655.

6. Polishing

6.1 Grinding and polishing may follow the usual accepted metallographic procedures as covered in Methods E 3, except that care must be taken that the graphite is retained at the polished surface and not torn or dragged out. Use of diamond powder polishing compound in one of the final stages of polishing is very effective in retaining the graphite at the polished surface.

7. Classification of Graphite Form with Chart

7.1 The graphite form type chart (Plate I)⁴ is used as a reference standard by scanning the polished specimen under the microscope and noting the graphite forms in the microstructure that more nearly correspond to type designations on the chart.

7.2 Type I is the normal and usually desirable graphite form in ductile iron, although the presence of Type II graphite forms has little or no adverse effect on properties. Graphite forms represented by Types IV through VI often occur in ductile iron in conjunction with Types I and II. The percentages of each graphite type are estimated by observation, or better, by counting the particles of each type. Types present in a sample are to be reported in percentages to total 100. Any convenient magnification that clearly reveals the graphite form may be used.

7.3 Type III is the graphite form most often seen in malleable iron castings after annealing. Some malleable irons may contain Types I or II graphite particles also.

7.4 Type VII is the flake graphite form usually seen in gray iron.

8. Classification of Graphite Distribution with Chart

8.1 The graphite distribution chart (Plate II)⁴ is useful principally in rating flake graphite, Type VII, distributions in gray cast iron. Occasionally, however, graphite in malleable or ductile iron may occur in a nonrandom distribution pattern which the distributions B to E may be used to describe.

9. Classification of Graphite Size by Chart

9.1 Two series of size charts, one for flake graphite, and one for nodules, are shown in Plate III⁴ to facilitate comparisons. At exactly 100 diameters magnification the *maximum* dimension

of the graphite particles for the various size classes are shown in Table I.

9.2 For direct comparison with the size classes in Plate III, the specimen to be evaluated should be projected on the ground glass screen, or photographed, at a magnification of exactly 100 diameters. Usually visual comparison with the chart is adequate to define the size class. If carefully calibrated, ocular scales may be used to measure the serpentine length dimension of flakes or the diameter of nodules. Where a mixture of one or more sizes occurs in the same sample, the sizes may be reported as percentages of the total graphite area represented by the sizes involved. It is a common practice in malleable iron to use nodule count per unit area instead of a comparison chart as given here. Nodule count, with known free carbon content, is a measure of calculated average nodule area.

10. Report of Graphite Microstructure

10.1 To report the microstructure of graphite in cast iron the headings to be used are as follows: Sample identification; graphite form type or types; graphite distribution; graphite size class.

10.2 Graphite type, or types, is designated by a Roman numeral I through VII. Graphite distribution is designated by a capital letter A through E. Graphite size is designated by an Arabic numeral 1 through 8.

10.3 Graphite distribution is always designated for flake graphite irons, but may be omitted for malleable and ductile iron.

10.3.1 For example, a typical gray iron of normal graphite structure might be designated VII A4. If eutectiform graphite is present, the rating might be VII D7. Mixtures of these two may be described by giving both ratings with appropriate percentages, 70 % VII A4, 30 % VII D7.

10.3.2 A high-quality ductile iron could be designated I6. A slightly inferior ductile iron, with somewhat insufficient nodulizing alloy, might be 70 % I6, 30 % IV5.

10.3.3 Graphite in malleable irons may be similarly designated as Types III, II, or I and the size from the nodular size chart.

⁴ Plates I, II, and III may be obtained from ASTM Headquarters. Order PCN 12-102470-09.

