

V436
L3

Escuela Superior Politécnica del Litoral
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
AREA METALURGIA • MECANICA

RECEIVED
FEBRUARY 16 1981
SECTION - GUAYAS

16 MAR. 1981

INVENTARIADO

RESPONSABLE:

29 APR 1982

INVENTARIADO

RESPONSABLE

MALEABILIZACION DEL HIERRO BLANCO

T E S I S :

Que para obtener el Título de Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

ELOY VELEZ GALAN

Guayaquil, Septiembre de 1976

MALEABILIZACION DEL HIERRO BLANCO

INVENTARIADO

RESPONSABLE:

1061-874 1-7

Firma del Autor

Eloy Velez Galán

Certificado por:

Ing. Ignacio Wiesner F.
Director de Tesis

Aceptado por:

Ing. Eduardo Rivadeneira
Director del Dpto. de Ing. Mecánica

DECLARACION EXPRESA

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas corresponden exclusivamente a su autor y el patrimonio intelectual corresponderá a la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la Escuela Superior Politécnica del Litoral)



BIBLIOTECA

A mis padres con
todo cariño

Eloy Vélez Yugance
Josefina Galán de Vélez

A mi esposa e hijas
con todo mi amor

Adela Aspiazu de Vélez
María Fernanda
María Rosita
María José

A mis hermanos

Xavier Vicente
María Teresa

Con especial afecto

a mis suegros
y familiares

AGRADECIMIENTO

El autor quiere dejar constancia de su agradecimiento a los catedráticos del área de Metalurgia - Mecánica de la Escuela Superior Politécnica del Litoral: Ing. Antonio Viteri, Ing. Omar Serrano e Ing. Isauro Rodríguez por haber prestado facilidad para el uso de los equipos del Laboratorio, al Taller Mecánico de la Institución, a la Fundición Vallejo en la persona de los Hnos. Vallejo, a Siderúrgica Guayaquil en la persona del Ing. Ramirez, a los Ingenieros mexicanos Juan Aguilar, J. A. Rábago y Hnos. Cabral, por la generosa colaboración que brindaron en las labores prácticas.

Agradece también a sus profesores, compañeros y al Gerente Técnico de Xerox Sr. Angel Vélez.

De manera especial, agradece al Sr. Director de Tesis Ing. Ignacio Wiesner, ya que sin su decidido apoyo y conocimientos no hubiera podido realizar el presente Tema de Tesis.

La deuda con todos ellos es tan grande, que es imposible expresarla con palabras.



P R O L O G O

La evolución acelerada experimentada en los últimos años en la industria de la fundición a nivel mundial, ha tenido como resultado la aparición de dos nuevos tipos de hierros fundidos, el hierro maleable y el nodular o dúctil, los mismos que han venido a resolver muchos problemas tecnológicos de la construcción de máquinas y herramientas. Es de preveer que, con los compromisos adquiridos por nuestro país en relación con el desarrollo regional, tenga dentro de muy poco tiempo que asimilar y desarrollar tecnología de estos materiales.

Sabiendo de esta circunstancia es por la que hemos tomado interés en conocer de cerca el proceso de elaboración del hierro maleable para tratar de introducirlo en el medio de la fundición nacional.

El interés principal de este trabajo, es dar a conocer a nuestros fundidores, la manera de producir el hierro blanco base dentro de los rangos químicos establecidos para luego indicar el tratamiento térmico del mismo y obtener un hierro maleable de calidades aceptables.

La importancia de nuestro trabajo radica en que hemos llegado a producir hierro maleable en las condiciones de trabajo del fundidor nacional, es decir estamos probando al fundidor que con el equipo de fusión que posee actualmente (horno de cubilote) puede trabajar maleable de calidad aceptable.

Son muchos los equipos con los que se trabaja en fundición para producir hierro blanco, se ha pasado del método tradicional del cubilote al horno eléctrico y en el maleabilizado se ha pasado del horno de caja común al horno continuo, pero en cualquiera de los casos los problemas que se manifiestan con el manejo de equipos son específicos y los resultados de calidad son un compromiso entre el fundidor y el comprador.

Muchos serán de la idea que debe producirse maleable de calidad automotriz en horno eléctrico, y estamos de acuerdo, pero muchos en el Ecuador pensarán que esta es la única forma de hacer maleable de cualquier otra calidad y estamos probando que no es verdad.

Para desarrollar este tema ha sido necesario dialogar y trabajar con gente que produce hierro maleable y que trabaja por muchos años en la industria de la fundición. Se han visitado las mayores fundiciones de hierro maleable de México y se ha tratado de mantener una relación constante con la experiencia lograda por fundidores del medio local.

Colaboraron en este trabajo las empresas Fundición Vallejo y Siderúrgica Guayaquil, en donde se obtuvieron las probetas que sirvieron para los experimentos de maleabilización en los hornos del Laboratorio de Metalúrgia Mecánica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

I N D I C E

TITULO	i
DECLARACION EXPRESA	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
PROLOGO	v
CAPITULO I	
A.- Introducci3n	1
CAPITULO II	
HIERRO BLANCO	
A.- Generalidades	9
B.- Metal3rgia b3sica	
1.b.- An3lisis de una aleaci3n proeut3ctica	11
2.b.- Definici3n de los componentes estruc- turales.	14
3.b.- Transformaciones y factores que influ- yen en la formaci3n de hierro blanco	16
4.b.- Operaci3n de fusi3n para hierro blan- co base	22
1.- Materiales de carga	22
2.- Operaci3n de fusi3n	24
C.- Propiedades	29

CAPITULO III

MALEABILIZACION DEL HIERRO BLANCO

A.- Generalidades	30
B.- Metalúrgia básica	
1.b.- Proceso de maleabilización	32
2.b.- Factores que influyen en el tratamiento de maleabilizado	42
3.b.- Control de atmósfera durante el proceso	55
4.b.- Control metalúrgico del material procesado	66
1.- Control de materiales de carga y del coque	68
2.- Control de la operación de fusión	69
3.- Control de adiciones en la cuchara y velocidad de enfriamiento	70
4.- Control de temperaturas, tiempos y composición de atmósfera durante el maleabilizado	72
5.b.- Tipos de hornos de maleabilizado	
1.- Horno continuo	72
2.- Hornos de caja	77
3.- Hornos de mufla	78
C.- Propiedades, aplicaciones y usos comunes	81



CAPITULO IV

TRABAJO EXPERIMENTAL

A.- Introducción	86
B.- Colado de fundición blanca y muestreo	87
1.b.- Inspección y selección de materias primas	89
2.b.- Cargas del horno	91
3.b.- Composición del hierro blanco	93
4.b.- Pesada de materias primas	98
5.b.- Observación de dimensiones de las piezas a fundir	99
6.b.- Control del hierro blanco en la fundición	99
7.b.- Muestreo	100
C.- Maleabilizado y muestreo	108



CAPITULO V

ENSAYOS Y RESULTADOS

A.- Ensayo Metalográfico	121
1.a.- Preparación de las muestras	123
2.a.- Metalografía sin ataque	125
1.- Conteo de nódulos	126
2.- Distribución de nódulos	128
3.- Tamaño de nódulos	136
4.- Forma de nódulos	143
3.a.- Metalografía con ataque	150
B.- Ensayos de dureza	152
C.- Ensayos mecánicos	154



CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

159

DIAGRAMAS Y TABLAS

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO I

C A P I T U L O I

A.- INTRODUCCION

El hierro o fundición blanca es el material base para la fabricación del hierro maleable, forma parte del grupo de aleaciones ferrosas comúnmente llamados hierros colados, los cuales presentan como característica principal que tienen en su composición química más de 2 % de carbono y alto porcentaje de silicio.

La mayoría de la producción mundial de hierro blanco es usada como material de partida para la obtención de dos tipos de hierro maleable, a saber: fundición maleable Europea ó de corazón blanco y fundición maleable Americana ó de corazón negro.

La metalúrgia básica que define un hierro blanco, tiene que ver con las transformaciones que tienen lugar durante el enfriamiento de una aleación ternaria de hierro - carbono - silicio que solidifica según el diagrama de equilibrio metaestable, además de ello concurren en su forma-

ción muchos factores tales como: las materias primas seleccionadas para el caso, regímenes de enfriamiento, dimensionamiento de las piezas coladas y modo de llevar la operación de fusión.

Los fundidores han definido ésta aleación como "blanca" a consecuencia de el aspecto que presenta la superficie del material fracturado, la cual se diferencia de la fractura de un hierro gris. Esta diferencia consiste definitivamente por la constitución estructural, en el caso del hierro blanco la estructura metalográfica está formada por un alto porcentaje de cementita o carburo de hierro el cual es un compuesto intermetálico que se forma a 6.7 % de carbono, tiene una apariencia de cristales brillantes, es extremadamente dura y frágil, en cambio en el hierro gris la mayoría del carbono de la aleación no se encuentra combinado sino que está libre como grafito en forma de láminas, de allí que su apariencia sea más obscura.

La importancia tecnológica del hierro blanco es derivada de la producción de hierro maleable, cuando su composición química posee rangos bien controlados para efectuar la descomposición de la cementita en hierro y carbono libre, lográndose con ello un material con propiedades similares a la de un acero, ya que, el cambio estructural provocado destruye la fragilidad de la cementita y hace que el nuevo hierro posea un alargamiento comprendido entre 10 y 20 %.

El hierro maleable es en la actualidad una de las aleaciones más apreciadas como material de ingeniería, sus propiedades y diversidad de aplicaciones lo colocan como uno de los materiales metálicos de gran aceptación en la industria moderna, ya que reemplaza con muy buen resultado a la fundición de acero.

El proceso de recocido de la fundición blanca consiste fundamentalmente, según la técnica americana usada en este trabajo, en tomar un hierro blanco base con una composición química apropiada y someterlo a temperaturas próximas

a 950°C en una atmósfera inerte por tiempos prolongados para transformar su estructura consistente de cementita primaria y perlita en ferrita y nódulos de grafito.

El proceso de maleabilización de la fundición blanca tiene dos etapas bien definidas: en la primera el material es calentado a una temperatura superior a la del punto eutectoide, entonces la perlita laminar fina presente en la estructura en una proporción que varía del 30 al 60 % se transforma en austenita mediante la difusión del carbono de la cementita en hierro gamma y forma una solución sólida de carbono en hierro, en este momento los carburos libres o cementita primaria no son afectados por el calentamiento hasta la temperatura de austenización, sin embargo, cuando se mantiene las condiciones de temperaturas por mucho tiempo se provoca la grafitización de la cementita.

La aceleración de esta reacción de descomposición se produce cuando se tiene altos contenidos de carbono y la presencia de elementos ta-

les como el silicio, boro y aluminio.

Al finalizar la primera etapa del tratamiento la temperatura del hierro es reducida hasta un punto un poco más alto que la temperatura eutectoide donde pueden coexistir tres fases austenita - ferrita - cementita ó en su defecto austenita - ferrita - grafito. A causa de la baja solubilidad del carbono en la austenita en este campo o intervalo de temperatura crítica eutectoide y si la velocidad de enfriamiento es lenta, la transformación procede de acuerdo con el sistema estable hierro - grafito, por lo tanto, si la velocidad en este punto es demasiado rápida la grafitización no es completa y las transformaciones se llevan a cabo de acuerdo con el sistema metaestable hierro - cementita formándose perlita.

Normalmente el maleable ferrítico tiene mayor aceptación que el perlítico, lo cual es fácil de comprender por las diferentes propiedades mecánicas que manifiesta. Para lograr calidades aceptables por consumidores de maleable ferrítico es imprescindible identificar un

control de proceso depurado, el mismo que debe ser concerniente con el hierro blanco base, con la operación de fusión, con materiales de tratamiento en cuchara, con temperaturas, tiempos y composición del horno de maleabilizado y finalmente con el control metalográfico y de propiedades mecánicas. De todos los controles mencionados los que dicen sobre la calidad final del material son los dos últimos.

El control metalográfico tiene dos propósitos, a saber: control de etapas de proceso y control de producto final.

La observación de especímenes metalográficos en cada una de las etapas de producción, da una idea clara de la buena marcha del proceso y en casos de encontrarse anomalías indicará la manera de corregir la parte del proceso donde sea necesario y el control del producto maleabilizado indicará la calidad con ajuste a normas ASTM y AFS.

El control metalográfico se realiza como lo determina la Dayton Malleable Iron de Dayton, Ohio

con probetas preparadas para observación microscópica, las cuales se trabajan con o sin ataque químico.

En las probetas con ataque químico se hacen observaciones relacionadas con el conteo, distribución, tamaño y forma de nódulos de grafito que resultaron de la descomposición del carburo de hierro por el tratamiento térmico y en las probetas provistas de ataque químico se observan la morfología y la proporción de los constituyentes metalográficos, inclusiones no metálicas y presencia de microconstituyente e impurezas.

También se controla la calidad del producto final por medio de ensayos de dureza que reflejan una serie de distintas propiedades tales como: límite de fluencia, resistencia a la tracción, resistencia a la abrasión. El ensayo de dureza más común para hierro maleable es el Brinnell.

Finalmente el ensayo mecánico de resistencia a la tracción indicará la relación de los valores de esfuerzos resultantes en las pruebas con las

condiciones de diseño a las cuales se someterán las piezas de fundición terminadas que actuarán como elementos mecánicos constitutivos de maquinarias producidas por industrias tales como la automotriz, constructiva, eléctrica, ferroviaria, etc.

CAPITULO II

C A P I T U L O I I

HIERRO BLANCO

A.- GENERALIDADES

El hierro o fundición blanca es el material base para la fabricación del hierro maleable, forma parte del grupo de aleaciones ferrosas comunmente llamadas hierros colados, los cuales presentan como característica principal que tienen en su composición química más de 2% de carbono y también porcentaje alto de silicio.

Una explicación más clara sobre los rangos de composición que definen a los hierros colados, se logra por medio de la Figura Nr. 1 y la tabla Nr. 1.

Una inspección de la figura Nr. 1 manifiesta de una manera objetiva, que no todos los hierros blancos, son buenos para producir maleable, lo cual no es asunto importante cuando se hable de hierros blancos en general, pero es relevante cuando se lo menciona en la producción de maleable.

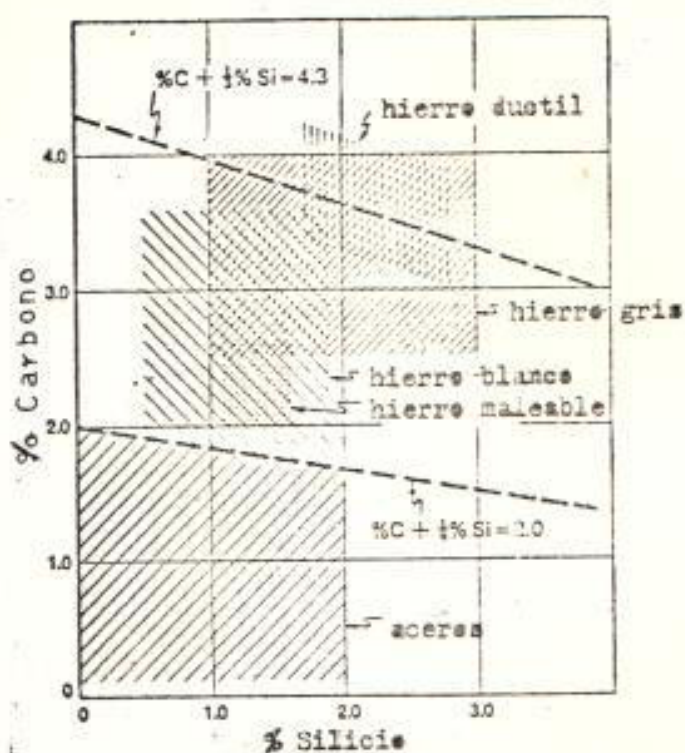


Fig. Nr. 1

Tabla Nr. 1

Elementos	Hierres Gris %	Hierres Blancs %	Hierres Malleables %	Hierres Duail %
Carbono	2.5 - 4.0	1.8 - 3.6	2.00 - 2.60	3.0 - 4.0
Silicio	1.0 - 3.0	0.5 - 1.9	1.10 - 1.60	1.8 - 2.8
Manganese	0.25 - 1.0	0.25 - 0.80	0.20 - 1.00	0.10 - 1.00
Azufre	0.02 - 0.25	0.06 - 0.20	0.04 - 0.18	0.03 max
Fósforo	0.05 - 1.0	0.06 - 0.18	0.18 max	0.10 max

Los contenidos de carbono y silicio por otro lado, definen claramente la metalúrgica de estas aleaciones, que sin lugar a dudas es una de las más complicadas y complejas, dado que intervienen varios factores en la dinámica de formación de la microestructura de estas aleaciones.

El hierro blanco se lo ha denominado así, porque al partir un pedazo, la ruptura ó fractura nos muestra un color blanco plateado.

Es empleado a veces en su forma de fundición o es recocido para convertirlo en hierro maleable, en cuyo caso, el carburo de hierro a la presencia del silicio se descompone para producir nódulos de grafito en una matriz de ferrita ó perlita.

B.- METALURGIA BASICA

1.b.- ANALISIS DE UNA ALEACION PROEUTECTICA

Las transformaciones que tienen lugar en la fundición blanca durante la solidificación y posteriormente enfriamiento, son las que indicamos en el diagrama hierro - carbono. Figura Nr. 2.

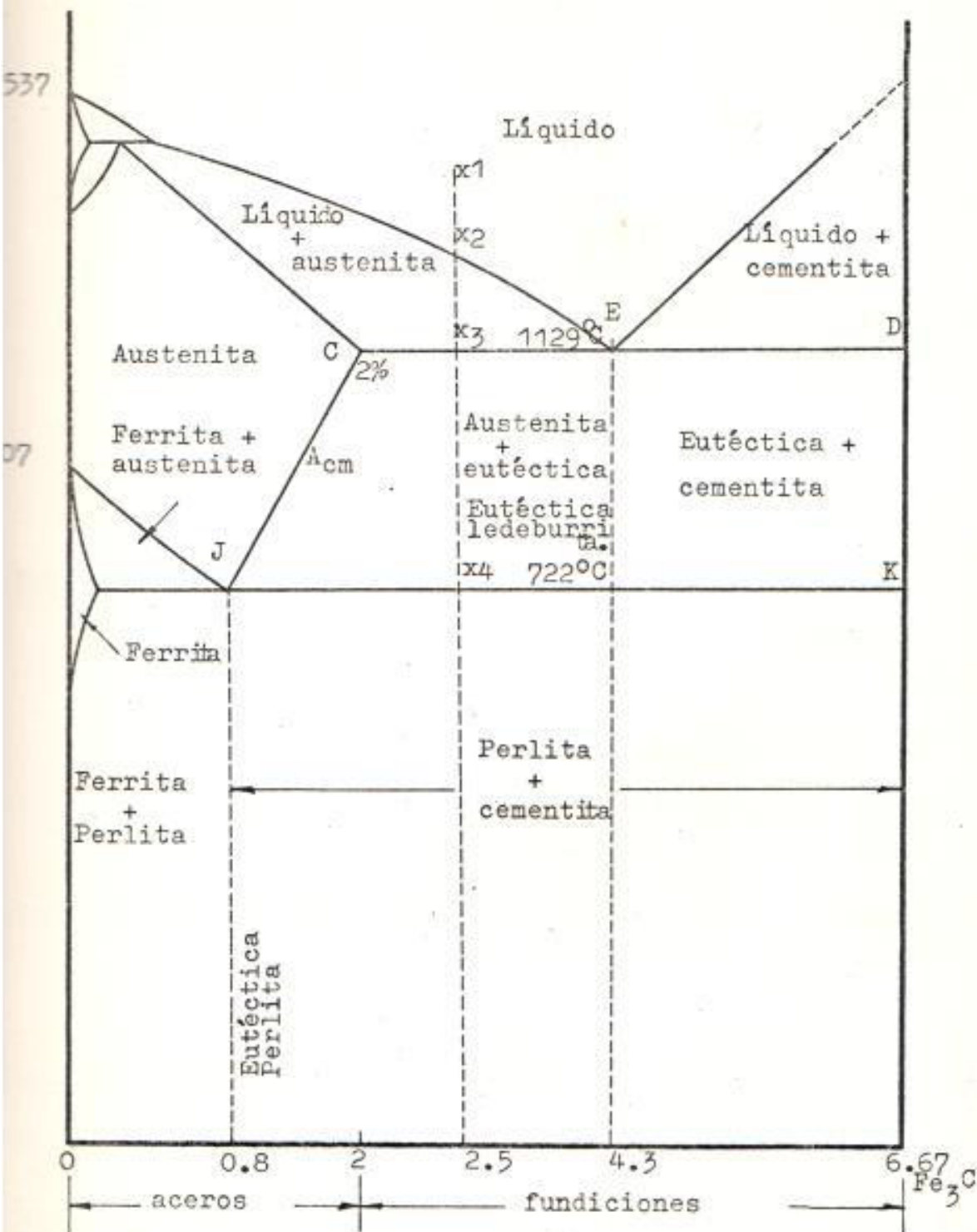


fig. Nr. 2

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO-CARBONO

Todas las fundiciones blancas son aleaciones hipoeutéticas y vamos a analizar las transformaciones que tienen lugar durante su enfriamiento, tomando como ejemplo una aleación con 2.5% de carbono. Esta aleación a la temperatura correspondiente al punto X_1 , está constituida por una solución líquida homogénea de carbono en hierro líquido y permanece en este estado hasta descender la temperatura corta en el punto X_2 de la línea de liquidus. En este momento comienza la solidificación y se precipitan cristales de austenita de aproximadamente 1% de carbono. Al descender la temperatura, los nuevos cristales de austenita primaria que se precipitan tienen cada vez más carbono y su composición viene marcada por la línea de solidus la cual recorre en dirección a C. Al mismo tiempo el líquido va aumentando su riqueza en carbono, según las composiciones indicadas por la línea de liquidus, la cual recorre en dirección a E.

A la temperatura de formación del eutéctico, 1129°C , la aleación está formada por dendritas de austenita. Con un contenido de carbono de 2% y por una solución líquida de 4.3% de carbono. En este momento todo líquido solidifica a temperatura constante de acuerdo con la reacción eutéctica, obteniéndose una

mezcla eutéctica formada por cristales de austenita y cementita conocida como ledeburita. Como esta reacción se verifica a temperaturas elevadas, la ledeburita aparecerá como una mezcla basta en vez de presentar aspecto fino típico de los eutécticos. A veces la ledeburita se separa totalmente, agregándose la austenita eutéctica a las dendrita de austenita primaria y quedan libres capas relativamente grandes de cementita.

Al ir disminuyendo la temperatura entre X_3 y X_4 , la solubilidad del carbono en la austenita decrece, tal como indica la línea CJ de los puntos Acm. Este origina la precipitación de cementita proeutectoide, gran parte de la cual se deposita sobre la cementita ya formada. A la temperatura eutectoide el resto de la austenita cuyo contenido en carbono es 0.8%, se transforma isotérmicamente, en perlita de acuerdo con la reacción eutéctoide. Durante el posterior enfriamiento a la temperatura ambiente, la estructura permanece sustancialmente invariable.

2.b.- DEFINICION DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES

El diagrama de fases del sistema hierro - carbono nos

muestra tipos fundamentales de componentes estructurales que tienen los hierros fundidos y son los siguientes:

FERRITA : Es una solución sólida de hierro alfa con estructura de rejilla cúbica centrada en el cuerpo. Es un cristal de hierro en el que están disueltos otros elementos presentes en el hierro tales como carbono hasta 0.1% , manganeso, níquel, silicio y otros. La característica significativa del hierro alfa es que muy poco carbono puede disolverse en él.

Esta estructura es la más blanda de las que aparecen en el diagrama. El valor medio de sus propiedades es resistencia a la tracción de 28 kg/mm^2 alargamiento 40% en 2 pulgadas, dureza inferior a 0 Rockwell C.

PERLITA : Es una mezcla autectoide formada por una serie de láminas paralelas de muy pequeño espesor de ferrita y cementita y su microestructura recuerda una huella digital.

El valor medio de sus propiedades es: resistencia a la tracción 84 kg/mm^2 . Alargamiento 20% en 2 pulgadas, dureza aproximadamente 20 Rockwell C.

CEMENTITA : Carburo de hierro de fórmula Fe_3C , su apariencia es de cristales brillantes.

Es extremadamente dura y frágil, cuya resistencia a la tracción es pequeña, pero una resistencia a la comprensión elevada. De todas las estructuras es la que ofrece mayor dureza, 80 Rockwell C.

AUSTENITA : Es de red cúbica de caras centradas. El hierro disuelve carbono siendo la solubilidad máxima de éste en aquél de un 2% a 1129°C , y la solución sólida intersticial así formada se denomina austenita. La estructura atómica es tal que cantidades apreciables de carbono son solubles en hierro gamma.

El valor medio de sus propiedades es: resistencia a la tracción 105 kg/mm^2 , alargamiento 10% en 2 pulgadas, dureza 40 Rockwell C aproximadamente.

3. b. TRANSFORMACIONES Y FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMACION DE HIERRO BLANCO.

La ausencia de elementos grafitizantes en la composición química de los hierros es la causa por la

cual todo el carbono soluble en la austenita precipite en forma de carburo de hierro al transformarse la austenita en ferrita, la cual no puede mantener disuelto el carbono. De lo anterior se deduce que las transformaciones estructurales en los hierros blancos se rigen de acuerdo con el sistema hierro - cementita conocido como el sistema metaestable..

En el caso de los hierros fundidos, que como ya se dijo, contienen cantidades apreciables de silicio, las transformaciones estructurales pueden seguir otros procesos, esto es, el silicio como uno de los elementos grafitizantes más potentes que se conocen actúa sobre el carbono disuelto, es por esto que las transformaciones estructurales en los hierros colados se rigen por el sistema estable hierro - grafito. De lo anterior se deduce que el grafito es otro constituyente en la estructura de los hierros colados, siendo sus principales características su baja resistencia y baja dureza.

La fundición blanca presenta en su estructura típica una mezcla de perlita laminar muy fina y cementita en diferentes proporciones según sea la composición química, de esto se concluye que al

carecer de grafito el hierro blanco, el proceso de formación de la microestructura se lleva a cabo de acuerdo al sistema metaestable hierro - cementita.

La Microfotografía Nr. 1 nos muestra la microestructura típica de un hierro blanco mostrando sus componentes estructurales básicos.

Microfotografía Nr. 1



500 x

Nital 2%

Hierro Blanco: se puede observar la microestructura consistente de lagunas de cementita (zonas claras) y perlita (zonas sombreadas).

La formación de grafito durante el proceso de solidificación en el hierro blanco es considerada como dañina por lo cual es evitada mediante la adición al hierro en la olla o cuchara, de elementos carburoestabilizantes (elementos que favorecen la formación de cementita, normalmente bismuto es el elemento carburógeno que es usado como adición para evitar la formación de grafito laminar durante la solidificación.