TABLE 1 Graphite Size

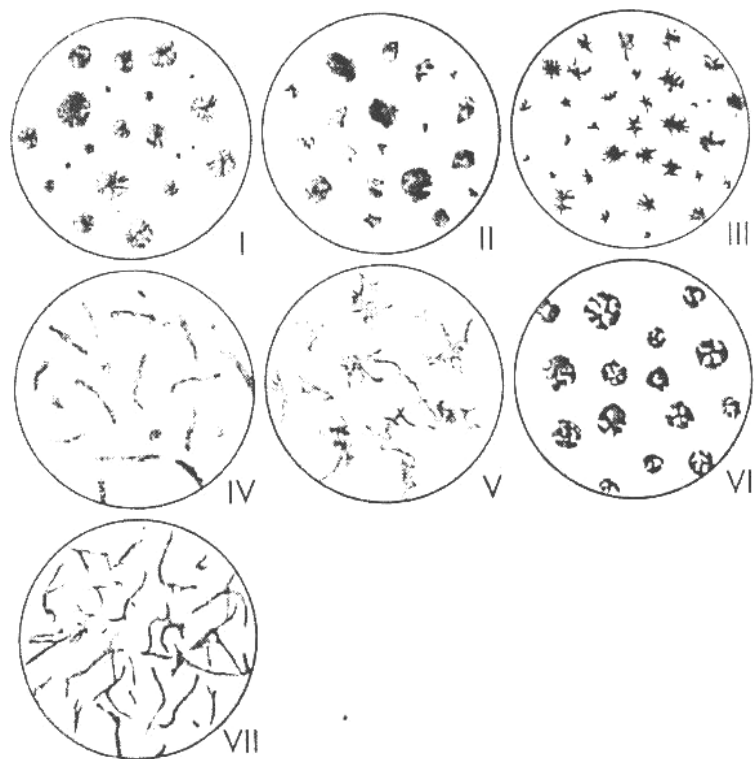
Size Class	Maximum Dimension at \times 100, mm ⁴
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

⁴ The gradation of sizes shown in each size class from the maximum dimension were computer calculated at the National Bureau of Standards using data obtained from actual micrographs.⁵

⁵ Wyman, L. L., and Moore, G. A., "Quantitative Metallographic Evaluations of Graphite Microstructures," *Modern Castings*, Vol 43, No. 1, Jan. 1963, p. 7.