El telurio suele usarse pero existe el peligro de provocar el defecto llamado por los americanos "inverse chill"

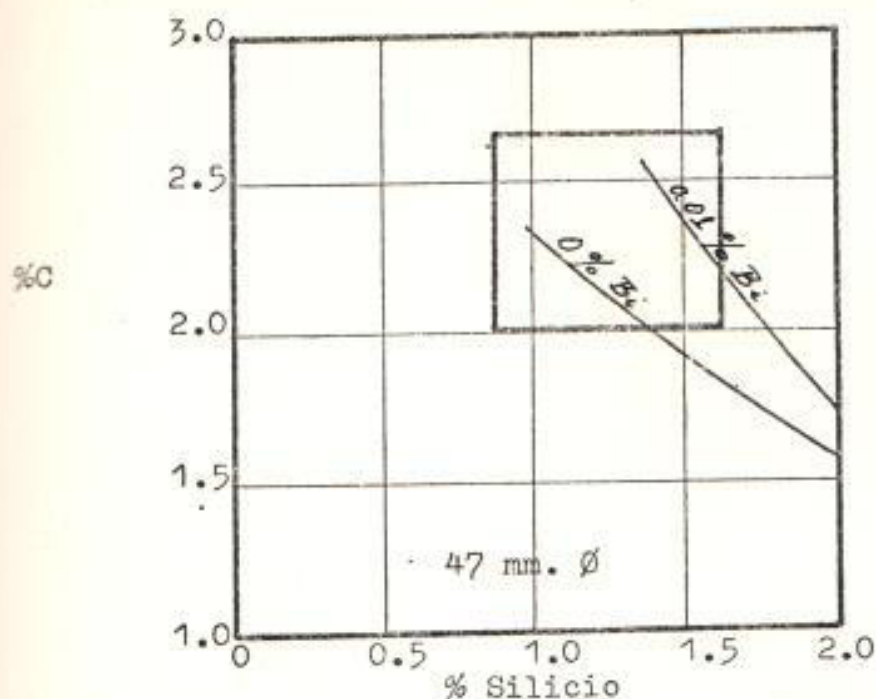
Tanto el bismuto como el telurio son adicionados a la cuchara en cantidades pequeñas, pues se ha observado que cantidades mayores a 0.01 % de bismuto, que es el elemento antigrafitizante más usado, no tiene un efecto apreciable. Es importante hacer notar que la vida de acción del bismuto es de 12 minutos a partir de la adición y que la acción de éste es más efectiva si se hace cuando el hierro tiene una temperatura superior a los 1430°C .

Con el objeto de facilitar la grafitización del hierro blanco durante la maleabilización se recurre a la adición de elementos nucleantes que la promuevan sin que éstos mismos elementos tengan excesiva influencia sobre la formación de grafito eutéctico durante la solidificación.

Los elementos más usados son el boro y aluminio que se adicionan en cantidades no mayores de 0.003%, la acción benéfica de estos elementos en la maleabilización es debida a su propiedad de aumentar la formación de núcleos o centros de grafitización lo que aumenta la cantidad de nódulos de grafito en el recocido y por lo tanto la distancia que el carbono soluble en la austenita tiene que recorrer para depositarse en los nódulos en forma de grafito disminuye apreciablemente, facilitando grandemente el recocido y acortando el tiempo necesario para la maleabilización.

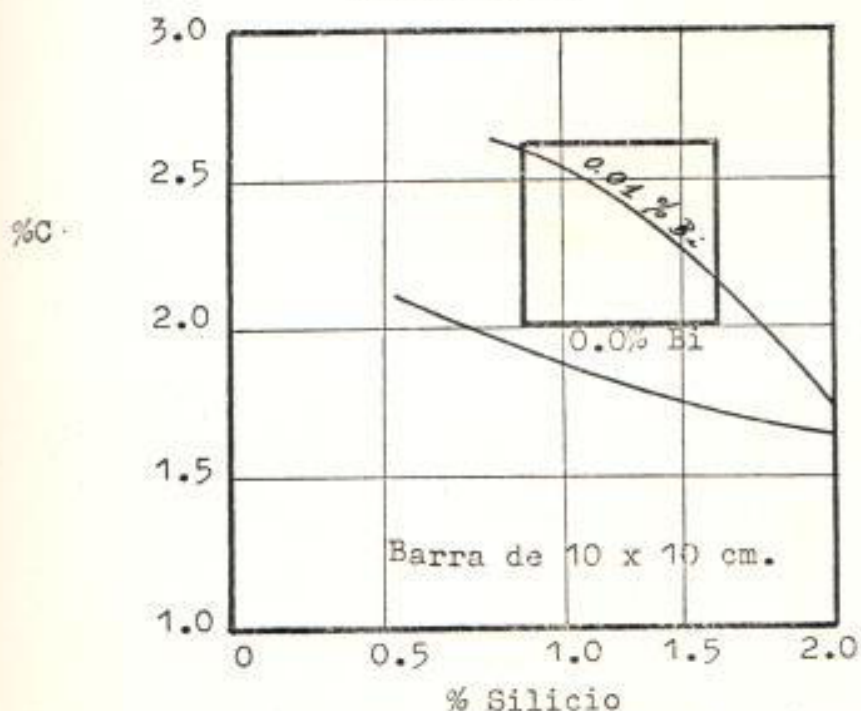
Las figuras Nr. 3 y Nr. 4 muestran la influencia del bismuto sobre la grafitización del hierro blanco.

FIGURA Nr. 3



La fractura es blanca abajo y moteada arriba de cada curva.

FIGURA Nr. 4



Efecto de la adición de 0.01% de bismuto sobre los máximos contenidos de carbono y silicio que pueden producir una fractura blanca en dos piezas de diferente tamaño de sección.

4.b.- OPERACION DE FUSION PARA HIERRO BLANCO

BASE

La fase de fusión en la producción del hierro maleable puede ser llevada a cabo en varios tipos de hornos, sin embargo en el 90 % de los casos el horno utilizado es el cubilote, por tener éste la ventaja de su bajo costo de operación y su relativa facilidad de control. En la presente experiencia se usó cubilote, que es muy popular en nuestro medio.

La práctica común de medianas y grandes fábricas que producen maleable y con el objeto de obtener una mayor calidad en el hierro mediante un control adecuado se suele operar con el llamado sistema "Duplex", acoplando un cubilote con un horno eléctrico lo cual permite la obtención del hierro a temperatura uniforme y con una composición química controlada.

1.- MATERIALES DE CARGA

A diferencia del hierro gris que tiene contenidos de carbono y silicio altos, el hierro blanco base

de maleable debe de controlarse a niveles más bajos de estos elementos, por lo que la carga metálica debe ser escogida cuidadosamente tomando en cuenta este factor.

Aunque algunos fundidores utilizan de arrabio lingote, generalmente el uso de este material de carga en la carga de fusión de hierro blanco se tiende a eliminar dado su gran contenido de carbono grafitico que se ha comprobado influye en la formación de grafito eutéctico durante la solidificación, pero en proporciones cortas es recomendable por su acción nedulizante en el recocido.

La mayoría de los fundidores de maleable utilizan como materiales de carga el acero y las coladas o retornos de la propia fundición blanca por estar estos materiales libres de carbono grafitico. Se ha constatado que la siguiente composición de carga se presenta a un buen control del análisis del hierro en casos tan difíciles como el de alimentar moldes de piezas de variados tamaños de sección.

La carga en cuestión es la siguiente:

60%

-Chatarra de acero

40%

-Retornos de la propia fundición

Fe-Si y Fe-Mn

Lo adecuado para ajustar el análisis de estos dos elementos en el hierro.

El control necesario de la grafitización primaria es facilitado con este tipo de carga sin que por ellos las piezas de sección delgada se vean afectadas a la formación de estructuras 100% cementíticas, puesto que contenidos de silicio en niveles tan altos como 1.50 - 1.60 % se tienen, con el objeto de facilitar el tratamiento mediante su acción grafitizante. Por otro lado las piezas de sección mayores de 30 mm, pueden ser obtenidas libres de grafitización primaria a pesar de los límites de silicio antes mencionados por la acción del alto contenido de acero en la carga, que al parecer, controla eficazmente el equilibrio grafito - cementita.

2.- OPERACION DE FUSION

La operación de un cubilote para la fusión de hierro blanco no es muy diferente de la que se lleva a cabo para la fusión del hierro gris. El control metalúrgico de todos los factores que intervienen

en la fusión deben ser cuidadosamente observados para mantener el hierro lo más uniforme posible, debido a la relativa tolerancia pequeña de que se dispone normalmente en la composición.

El buen control de la fusión involucra cada fase de la operación, desde el análisis químico y físico de todas las materias primas que entran en la carga hasta el análisis del metal colado en el molde. Son muy convenientes las gráficas que muestran las condiciones reales de operación durante el día de fusión, tal como muestra la figura Nr. 5. Los factores en las gráficas pueden ser el carbono, el silicio, la temperatura de colado, las toneladas por horas fundidas, el volumen de aire soplado, etc.

Como se mencionó previamente, cuando se funde hierro en un cubilote para la producción de hierro maleable, la diferencia más grande que existe es el bajo contenido de carbono en el hierro. Este exige un bajo contenido de carbono en la carga del metal y un aumento en la relación del hierro a coque. Las relaciones bajas de coque a hierro dan por resultado un mayor grado de oxidación durante la fusión. Las pérdidas de silicio y manganeso

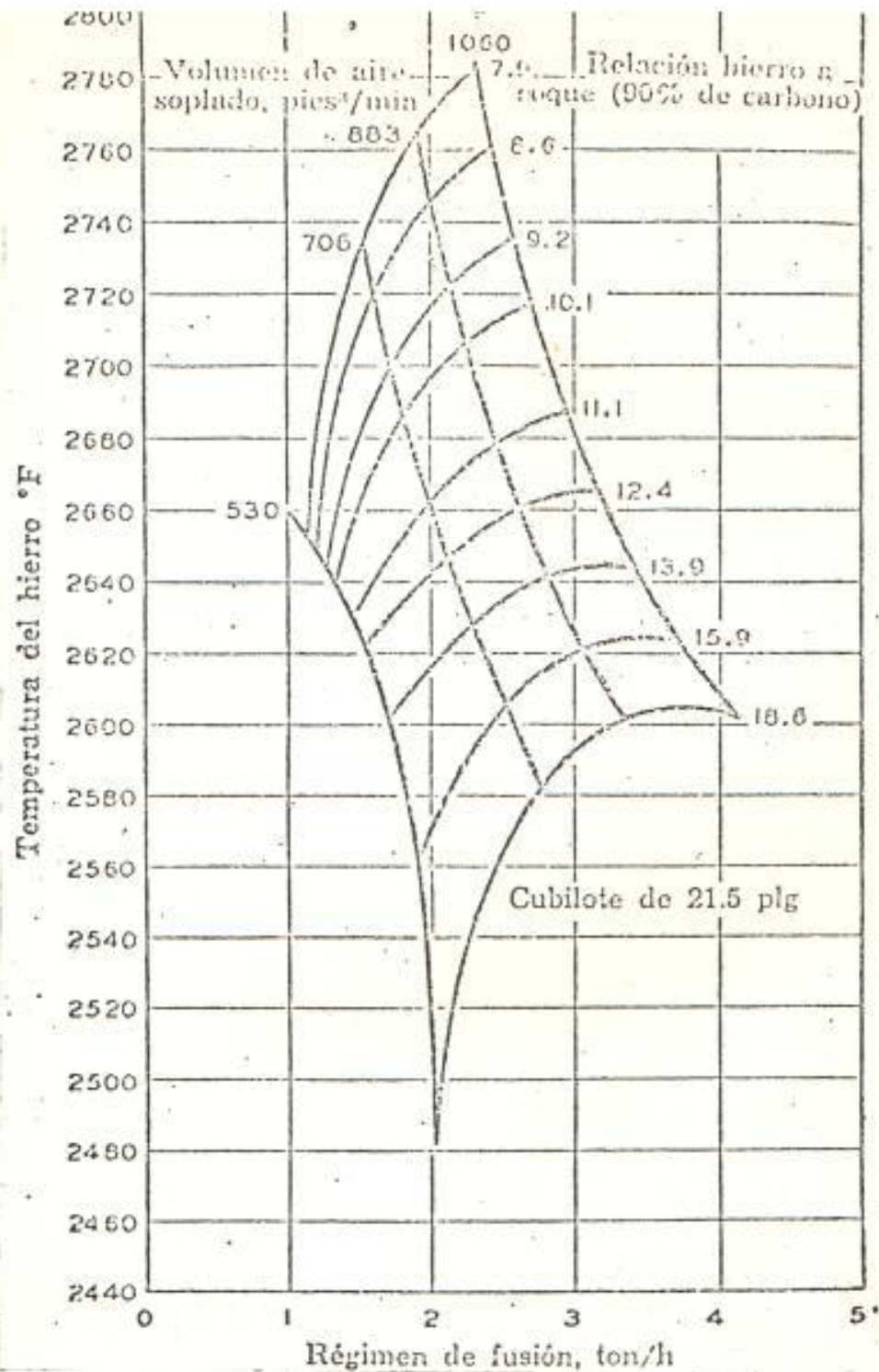


fig. Nr. 5

Condiciones de operación para un cubilote de 546 mm de diámetro (relación entre temperatura del hierro y relación hierro/carbono, volumen de aire soplado y régimen de fusión).

pueden ser elevadas, dependiendo del porcentaje y naturaleza de la chatarra de acero empleada.

Las pérdidas por oxidación elevada conducen con frecuencia a un aumento en la tendencia del hierro a contraerse y causa grietas y fallas en caliente.

La oxidación elevada conduce también a una elevación en el punto de solidificación del metal y tiene un efecto adverso sobre la fluidez aumentando así la tendencia del hierro a dejar el molde sin llenar.

Para vencer las pérdidas por oxidación elevada, muchas fundiciones de maleable han instalado equipo para insuflación de aire caliente. Existen varias ventajas derivadas del empleo de aire caliente pero la principal es la reducción de la oxidación del metal.

El control de la humedad del aire soplado es otra herramienta empleada en las fundiciones de maleable para mantener la calidad. El control de la humedad durante el año, ha ayudado al fundidor a reducir sus pérdidas por piezas defectuosas y man-

tener un metal más uniforme.

Por otro lado es importante considerar el control de la escoria, que consiste principalmente en el mantenimiento de la fluidez en el nivel deseado para el deslave mínimo de los refractarios y facilidad de salida del cubilote con la máxima eficiencia. El contenido de óxidos de hierro y manganeso es más alto en la escoria del cubilote de maleable comparado con la operación para hierro gris. Este produce una escoria relativamente negra o de un color verde muy oscuro lo que hace difícil el control desde el punto de vista de su color.

El azufre es absorbido del coque durante la fusión y generalmente es más alto que el obtenido en la práctica del hierro gris. Muchos cubilotes operados para hierro maleable no funden tan caliente como para hierro gris y esta es una razón para el mayor contenido de azufre.

Algunas fundiciones desulfuran con carbonato de sodio en un atecrisol y reducen el azufre hasta en un 30% de su contenido.

C.- PROPIEDADES.

El hierro blanco contiene grandes cantidades de cementita, material que se caracteriza por su dureza y resistencia al desgaste, siendo sumamente quebradizo y difícil de mecanizar. Esta fragilidad y falta de maquinabilidad limita la utilización industrial del hierro blanco, quedando su empleo reducido a aquellos casos en que no se requiera ductibilidad como es en las camisas interiores de las hormigoneras, molinos de bolas, algunos tipos de estampa de estirar y en las boquillas de extrusión.

Las propiedades están relacionadas con su microestructura, la que como se dijo consiste de perlita y cementita. La resistencia a la abrasión que acompaña a este material hace que lo utilice con ventaja en molinos de tambor, placas de molinos de pulverización y aplicaciones similares.

El hierro blanco se utiliza en grandes cantidades, como material de partida, para la fabricación de hierro maleable.

CAPITULO III

C A P I T U L O I I I

MALEABILIZACION DEL HIERRO BLANCO

A.- GENERALIDADES

El hierro maleable es en la actualidad una de las aleaciones más apreciadas como material de ingeniería, sus propiedades y diversidad de aplicaciones lo colocan como uno de los materiales metálicos de mayor aceptación en la industria moderna.

Existen dos tipos de fundiciones maleables: La fundición maleable européa o de corazón blanco que es una fundición rica en carbono (3 % ó más) y se obtiene mediante un proceso de recocido en presencia de un material oxidante (óxido de hierro), el carbono de la cementita, al menos en unos milímetros de profundidad, forma con el oxígeno del óxido de hierro un gas (CO ó CO_2), que se libera desprendiéndose de la pieza, ésta permanece así constituida por cristales de ferrita más o menos pura, por lo regular se funden piezas de pequeños espesores. La

fundición maleable americana o de corazón negro que es una fundición con menos carbono (2.5 - 2.6 %) y se obtiene mediante un proceso de recocido en presencia de un material inerte ó neutro, atmósfera de argón (arena de sílice, SiO_2 para nuestro caso), se separa la cementita, permanece en la pieza y forma nódulos de grafito diseminados en la matriz de ferrita más o menos pura.

En esta tesis se va a tratar de la fundición maleable americana o de corazón negro, producido en cubilote.

El proceso de fabricación del hierro maleable se lo puede dividir en dos etapas:

- 1.- Operación general de fundición para obtener la fundición blanca.
- 2.- Tratamiento térmico de maleabilización de la fundición blanca.

Las dos etapas están íntimamente relacionadas entre sí, de modo que es necesario vigilar la primera etapa para poder obtener un maleabilizado completo en un tiempo mínimo, lo cual es la meta de todo fundidor.

El tratamiento de recocido o maleabilización ha recibido las mayores aportaciones técnicas y de equipos, a tal grado que ha sido necesario modificar la primera etapa en cuanto a composición química, operación de fundición y tratamiento en la cuchara de colado.

B.- METALURGIA BASICA

1. b. PROCESO DE MALEABILIZACION

Antes de entrar en este tema se debe recordar que el principal objetivo es transformar a un hierro blanco de estructura consistente de aproximadamente 60% de cementita y 40% de perlita fina y sin existencia de grafito eutéctico laminar en un hierro ferrítico.

El proceso de maleabilización con los últimos adelantos técnicos y de equipo se lleva a cabo en un tiempo de 24 a 33 horas. El tratamiento se verifica en dos etapas durante las cuales se produce las siguientes transformaciones metalúrgicas tal como se muestra en la figura Nr. 6 donde se observa el ciclo de maleabili-

zación en un horno continuo.

PRIMERA ETAPA DE LA MALEABILIZACION. - Si

el hierro blanco es calentado en una temperatura superior a la del punto eutectoide del diagrama hierro carbono, la perlita laminar fina presente en la estructura en una proporción que varía de 30 al 60% se transforma en austenita mediante la difusión del carbono de la cementita dentro del hierro gamma para formar una solución sólida de carbono en hierro gamma llamada precisamente austenita, la cual por tener una forma cristalina de red cúbica centrada en las caras, permite la disolución del carbono hasta cierto límite por el acomodamiento de átomos de carbono en el interior de las celdas cristalinas cúbicas del hierro gamma.

Los carburos libres o cementita primaria que constituyen el otro componente extructural del hierro blanco no son afectados por el calentamiento hasta la temperatura de austenización y tal como mostramos en la figura Nr. 6 la estructura del hierro blanco

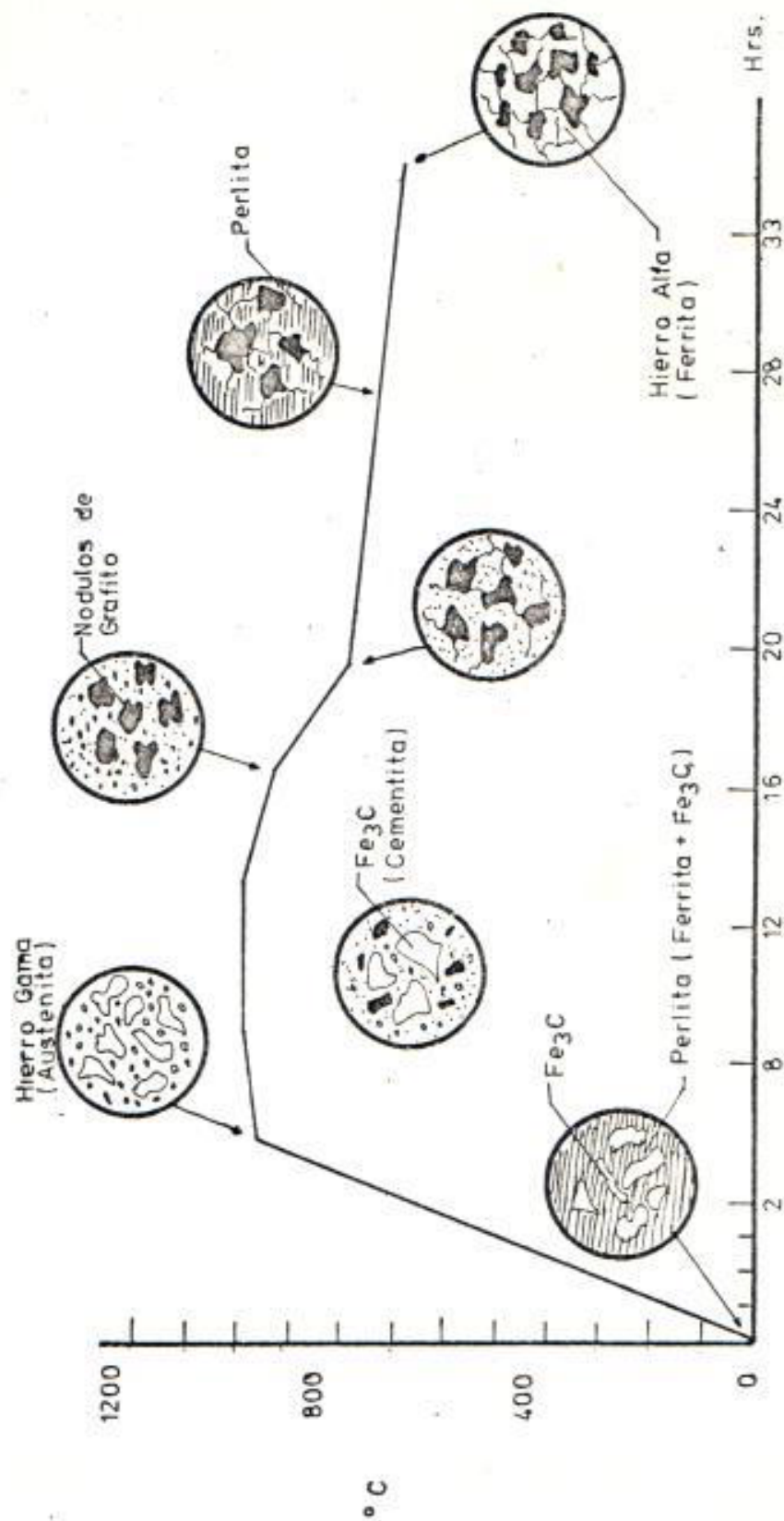
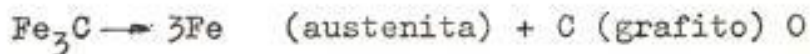


Fig. Nr. 6

arriba de la temperatura eutectoide consiste de cementita primaria en autenita.

Sin embargo, cuando un hierro blanco con una composición química base para maleabilizado es mantenido a temperaturas altas arriba del límite de temperatura eutectoide, la grafitización de la cementita se lleva acabo mediante la reacción:



Como la mayoría de las reacciones químicas, la reacción se lleva a cabo más rápidamente aumentando la temperatura, además de que la solubilidad del carbono se ve aumentada por la misma razón, grandes temperaturas y cercanas al punto eutectoide no son recomendables pues aunque aceleran la grafitización de la cementita provocan baja resistencia y produce deformación de las piezas, además que resulta anti-económico por el gasto excesivo de refractario y combustible en los hornos.

La temperatura óptima para llevar acabo la grafitización de la cementita en el hierro blanco sin que tenga efectos dañinos es de apro -

ximadamente 950°C , en la cual se grafitiza la cementita con la ayuda de los siguientes factores:

- a.- Manteniendo ésta temperatura durante largos períodos de tiempo.
- b.- Altos contenidos de carbono.
- c.- Elementos tales como el silicio, boro, aluminio, etc. que ayudan a la descomposición de la cementita mediante su acción grafitizante.

La austenita del sistema metaestable puede disolver algo más de carbono que la austenita del sistema estable de modo que si el hierro blanco solidifica de acuerdo con el sistema metaestable existe una tendencia del carbono a precipitar de la austenita como grafito libre, originándose una cristalización en la interface de la cementita-austenita y la cantidad de carbono de la austenita decrece induciendo a la cementita adyacente a disociar más carbono, el carbono se deposita en forma de grafito en los núcleos de grafitización formando los nódulos. En resumen la primera parte de la maleabilización consiste de los

mayores procesos simultáneos:

- 1.- Solución de la cementita en su interface con la austenita.
- 2.- Disociación de la cementita con sus dos elementos constituyentes: hierro y carbono.
- 3.- Migración de los átomos de carbono através de la matriz de austenita hacia los núcleos de grafitización en la interface austenita-cementita.
- 4.- Precipitación del carbono en forma de grafito en los núcleos de modo que estos van creciendo.

Manteniendo el hierro blanco a la temperatura mencionada anteriormente, los cuatro puntos descritos se llevan acabo hasta que toda la cementita es eliminada o grafitizada. A este punto como se muestra en la Fig. Nr. 6 de la Pág. Nr.34 la estructura del hierro se compone de nódulos de grafitos en una matriz de austenita con un punto de saturación de carbono de acuerdo con la temperatura que mantuvo en la primera parte del tratamiento.

Para un fácil maleabilizado es necesario ob-

tener un número suficiente de núcleos de grafitización con el objeto de que se disminuya la distancia de difusión del carbono através de la austenita.

Si queremos aumentar el número de núcleos de grafitización debemos recurrir a la siguiente práctica:

Obtener una dispersión fina de los carburos libres en el hierro blanco mediante un enfriamiento rápido durante la solidificación.

Adicionar al hierro elementos grafitizantes como boro y aluminio.

En la práctica se considera adecuada una cuenta de nódulos de 80 y 140 por milímetros cuadrados para poder obtener un maleabilizado completo en un corto lapso de tiempo.

La figura Nr. 7 muestra la influencia del número de nódulos en el tiempo necesario para llevar a cabo la maleabilización en la primera y segunda etapa.