ANEXO 4

TAMAÑO TIPO Y FORMA DE LAS FUNDICIONES GRISES



ANEXO 5

MICROESTRUCTURAS

PROBETA A

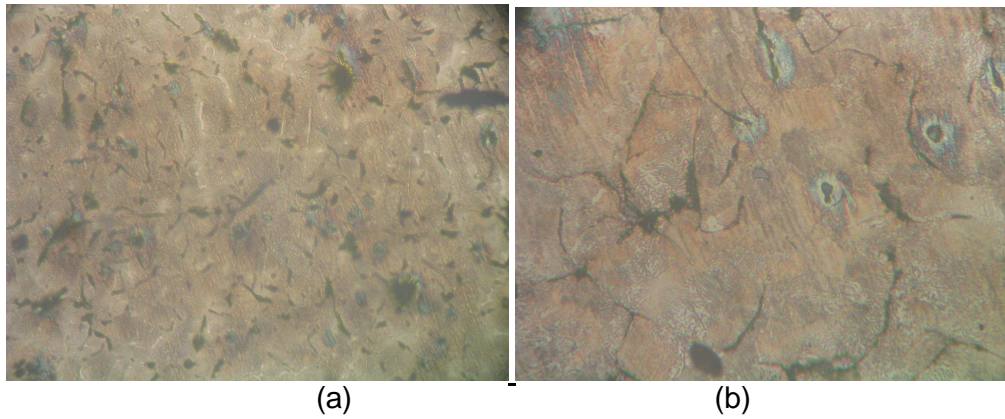


Figura A.1 Microestructura de la probeta A. (a) 100x y (b) 400x

A	%
Ms	0.67
Ferrita	6.78
Grafito	37.33
Perlita	49.89
Fosfuro de hierro	0.33

Tabla A.1 Análisis cuantitativo por área de la probeta A

PROBETA B

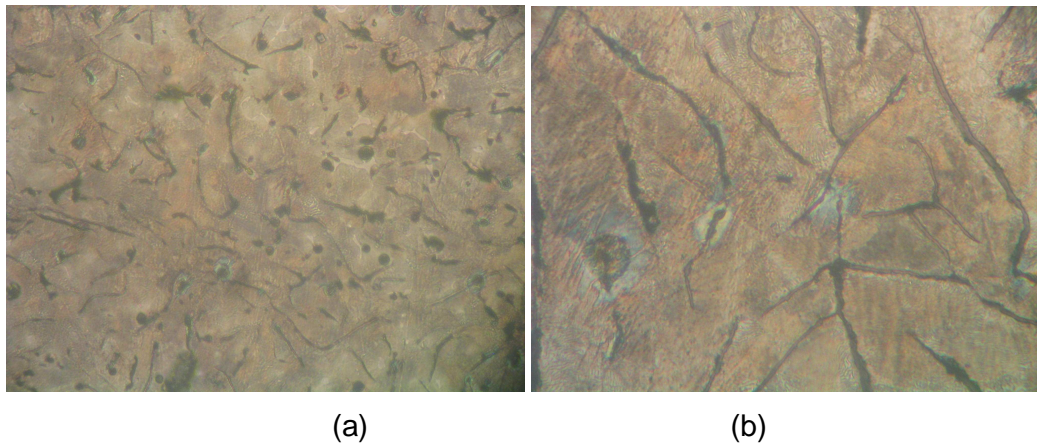


Figura A.2 Microestructura de la probeta B. (a) 100x y (b) 400x

B	%
MnS	0.8
Ferrita	4.1
Grafito	33.6
Perlita	59.6
Fosfuro de hierro	1.2

Tabla A.2 Análisis cuantitativo por área de la probeta B

PROBETA C

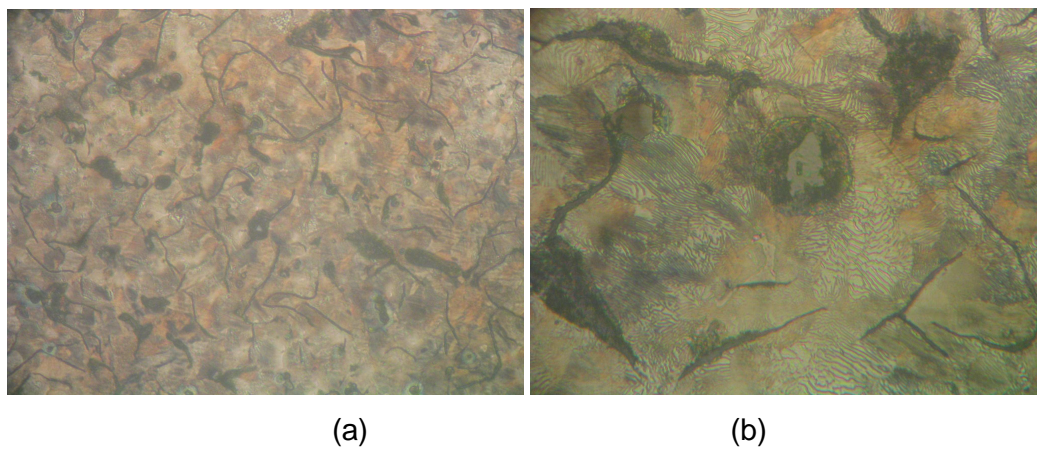


Figura A.3 Microestructura de la probeta C. (a) 100x y (b) 400x

C	%
MnS	0.4
Ferrita	0.5
Grafito	40.3
Perlita	58.6
Fosfuro de hierro	0.2

Tabla A.3 Análisis cuantitativo por área de la probeta C

PROBETA D

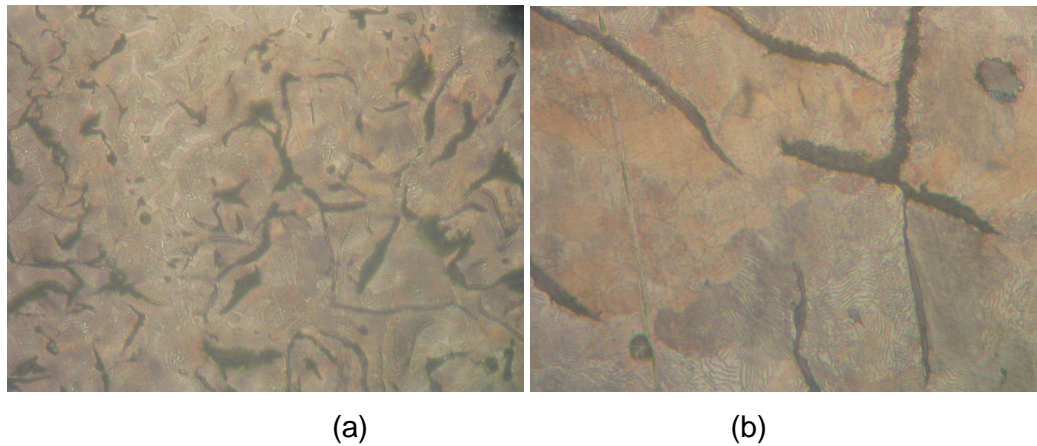


Figura A.4 Microestructura de la probeta D. (a) 100x y (b) 400x

D	%
MnS	0.9
Ferrita	0.0
Grafito	30.6
Perlita	67.8
Fosfuro de hierro	0.8

Tabla A.4 Análisis cuantitativo por área de la probeta D

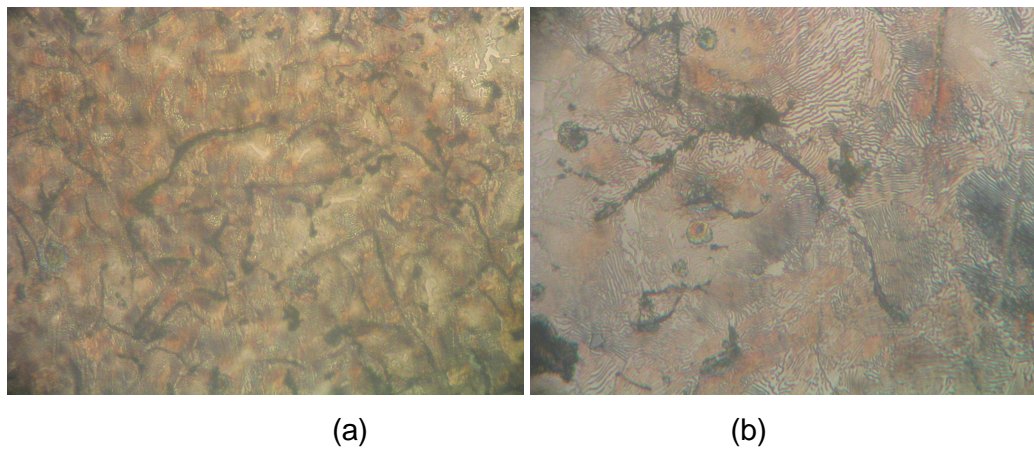
PROBETA E

Figura A.5 Microestructura de la probeta E. (a) 100x y (b) 400x

E	%
MnS	0.6
Ferrita	0.4
Grafito	31.1
Perlita	67.0
Fosfuro de hierro	0.9