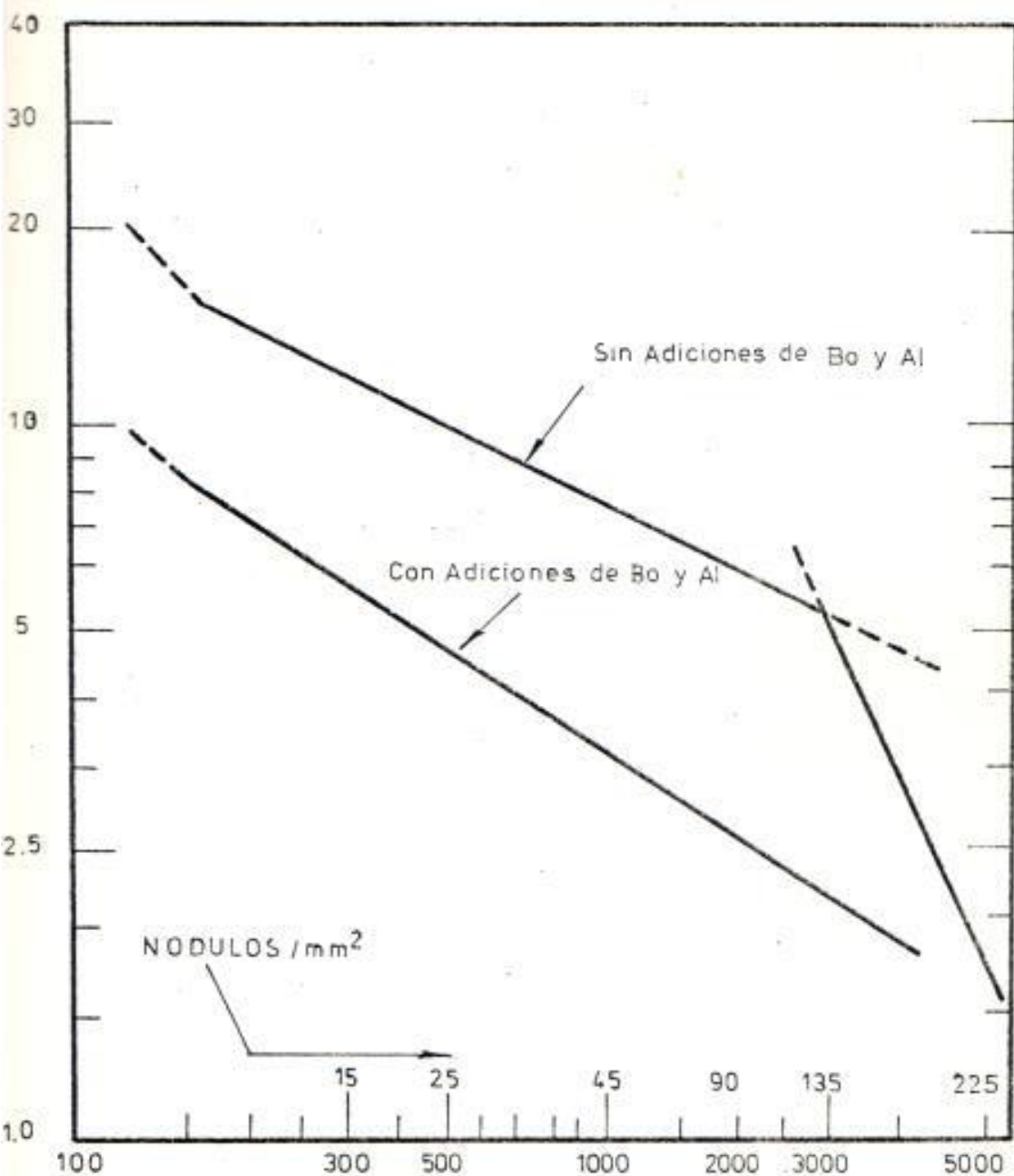


Fig. Nr. 7
Nódulos por milímetro cúbico. Efecto del número de
nódulos sobre el tiempo requerido para la primera par-
te del maleabilizado.

SEGUNDA ETAPA DE LA MALEABILIZACION.-

Al finalizar la primera parte del tratamiento la temperatura del hierro es reducida hasta una zona un poco más alta que la temperatura eutectoide, la microestructura del hierro consiste en la coexistencia de tres fases: austenita - ferrita - cementita o austenita - ferrita - grafito. A causa de la baja solubilidad del carbono en la austenita en este campo o intervalo de temperatura crítica eutectoide; y si la velocidad del enfriamiento es lenta, la transformación procede de acuerdo con el sistema estable hierro - grafito, por lo tanto, si la velocidad de enfriamiento en este punto es demasiado rápida la grafitización no es completa y las transformaciones se llevan a cabo de acuerdo con el sistema metaestable hierro - cementita formándose perlita, a una temperatura ligeramente abajo del intervalo crítico, esta perlita puede ser grafitizada pero a una velocidad lenta de enfriamiento, esto se puede explicar por la solubilidad extremadamente baja del carbono en la ferrita y por lo tanto, se tiene una velocidad lenta de difusión del carbono.

De lo dicho anteriormente se deduce que para obtener buenos resultados es necesario tener una velocidad de enfriamiento lenta y uniforme a través del intervalo crítico de temperatura eutectoide debiendo ser así mismo lenta la velocidad de enfriamiento después, de pasar el intervalo crítico con el fin de obtener una grafitización completa de la perlita en la segunda parte; pues de lo contrario del carbono, a causa de la baja velocidad de difusión en la austenita a esta temperatura y en la ferrita después de atravesar la temperatura eutectoide no alcanza a depositarse en forma combinada formando perlita, en las zonas adyacentes a los nódulos produciéndose la estructura llamada "Ojo de buey", la cual nos indica siempre una deficiencia en la grafitización de la segunda parte del tratamiento.

Por otra parte se puede tener el caso de un área perlítica alrededor de la superficie de la pieza pero sin ser propiamente un anillo perlítico producido por condiciones reductoras en la atmósfera del horno, este tipo de estructura presenta un área perlítica abajo de la superficie de la pieza entre dos zonas

completamente ferríticas y es causada por ausencia de nódulos de grafitización en el área cercana a la superficie de la pieza por lo que el carbono no alcanza a recorrer distancia de difusión tan grandes hacia los nódulos interiores y queda depositada en forma combinada formando el área perlítica mencionada.

Las microfotografías Nr. 2 y Nr. 3 muestran el efecto antes mencionado.

Se ha demostrado que la baja concentración de nódulos en la zona superficial de las piezas es debida a la descarburación por oxidación y por un bajo contenido de carbono en el hierro.

2.b.- FACTORES QUE INFLUYEN EN EL TRATAMIENTO DE MALEABILIZADO

La operación de fusión es una de las dos etapas importantes en la producción del hierro maleable, en ella el control en la composición química del hierro es de suma importancia para la obtención de un hierro base, que sea fácil



Microfotografía Nr. 2

100 X nital 2%

Fe maleable superficie
descarburada alta concen-
tración de CO_2 y oxígeno.



Microfotografía Nr. 3
200 X nital 2%
Fe maleable superficie
perlítica alta concen-
tración de CO.

de maleabilizar en un lapso relativamente corto de tiempo

Los límites de composición química de un hierro blanco base para tener mejores resultados los indica la Table Nr. 2.

Tabla Nr. 2

PORCENTAJE

Carbono	2.0	-	2.6
Silicio	0.9	-	1.6
Manganeso	0.25	-	0.55
Azufre	0.08	-	0.12 máximo
Fósforo	0.03	-	0.08 máximo

El análisis químico óptimo para cada caso varía según el equipo con que se cuente y sobre todo con el tipo de horno de maleabilizado y también el tamaño de la sección de las piezas que se va a producir.

Lo más importante de controlar en la composición química del hierro maleable es el carbón y el silicio ya que estos dos elementos son los que mayor influencia ejercen en las

propiedades y microestructura final del hierro maleable.

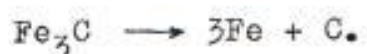
En lo que respecta a la fase de fusión la influencia de estos dos elementos es de gran importancia y de su control depende que el carbono se precipite en forma de grafito.

Se tratará ahora de dar mayor información de cómo interviene cada uno de estos elementos durante el proceso de maleabilización:

CARBONO: La fluidéz de las aleaciones ferrosas, se ve directamente afectada por el carbono disuelto en el metal, de modo que, un hierro con alto contenido de carbono tiene más fluidez que un hierro con bajo contenido de carbono, sin embargo el contenido de éste debe ser ajustado de modo que se obtenga un hierro con alta fluidez capaz de llenar moldes para piezas con sección delgada y de forma intrincada y lograr un hierro con un contenido de carbono adecuado para evitar la grafitización de éste por la influencia del silicio, pues como es bien sabido, un hierro con análisis típico para hierro maleable al solidificar puede seguir dos diferentes caminos,

esto es, de acuerdo con el sistema estable o meta-estable. El hierro blanco base para la producción de maleable debe de solidificar de acuerdo con el sistema metaestable, esto es, con precipitación del carbono en forma combinada (cementita).

SILICIO: La maleabilización de un hierro blanco se ve fuertemente afectada por el contenido de silicio, pues la acción fuertemente grafitizante de éste permite y facilita la formación de los nódulos durante el tratamiento mediante la descomposición de la cementita según la reacción:



Es por esta razón que es deseable mantener el silicio al más alto nivel permisible sin causar la grafitización durante la solidificación (grafitización primaria). La acción grafitizante del silicio es aumentada con velocidades de solidificación lentas tales como se tienen en piezas con secciones muy gruesas, es por lo tanto muy importante controlar el contenido de carbono y silicio

muy estrechamente cuando se cuellan piezas de diferentes secciones, de modo de obtener un hierro blanco libre de grafitización primaria que pueda causar la disminución de las propiedades mecánicas en el hierro después de la maleabilización.

MANGANESO - AZUFRE : El azufre que siempre está presente en el hierro se combina con el manganeso formando inclusiones de sulfuro de manganeso (MnS), que por su bajo peso específico se elimina en su mayor parte con la escoria, de modo que, el pequeño número de inclusiones que quedan atrapadas durante la solidificación no afectan apreciablemente las propiedades mecánicas del hierro.

Teóricamente 1.7 partes del azufre son necesarias para combinarse con una parte de manganeso para formar sulfuro de manganeso (MnS) por lo tanto, en la práctica se controla el contenido de manganeso manteniéndolo tres veces más alto que el contenido de azufre.

Un exceso en el contenido de manganeso con respecto al azufre retarda peligrosamente

la grafitización en la segunda parte del tratamiento térmico de maleabilización por tener un carácter perlitizante al impedir o estorbar la formación de ferrita; por otro lado en la solidificación el manganeso afecta la grafitización eutectoide evitándola y favoreciendo la precipitación del carbono en forma de cementita.

Cuando hay un exceso de azufre presente de modo que la relación manganeso - azufre sea menor que uno, la formación de grafito primario es fuertemente suprimida, pues de ha experimentado que cada centésima de azufre libre presente es suficiente para neutralizar la influencia grafitizante de quince centésimas de silicio; es por ésto que un exceso de azufre retarda también la grafitización secundaria durante las dos etapas de maleabilización.

Cuando no hay suficiente manganeso presente para neutralizar el azufre, éste tendrá a formar con el hierro el correspondiente sulfuro de hierro (FeS), el cual afecta la flui-

dez del hierro fundido disminuyéndola y sobre todo afecta profundamente las propiedades mecánicas del hierro al actuar como una inclusión alrededor de la cual se deposita el grafito durante la grafitización secundaria en el maleabilizado. La figura Nr. 8 muestra el efecto del carbono y silicio sobre la solidificación del hierro.

CROMO : Este elemento es un fuerte formador de carburos o carburógenos, por lo tanto, cantidades de exceso de tres a seis centésimas de por ciento son totalmente indeseables en el hierro maleable. El cromo estabiliza fuertemente la cementita, este efecto se hace más crítico en piezas de sección delgada, tales como las conecciones para tuberías.

El cromo puede introducirse en el hierro por medio de los materiales de carga al cubilote u horno de fusión, por lo tanto, se hace necesario un estricto control sobre éstos.

FOSFORO : El fósforo es otro elemento que siempre está presente en el hierro, su origen

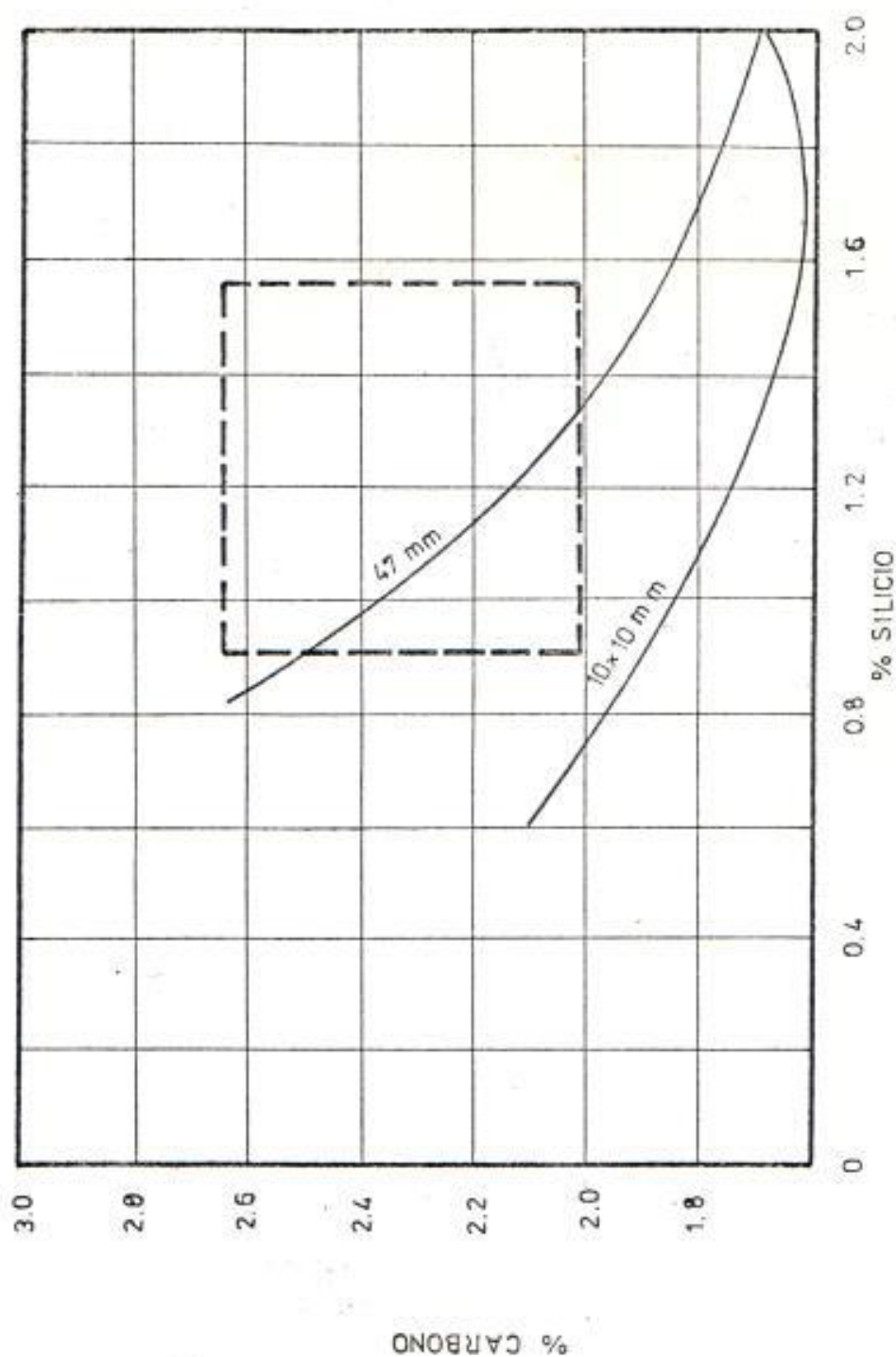


Fig. Nr. 8
Influencia del carbono y silicio sobre la solidificación en las barras de diferente sección.

es el mineral de hierro/ que se carga a los altos hornos donde se reduce el arrabio o hierro de primera fusión que es el material base para la fabricación de los hierros colados.

Este elemento aumenta la fluidez del hierro, lo cual ayuda a aumentar la colabilidad y permite obtener piezas con forma complicada y difícil de alimentar. El fósforo es también un grafitizante, al aumentar el intervalo de solidificación en el punto eutéctico, por otro lado, cantidades mayores de 0.15% en fósforo y cantidades excesivas de silicio en el hierro blanco ocasionan el fenómeno llamado de fragilidad al temple es por esto que piezas de maleable que se fundan con altos contenidos de fósforo y silicio y que vayan a ser galvanizadas sufren este fenómeno, ya que la temperatura en el baño de zinc en el galvanizado es superior a la temperatura eutectoide de transformación de austenita ó perlita.

El fenómeno de fragilidad al temple es causado por cambios transgranulares, pues la es-

estructura no sufre cambios después de producirse el fenómeno y solo puede ser detectado por pruebas de resistencia al impacto (Charpy), ó por determinación del módulo de elasticidad.

COBRE : El cobre tiene un efecto grafitizante durante la solidificación del hierro blanco, así como un efecto perlitizante durante la transformación eutectoide, lo cual es significativo en la producción de los hierros maleables perlíticos.

Se ha reportado que una adición de 1.0 % ó más, aumentan las propiedades mecánicas del hierro maleable por el aumento de la relación entre el límite elástico y la resistencia a la ruptura por tracción, aunque esto hace que el porcentaje de alargamiento disminuya.

Generalmente, la tabla Nr. 3 , nos muestra la influencia de los elementos más importantes sobre el proceso de solidificación del hierro blanco en el diagrama de equilibrio grafito - cementita.

Tabla Nr. 3

I N F L U E N C I A

CARBUROGENA

Vanadio

Cromo

Molibdeno

Manganeso

Azufre

GRAFITIZANTE

Silicio

Cobre

Níquel

Cobalto

Aluminio

Boro

3. b.- CONTROL DE ATMOSFERA DURANTE EL
PROCESO

En cualquier proceso de tratamiento térmico lo primordial es mantener un control estricto sobre la atmósfera existente en los hornos, pués de lo contrario la superficie de las piezas tratadas sufrirán deterioros debido a las reacciones de oxidación y reducción entre el metal y la atmósfera.

En el proceso de maleabilización se lleva a cabo este control, mediante el uso de una unidad generadora de nitrógeno; la cual proporciona una mezcla de gases en un equilibrio adecuado para evitar los problemas antes mencionados.

Daremos una idea del tipo de control necesario en las atmósferas de hornos para tratamientos térmicos.

Hay dos tipos de cambios en las superficies de los hierros tratados termicamente en hornos y son los siguientes:

OXIDACION

El cambio más común que se efectúa en la superficie de los hierros es la oxidación, este es el resultado de la combinación, en alguna de sus formas, del oxígeno con el hierro. El óxido producido de esta manera puede ser, desde una delgada coloración hasta una gruesa capa suelta.

REDUCCION

La reducción es lo opuesta a la oxidación. Una pieza de hierro con la superficie oxidada cuando se la calienta hasta el rojo en una atmósfera que contenga hidrógeno ó monóxido de carbono, quedará con el óxido reducido a hierro puro con un color gris plateado.

Hay muchos casos en los que se aplica con éxito atmósferas protectoras; entre ellas se encuentran las inertes y las reductoras, que son las que más se utilizan como protección en el tratamiento de los hierros.

La atmósfera protectora más simple para el tratamiento de los hierros está formada por un gas inerte puro para el hierro tal como argón. Este gas no reacciona con la super-

ficie del hierro para formar costras o cascarrillas de óxido; no se disuelve el hierro ni ataca las superficies pulidas haciéndolas asperas.

Sin embargo este gas no es de uso práctico por su elevado costo y el hecho de que no se lo puede mantener con la pureza requerida a un horno de tipo comercial.

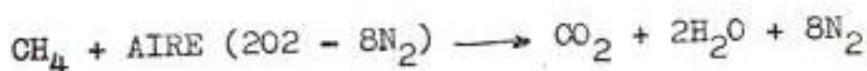
El nitrógeno, debido a que es un gas inerte es otro buen prospecto pero, a pesar de su fácil adquisición no forma una atmósfera adecuada debido a su propia carencia de protección contra impurezas tales como el oxígeno y descarbonización del hierro cuando se le trate con nitrógeno.

Para prevenir la oxidación la atmósfera normal del horno debería estar libre de oxígeno debido a que el porcentaje de oxígeno (presión parcial) es siempre mayor en el aire circundante que en el horno, este gas tiende a penetrar en el último. Para evitar la entrada de oxígeno a través del sello, se necesita mantener una presión positiva en el interior

del horno y esto lo podemos conseguir por medio de una atmósfera protectora.

Si la atmósfera protectora es de nitrógeno puro, no será capaz de neutralizar cantidad alguna de oxígeno, tanto en la forma de oxígeno libre, como en la de bióxido de carbono a vapor de agua, que pueda penetrar en el horno, (tal como lo haría otro gas como el hidrógeno u el monóxido de carbono) capaz de reaccionar y neutralizar el efecto oxidante del producto formado.

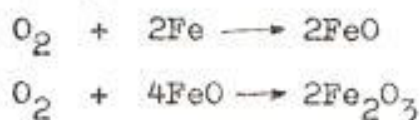
En la producción de atmósferas para horno por medio de la combustión parcial o total de gases se producen también reacciones químicas de la combustión. Por este proceso, la combustión de los gases de hidrocarburos tales como el gas natural (metano CH_4) serían las siguientes:



REACCION OXIDANTE El resultado más importante que obtenemos de las atmósferas protectoras es la prevención de la oxidación en la superficie

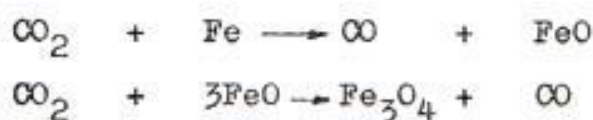
de los materiales que se están trantando. El oxígeno tanto en su estado libre como en el aire, o en combinación, como en el bióxido de carbono y vapor de agua, es la causa más común de la oxidación que se desea evitar.

Las siguientes reacciones son el resultado característico del oxígeno libre en contacto con el hierro a temperaturas elevadas:



Estas reacciones pueden representar una oxidación entre una coloración de un azul fuerte y una capa de óxido suelta.

El bióxido de carbono reacciona con el hierro de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



Estas reacciones deben considerarse como reversibles hasta un punto de equilibrio en el

cual la concentración del monóxido de carbono producido equilibrará la concentración de bióxido de carbono de acuerdo con la constante de equilibrio a temperatura determinada.

Un conocimiento de la composición de equilibrio del gas en función de la temperatura nos permitirá predecir la forma en que tiende a reaccionar con el hierro a cualquier temperatura, cualquier mezcla que contenga monóxido y bióxido de carbono. La reacción que ocurre depende de un gran número de factores, pero en general, el grado de la reacción es bastante alto a temperaturas elevadas, por lo común, la oxidación a la reducción ocurre a las temperaturas del tratamiento térmico, si la composición del gas es favorable.

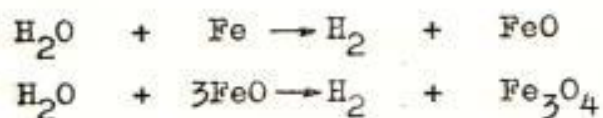
Los datos para este tipo de equilibrio se expresan en términos de relación entre los gases, con los que se forman constantes de un valor definido para cada temperatura. Debido a esta información ha sido posible preparar curvas de equilibrio térmico. La llamada curva de equilibrio derecha, proporciona las relaciones de equili-

brio entre el hierro, óxido de hierro, monóxido de carbono y bióxido de carbono. Ver Fig. Nr. 9

Según esta gráfica, puede notarse que el área a la derecha de la curva es la zona oxidante y que el área a la izquierda es la zona reductora.

En consecuencia, si una atmósfera contiene partes iguales de CO y CO₂ se podrá calentar hierro en ella hasta a una temperatura de 538°C (1.000°F) apróximadamente sin que forme oxidación azul o coloración. En cambio si se aumentase la temperatura a 593°C (1.100°F) se caerá en el lado oxidante de la curva y deberá esperarse que se efectúe cierta oxidación.

La reacción de oxidación que sigue en importancia es la del vapor de agua con el hierro de acuerdo con las ecuaciones siguientes:



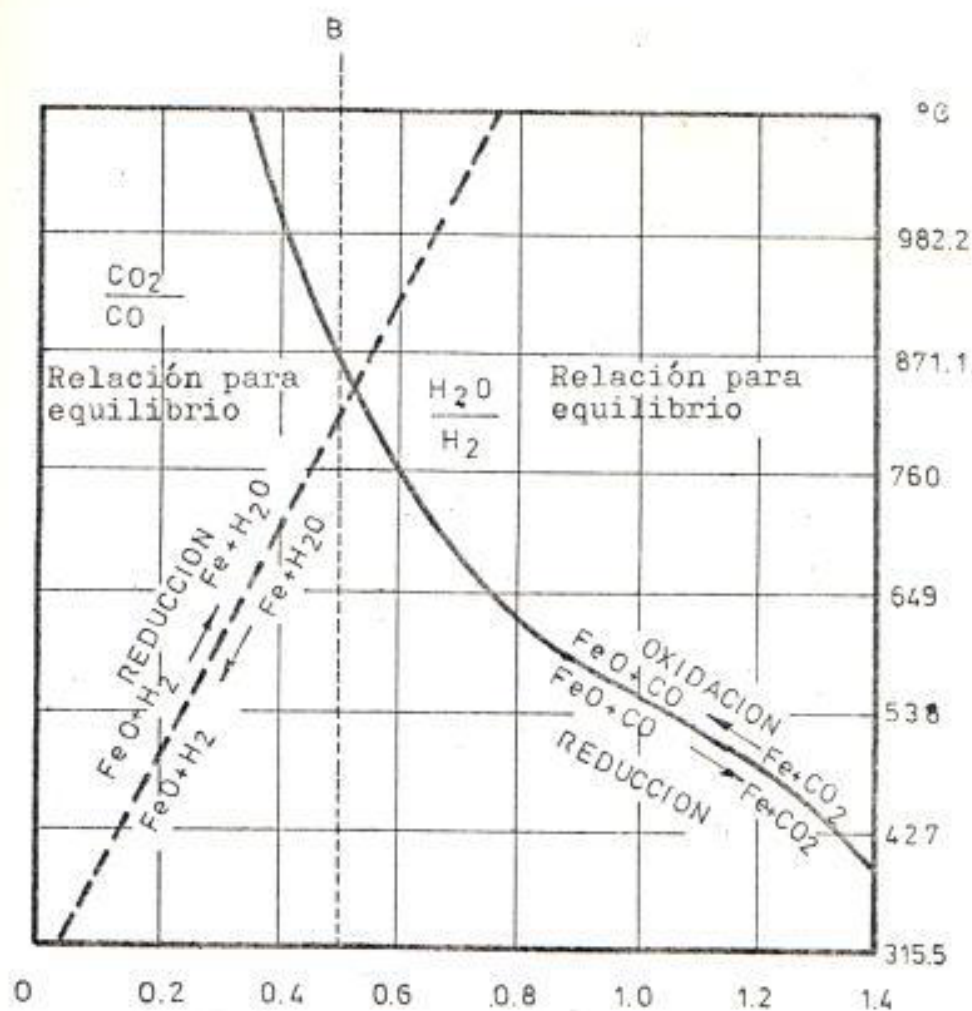


Fig. Nr. 9

Relación de gases en una mezcla.