Tabla A.5 Análisis cuantitativo por área de la probeta E

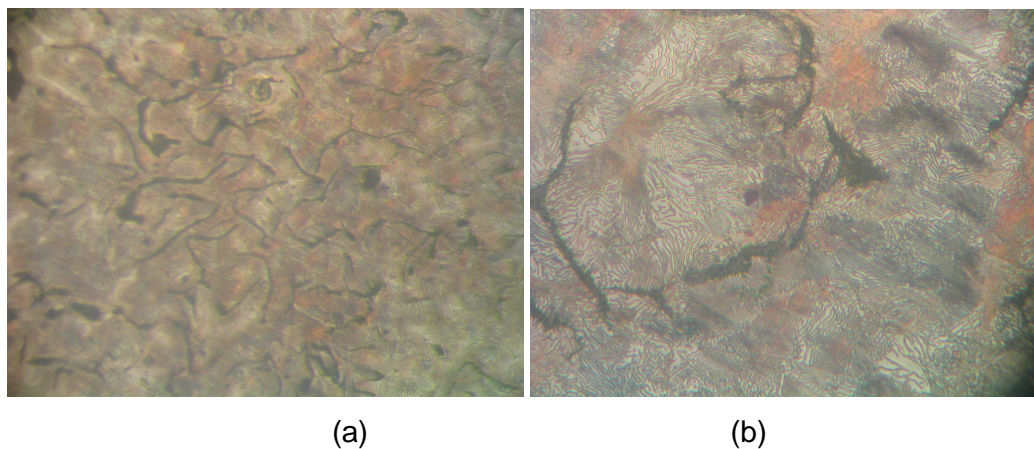
PROBETA E

Figura A.6 Microestructura de la probeta F. (a) 100x y (b) 400x

F	%
MnS	0.8
Ferrita	0.0
Grafito	30.6
Perlita	68.1
Fosfuro de hierro	0.6

Tabla A.6 Análisis cuantitativo por área de la probeta F

PROBETA H

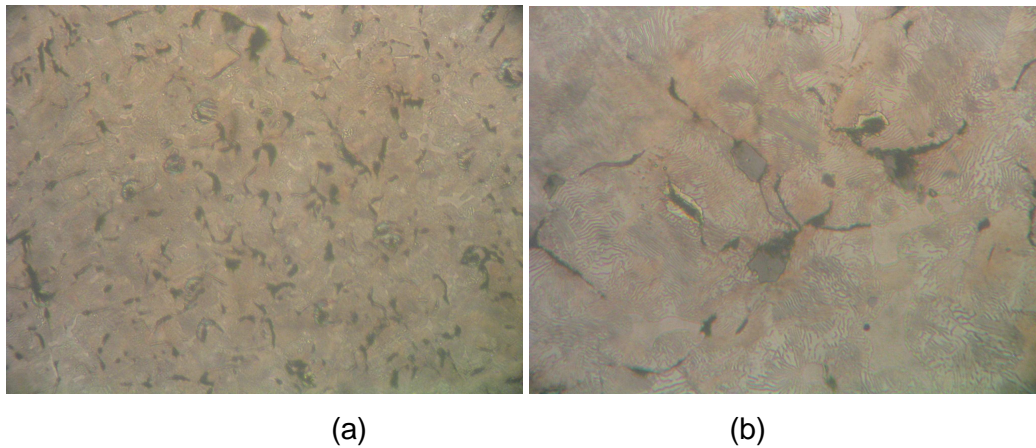
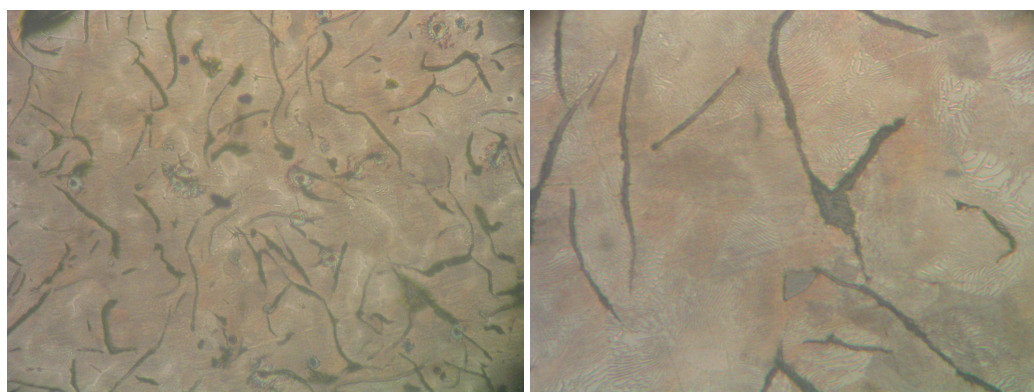


Figura A.7 Microestructura de la probeta H. (a) 100x y (b) 400x

H	%
MnS	0.7
Ferrita	4.2
Grafito	25.6
Perlita	69.4
Fosfuro de hierro	0.3

Tabla A.7 Análisis cuantitativo por área de la probeta H

PROBETA I

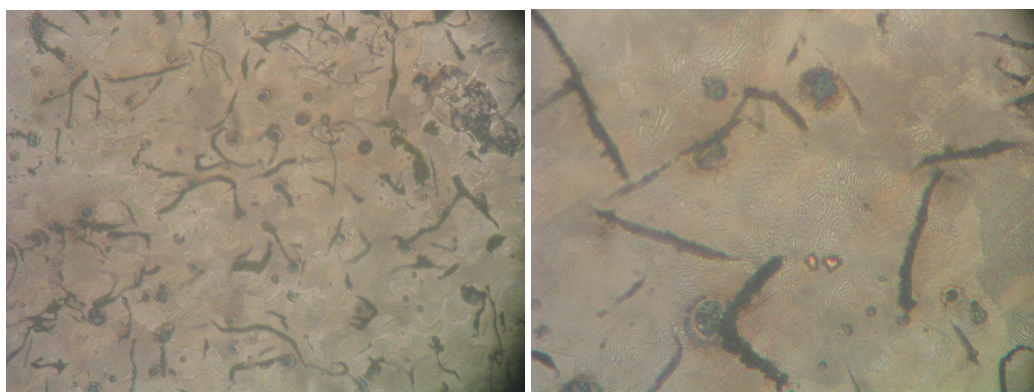
(a)

(b)

Figura A.8 Microestructura de la probeta I. (a) 100x y (b) 400x

I	%
MnS	0.8
Ferrita	3.2
Grafito	32.2
Perlita	63.4
Fosfuro de hierro	0.4

Tabla A.8 Análisis cuantitativo por área de la probeta I

PROBETA J

(a)

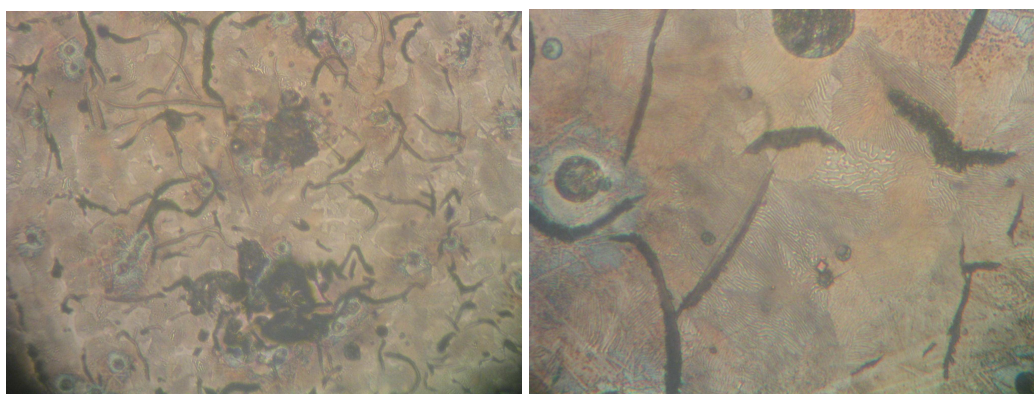
(b)

Figura A.9 Microestructura de la probeta J. (a) 100x y (b) 400x

J	%
MnS	0.0
Ferrita	5.8
Grafito	37.2
Perlita	56.8
Fosfuro de hierro	0.1

Tabla A.9 Análisis cuantitativo por área de la probeta J

PROBETA K



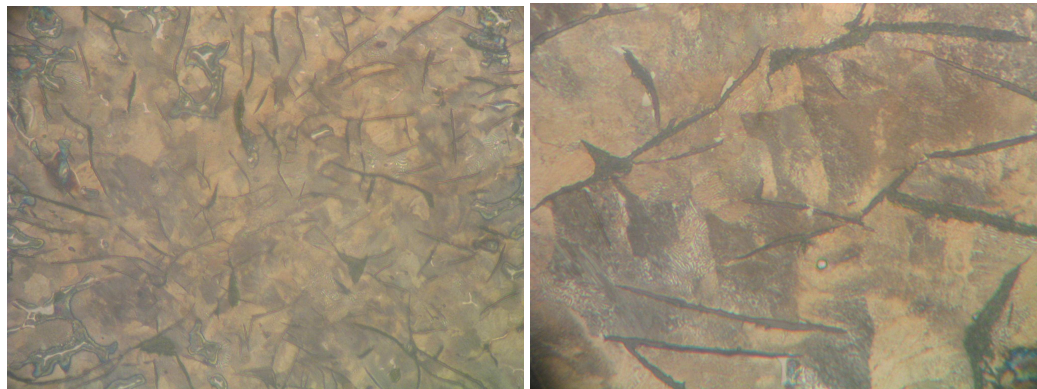
(a)

(b)