Esta reacción tiene también sus valores de equilibrio que se muestran en la curva a la izquierda. Nuevamente, el área de la izquierda, de la curva, indica una reacción reductora y la de la derecha indica oxidación.

Cuando se tiene un gas complejo que contenga CO y CO₂ tal como el obtenido de la combustión parcial de los gases del hidrocarburos, se tiene una situación interesante.

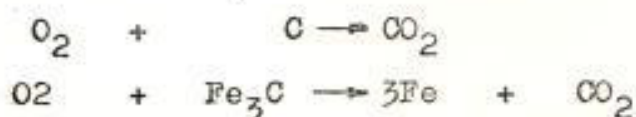
La curva de equilibrio teórica para el hierro y el óxido del hierro, CO y CO₂, cruza a la del hierro, óxido de hierro, H₂O y H₂, a unos 816°C (1.500°F). En consecuencia, si se tiene, digamos, 5 % de CO₂ y 10 % de CO en el gas mencionado, junto con hidrógeno y vapor de agua, la relación de los gases de carbono (CO₂ a CO) que es de 0.50 trazada con B, (649°C - 1.200°F) muestra que la mezcla es bastante reductora y que aumenta su acción según aumenta la temperatura. Por lo tanto, es posible con un gas complejo, enfriar hierro por debajo de su zona crítica de (538°C - 1.000°F) sin que se produzca oxidación debido a que el efecto reductor del

equilibrio del CO_2 dividido entre el CO contrasta el efecto oxidante de la combinación del H_2O , dividido entre el H_2 .

REACCIONES CARBURIZANTES Y DESCARBURIZANTES

El oxígeno es tanto oxidante como descarburante del hierro y se eliminará con tanta rapidez como el carbono, y la superficie resultante no mostrará descarburación.

En cambio si el proceso de oxidación es lento, el carbono puede quitarse con mayor rapidez que el hierro, resultando la descarburación. Las reacciones del oxígeno con el carbono y el carburo de hierro son las siguientes:



El vapor de agua oxidará al hierro, y es también un fuerte descarburante. Sin embargo, la propiedad más importante del vapor de agua aparece que es su efecto sobre la condición de equilibrio de los otros gases.

Por ejemplo, una cantidad muy pequeña de vapor de agua añadida a hidrógeno puro seco, más allá de cierto punto, ocasionará que la atmósfera se vuelva descarburante. La misma condición existe con el nitrógeno.

El efecto general de añadir vapor de agua a ciertas atmósferas protectoras, es el de retardar las relaciones de los gases de hidrocarburos con el hierro y neutralizar el potencial de carbono de ciertos gases de hidrocarburos disociados. En consecuencia, para prevenir la descarburación en una forma satisfactoria, debe mantenerse un bajo contenido de humedad en cualquier atmósfera.

El proceso de restauración del carbono, que involucra la restauración del carbono en las superficies descarburadas, ha recibido mucha atención en los últimos años.

Como los demás gases oxidantes, el CO_2 es descarburante; además el CO_2 no solo se combina directamente con el hierro y el carburo de hierro, sino que se combinará con el hidrógeno para producir vapor de agua por medio de la reacción gas de agua. Por lo tanto, para mantener un punto

de rocío bajo, es necesario eliminar casi por completo el CO_2 .

La reacción del CO_2 con el carburo de hierro es:



Esta ecuación que es reversible, muestra que para mantener un equilibrio entre los gases y el carburo de hierro, debe existir cierta relación fija de CO y CO_2 .

Las curvas de la Fig. Nr. 9 de la Pág. Nr.62, indican esta relación que es una función de la temperatura y del contenido de carbono. Es importante notar que una sola relación de CO y CO_2 es neutral a solo un contenido de carbono a una temperatura en particular.

4.b.- CONTROL METALURGICO DEL MATERIAL PROCESADO

El control metalúrgico en el proceso de la producción del hierro maleable es básico para poder obtener un hierro que reúna todas las características de calidad y que llene las especificaciones de ingeniería para este tipo de

ferroaleación.

Este control ante todo debe ser eminentemente práctico de modo que no presente dificultades para llevarse a cabo y que sea desde luego representativo para el ritmo de producción específico de cada fundición.

Un control metalúrgico adecuado del hierro maleable debe de cubrir desde la inspección de los materiales de carga al horno de fusión hasta el control metalográfico y de pruebas mecánicas en el Laboratorio de Metalurgia Física. En general se puede decir que el control se basa en la inspección de cada una de las siguientes partes del proceso:

- a.- Materiales de carga y combustible (coque)
- b.- Operación de fusión directa
- c.- Control de temperaturas de colada y velocidad de enfriamiento.
- d.- Control de temperaturas, tiempos, y composición de atmósfera en el maleabilizado.
- e.- Control de microestructuras y de las propiedades mecánicas del hierro.

1.- CONTROL DE MATERIALES DE CARGA

Como ya se dijo anteriormente la carga típica del horno de fusión con el objeto de obtener un hierro con análisis propio para maleabilizado consiste de acero (60%) y retornos de la propia fundición (40%) así como ferrosilicio y ferromanganeso.

El control de estos dos materiales es generalmente por observación visual y en casos especiales se hace uso de análisis químico.

El acero debe ser de bajo carbono lo cual se puede comprobar mediante el análisis químico y estudiando su procedencia, desde luego son rechazables aquellos lotes con partes cromadas, niqueladas y estanadas, por lo regular el acero utilizado en las cargas para la fusión del hierro maleable proviene de desperdicios o sobfantes de plantas troqueladoras que utilizan lámina de acero de bajo carbono.

El control de los retornos es más sencillo, y

sólo deberá de tenerse la seguridad de no cargar retornos de fundición gris por su alto contenido de carbono grafitico.

El control del coque utilizado para fundir debe tender a comprobar el bajo contenido de azufre (0.5% máximo), ya que éste elemento retarda la grafitización en el recocido de maleabilización y es detrimental para las propiedades mecánicas del hierro.

El control de las ferroaleaciones es llevado de acuerdo con el análisis químico especificado en las mismas.

2.- CONTROL DE LA OPERACION DE FUSION.- Este control se describió anteriormente y solo se añade la recomendación de usar un determinador de carbono termoeléctrico para conocer el carbono equivalente del hierro.

Otro medio de control de mucha ayuda consiste en la observación de fractura para controlar la grafitización primaria.

Se tiene diferentes tipos de barras para este control y para llevarse a cabo debe ser tomado

en cuenta la velocidad de enfriamiento de las mismas.

Las Fig. Nr. 10 y Nr. 11 muestran dos de los tipos de barras y cuñas de temple utilizadas para el control de la grafitización primaria.

3.- CONTROL DE ADICIONES EN LA CUCHARA Y VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

Este control se ha descrito en el capítulo II y solo se hace resaltar la necesidad de mantener un estricto control sobre las adiciones en la cuchara (bismuto) pues si éstas son hechas en exceso sus beneficios se pierden y además ocasionan graves problemas en el posterior maleabilizado a causa de que el bismuto puede actuar como un retardante de la grafitización en el mismo.

La velocidad de enfriamiento debe ser controlada ya que de ello depende la estructura del hierro al ser maleabilizado y desde luego la posible formación indeseable de grafito laminar eutéctico (moteado).

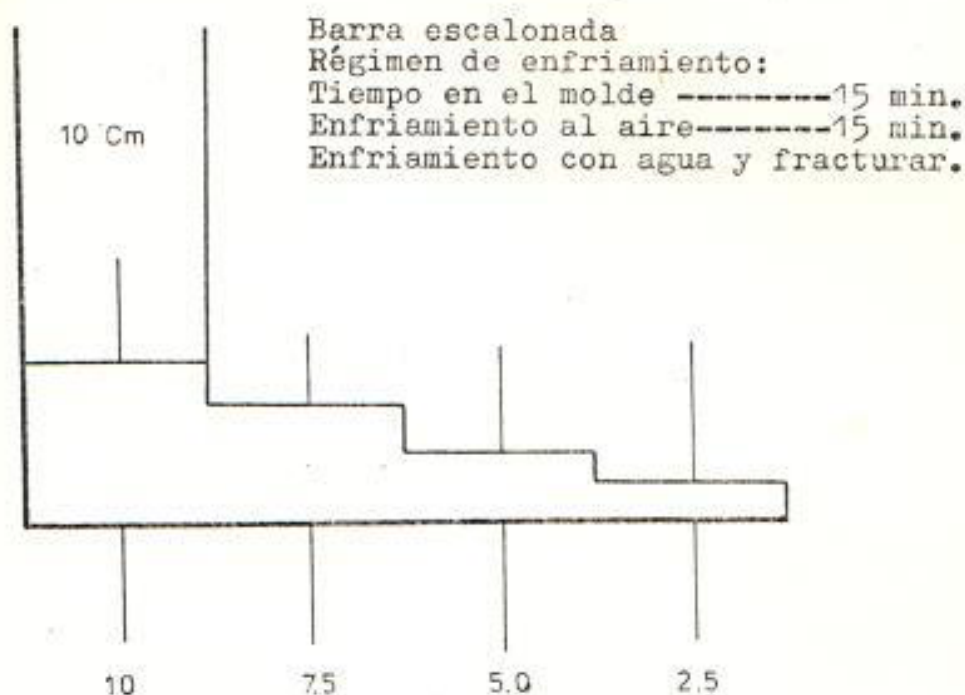


Fig. Nr. 10

Cuña de 5 Cm
 Tiempo en el molde-----5 min.
 Enfriamiento al aire -----5 min.
 Enfriar con agua y fracturar

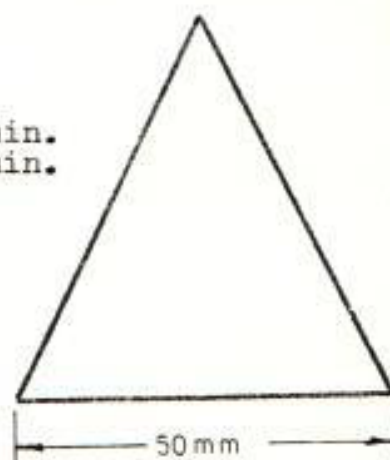


Fig. Nr. 11

Tipos de barra para control de grafitización primaria.

4.- CONTROL DE TEMPERATURAS, TIEMPOS Y COMPOSICION DE ATMOSFERA DURANTE EL MALEABILIZADO

Las temperaturas y tiempos durante el recócido de maleabilización afectan profundamente los resultados finales, por lo tanto, estos deben ser registrados cada hora en cada una de las zonas del horno. En lo que respecta a la atmósfera del horno de maleabilizado debe de practicarse una comprobación continua del punto de rocío de la composición química de los gases, que asegure la mantención de la relación adecuada de gases para evitar las reacciones de oxidación o reducción entre el metal y la atmósfera.

5-b.- TIPOS DE HORNOS DE MALEABILIZADO.- En cualquier proceso industrial es de suma importancia el factor equipo para obtener productos de primera calidad a un costo de baja producción.

[La importancia del equipo se hace capital, puesto que un horno de maleabilizado con todos los adelantos técnicos, así como un equipo productor de una atmósfera inerte que evite las reacciones de oxidación y reducción en la superficie del metal, son básicas para la obtención de un hie-

ro maleable de gran calidad de un corto tiempo.

El equipo para un maleabilizado eficiente lo podemos definir de la siguiente manera: un equipo de diseño probado que sea capaz de maleabilizar un hierro blanco de análisis dado en piezas de tamaño promedio a un bajo costo de un corto lapso de tiempo a especificaciones de ingeniería determinadas refiriéndose a propiedades mecánicas y metalúrgicas.

Los hornos para maleabilización han sido desde la introducción del hierro maleable de corazón negro, objetivo y meta de estudio de varios investigadores, pues a medida que se conocía más a fondo la dinámica de las transformaciones estructurales llevadas a cabo durante el proceso, se vió como una necesidad del desarrollo técnico y mejoramiento del equipo.

En esta tesis se describen los hornos actuales para maleabilización pues no se considera importante indicar las transformaciones que estos han sufrido desde el comienzo de su utilización, en la actualidad el tipo de horno que más

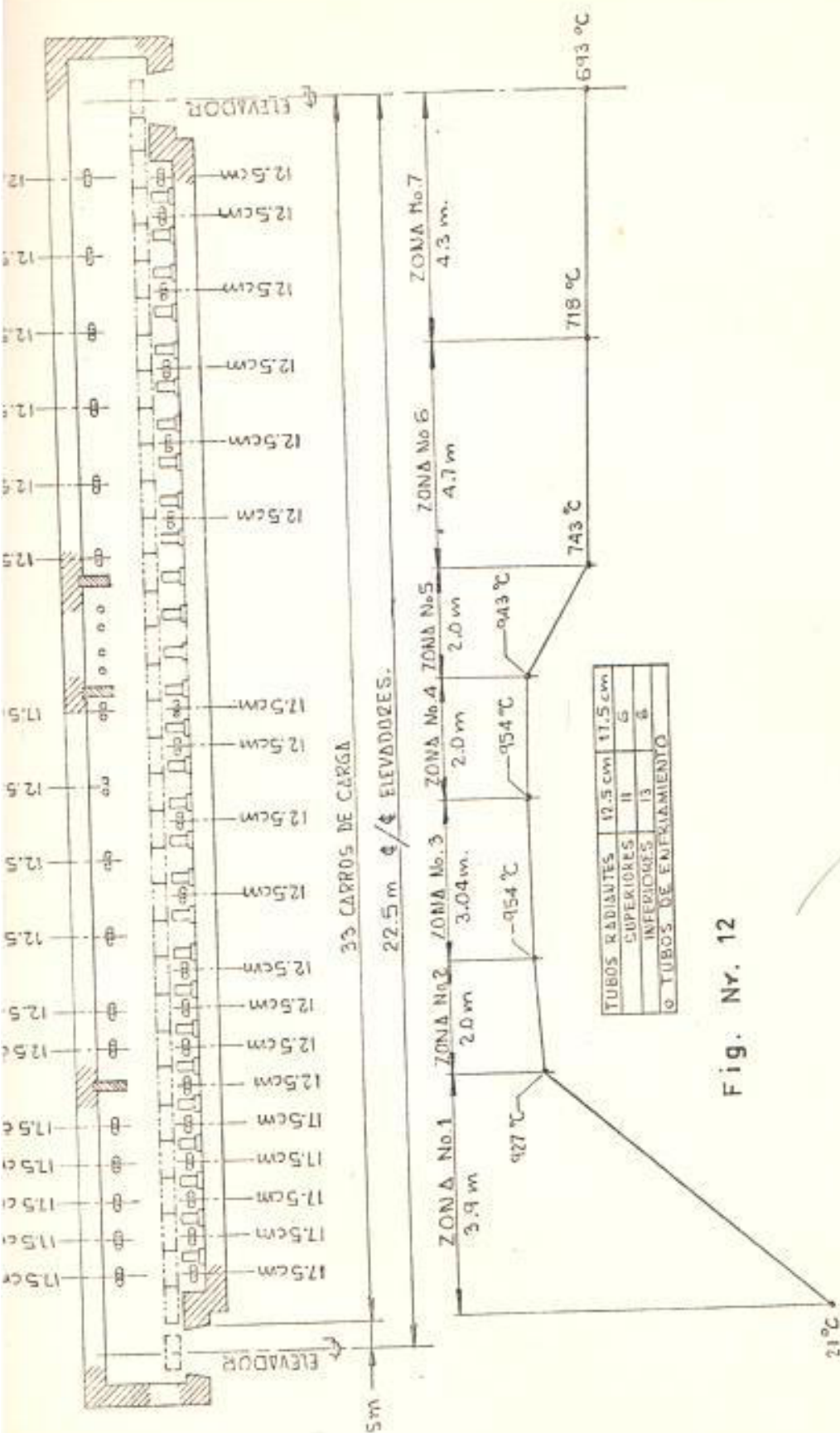
se emplea en la industria del hierro maleable de gran escala es el de tipo continuo, ver Fig. Nr. 12 pues es el que ofrece mayores ventajas tratándose de grandes volúmenes de producción.]

Este tipo de horno puede medir hasta 35 metros de longitud y está diseñado para que la carga pase a través de él, donde existen diferentes temperaturas para llevar a cabo el tratamiento.

La carga entra y sale mediante un sistema de elevadores en los extremos. La capacidad de estos hornos es de hasta para 99 canastillas de carga que son colocadas en tres carriles, cargándolas y descargándolas de tres en tres en un determinado tiempo que varía según la duración del tratamiento.

El tiempo de maleabilizado dura por lo general de 33 a 48 horas y depende de varios factores como la composición química del hierro, el tamaño o sección de las piezas, el tipo de horno, etc.

La forma de calentar estos hornos es por medio



de tubos radiantes de material refractario que tiene un quemador que introduce la flama dentro de ellos.

A lo largo del horno podemos distinguir tres zonas básicas que las podemos describir de la siguiente manera:

ZONA CALIENTE O DE ALTA TEMPERATURA.- Esta zona se tiene en el extremo de la entrada de la carga, la zona de precalentamiento en donde la carga se va calentando lentamente hasta alcanzar una temperatura de 950 grados centígrados. Después de esta zona se tiene un mantenimiento de temperatura donde la carga es sometida a la temperatura antes mencionada durante diez o doce horas.

ZONA DE ENFRIAMIENTO.- Esta zona se caracteriza por efectuarse en ella un tratamiento rápido de la carga hasta aproximadamente 760 grados centígrados. Este enfriamiento rápido se debe llevar a cabo durante tres horas aproximadamente al pasar la carga por una zona donde se tienen los tubos radiantes con una circulación de aire frio.

ZONA DE ENFRIAMIENTO LENTO.- En esta zona la carga se enfria durante trece o catorce horas desde una temperatura de 760 grados centígrados a 656 grados centígrados.

Esta zona de enfriamiento lento se la denomina segundo escalón del tratamiento de maleabilizado, la cual es la más difícil y necesaria de controlar, por lo tanto, en los hornos modernos se han diseñado para que esta parte del horno sea calentada por medio de electricidad de modo que se pueda controlar facilmente la velocidad de enfriamiento necesaria para asegurar una completa ferritización por un control exacto de temperatura através de esta zona.

Un horno continuo para maleabilizado es el que se ilustra en la Fig. Nr. 12 otros tipos de hornos para mabealizado son los estacionarios de caja con empaque, los de carro y los de mufla, que son los utilizados en las fundiciones de mediana y baja producción.

HORNOS DE CAJA.- Como su nombre lo indica las pie-

zas se empacan en cajas cuya forma es de crisol y son calentados exteriormente, en ellos se empaca la carga y se procura cubrirla con algún material inerte como arena de sílice o escorias para evitar las reacciones entre la superficie del metal y la atmósfera, desde luego un control adecuado del tratamiento es difícil y el hierro que se obtiene en estos hornos no posee la calidad de los hornos continuos, ver Fig. Nr. 13

HORNOS DE MUFLA..- Son llamados también hornos de laboratorio. Los más comunes y versátiles son los calentados a base de elementos de resistencia eléctrica, formada por una aleación que contiene un 80 % de níquel y 20 % de cromo. Son de hogar rectangular y están revestidos mediante un refractorio adecuado. Este tipo de horno, como se muestra en la Fig. Nr. 14 es el que se empleará para las experiencias en el laboratorio de metalurgia para el proceso de maleabilización del hierro blanco.

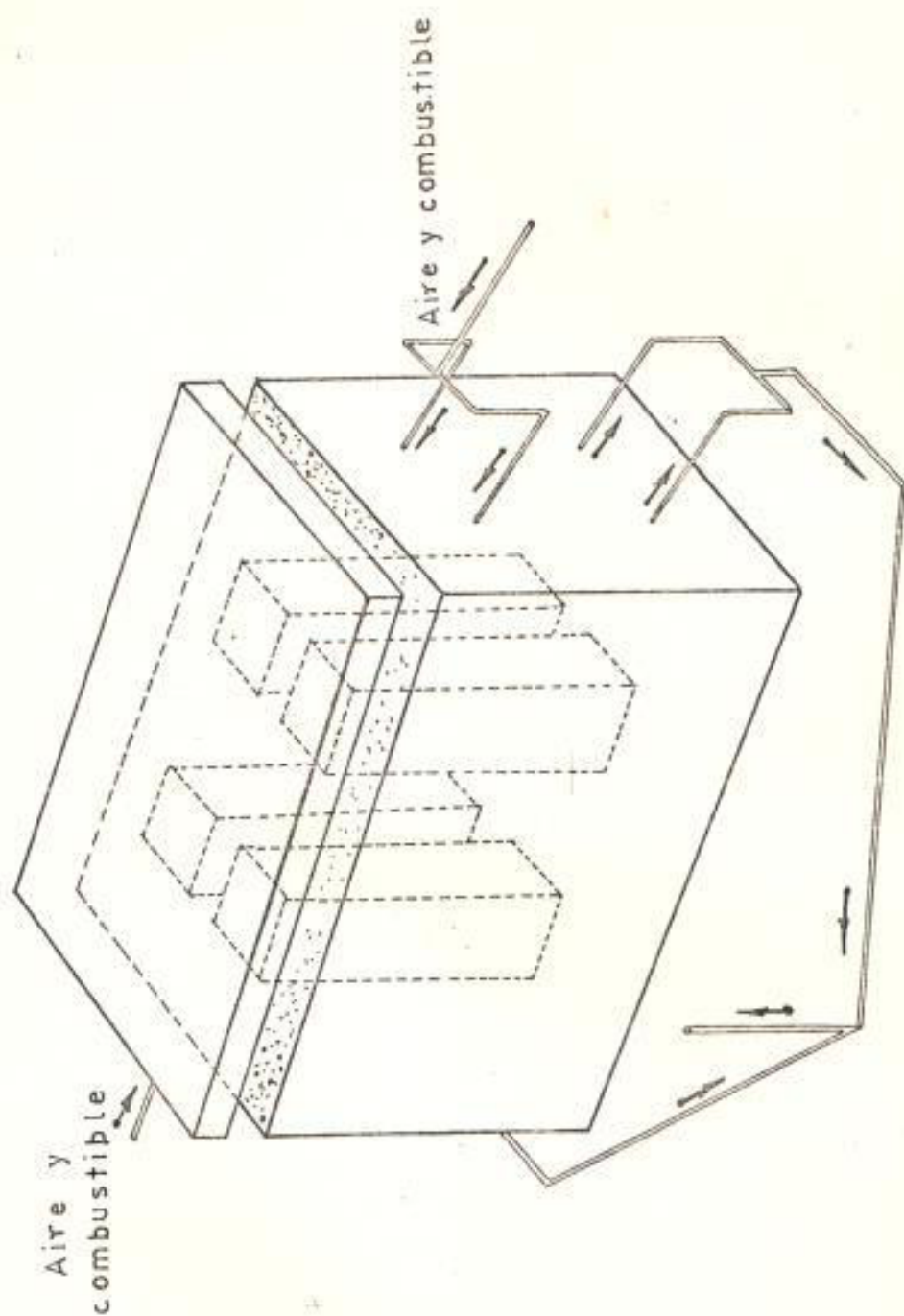


Fig. Nr. 13 Horno de Caja

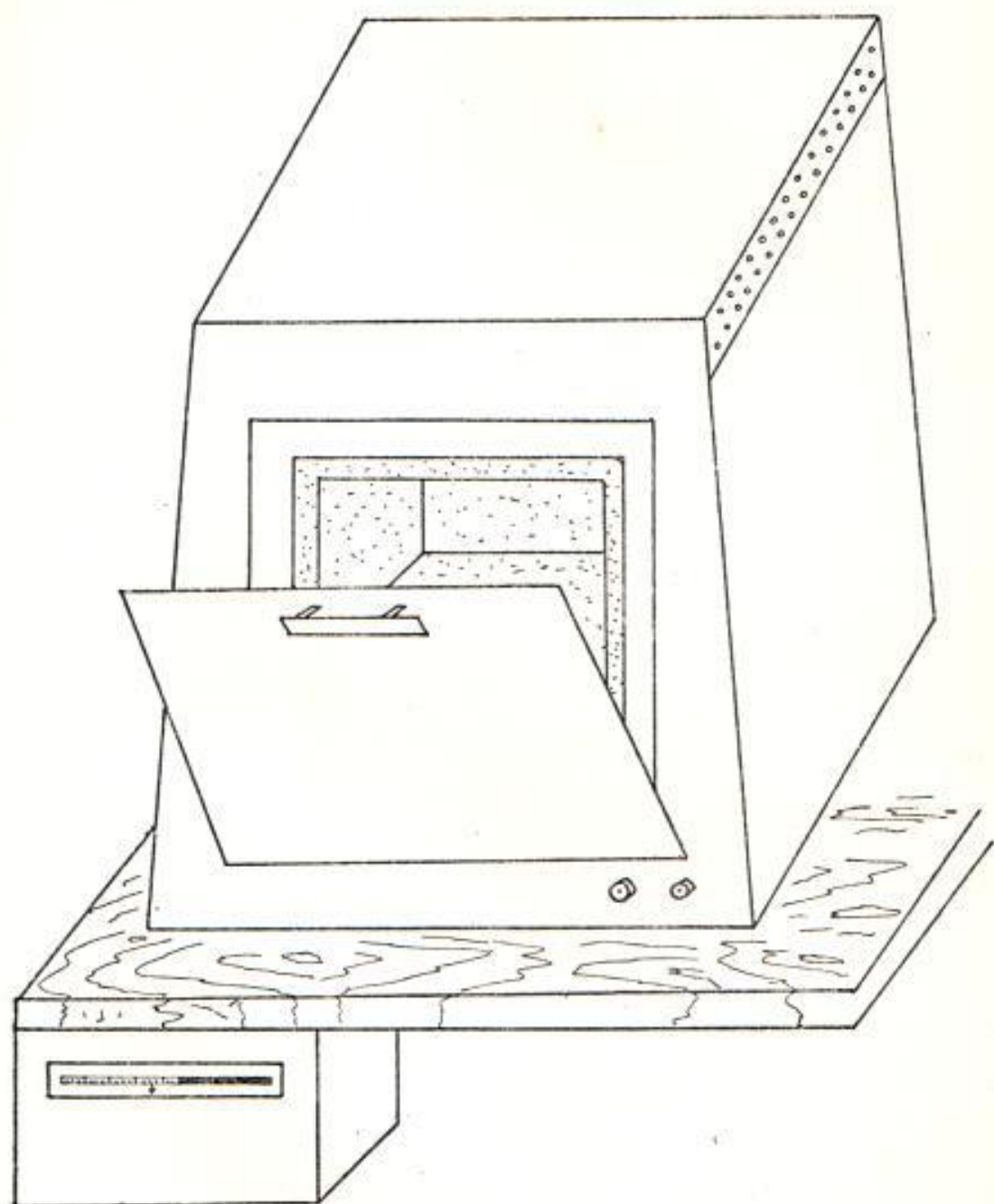


Fig. Nr. 14 Mufła

C.- PROPIEDADES, APLICACIONES Y USOS COMUNES

Las propiedades del hierro maleable ferrítico y perlítico determinadas por la ASTM son las siguientes:

GRADO 32510

Resistencia mínima a la tracción:

35.15 kg / mm²

50.000 lbs / pulg²

Resistencia elástica mínima

22.85 kg / mm²

32.5000 lbs / pulg²

Alargamiento mínimo en barra de 2"

10 %

Módulo de elasticidad.