Figura A.10 Microestructura de la probeta K. (a) 100x y (b) 400x

K	%
MnS	0.0
Ferrita	11.1
Grafito	40.2
Perlita	48.5
Fosfuro de hierro	0.1

Tabla A.10 Análisis cuantitativo por área de la probeta K

PROBETA L

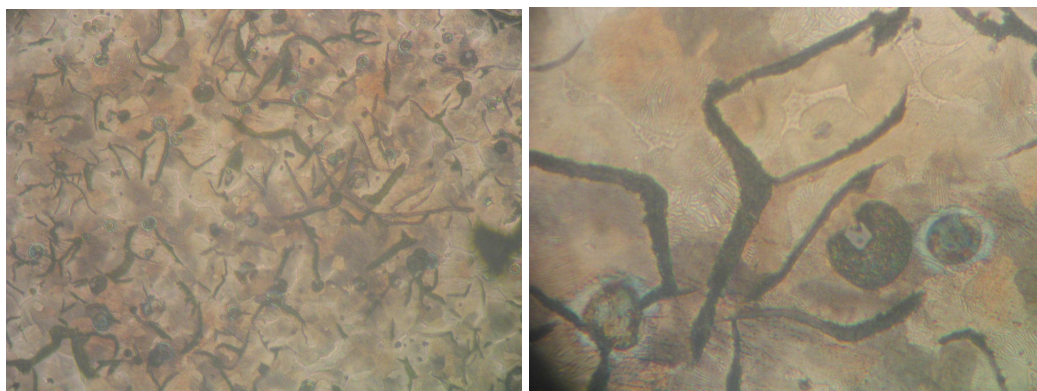
(a)

(b)

Figura A.11 Microestructura de la probeta L. (a) 100x y (b) 400x

L	%
MnS	0.0
Ferrita	1.4
Grafito	41.1
Perlita	55.5
Fosforo de hierro	1.9

Tabla A.11 Análisis cuantitativo por área de la probeta L

PROBETA N

(a)

(b)

Figura A.12 Microestructura de la probeta N. (a) 100x y (b) 400x

N	%
MnS	0.8
Ferrita	2.2
Grafito	35.6
Perlita	60.7
Fosfuro de hierro	0.7

Tabla A.12 Análisis cuantitativo por área de la probeta N

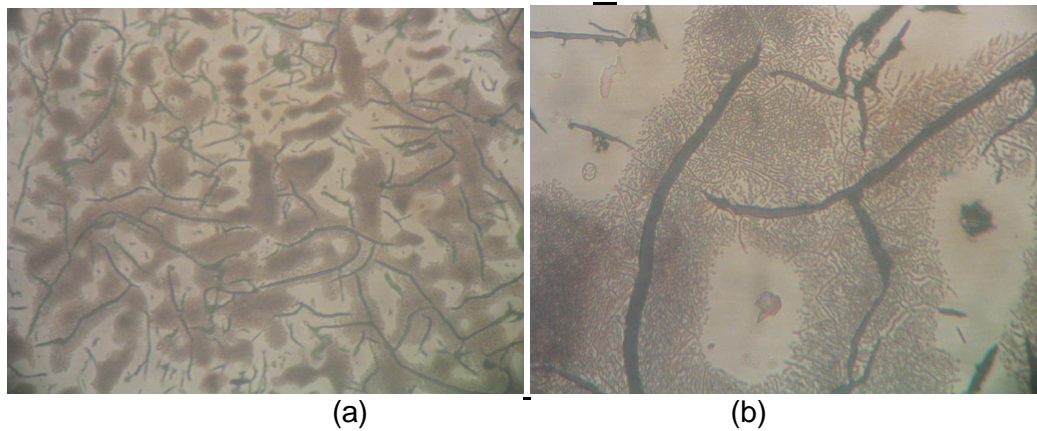
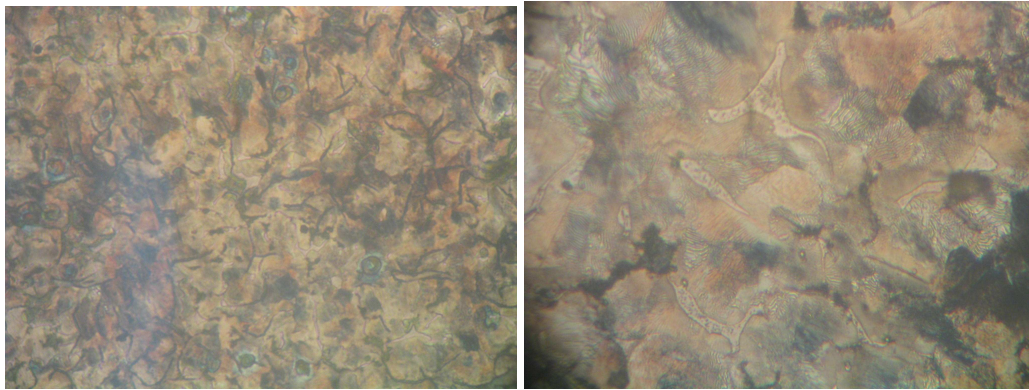
PROBETA O