1'760.000 kg / cm² mín.

25'000.000 lbs/pulg²

Resistencia a la compresión.

140 kg / mm² mín.

200.000 lbs / pulg²

Resistencia al corte.

80 a 90 % de la resistencia a la tracción.

Dureza Brinell:

110 - 156

GRADO 35018

Resistencia a la tracción.

37.26 kg / mm² mín.

53.000 lbs/pulg²

Resistencia elástica mínima.

24.61 kg / mm²

35.000 lbs/ pulg²

Alargamiento en barras de 2"

18 %

Dureza Brinell:

110 - 156

Las propiedades del hierro maleable perlítico
determinadas por la ASTM son las detalladas en
la tabla Nr. 4

MALEABLE PERLITICO:

Tabla Nr. 4

Grado	Resistencia tracción ₂ lbs/pulg ²	Alargamiento barras de 2"	Punto fluencia ₂ lbs/pulg ²	Dureza Brinell
45010	65.000	10 %	45.000	163-207
45007	68.000	7 %	45.000	163-217
48004	70.000	4 %	48.000	163-228
50007	75.000	7 %	50.000	179-228
53004	80.000	4 %	53.000	197-241
60003	80.000	3 %	60.000	197-255
80002	100.000	2 %	80.000	241-269

Este tipo de hierro maleable se puede pasar de un grado mayor al menor haciendo un tratamiento térmico adecuado.

El hierro maleable es utilizado en piezas fundidas para muy importantes industrias tales como la automotriz, constructiva, eléctrica, ferroviaria, etc.

Su aplicación es cada vez más extensa dado que

la técnica de su fabricación se ha desarrollado y perfeccionado enormemente en los últimos años.

Las aplicaciones de maleables ferríticos especialmente son:

GRADO 32510

Conexiones para tubería (codos, nudos, neplos, etc.)

Cajas de engranajes, eslabones de cadenas, perchas y columpios de muelle, zapatas para frenos, mazas para ruedas, piezas para la industria automotriz e implementos agrícolas, herrajes para las líneas de distribución en la industria eléctrica.

GRADO 35018

Herramientas de mano, piezas sujetas a alta presión, artículos para la industria petrolera, palancas de accionamiento en general y piezas para la industria ferroviaria, en las juntas de dilatación, parapetos de los puentes, en los montacar-

gas de cadenas y en muchas aplicaciones de uso general.

Las aplicaciones más corrientes de las fundiciones maleables perlíticas son en la industria automovilística, como cajas del puente trasero y de la diferencial, árboles de leva y cigueñales, en la fabricación de equipos de transporte, ruedas dentadas, eslabones de cadenas, en la construcción de elementos de máquinas, cilindros de laminar, bombas, boquillas, levas y balancines. En la fabricación de armamento, montajes de piezas de los carros de combate y armas cortas, finalmente en la construcción de numerosas herramientas pequeñas tales como llaves inglesas, martillos, prensas de mano y tijeras.

C A P I T U L O I V

C A P I T U L O I V

TRABAJO EXPERIMENTAL

A.- INTRODUCCION

En este capítulo, se tratará de la obtención del hierro blanco en las Industrias Nacionales: Fundición Vallejo y Siderúrgica Guayaquil, quienes cooperaron para que se efectuaran los diferentes ensayos para la obtención de las probetas.

Primeramente se indicó al fundidor que en lo posible trate de seleccionar los materiales que se tenían a la mano y que iban a ser fundidos en el horno de cubilote, tratando de escoger lo más adecuado para obtener un hierro blanco cuya composición química entre en el rango determinado por la Sociedad de Fundidores de hierro maleable y que fué descrita en el capítulo Nr. 2.

En la Fundición Vallejo se trabajó sin tratamiento de cuchara y se obtuvo el hierro blanco por el método de enfriamiento rápido. En Siderúrgica Guayaquil, se hizo tratamiento de cuchara con bismuto como elemento carburógeno y aluminio como

elemento nucleante.

Una vez obtenidas las probetas se efectuó el tratamiento térmico en los hornos del laboratorio de metalurgia, tomándo como patrón el ciclo típico de recocido de hierro maleable, realizándose a su vez varios ensayos cambiando el factor tiempo en las 2 etapas de maleabilizado y los resultados obtenidos se describirán en el siguiente capítulo.

B.- COLADO DE FUNDICION BLANCA Y MUESTREO

Antes de comenzar a describir la manera de como se lograron las muestras de material (hierro blanco) con el que se pudiera llegar a un posterior maleabilizado, es necesario mencionar las experiencias realizadas en las fabricas visitadas.

Las fundiciones del medio local, solo trabajan produciendo hierro gris, sin ningún control de laboratorio para reconocer las cualidades de sus respectivas coladas, lo cual representa para el presente trabajo un serio inconveniente, ya que la producción de maleable implica un severo con-

trol tanto de materiales de carga como ajuste de composición.

Esta situación se torna aún más crítica cuando el equipo de fusión es un cubilote. Es bién sabido que tener una composición definida ó entre ciertos rangos es difícil de alcanzar en este tipo de horno, puesto que la naturaleza de la fusión no es controlable. Solo la experiencia de años de trabajo produciendo hierro gris de los fundidores nacionales, es la que se ha tomado como guía para un tanteo de composición final por medio de cálculos de carga de materias primas dentro del cubilote.

Realmente en la práctica no es lo óptimo cuando se trata de producir un maleable de calidad establecida por normas, pero se considera que el presente trabajo puede dar una pauta a los fundidores nacionales que deseen trabajar en la elaboración de hierros maleables comunes, que son en definitiva en los actuales momentos de imperiosa necesidad para nuestro medio y más aún cuando se piensa ya en la introducción de las industrias automovilística y la de fabricación de maquinarias.

Después de lo analizado anteriormente, se tiene una respuesta directa en cuanto a como deben los fundidores llevar su proceso de fusión en cubilote. Esto tiene que ver en programas de control que deben ser cuidadosamente planeados y seguidos de acuerdo a lo establecido.

Los procesos de control que se imponen en cualquier hierro blanco base a partir de cubilote son:

- 1.- Inspección y selección de materias primas.
- 2.- Cargas del horno.
- 3.- Composición del hierro blanco base.
- 4.- Pesada de materias primas.
- 5.- Observación de dimensiones de las piezas a fundir.
- 6.- Control del hierro blanco en la fundición.

En adelante se comentará cada uno de estos pasos para la obtención del hierro blanco base.

1.- INSPECCION Y SELECCION DE MATERIAS PRIMAS.-

Tiene por objeto determinar los materiales metá-

licos que se fundirán en el horno. En primera instancia se tratará de usar materiales que sean de una sola fuente tanto para los aceros como para los hierros, los mismos que deberán estar excentos de materias extrañas tales como grasas, aceites, etc. que puedan contaminar la carga.

En el caso de los primeros, es importante seleccionar un tipo de carga que sea de pequeñas dimensiones lo cual redundará en la facilidad de fusión de los mismos, la experiencia recomienda que se usen materiales laminados como recortes de planchas de hierro negro que son de muy bajo contenido de carbono, tal como los aceros SAE 1006 hasta SAE 1017 que tienen las siguientes composiciones químicas:

SAE Nr.	C %	Mn %	P, máx. %	S, máx. %
1006	.08 máx	.25 - .40	.040	.050
1008	.10 máx	.25 - .50	.040	.050
1009	.15 máx	.60 -	.040	.050
1010	.08-.13	.30 - .60	.040	.050
1012	.10-.15	.30 - .60	.040	.050
1015	.13-.18	.30 - .60	.040	.050
1017	.15-.20	.30 - .60	.040	.050

En cuanto a los hierros se preferirá aquellos que contengan bajos contenidos de fósforo y azufre tales como los hierros grises automotrices SAE 121 y SAE 122 que tienen las siguientes composiciones:

SAE Nr.	Ct %	Si %	P %	S %	Mn %
121	3.10 - 3.30	2.10 - 1.80	.12	.15	.60 - .90
122	3.00 - 3.20	2.10 - 1.80	.10	.15	.70 - 1.0

Debe mencionarse en esta parte que los hierros grises recomendables en la tabla anterior son solo para trabajar en la primera etapa de la industria ya que posteriormente la carga del horno deberá estar constituida por retazos de planchas de hierro y retornos de hierro blanco y maleable que resulta de bebederos y alimentadores y rechazos, y arrabio, cuya composición es la siguiente:

C %	Si %	Mn %	P %	S %
4	3.50	0.90	0.25	0.03

2.- CARGAS DEL HORNO

Todas las cargas deben ser pesadas en base a los

cálculos previos que relacionan la composición final del hierro blanco base con la composición de las materias primas.

La experiencia de una industria mexicana que produce hierro blanco en cubilote recomienda los siguientes porcentajes de materiales metálicos:

60 % Aceros de bajo contenido de carbono

40 % Hierro fundido ó retornos de la propia fundición

Junto con esta carga se introducirán las ferroaleaciones de silicio y manganeso. En cuanto al ferrosilicio su composición deberá contener 75 % de silicio y se agregará en una cantidad equivalente entre 0.90 a 1.20 %. Para el caso del ferromanganeso su composición deberá contener 50 % de manganeso y entrará en un porcentaje equivalente entre 0.30 a 0.60 %.

Deberá también observarse la calidad del Coke, debiendo para ello ver los factores que permiten un máximo rendimiento en la fundición con el combustible. Estos factores son:

- a.- Tamaño uniforme y mayor a 50 mm.
- b.- Dureza elevada
- c.- Contenido de carbono alto
- d.- Contenido de fósforo y azúfre bajos
- e.- Contenido calorífico alto
- f.- Humedad, cenizas, y materias volátiles bajos.

Por último también deberá cuidarse de la calidad de la piedra caliza que actúa como fundente de los materiales que se incorporan a la escoria. Su tamaño debe estar comprendido entre 60 y 75 mm. y su análisis requiere un 95 % de componentes $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ y debe estar excenta de arcilla y arena.

3.- COMPOSICION DEL HIERRO BLANCO

La composición del hierro blanco base utilizado para maleabilizado, necesita un meticoloso control de los siguientes elementos:

- Carbono
- Silicio
- Fósforo
- Azúfre
- Manganeso

De allí la importancia de un cálculo de cargas de cubilote hasta que se establezcan porcentajes fijos de cada material.

A modo de ejemplo se hace el siguiente cálculo a partir de hierro SAE 121, acero SAE 1006 y arrabio, para ajustarlos a la composición de hierro blanco establecido en la tabla Nr. 2 Pág. Nr. 45

Se determina la composición promedio de la carga, basado en los respectivos pesos. La tabla Nr. 5 muestra los cambios que ocurren durante la operación de fusión, expresados como pérdida ó ganancia aproximada de elementos en la fusión. Los resultados darán una aproximación de los porcentajes de silicio, azúfre, manganeso y fósforo que pueden esperarse en el hierro obtenido en el pico del cubilote. Generalmente tratándose del carbono y azúfre hay ganancias y hablando del resto de elementos hay pérdidas.

Tabla Nr. 5

Elemento	Ajuste por fusión- ^{+ ganancia} pérdida	Observaciones
Silicio	Si -10 % total cargado	Pérdida entra en la escoria.
Carbono	C ¹⁰ +30 % del carbón bruto	Depende mucho de la operación
Manganeso	Mn -15 % del total cargado	Pérdida entra en la escoria
Fósforo	P no hay variación.	
Azufre	S -0.05 % del valor bruto calculado	S ganado del coque depende de la operación.

Es entonces importante que cada fundidor conozca a través de experiencias debidamente registradas los valores aplicables a su horno y a su procedimiento de fundición.

Suponiendo que se quiera fundir un hierro blanco de la siguiente composición:

2.5 % C, 1.5 % Si, 0.5 % Mn.

Esta composición es la que se espera al salir el hierro líquido de la boca del cubilote.

En el caso, de que la carga inicial sea de la siguiente composición:

Acero	1006	50 %
Fe	121	40 %
Arrabio		10 %

1.- Cálculo para el silicio para una carga de 70 kg.

Acero	1006	35 kg X 0.000	0.000
Fe	121	28 kg X 0.020	0.560
Arrabio		7 kg X 0.035	0.245
			0.805 kg Si

$$6 \quad \frac{0.805}{70} \times 100 = 1.15 \% \text{ silicio.}$$

pérdida 10 %

$$1.15 \times .10 = 0.11$$

porcentaje neto $1.15 - 0.11 = 1.04 \% \text{ silicio}$

2.- Cálculo para el manganeso, carga de 70 kg.

Acero	1006	35 kg X 0.003 =	0.105
Fe	121	28 kg X 0.006 =	0.168
Arrabio		7 kg X 0.009 =	0.063
			0.336 kg Mn

$$6 \quad \frac{0.336}{70} \times 100 = 0.48 \% \text{ manganeso}$$

pérdida: 15 %

$$0.48 \times 0.15 = 0.07$$

porcentaje neto $0.48 - 0.07 = 0.41 \% \text{ manganeso}$

También el carbón se puede calcular por el mismo método empleado para el silicio y manganeso, aunque estos cálculos dependen mucho del tipo de instalación y del tipo de operación del cubilote.

3.- Cálculo para el carbono

Acero	1006	35 kg X 0.0008 = 0.028
Fe	121	28 kg X 0.033 = 0.924
Arrabio		7 kg X 0.04 = 0.280
		1.232 kg C.

$$6 \quad \frac{1.232}{70} \times 100 = 1.76 \% \text{ carbon}$$

Ganancia: 30 %

$$1.76 \times 0.30 = 0.53$$

$$\text{Porcentaje neto } 1.76 + 0.53 = 2.29 \% \text{ C.}$$

Para obtener un hierro blanco base para el maleabilizado se observa que los valores obtenidos no son suficientes, por lo tanto se tendrá que agregar los materiales en forma de briquetas de ferrosilicio, ferromanganeso y algo más de arrabio y luego hacer análisis químicos para ir ajustando la composición del material que se desee obtener.

Los datos del laboratorio son los que sirven para corregir continuamente el método de cálculo y los factores que en él se apuntan.

4.- PESADA DE MATERIAS PRIMAS

Factor de vital importancia en el proceso de obtención del hierro blanco base, es el pesaje de las cargas. Se establecen dos tipos de pesada sea la materia prima que se trate. Para el caso de chatarra de acero y chatarra de hierro fundido deberán manifestarse precisiones hasta de gramos, y en caso de ferroaleaciones introducidas

con la carga y materiales de tratamiento de cuchara precisión hasta de centésimos de gramo.

5.- OBSERVACION DE DIMENSIONES DE LAS PIEZAS A FUNDIR

La técnica de la fundición maleable americana aconseja que las piezas pueden tener espesores de 30 hasta 40 milímetros, por lo que deberá cuidarse el diseño de las piezas de este tipo de fundición que no excedan el límite establecido, ya que de no hacerlo, se podría trastocar la estructura blanca (que es lo deseable) en una estructura moteada o en el peor de los casos con estructura gris.

6.- CONTROL DEL HIERRO BLANCO EN LA FUNDICION

Para este propósito lo más recomendable es efectuar un ensayo de fractura de una pieza colada. La superficie después del ensayo debe presentar el color blanco plateado, característico de la fundición blanca. Posteriormente se podrá hacer observación de microestructura por medio de me-

talografía, para establecer porcentajes de fases presentes, (cementita y perlita).

El tipo de estructura resultante de la fundición blanca que mejores resultados presenta en el maleabilizado es aquella que contiene 70 % de cementita y 30 % de perlita.

NUESTREO

Después de haber comentado las consideraciones generales sobre la práctica de la fusión del hierro base, se describirá ahora la manera en que fueron obtenidas las muestras de hierro blanco en las fundiciones Vallejo y Siderúrgica Guayaquil.

Es preciso decir que no se logró de ninguna manera controlar todas las variables que se han mencionado, ya que resulta enteramente difícil solicitar al fundidor una colada de cubilote expresamente para experimentación. Los mismos han aseverado que las coladas entregadas para el propósito de este trabajo contenían presumiblemente de 3 o 3.5 % de carbono total, silicio de 1.2 -

1.7 %,manganeso 0.60 %.

En todas las coladas se agregaron ferroaleaciones de silicio y manganeso en los siguientes porcentajes:

Ferrosilicio	1.0 %
Ferromanganeso	0.20 %

Las temperaturas en el orificio de sangrado medidas con pirómetro óptico resultaron estar comprendidas entre 1350 y 1420 grados centígrados.

Es práctica de estas fundiciones recibir el caldo en un antecrisol y luego tomar cantidades equivalente a 50 kg. en ellas de vaciado. Fue en éstas que se hizo el tratamiento de cuchara adicionando bismuto en un porcentaje de .020 - .030 % y aluminio usado en extrusión en un porcentaje de .010 - .015 %

La temperatura del hierro líquido cuando se procedió a este tratamiento había perdido de 50°C a 70°C por lo que las temperaturas de colado fueron alrededor de 1300°C.

En Siderúrgica Guayaquil, se moldearon 6 barras

de 1 pulgada de diametro por 8 pulgadas de largo usando para ello arena silicea aglomerada con 3% de Bentonita y un 4 % de agua.

El moldeo se efectuó por medio de un pisón manual proveyendo de un canal de alimentación común. Se vaciaron las barras usando como bebedero una de los orificios moldeados que posteriormente serviría para cortar probetas de 1/2 pulgadas de espesor, con los que se haría el control metalúrgico del proceso de maleabilizado. Las barras restantes fueron material en estudio como se indica en la Fig. Nr. 15

En la Fundición Vallejo se obtuvo una placa rectangular de 1 X 8 X 10" por medio de enfriamiento rápido provocado por placas de hierro coladas en forma paralela como se ve en la Fig. Nr. 16 la razón del uso de este metodo fué porque no se realizó tratamiento de cuchara con bismuto, que es un fuerte formador de carburos.

Se tomarón pedazos de 1 X 1/2 X 1/2" para control metalúrgico y se tomó el resto de la placa como

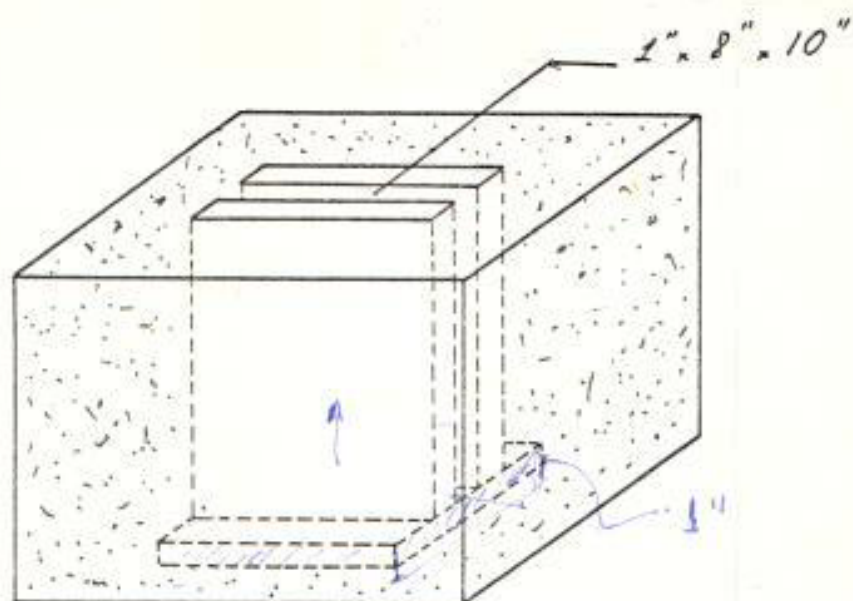


Fig. Nr. 15

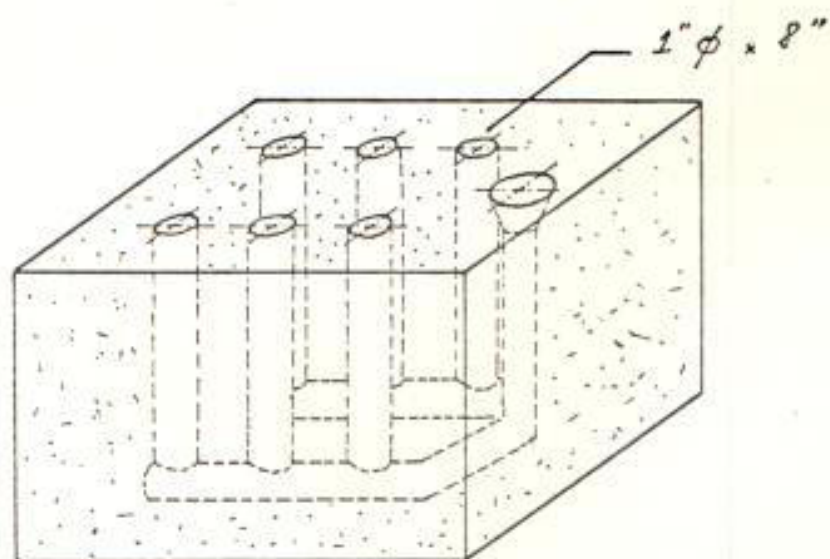
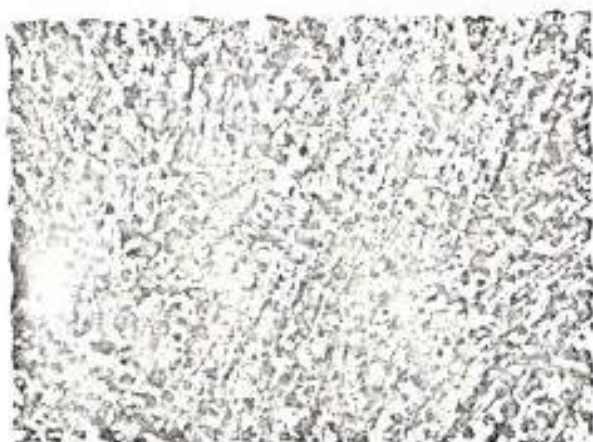


Fig. Nr. 15

material para estudio, las probetas para estudio se nombraron como sigue a continuación:

Fundición Vallejo	V1, V2, V3.
Siderúrgica Guayaquil	G1, G2, G3.

El análisis metalográfico de las respectivas coladas estableció que la fundición era apta para maleabilizado lo que se demuestra con las microfotografías Nr. 4 y Nr. 5 tomadas a las coladas de Fundición Vallejo y Siderúrgica Guayaquil, que se comparan con la estructura de la microfotografía Nr. 6 de la fundición de CIFUNSA. (Industria Mexicana).



Microfotografía Nr. 4

50 X Nital 2 %

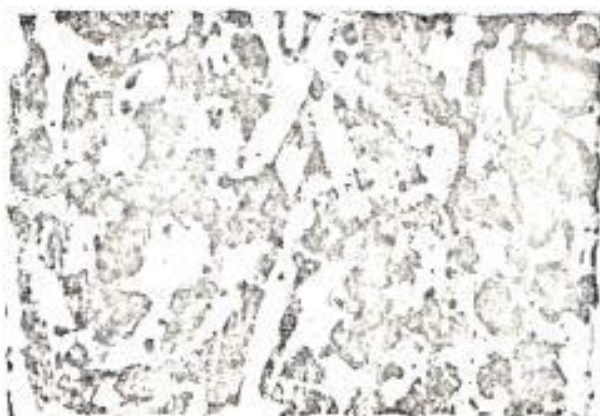
hierro blanco de Side-

rúrgica Guayaquil. A-

dición de bismuto y alu-

minio. Perlita en matriz

de cementita.



Microfotografía Nr. 5
200 X Nital 2 %
hierro blanco de Fundi-
ción Vallejo obtenido
por el metodo de Chill.
Perlita en una matriz
de cementita.



Microfotografía Nr. 6
500 X Nital 2 %
Hierro blanco de fundi-
ción mexicana. Adición
de ferroboro, bismuto,
Perlita en matriz de
cementita.

C.- MALEABILIZADO Y MUESTREO

INTRODUCCION

Ya en el capítulo III se ha comentado la teoría del proceso de maleabilizado, de los factores que influyen en el tratamiento, etc. Ahora se tratará sobre las experiencias realizadas en los materiales tomados de las fundiciones del medio guayaquileño y que en parrafos anteriores se los ha calificado como V (Fundición Vallejo) y G (Siderúrgica Guayaquil).

Se efectuó un proceso de tratamiento de prueba con tres propósitos, a saber: chequear el normal funcionamiento del horno, hacer un maleabilizado de prueba para los materiales en estudio y comprobar la atmosfera del horno.

Una vez comprobadas las inquietudes planteadas, se procedió a realizar los tratamientos térmicos de cada barra por separado, o sea que, en total se hicieron varios tratamientos.

El equipo usado fué un horno eléctrico LINDBERG

equipado con un control automático de temperatura Barber Colman ver Fig. Nr. 17

MODELO	51449
VOLTIOS	230
VATIOS	4.000
Amperios	17
Rang. Temp.	C ^o F - 2000 ^o F

Se confeccionó una caja de lámina de hierro de 1/8 de espesor para colocar la probeta de hierro blanco en arena de sílice, con el objeto de mantener una atmósfera con la menor cantidad de oxígeno para evitar la oxidación de las piezas.

Los tratamientos se hicieron siguiendo recomendaciones de ciclos de temperaturas y tiempos indicados en la Fig. Nr. 18 Se trabaja con materiales que pueden estar representados por el diagrama de equilibrio de la Fig. Nr. 19 para contenido de 2 % de silicio, lo cual ajusta presumiblemente al presente caso.

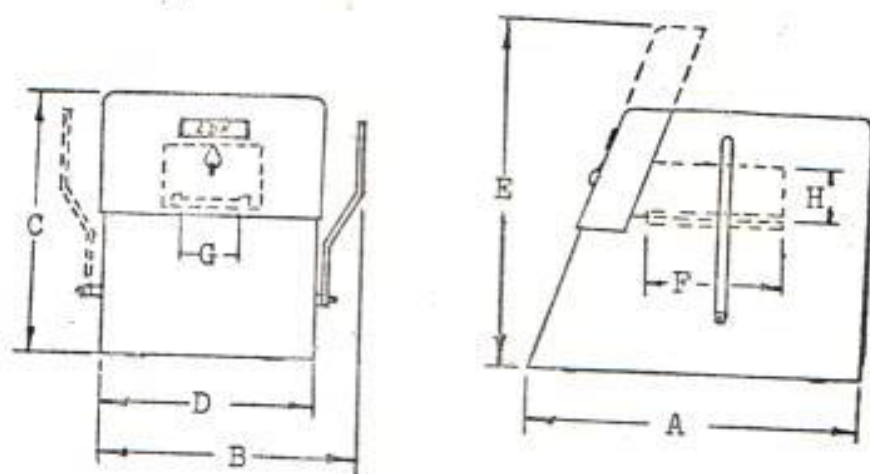


Fig. Nr. 17

DIMENSIONES

A.- Largo Total	77 cms.
B.- Ancho total	56 cms.
C.- Altura	66 cms.
D.- Ancho del horno	49 cms.
E.- Altura libre (puerta)	83 cms.
F.- Largo de la cámara	36 cms.
G.- Ancho de la cámara	19 cms.
H.- Altura de la cámara	14 cms.

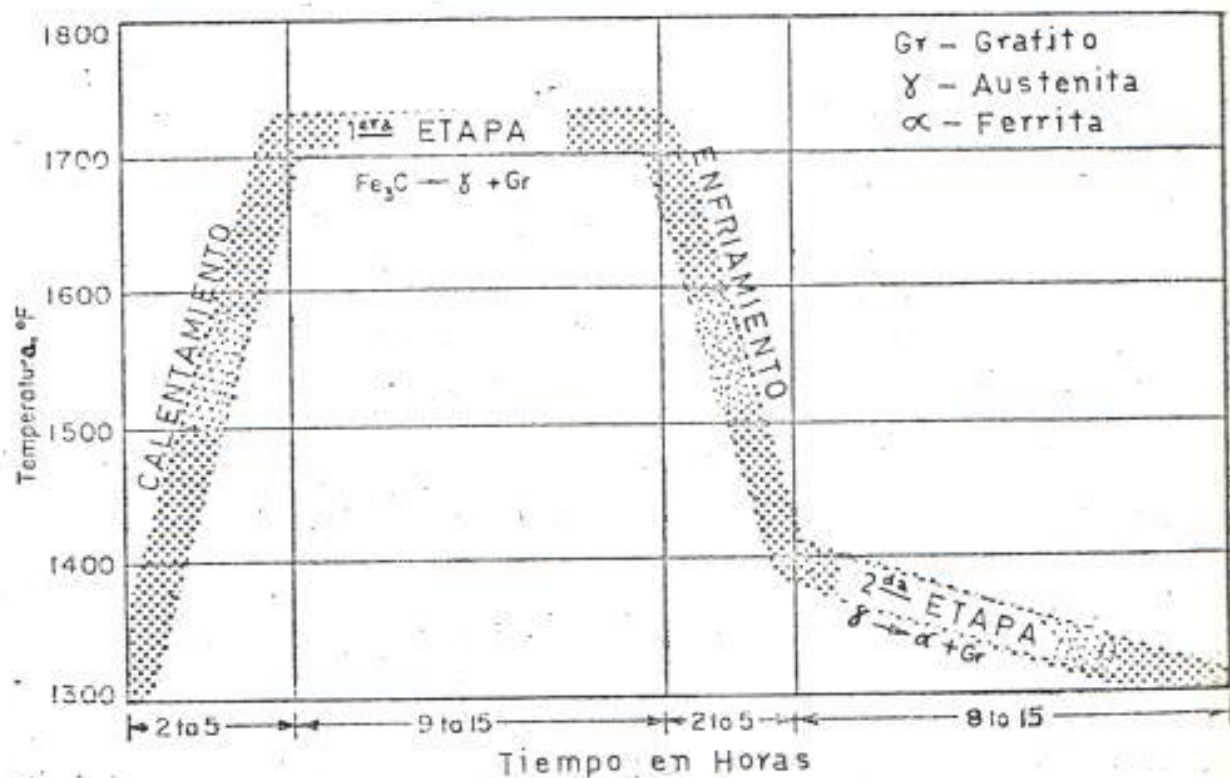


Fig. Nr. 18 CICLO TIPICO DE RECOCIDO PARA HIERRO MALEABLE

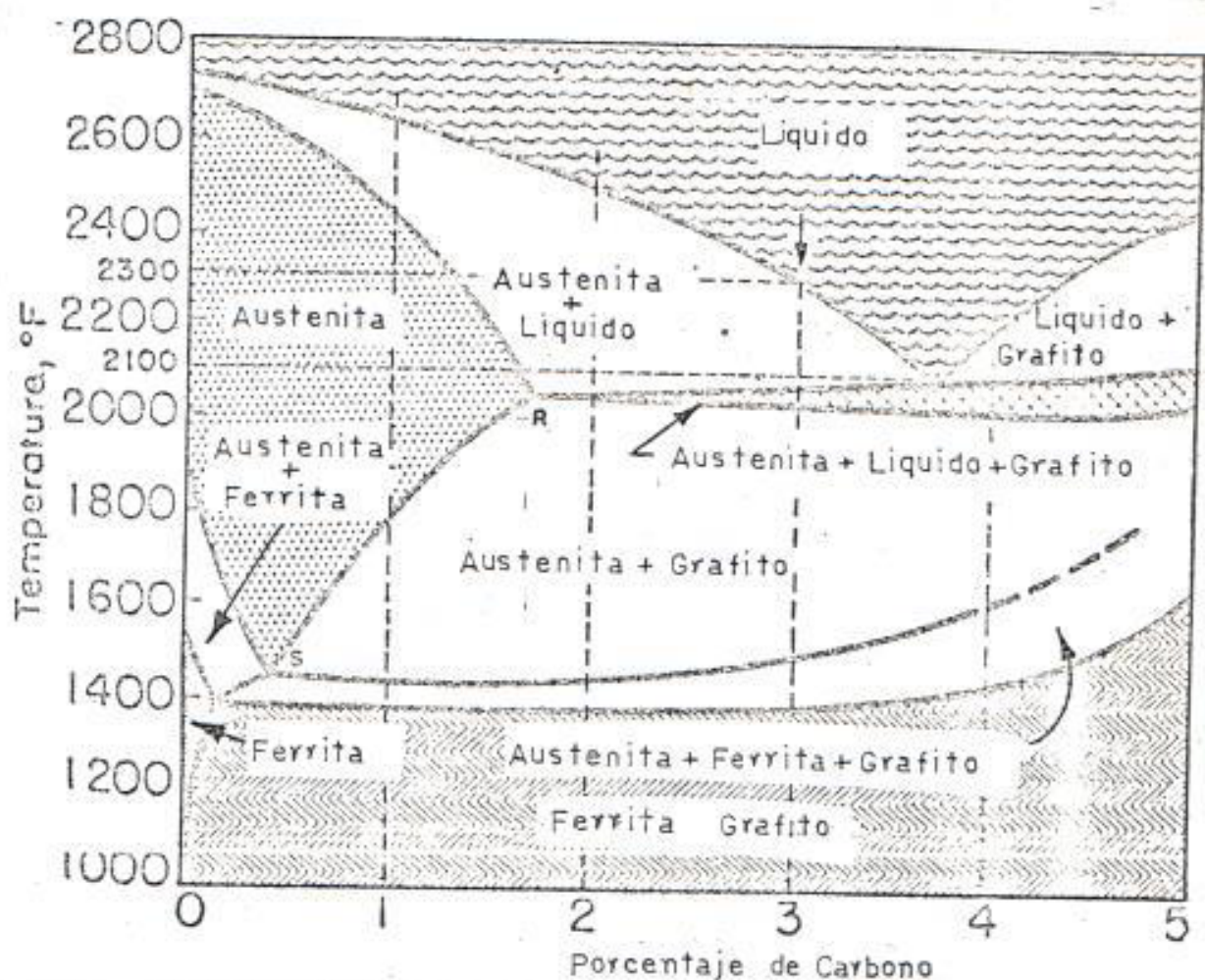


Fig. Nr. 19 DIAGRAMA DE FASES DE HIERRO GRAFITO CON 2 % DE SILICIO

EXPERIENCIA Nr. 1.- MATERIAL DE SIDERURGICA

GUAYAQUIL

Se procedió a elevar la temperatura del horno lentamente hasta 950° en un tiempo determinado de 5 horas, incrementando la temperatura en 95°C cada 1/2 hora.

A esta temperatura, superior a la del punto eutectoide, la perlita que existe se transforma en austenita y el otro componente del hierro blanco que es la cementita primaria no se afecta con dicha temperatura y la estructura del hierro blanco consiste de cementita primaria en austenita.

Luego se mantuvo la temperatura de 950°C durante 12 horas, y en este rango de temperatura la cementita primaria se transforma en austenita y grafito, teóricamente actuando de esta forma toda la cementita es eliminada,

Al termino de esta primera parte, la estructura del hierro se compone de nódulos de grafito en

una matriz de austenita. Posteriormente se enfria el material hasta una temperatura de 760°C en un tiempo de 3 horas (haciendo 5 etapas de 30°C cada $1/2$ hora y 1 etapa de 40°C) para luego hacer descender lentamente la temperatura a 650°C en un tiempo de 10 horas y mantener esta temperatura durante 4 horas como muestra la Fig. Nr. 20

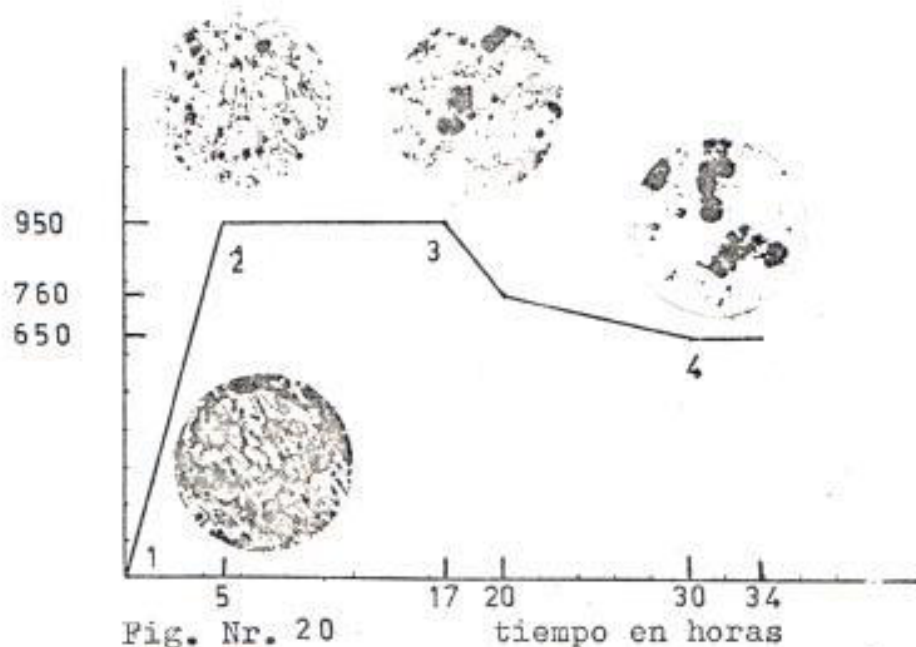


Fig. Nr. 20

tiempo en horas

En esta etapa de enfriamiento pueden suceder 2 casos: el uno que la velocidad de enfriamiento sea lenta en el intervalo de temperatura crítica eutectoide (729°C) entonces la austenita se transforma en ferrita que es la matriz ideal de

un hierro maleable y la otra que la velocidad en este punto sea rápida, entonces la grafitización no es completa y las transformaciones ocurren según el sistema metaestable hierro-cementita y se forma perlita a una temperatura ligeramente abajo del intervalo crítico. En la práctica se encontraron estas dos posibilidades de resultado como se demuestra con las microfotografías Nr. 7 y Nr. 8

Una vez que se mantuvo la temperatura en 650°C se apagó el horno y se dejó que las piezas se enfrien lentamente dentro del mismo.

Luego se procedió a sacar las muestras para los diferentes análisis metalográficos, ensayos de dureza, ensayos mecánicos cuyos resultados se darán a conocer en el siguiente capítulo.

En los puntos 1, 2, 3 y 4, que se detallan en la Fig. Nr. 20, se tomó muestras y se las enfrió en agua con el fin de controlar el proceso de maleabilizado obteniendo los siguientes resultados de transformación estructural, como muestran las microfotografías de las probetas que fueron pre-



Microfotografía Nr. 7
200 X nital al 2 %
Hierro maleable ferrí-
tico, grafito en una
matriz de ferrita.



Microfotografía Nr. 8

200 X nital al 2 %

Hierro maleable per-
ltico, grafito en una
matriz de perlita.

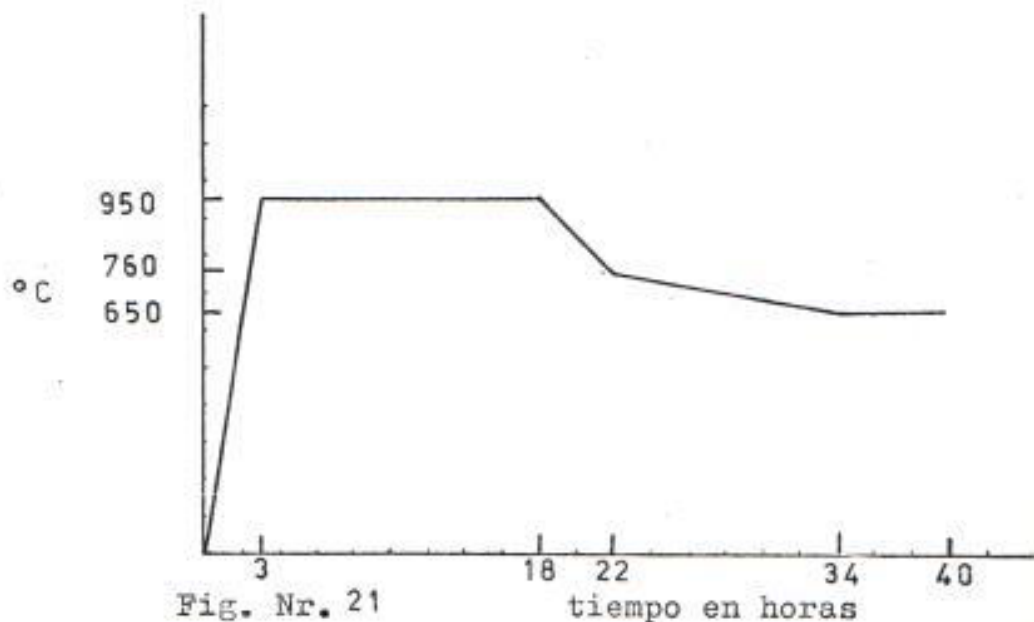
paradas siguiendo el proceso normal corte, desvaste, pulido fino y ataque químico.

EXPERIENCIA Nr. 2.- MATERIAL DE SIDERURGICA

GUAYAQUIL

El ciclo de tratamiento de maleabilizado para este caso se llevó como se indica a continuación:

Tiempo elevar temperatura	950°C	3 horas
Tiempo temperatura a	950°C	15 horas
Tiempo enfriamiento a	760°C	4 horas
Tiempo enfriamiento a	650°C	12 horas
Tiempo temperatura a	650°C	6 horas



Teniendo como resultado de la experiencia anterior una estructura grafitica con pocos centros de nucleación y como consecuencia de ello, sitios de cantidades masivas de carbono, se resolvió hacer un tratamiento previo de maleabilizado.

Con objeto de proveer la formación de nucleos de grafitización en las más primeras etapas del maleabilizado se recurrió al empleo del método llamado "Prebake" o sistema de "Pre-horneado" que consiste en un calentamiento previo a temperaturas entre 315°C y 425°C en un lapso de tiempo de 2 a 4 horas y luego se deja enfriar la probeta al aire libre antes del proceso normal de Maleabilizado. Para el caso se hizo el "Prebake" calentando por 4 horas a una temperatura de 400°C .

Una vez realizado este trabajo se procedió a efectuar la tercera experiencia.

EXPERIENCIA Nr. 3.- MATERIAL DE VALLEJO

El ciclo de tratamiento de maleabilización para el presente caso se lo realizó como se indica a continuación:

Tiempo elevar temperatura	950°C	5 horas
Tiempo temperatura a	950°C	20 horas
Tiempo enfriamiento a	760°C	5 horas
Tiempo enfriamiento a	650°C	24 horas
Tiempo temperatura a	650°C	6 horas

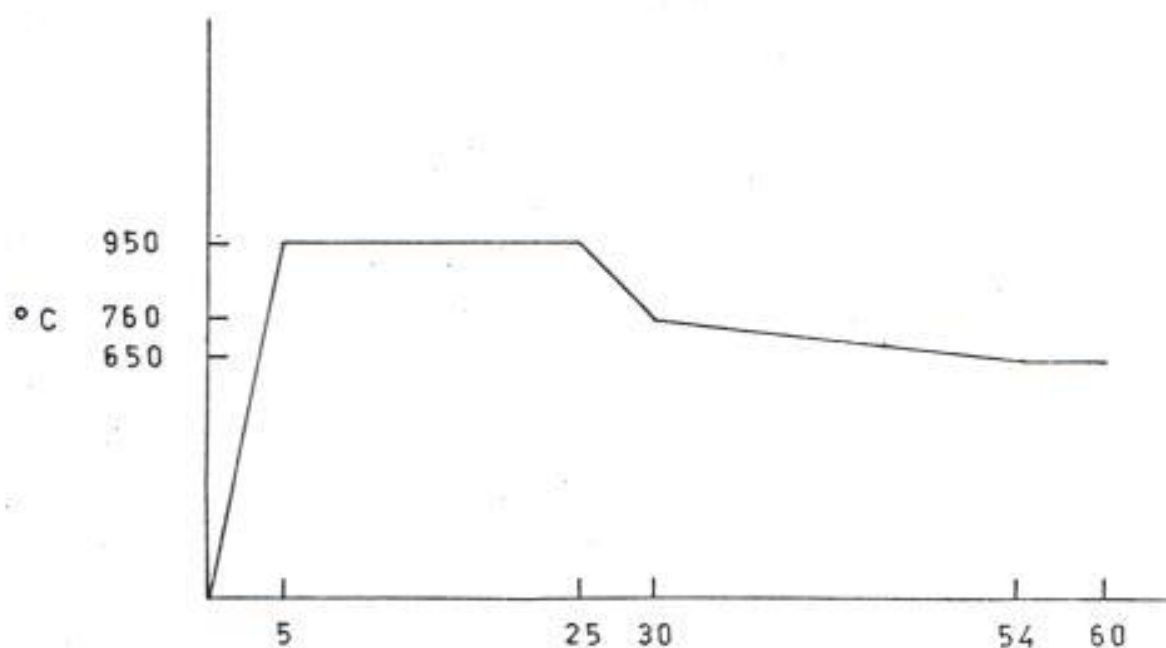


Fig. Nr.22

tiempo en horas.

C A P I T U L O V

C A P I T U L O V

ENSAYOS Y RESULTADOS

A.- ENSAYO METALOGRAFICO

La metalografía es, esencialmente el estudio de las características estructurales de constitución de un metal o una aleación, para relacionar éstas con las propiedades físicas y mecánicas.

El análisis metalográfico es sin duda el arma más poderosa que el fundidor tiene para controlar un determinado proceso de tratamiento térmico, ya que, de la observación de las microestructuras se puede valorar la eficiencia del proceso y proceder de inmediato a eliminar aquellas fallas que hayan producido una microestructura fuera de lo especificado.

En el caso del hierro maleable el control metalográfico es de primera importancia si se requiere óptima calidad del hierro producido.

En el proceso del hierro maleable como ya se ha explicado, se van produciendo transformaciones microestructurales hasta obtener una estructura consistente en nódulos de grafito uniformemente distribuidos en una matriz de ferrita o perlita; según el caso.

Generalmente se emplea la metalografía para dos propósitos; control de etapas de proceso y para control del producto final.

La observación de especímenes metalográficos en cada una de las etapas de producción, da una idea clara de la buena marcha del proceso y en casos de encontrarse anomalías indicará la manera de corregir la parte del proceso donde sea necesario y el control del producto maleabilizado indicará la calidad con ajuste a normas.

Para realizar este tipo de control de calidad del hierro maleable, es imperativo efectuar pasos preliminares con los que se prepara la muestra para observación al microscopio. En este trabajo se han seguido las indicaciones generales de la práctica metalográfica, pasos que se

describen a continuación:

1.- Preparación de las muestras.- Una vez obtenidas las muestras en las fábricas, se procedió a hacer las diferentes probetas. Pedazos pequeños de más o menos 1 cm^3 para control metalográfico de proceso y el resto de las barras para el tratamiento térmico, donde posteriormente se hará metalografía de control de calidad.

El material se lo cortó en máquinas de discos abrasivos con enfriamiento de agua para así eliminar posibles alteraciones de la estructura del hierro.

En el pedazo de muestra, se realizó el montaje para lo cual se colocó el material sobre una placa de vidrio de $1\frac{1}{2} \times 2$ " y luego se puso un molde cilíndrico hecho de baquelita, la práctica del montaje recomienda que tanto la placa como el anillo deben de ser roceados con un spray de silicon para evitar adherencias de la probeta al molde. Luego se prepara en una cápsula la mezcla de la resina de embutición

que va a ser depositado en el interior del anillo, cuya composición es la siguiente:

dos partes de resina plástica en polvo
una parte de resina líquida
ocho gotas de endurecedor ó catalizador.

Se espera un tiempo determinado de 20 minutos para proceder al pulimiento de la probeta. El procedimiento de pulimento que se empleó, es el que utiliza para materiales ferrosos y que se describe a continuación:

Pulimento grueso.- Normalmente se lo ha efectuado en mesas de desbaste con lijas de grano Nr. 240, 320, 400 y 600. Se debe tener mucho cuidado en la presión de la probeta contra los abrasivos, ya que, una práctica incorrecta destruye la estructura grafitica del material por el arranque de los nódulos de sus sitios.

Pulimento fino.- Llamado también pulimento final se lo ha hecho con el objeto de eliminar las rayas producidas en el desbaste, se lo realiza apoyando la cara desbastada sobre un paño Struers NAP. para pulido fino, montado so-

bre un disco cuya velocidad fué controlada hasta 500 RPM.

Se utilizó como abrasivo Oxido de Aluminio (alúmina) de 0.3 micrones y también se usó ocasionalmente una pasta de diamante de 7 u, para acelerar el proceso, el lubricante en todos los casos fué agua.

En la metalografía del hierro maleable, la Dayton Malleable Iron, recomienda dos tipos de ensayos que son determinados por la condición de observación de la probeta con o sin Ataque químico.

2.a.- METALOGRAFIA SIN ATAQUE.-- Este ensayo tiene que ver con el conteo, distribución, tamaño y forma de los nódulos de grafito que resultarán de la descomposición del carburo de hierro por el tratamiento térmico. En adelante, se identificarán lo que represente cada uno de los ensayos y se darán los resultados de los materiales en estudio, correspondientes a la fundiciones Vallejo y Siderúrgica Guayaquil.

1.- Conteo de Nódulos.-- Según la Dayton Malleable Iron de Ohio, recomienda efectuar un conteo nodular o sea determinar el número de nódulos que existen en 1 mm².

El conteo de nódulos es un factor muy importante, pues nos indica la recocibilidad del hierro, ya que el control de número de nódulos da la indicación para efectuar la adición de agentes nodulizantes y también para efectuar cambios en la composición química del hierro, sobre todo, para aumentar o disminuir el Silicio según sea baja o alta la cantidad de nódulos por milímetro cuadrado.

El procedimiento que se utiliza para efectuar el conteo de nódulos es el siguiente: se observa el espécimen al microscopio a diferentes aumentos y por lo tanto se observan diferentes áreas de la muestra, se procede a efectuar el conteo de los nódulos en tres diferentes áreas, se toma un promedio y se multiplica por el factor que sea relacionado con el área y los aumentos a que se hace la observación.

En este trabajo se van a tomar como referencia

los factores obtenidos bajo un sin número de experiencias de la Malleable Research Center de Dayton, Ohio,

<u>AUMENTOS</u>	<u>FACTOR</u>
100	0.25
200	2.25
500	14

El número de nódulos multiplicados por el factor correspondiente dá el número total de nódulos que hay en la muestra por milímetro cuadrado.

Los resultados de las muestras de la Fundición Vallejo y Siderúrgica Guayaquil fueron los siguientes:

<u>Muestra</u>	<u>Aumentos</u>	<u>Nr. nódulos observados</u>	<u>Factor</u>	<u>Nr. nódulos total</u>
V ₁	500	10	14	140
V ₂	500	11	14	154
V ₃	200	31	2.25	70
G ₁	500	18	14	252
G ₂	500	10	14	140
G ₃	500	20	14	280

Según la asociación de fundidores de Fe. maleable de los Estados Unidos para controlar el recocido del hierro blanco se toma como límites adecuados de 80 a 140 nódulos por milímetro cuadrado.

2.- Distribución de nódulos.- La distribución de los nódulos de grafito es de gran influencia en las propiedades mecánicas del hierro, ya que nódulos alineados y en forma de cadenas ocasionan líneas de cedencia, especialmente cuando las piezas son sometidas a trabajo pesado o de fatiga, es por lo tanto de interés, controlar este factor mediante la metalografía.

Este defecto es ocasionado por un exceso en la adición de elementos nodulizantes tales como el boro.

Todos estos factores se pueden controlar con la práctica continua de análisis metalográficos, pero quizás la mayor ventaja de éstos sea la comprobación de que no se tenga formación de grafito laminar.

Para determinar la distribución se observan diferentes áreas de las probetas a 50 aumentos y se comparan con las fotos patrón de la Dayton Malleable Iron, los ensayos efectuados como se indica dieron los siguientes resultados.

<u>MUESTRAS</u>	<u>DISTRIBUCION DE NODULOS</u>
V ₁	2 - 3
V ₂	3 - 3 - 5
V ₃	2
G ₁	4 - 5
G ₂	2 - 3
G ₃	4 - 5

Cabe indicar que las microfotografías que a continuación se presentan tanto para la distribución, forma y tamaño de nódulos son referenciales de lo observado en las probetas, pero las determinaciones hechas no se efectuaron a partir de ellas, sino de la observación microscópica de toda la superficie metálica.