Figura A.13 Microestructura de la probeta O. (a) 100x y (b) 400x

O	%
MnS	0.1
Ferrita	35
Grafito	30
Perlita	34
Fosfuro de hierro	4

Tabla A.13 Análisis cuantitativo por área de la probeta O

PROBETA P

(a)

(b)

Figura A.14 Microestructura de la probeta P. (a) 100x y (b) 400x

P	%
MnS	0.1
Ferrita	0.1
Grafito	43.3
Perlita	55.3
Fosfuro de hierro	1.1

Tabla A.14 Análisis cuantitativo por área de la probeta P

PROBETA R

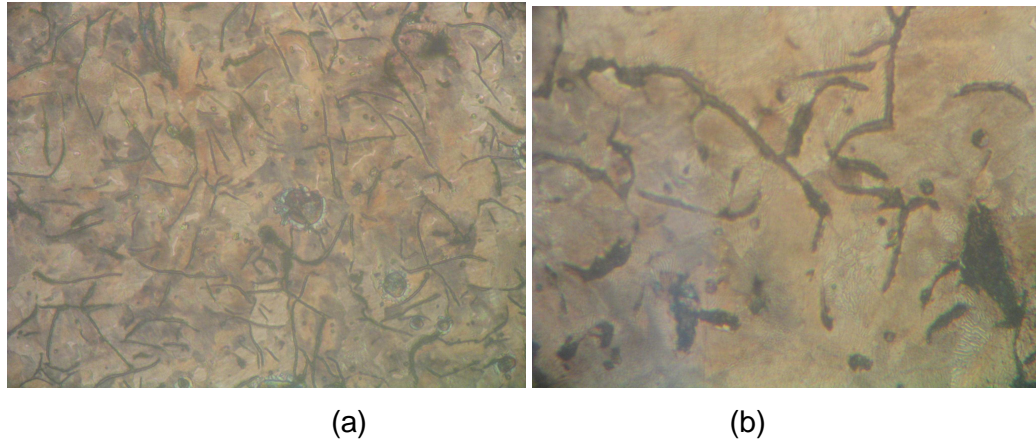


Figura A.15 Microestructura de la probeta R. (a) 100x y (b) 400x

R	%
MnS	0.1
Ferrita	0.4
Grafito	37.4
Perlita	61.5
Fosfuro de hierro	0.6

Tabla A.15 Análisis cuantitativo por área de la probeta R

PROBETA S

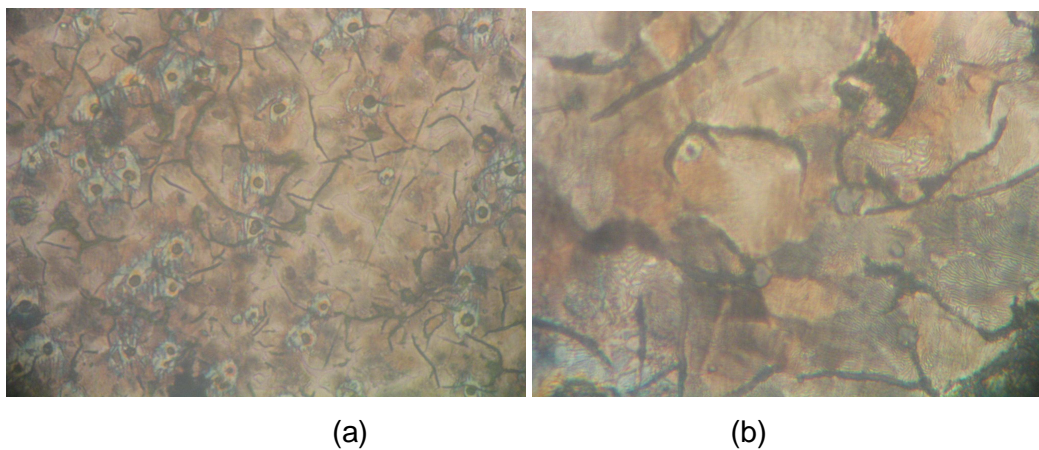


Figura A.16 Microestructura de la probeta S. (a) 100x y (b) 400x

S	%
MnS	0.6
Ferrita	4.5
Grafito	38.3
Perlita	55.9
Fosfuro de hierro	0.7

Tabla A.16 Análisis cuantitativo por área de la probeta S

ANEXO 6

DIAGRAMA DE HEINBAUER