Microfotografía Nr. 9

50 X sin ataque

muestra V1 distribución

de nódulos 2 - 3



Microfotografía Nr. 10

50 X sin ataque

muestra V2 distribución

de nódulos 3 - 3

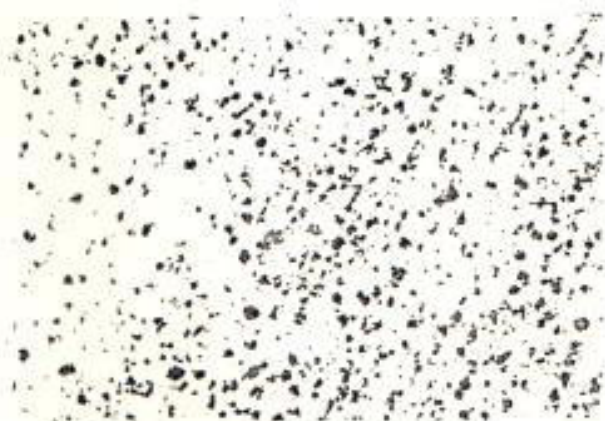


Microfotografía Nr. 11

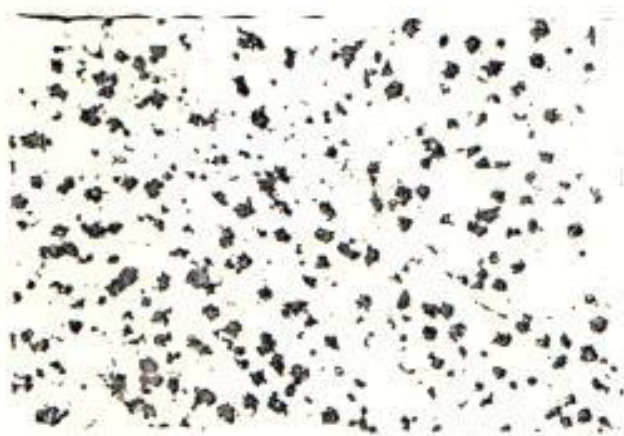
50 X sin ataque

muestra V3 distribución

de nódulos 2 - 3



Microfotografía Nr. 12
50 X sin ataque
muestra G1 distribución
de nódulos 2 - 3

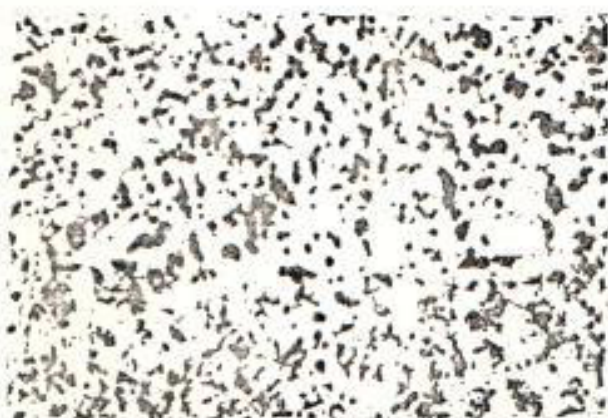


Microfotografía Nr. 13

50 X sin ataque

muestra G2 distribución

de nódulos 3 - 4



Microfotografía Nr. 14

50 X sin ataque
muestra G3 distribución
de nódulos 4 - 5. Nód-
ulos irregulares y exceso
de carbono. Notece que los
mismos se unen entre si, for-
mando acumulaciones de grafito.

3.- Tamaño de nódulos.- Este factor se puede decir que no es tan importante, sin embargo se debe controlar, pues influye en la distribución y forma de los nódulos, lo cual se traduce en alteraciones de las propiedades mecánicas del hierro.

Para determinar el tamaño de los nódulos vamos a seguir en proceso indicado para la distribución de nódulos, usando las fotos patrón establecidas por la Dayton Malleable Iron, la cual determina que para este caso, las observaciones de las muestras deben hacerse a 100 aumentos y los resultados fueron los siguientes:

<u>MUESTRAS</u>	<u>TAMANO DE NODULOS</u>
V ₁	1 - 2
V ₂	1 - 2
V ₃	2 - 3
G ₁	1
G ₂	1 - 2 - 3
G ₃	3 - 4



Microfotografía Nr. 15

100 X sin ataque

muestra V1 tamaño de

nódulos 1 - 2



Microfotografía Nr. 16

100 X sin ataque

muestra V2 tamaño

de nódulos 1 - 2



Microfotografía Nr. 17

100 X sin ataque

muestra V3 tamaño

de nódulos 2 - 3

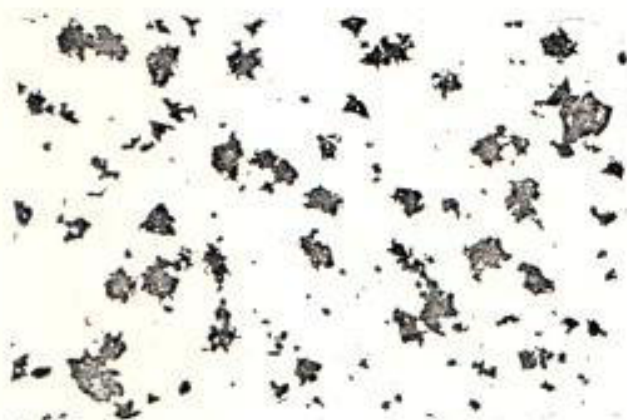


Microfotografía Nr. 18

100 X sin ataque

muestra G1 tamaño

de nódulos 1



Microfotografía Nr. 19

100 X sin ataque
muestra G2 tamaño
de nódulos 1-2-3



Microfotografía Nr. 20

100 X sin ataque
muestra G3 tamaño
de nódulos 2-3-4

4.- Forma de nódulos.- Este factor si es de suma importancia y es uno de los puntos del control metalográfico del hierro maleable. De la observación de la forma de los nódulos se puede controlar en gran parte las propiedades mecánicas del hierros, pues nódulos con forma de cangrejo o ramificados pueden originar baja resistencia.

La forma de nódulos se controla vigilando los siguientes factores en el proceso.

- 1.- Composición química (bajo silicio)
- 2.- Adiciones de elementos nodulizantes. (boro)
- 3.- Temperatura en el recocido (la temperatura en la primera parte del recocido no debe de ser mayor de 950°C)

Se usa para este propósito el mismo método de comparación con fotos patrón. Después de hacer la observación a 200 aumentos, se obtuvo lo siguiente:

<u>MUESTRAS</u>	<u>FORMA DE NODULOS</u>
V ₁	3 - 4
V ₂	3 - 4
V ₃	4 - 6
G ₁	3
G ₂	3 - 4
G ₃	4 - 6

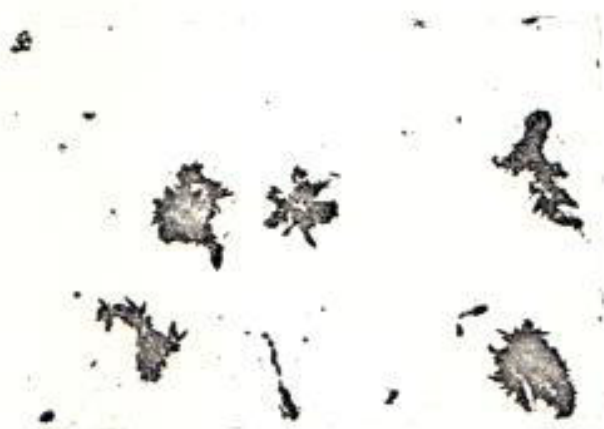


Microfotografía Nr. 21

200 X sin ataque

muestra V₁. forma de

nódulos 3 - 4



Microfotografía Nr. 22

200 X sin ataque

muestra V2 forma de

nódulos 3 - 4



Microfotografía Nr. 23

200 X sin ataque

muestra V3. forma

de nódulos 4 - 6



Microfotografía Nr. 24

200 X sin ataque

muestra G1 forma de

nódulos 4 - 5

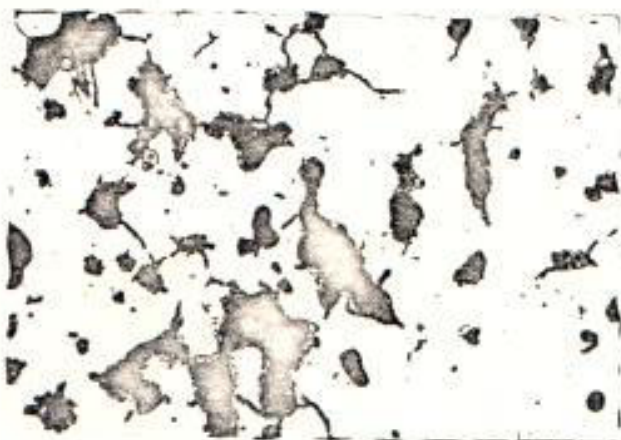


Microfotografía Nr. 25

200 X sin ataque

muestra G2 forma

de nódulos 3



Microfotografía Nr. 26

200 X sin ataque
muestra G3 forma
de nódulos 2-6-7

3.a.- METALOGRAFIA CON ATAQUE.- Mediante el ataque químico, se pone de manifiesto la morfología, la proporción y la coloración de cada uno de los constituyentes metalográficos.

Para observar la matriz del hierro maleable, se usó como reactivo de ataque, una solución de Nital al 2 % (100 cc de alcohol metílico y 2 cc de ácido nítrico concentrado)

Como ya se ha dicho, la matriz del hierro maleable debe consistir de ferrita, la presencia de perlita o cementita indican un tratamiento térmico deficiente o una composición química defectuosa, aunque en muchos casos se busca trabajar de tal forma, que se obtenga finalmente una matriz de perlita. Los maleables perlíticos tienen diferente aplicación que los ferríticos.

La presencia de Perlita, cuando se tiene matriz combinada Ferrita-Perlita, indica los siguientes posibles errores en el proceso:

- 1.- Silicio bajo
- 2.- Exceso de manganeso

- 3.- Presencia de cromo o elementos carburógenos
- 4.- Mal control de la temperatura en la segunda parte del tratamiento.

Por otro lado, la presencia de cementita, indica los siguientes posibles errores en el proceso:

- 1.- Muy bajo silicio y carbono ó la presencia de elementos carburógenos, como el cromo o vanadio.
- 2.- Temperaturas muy bajas en la primera parte del recocido.

La estructura del material, también manifiesta en muchos casos (especialmente cuando se trabaja en cubilote), la presencia de excesivas cantidades de sulfuro de manganeso, esto es debido a un alto porcentaje de azufre en el hierro, que inclusive, llega a formar sulfuros de hierro y esto ocasiona una baja resistencia al impacto.

Otra de las cosas que presentan los análisis metalográficos con ataque, es la observación de zonas superficiales descarbonizadas y oxidadas

(ya comentadas en el capítulo 3), que indican un mal control de la composición de la atmósfera en el horno.

B.- ENSAYO DE DUREZA

La palabra dureza, cuando se refiere a metales o aleaciones, representan un concepto muy importante, pero dentro de los conocimientos actuales, no corresponde a ninguna propiedad fundamental de la materia.

Cuando se trata de reflejar la dureza en un número según la forma en que tal número se obtiene, involucra una serie de distintas propiedades, tales como: el límite de fluencia, la resistencia a la tracción, resistencia a la abrasión, etc.

Para determinar el número de dureza, se va a emplear el ensayo Brinell, que consiste en determinar la dureza de un metal midiendo las dimensiones de la huella que se produce al comprimir el material por medio de una bola de acero, aplicando una carga estática.

La carga que se emplea depende del tamaño de la bola y de la dureza relativa del material ensayado.

En el caso presente se ha utilizado el ensayo Brinell normal, dando una carga de 3.000 kg. con un indentador esférico de 10 mm de diámetro.

El valor numérico de la dureza Brinell, que tiene por dimensiones kg/mm^2 , es el cociente de dividir la carga aplicada en kg. por el área de la huella producida en mm^2 .

Para realizar un ensayo Brinell, se debe tomar en cuenta que el espesor de la probeta debe ser 10 veces la profundidad de la impresión y el centro de la huella debe distar, por lo menos 2.5 veces el diámetro de la misma del borde más próximo de la superficie ensayada.

Los diferentes ensayos dieron los siguientes resultados que constan en la tabla Nr. 6

<u>Muestra</u>	<u>Diámetro de Indentación</u>	<u>Cifra de dureza Brinell</u>
V ₁	4.6	170
V ₂	4.79	156
V ₃	4.91	148
G ₁	5.65	109
G ₂	5.40	121
G ₃	5.55	114

Tabla Nr. 6

El otro ensayo de dureza que se efectuó fué Rockwell B., para lo cual se utilizó un indentador de 1/16" de diámetro y los ensayos produjeron los siguientes resultados que fueron observados en el dial indicador de lectura directa:

<u>Muestra</u>	<u>Indentador</u>	<u>Cifra dureza Rockwell B.</u>
V ₁	1/16	81
V ₂	1/16	78
V ₃	1/16	74
G ₁	1/16	53
G ₂	1/16	56
G ₃	1/16	52

C.- ENSAYOS MECANICOS.

Para ensayar la resistencia de los materiales,

a fin de relacionar valores de esfuerzos resultantes de pruebas, con las condiciones de trabajo que tendrá que soportar, adecuadamente maquinado bajo estrictas normas de ensayo y luego se le aplica cargas axiales de tracción hasta llegar a su destrucción.

Una vez numeradas las probetas de la placa de hierro blanco de 1 x 8 x 10" tomada en fundición Vallejo, según muestra la Fig. Nr. 23, se las maquinó a las medidas que se describen en la Fig. Nr. 24, las mismas que corresponden a las normas de ensayos de tracción para hierro maleable ASTM A - 47.

Los resultados de los ensayos de tracción fueron los siguientes:

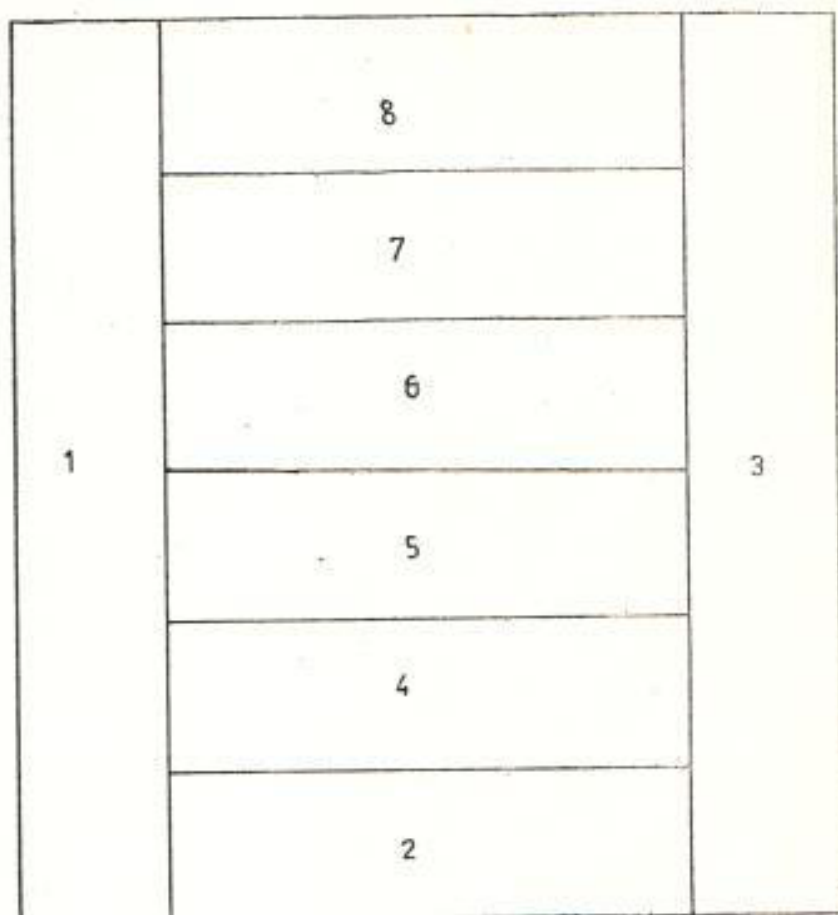
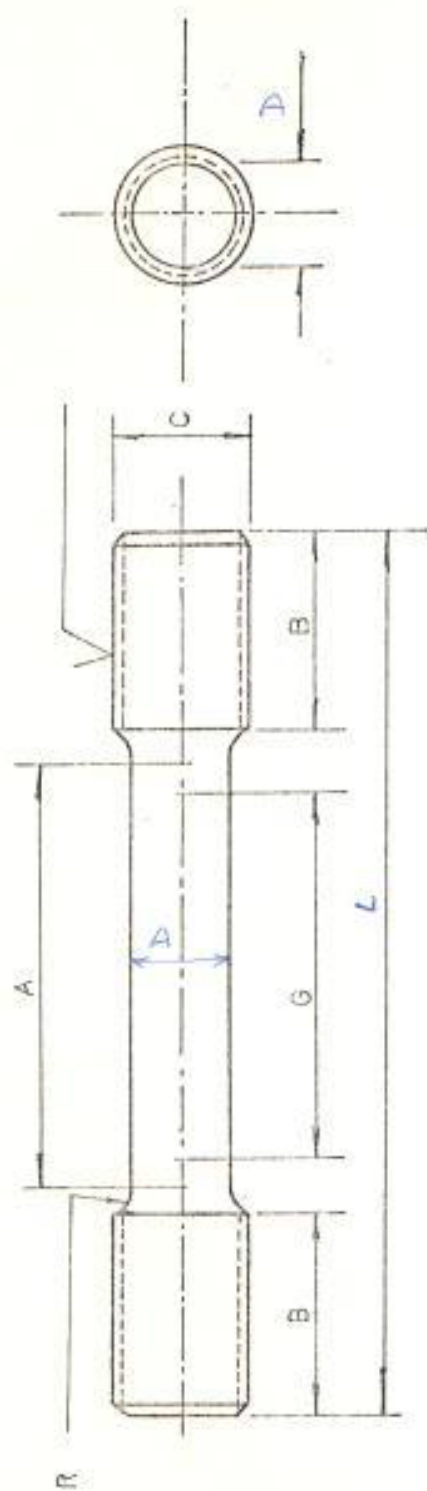


Fig. Nr. 23 Placa de hierro blanco de
1 X 8 X 10"



D	G	R	A	C	B	L
1/2	2	3/8	2 1/4	3/4	1	5'
3/8	1.4	3/8	1 3/4	1/2	3/4	4'

Fig. Nr. 24

LABORATORIO DE METALURGIA MECANICA

ENSAYO DE TRACCION

Material: Hierro Maleable

Procedencia: Fundición Vallejo

Temp. de ensayo °C: 28

Velocidad de ensayo: 2 mm/min.

Solicitado por:

Solicitud N°:

Norma: ASTM

Fecha:

PROBETA N°	Ao mm ²	Lo mm	Lf mm	σ_f Kg/mm ²	σ_{max} Kg/mm ²	σ_{rot} Kg/mm ²	ϵ %
1	126.6	50.8	53.975	28.12		31.95	6.25
2	126.6	50.8	56.356	34.60		37.54	10.94
3	126.6	50.8	53.975	28.30		31.42	6.25
4	71.22	44.45	49.21	29.93		32.35	10.71
5	71.22	44.45	47.625	27.06		29.93	7.14
6	71.22	44.45	47.625	26.11		29.30	7.14
7	71.22	44.45	47.625	26.74		28.65	7.14

CAPITULO VI

C A P I T U L O V I

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En primer lugar se deben analizar los resultados de la observación metalográfica que indican muy claramente la presencia de un exceso de carbono en la aleación (microfotografía Nr.27), esto dió como resultado que en algunos ensayos previos de maleabilizado el resultado final fuera hierro moteado (mezcla de hierro gris y blanco), esto determinó que se solicitara a los fundidores que proporcionaran coladas con cargas de acero, hierro gris y ferroaleaciones, con lo cual se logró obtener resultados satisfactorios.

El material obtenido después de ensayos metalográficos, de dureza y mecánicos se lo puede asimilar a un ASTM 32510, cuyas especificaciones están en la Pág. Nr. , norma que define una calidad corriente de maleable de cubilote (Cupola Malleable Iron).

Es de hacer notar la atención que se ha dado a lo correspondiente a control de proceso de elabora-



Microfotografía Nr. 27

50 X sin ataque

presencia de exceso de
carbono

ción del hierro blanco, la recomendación que se expone a continuación es derivada de lo que se ha observado en el trabajo normal en fundiciones extranjeras.

Una forma viable para controlar y certificar los rangos de composición de carbono y silicio en planta sería por medio de un potenciómetro con el que se pueden efectuar curvas de enfriamiento de la aleación hierro-carbono-silicio, lo cual representaría la inversión más económica y el fundidor podría determinar un método de trabajo, para ajustar su composición química de acuerdo con la carga introducida al horno y el carbono equivalente obtenido.

Si se deseara hacer una inversión mayor, lo adecuado sería adquirir un aparato medidor del carbono equivalente. Sus resultados son determinados por el tiempo de enfriamiento de la aleación por lo que el conocimiento de la composición química, en cuanto a carbono y silicio, no demora más de 5 minutos, con lo que el fundidor tiene una herramienta de respuesta rápida y puede por lo tanto hacer sus correcciones en la carga del horno para sucesivas coladas.

Otro medio de control eficiente en planta y que está asociado con el anterior, es la elaboración de cunas de temple, las mismas que funcionan adecuadamente para observación de porcentajes de silicio en la aleación y control de la grafitización primaria, se recomienda el uso de la probeta paralelepípeda de sección rectangular 20.50.80mm para silicio comprendido entre 1.1 y 2.2 %, que funciona para hierros colados en los cuales los otros elementos son contenidos en el límite:

C total	hasta 3.60 %
Mn	0.50 a 1.10 %
P	0.11 a 0.90 %
S	0.07 a 0.09 %

La recomendación más expresa se relaciona con el control de cargas al horno. Es de primordial importancia controlar calidad y pesos de:

- Aceros de bajo contenido de carbono
- Chatarra de hierro gris
- Coke
- Piedra caliza y
- Ferroaleaciones.

En las experiencias realizadas en el tratamiento

de maleabilizado de probetas obtenidas en las fundiciones nacionales Fundición Vallejo y Sidérgica Guayaquil se observó lo siguiente:

- 1.- Que siguiendo la curva normal de maleabilizado (Fig. Nr. 18, Pág. Nr.) siempre resultaron estructuras grafiticas con pocos centros de nucleación. Motivo por el que se recurrió al metodo Prebake o prehornado, que consiste en calentar la pieza durante 2 a 4 horas a temperaturas entre 315 y 425°C, con el fin de promover nucleos de grafitización.

Este paso ayuda a distribuir más uniformemente el carbono y destruye la tendencia que tienen los hierros blancos con exceso de carbono a formar grandes aglomeraciones de grafito (Microfotografía Nr.28)

- 2.- Que en el maleabilizado sin protección de atmósfera inerte (arena de sílice en las cajas) y con velocidad de enfriamiento rapida en zona de transformación eutectoide, resulto primero: estructura general de perlita con anillo periférico ferrítico. Esta baja concentración de nódulos en la zona superficial es debida a la



Microfotografía Nr. 28

100 X sin ataque

exceso de carbono for-

ma grandes aglomera-

ciones de grafito

descarburación por oxidación. En cambio, con velocidad lenta de enfriamiento en zona crítica se consiguió una estructura con matriz de ferrita y con anillo periférico perlítico y que resulta como consecuencia de que el carbono no alcanza a recorrer distancias de difusión tan grandes hacia los nódulos interiores y queda depositado en forma combinada formando el área perlítica.

- 3.- Que las probetas de espesores relativamente grandes (mayores a 40 mm), se maleabilizaron tal como muestran las microfotografías Nr. 29, 30, 31.
- 4.- Que cuando se piense producir herramientas manuales de hierro maleable sería muy recomendable tratar de hacerlo siguiendo el proceso de fabricación europeo o de corazón blanco, con el que se consigue un material de mejor calidad, aunque a un costo mayor lo cual se justifica plenamente.



Microfotografía Nr. 29

100 X nódulos de
grafito uniformemente
distribuidos (micro-
fotografía tomada a
dos centímetros del
borde)



Microfotografía Nr. 30
100 X nódulos de
grafito con pequeñas
ramificaciones (micro-
fotografía tomada a
cuatro centímetros del
borde)



Microfotografía Nr. 31
100 X nódulos de
grafito completamente
ramificados (microfo-
tografía tomada a seis
centímetros del borde)

D I A G R A M A S Y T A B L A S



FOTOGRAFÍAS PATRON PARA
DETERMINAR LA DISTRIBU-
CIÓN DE LOS NODULOS DE
GRAFITO DE UN HIERRO
MALEABLE

Fig. 4-2A-1

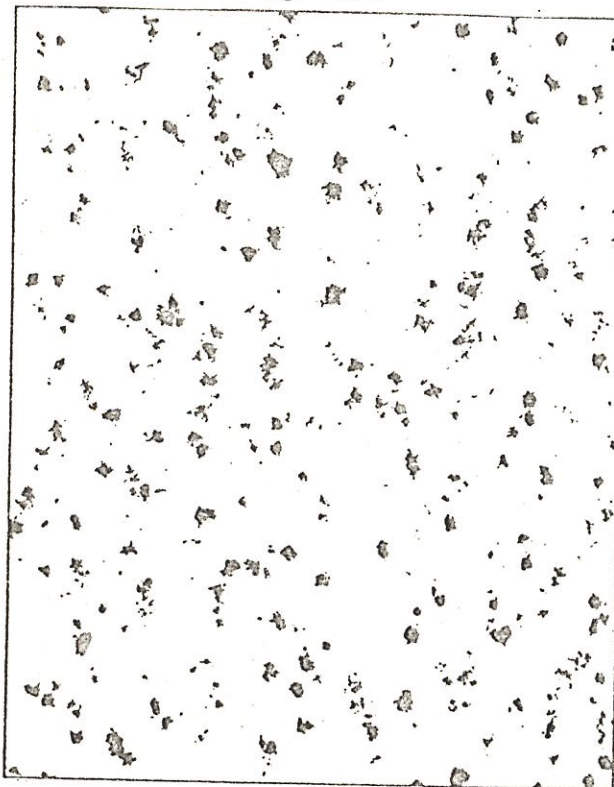


Fig. 4-2B-2

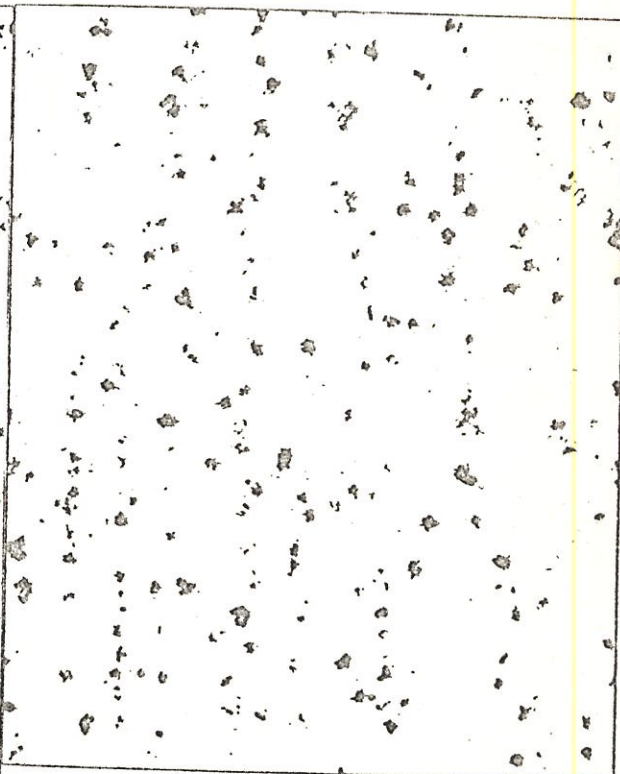


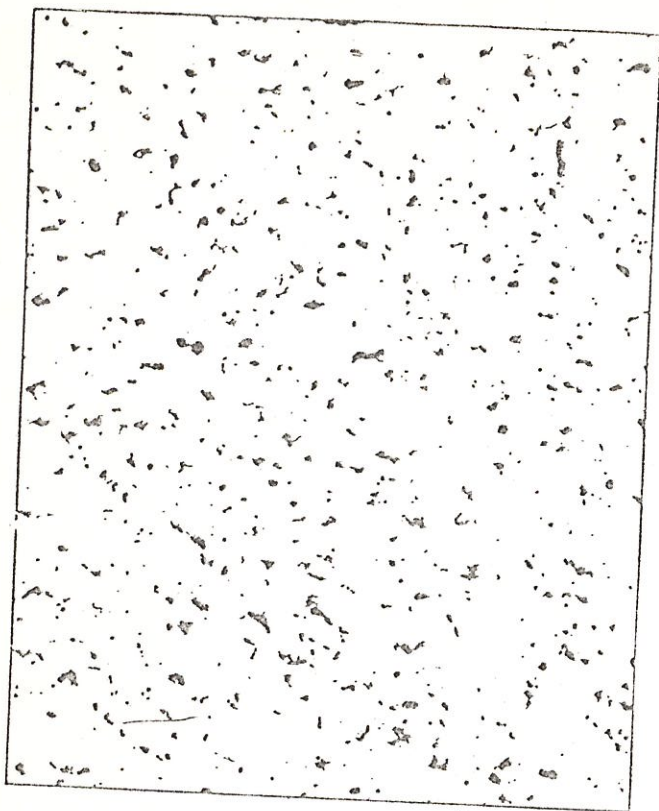
Fig. 4-2C-3



Fig. 4-2D-4



Fig. 4-2E-5



FOTOGRAFIAS PATRON PARA
DETERMINAR EL TAMANO DE
LOS NODULOS DE GRAFITO
DE UN HIERRO MALEABLE

Fig. 4-3A-1

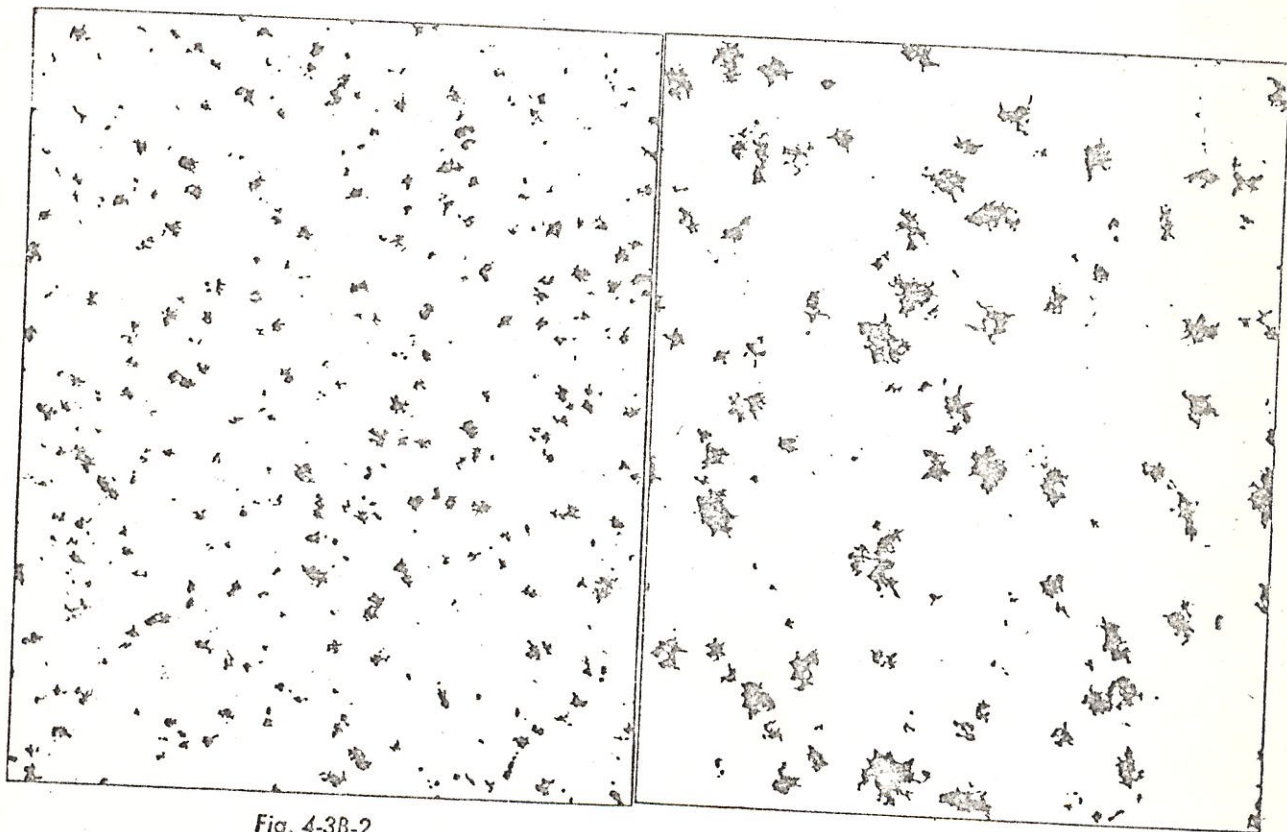


Fig. 4-3B-2

Fig. 4-3C-3



Fig. 4-3D-4



Fig. 4-3E-5



FOTOGRAFIAS PATRON PARA
DETERMINAR LA FORMA DE
LOS NODULOS DE GRAFITO
DE UN HIERRO MALEABLE

Fig. 4-1A-1

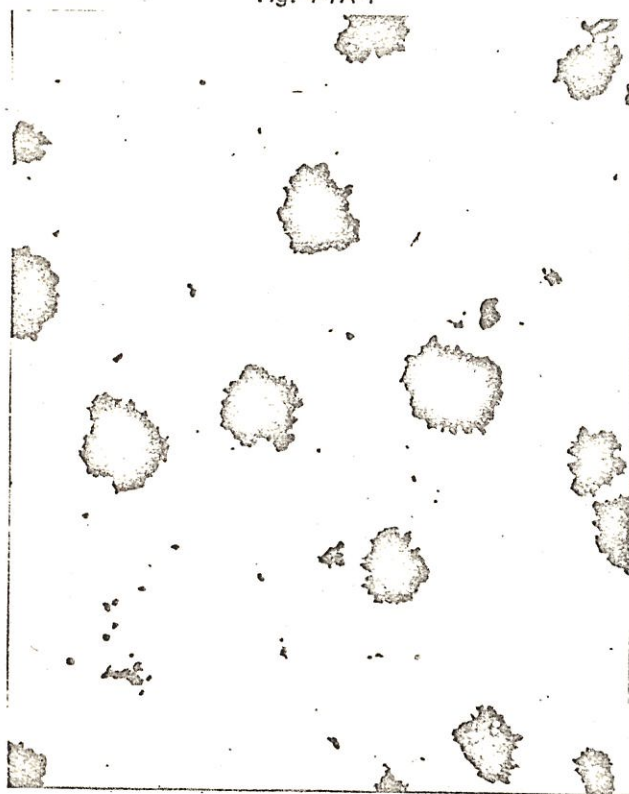


Fig. 4-1B-2

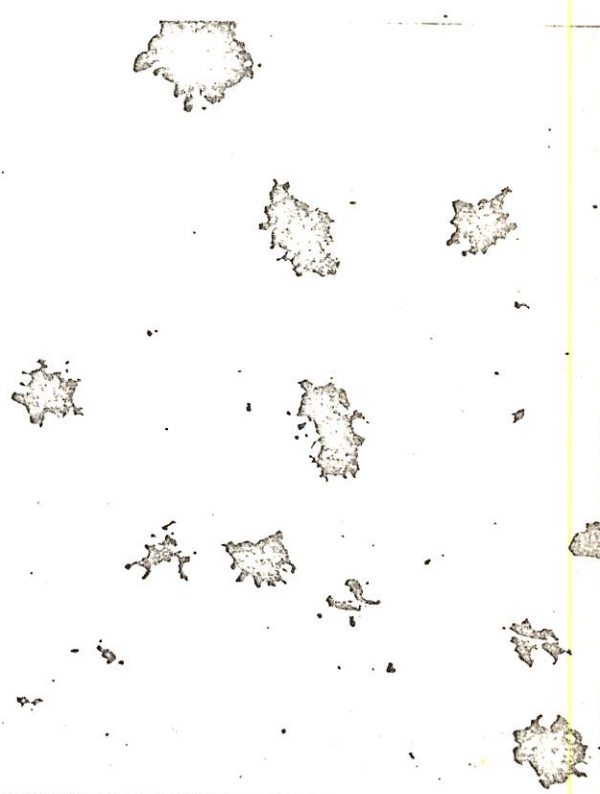


Fig. 4-1C-3



Fig. 4-1D-4

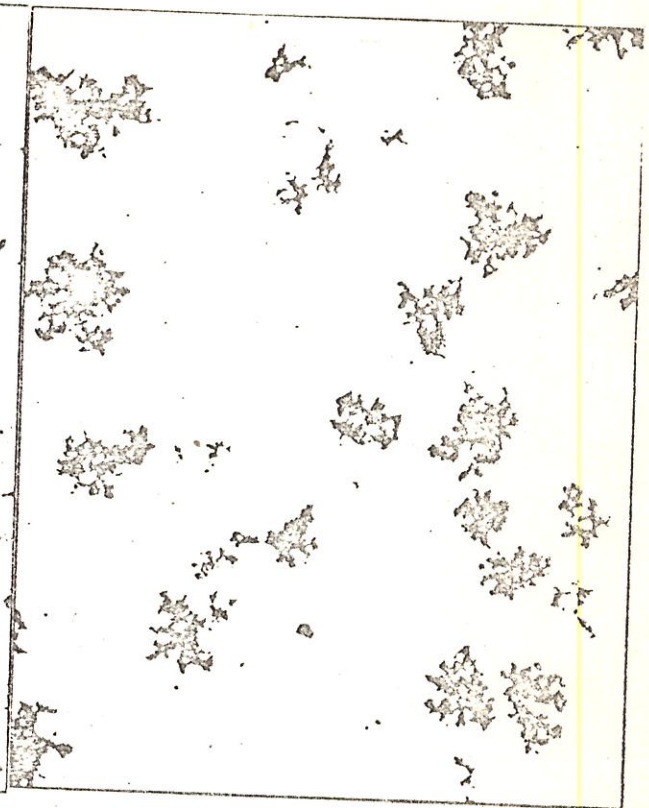


Fig. 4-1E-5

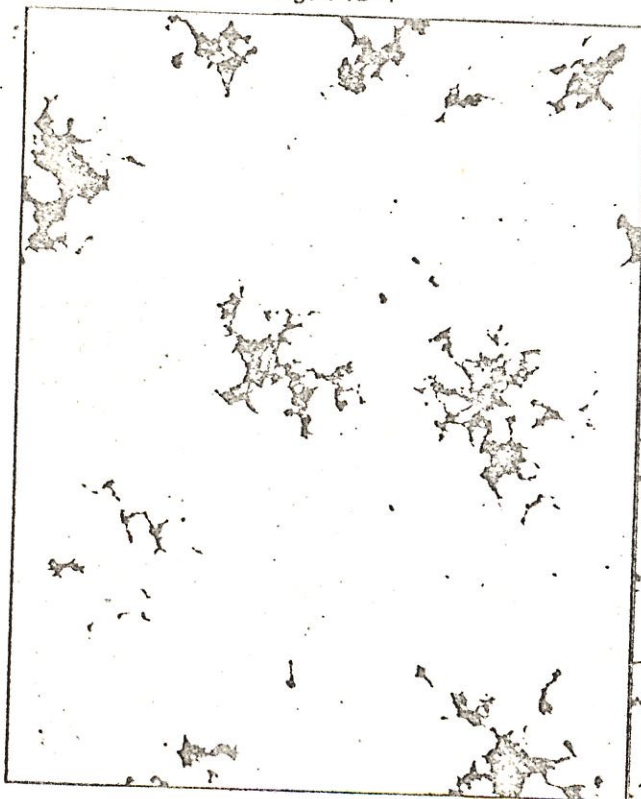


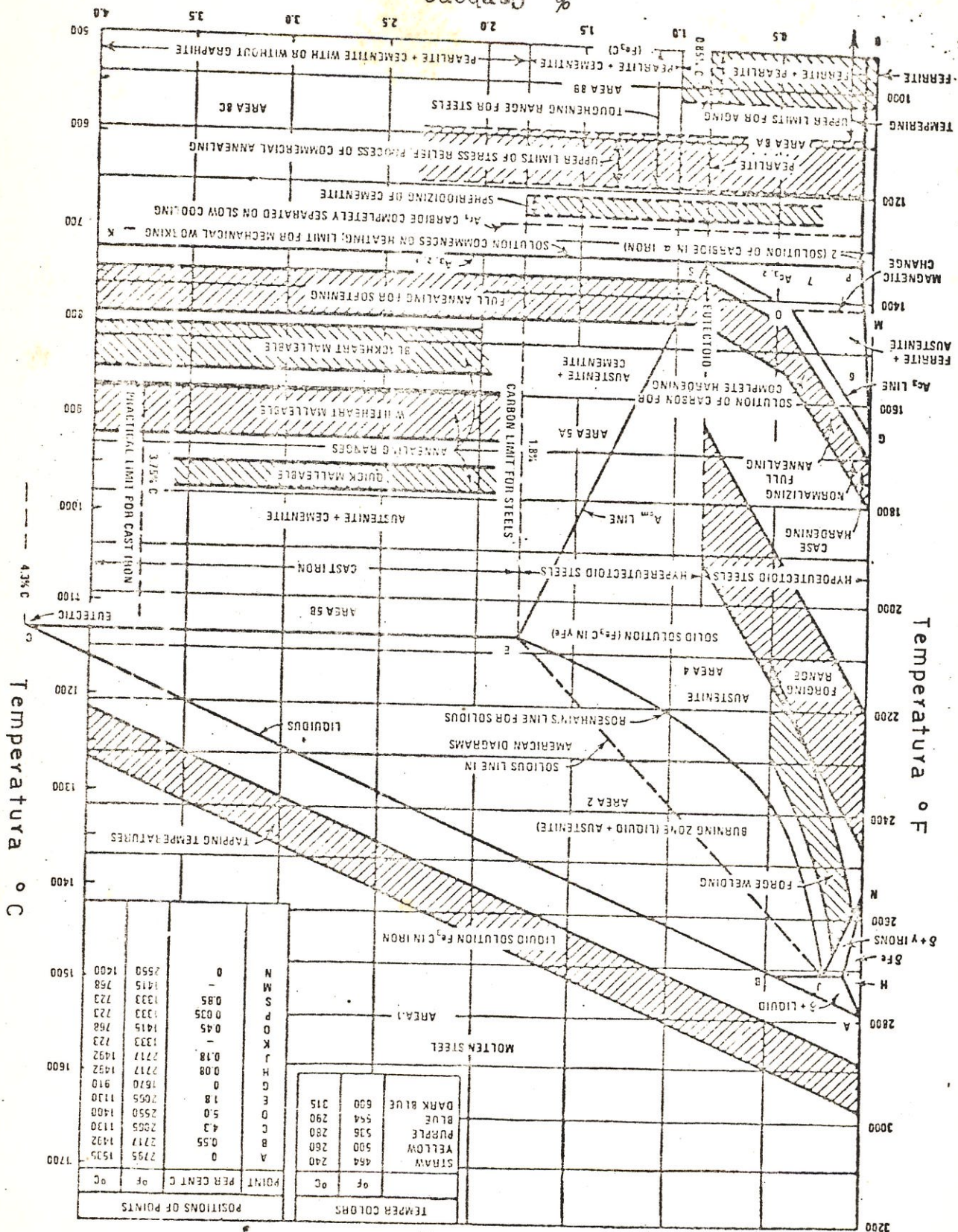
Fig. 4-1F-6



Fig. 4-1G-7

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO COMPLETO DE HIERRO CARBONO

% Carbono



0 to 100				100 to 1000				1000 to 2000				2000 to 3000											
C.	F.	C.	F.	C.	F.	C.	F.	C.	F.	C.	F.	C.	F.	C.	F.								
-17.8	0	32	10.0	50	122.0	35	100	212	260	500	932	538	1000	1832	816	1500	2732	1093	2000	3632	1371	2500	4532
-17.2	1	33.8	10.6	51	123.8	43	110	230	266	510	950	543	1010	1850	821	1510	2750	1099	2010	3650	1377	2510	4550
-16.7	2	35.6	11.1	52	125.6	49	120	248	271	520	968	549	1020	1868	827	1520	2768	1104	2020	3668	1382	2520	4568
-16.1	3	37.4	11.7	53	127.4	54	130	266	277	530	986	554	1030	1886	832	1530	2786	1110	2030	3686	1389	2530	4586
-15.6	4	39.2	12.2	54	129.2	60	140	284	282	540	1004	560	1040	1904	838	1540	2804	1116	2040	3704	1393	2540	4604
-15.0	5	41.0	12.8	55	131.0	66	150	292	288	550	1022	566	1050	1922	843	1550	2822	1121	2050	3722	1399	2550	4622
-14.4	6	42.8	13.3	56	132.8	71	160	320	293	560	1040	571	1060	1940	849	1560	2840	1127	2060	3740	1404	2560	4640
-13.9	7	44.6	13.9	57	134.6	77	170	338	299	570	1058	577	1070	1958	854	1570	2858	1132	2070	3758	1410	2570	4658
-13.3	8	46.4	14.4	58	136.4	82	180	356	304	580	1076	582	1080	1976	860	1580	2876	1138	2080	3776	1416	2580	4676
-12.8	9	48.2	15.0	59	138.2	88	190	374	310	590	1094	588	1090	1994	866	1590	2894	1143	2090	3794	1421	2590	4694
-12.2	10	50.0	15.6	60	140.0	93	200	392	316	600	1112	593	1100	2012	871	1600	2912	1149	2100	3812	1427	2600	4712
-11.7	11	51.8	16.1	61	141.8	99	210	410	321	610	1130	599	1110	2030	877	1610	2930	1154	2110	3830	1432	2610	4730
-11.1	12	53.6	16.7	62	143.6	100	212	413	327	620	1148	604	1120	2048	882	1620	2948	1160	2120	3848	1438	2620	4748
-10.6	13	55.4	17.2	63	145.4	104	220	428	332	630	1166	610	1130	2066	888	1630	2966	1165	2130	3866	1443	2630	4766
-10.0	14	57.2	17.8	64	147.2	110	230	446	338	640	1184	616	1140	2084	893	1640	2984	1171	2140	3884	1449	2640	4784
-9.44	15	59.0	18.3	65	149.0	116	240	464	343	650	1202	621	1150	2102	899	1650	3002	1177	2150	3902	1454	2650	4802
-8.89	16	60.8	18.9	66	150.8	121	250	482	349	660	1220	627	1160	2120	904	1660	3020	1182	2160	3920	1460	2660	4820
-8.33	17	62.6	19.4	67	152.6	127	260	500	354	670	1238	632	1170	2138	910	1670	3038	1188	2170	3938	1466	2670	4838
-7.78	18	64.4	20.0	68	154.4	132	270	518	360	680	1256	638	1180	2156	916	1680	3056	1193	2180	3956	1471	2680	4856
-7.22	19	66.2	20.6	69	156.2	138	280	536	366	690	1274	643	1190	2174	921	1690	3074	1199	2190	3974	1477	2690	4874
-6.67	20	68.0	21.1	70	158.0	143	290	554	371	700	1292	649	1200	2192	927	1700	3092	1204	2200	3992	1482	2700	4892
-6.11	21	69.8	21.7	71	159.8	149	300	572	377	710	1310	654	1210	2210	932	1710	3110	1210	2210	4010	1488	2710	4910
-5.56	22	71.6	22.2	72	161.6	154	310	590	382	720	1328	660	1220	2228	938	1720	3128	1216	2220	4028	1493	2720	4928
-5.00	23	73.4	22.8	73	163.4	160	320	608	388	730	1346	666	1230	2246	943	1730	3146	1221	2230	4046	1499	2730	4946
-4.44	24	75.2	23.3	74	165.2	166	330	626	393	740	1364	671	1240	2264	949	1740	3164	1227	2240	4064	1504	2740	4964
-3.89	25	77.0	23.9	75	167.0	171	340	644	399	750	1382	677	1250	2282	954	1750	3182	1232	2250	4082	1510	2750	4982
-3.33	26	78.8	24.4	76	168.8	177	350	662	404	760	1400	682	1260	2300	960	1760	3200	1238	2260	4100	1516	2760	5000
-2.78	27	80.6	25.0	77	170.6	182	360	680	410	770	1418	688	1270	2318	966	1770	3218	1243	2270	4118	1521	2770	5018
-2.22	28	82.4	25.6	78	172.4	188	370	698	416	780	1436	693	1280	2336	971	1780	3236	1249	2280	4136	1527	2780	5036
-1.67	29	84.2	26.1	79	174.2	193	380	716	421	790	1454	699	1290	2354	977	1790	3254	1254	2290	4154	1532	2790	5054
-1.11	30	86.0	26.7	80	176.0	199	390	734	427	800	1472	704	1300	2372	982	1800	3272	1260	2300	4172	1538	2800	5072
-0.56	31	87.8	27.2	81	177.8	204	400	752	432	810	1490	710	1310	2390	988	1810	3290	1266	2310	4190	1543	2810	5090
0.	32	89.6	27.8	82	179.6	210	410	770	438	820	1508	716	1320	2408	993	1820	3308	1271	2320	4208	1549	2820	5108
0.56	33	91.4	28.3	83	181.4	216	420	788	443	830	1526	721	1330	2426	999	1830	3326	1277	2330	4226	1554	2830	5126
1.11	34	93.2	28.9	84	183.2	221	430	806	449	840	1544	727	1340	2444	1004	1840	3344	1282	2340	4244	1560	2840	5144
1.67	35	95.0	29.4	85	185.0	227	440	824	454	850	1562	732	1350	2462	1010	1850	3362	1288	2350	4262	1566	2850	5162
2.22	36	96.8	30.0	86	186.8	232	450	842	460	860	1580	738	1360	2480	1016	1860	3380	1293	2360	4280	1571	2860	5180
2.78	37	98.6	30.6	87	188.6	238	460	860	466	870	1598	743	1370	2498	1021	1870	3398	1299	2370	4298	1577	2870	5198
3.33	38	100.4	31.1	88	190.4	243	470	878	471	880	1616	749	1380	2516	1027	1880	3416	1304	2380	4316	1582	2880	5216
3.89	39	102.2	31.7	89	192.2	249	480	896	477	890	1634	754	1390	2534	1032	1890	3434	1310	2390	4334	1588	2890	5234
4.44	40	104.0	32.2	90	194.0	254	490	914	482	900	1652	760	1400	2552	1038	1900	3452	1316	2400	4352	1593	2900	5252
5.00	41	105.8	32.8	91	195.8	488	910	1670	488	910	1670	766	1410	2570	1043	1910	3470	1321	2410	4370	1599	2910	5270
5.56	42	107.6	33.3	92	197.6	493	920	1688	493	920	1688	771	1420	2588	1049	1920	3488	1327	2420	4388	1604	2920	5288
6.11	43	109.4	33.9	93	199.4	499	930	1706	499	930	1706	777	1430	2606	1054	1930	3506	1332	2430	4406	1610	2930	5306
6.67	44	111.2	34.4	94	201.2	504	940	1724	504	940	1724	782	1440	2624	1060	1940	3524	1338	2440	4424	1616	2940	5324
7.22	45	113.0	35.0	95	203.0	510	950	1742	510	950	1742	788	1450	2642	1066	1950	3542	1343	2450	4442	1621	2950	5342
7.78	46	114.8	35.6	96	204.8	516	960	1760	516	960	1760	793	1460	2660	1071	1960	3560	1349	2460	4460	1627	2960	5360
8.33	47	116.6	36.1	97	206.6	521	970	1778	521	970	1778	799	1470	2678	1077	1970	3578	1354	2470	4478	1632	2970	5378
8.89	48	118.4	36.7	98	208.4	527	980	1796	527	980	1796	804	1480	2696	1082	1980	3596	1360	2480	4496	1638	2980	5396
9.44	49	120.2	37.2	99	210.2	523	990	1814	523	990	1814	810	1490	2714	1088	1990	3614	1366	2490	4514	1643	2990	5414
			37.8	100	212.0				538	1000	1832				1093	2000	3632				1649	3000	5432

TABLA DE CONVERSION DE GRADOS CENTIGRADOS A FARENHEIT Y VICEVERSA.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Heat treating technology, publicado por Lindberg división Of sola basic industries, año 1973.
- 2.- Practicas de metalografia, Dr. Eduardo J. Dubox, año 1974
- 3.- Metals Handbook, A.S.M., octava edición. Volumen 1, 3, 5, 7. The american society for metals, año 1972.
- 4.- Microstructure standards for malleable iron, bo-
letin 64, bayton malleable iron, de dayton ohio.
- 5.- Engineering data file, malleable founders society.
- 6.- Tratamientos termicos II, the american Society
for metals.
- 7.- Aspectos tecnologicos en la producción del hierro
nodular con equipo duplex cubilote-horno rotario,
Ing. Ignacio Wiesner, año 1975
- 8.- Fonderia, Danilo Parazzi, año 1961

- 9.- Tecnología de la fundición, Eduardo Capello.
- 10.- El horno de cubilote y su operación, american foundrymen's society (A.F.S.)
- 11.- Useful information for foundrymen, boletín fy-177r2, whiting corporation.
- 12.- Informe sobre el proceso de la maleabilización de la fundición blanca, Ing. J. A. Rábago, México.
- 13.- Annual book of astm standards, parte 2 y 31, american society for testing and materials, año 1973
- 14.- Manual del ingeniero mecánico, Baumeister y Marks.
- 15.- Manual del fundidor, J. Duponchelle, año 1966
- 16.- Consideraciones para la predicción de la composición del hierro gris en el proceso de fundición, boletín serie II, Nr. 4 de Atisa, México, Octubre 1974