

# Fabricación del Hierro Nodular por el Método de Transferencia (Sandwich)

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE QUIMICA**

---

**ROBERTO ANTONIO MAYA RUIZ**  
**INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

**MEXICO, D. F.**

**1977**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

LAS Tesis 1977  
AÑO [REDACTED]  
FECHA \_\_\_\_\_  
PRGC \_\_\_\_\_ **266**  
B \_\_\_\_\_



QUÍMICA

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA:

PRESIDENTE: FERNANDO MALDONADO MENDOZA

VOCAL: KURT NADLER GUNDEISHEIMER

SECRETARIO: JOSE CAMPOS CAUDILLO

1er. SUPLENTE: HECTOR ENRIQUE CURIEL REYNA

2do. SUPLENTE: HUMBERTO MALAGON ROMERO

DEDICO LA PRESENTE TESIS CON TODO RESPETO Y CARIÑO A :

MIS QUERIDAS HERMANAS:

Susana.

Gloria.

Georgina.

A MIS MAESTROS:

Al Ing. José Campos C. por su valiosa y atinada -  
Dirección , en el Desarrollo de mi Trabajo.

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS:

En especial a Elsa Martínez y Enrique Manzo, por -  
su Apoyo Incondicional en la Culminación de la -  
Misma.

CON INFINITA GRATITUD A MIS PADRES:

Don Filemón Maya Rodríguez

Y

Doña Susana Ruiz De Maya.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

## CAPITULO II

### GENERALIDADES

- 1.- Historia del hierro nodular
- 2.- Diferentes procesos para obtención del hierro nodular
  - a) Tratamiento directo
  - b) Método de dilución ( Técnica de Sulzer )
  - c) Método Sandwich
  - d) Método de Inmersión
  - e) Método de tratamientos especiales:
    - 1e Método de doble fondo o tapa desmontable
    - 2e Método de cuchara con entrepaño o trampa
    - 3e Método de tratamiento de flujo sobre el molde
    - 4e Método de cuchara a presión o cámara de presión
    - 5e Proceso del convertidor Fisher
- 3.- Unidades de fundición
  - a) Cubilote
  - b) Horno eléctrico
  - c) Horno de Inducción

## CAPITULO III

- 1.- Fusión del hierro base
  - a) Proceso
  - b) Tratamiento

2.- Nodulización

a) Aleaciones nodulizantes

3.- Inoculación

4.- Solidificación

5.- Desulfuración

a) Inyección

b) Tapón poroso

c) Agitación mecánica

CAPITULO IV

1.- Características mecánicas

2.- Composición metalográfica

3.- Soldadura

4.- Contracción de la fundición Nodular

5.- Propiedades físicas

6.- Tratamientos térmicos

7.- Control de calidad

CAPITULO V

CONCLUSIONES

## C A P I T U L O I

### INTRODUCCION

El incremento que ha tenido el Hierro Nodular como material de ingeniería durante la década pasada y el rápido incremento en la comercialización que ha surgido por la combinación de sus propiedades hacen de este material un elemento importante dentro de la industria del hierro.

El método de obtención que he escogido para el desarrollo del presente tema es el " METODO DE TRANSFERENCIA DE MAGNESIO " ó " SANDWICH " debido a que es un proceso que no requiere un equipo sofisticado, sino que se utiliza equipo común en una fundición por lo que la simplicidad del manejo de equipo no requiere de gran técnica y es fácil de adaptar a la Industria Mexicana.

El ciclo mínimo de tratamiento y la flexibilidad de producción saca ventajas sobre otros procesos de los cuales se describen algunos brevemente.

## C A P I T U L O II

### GENERALIDADES

1).- ANTECEDENTES HISTORICOS .- El hierro nodular también conocido como hierro dúctil o hierro grafiesferoidal, fué dado a conocer en la Convención de la Sociedad Americana de Fundidores, celebrada en Filadelfia, en el año de 1948. El Sr. H. Morrogh de la British Cast Iron Research Association, expresó que con las adiciones de cerio al hierro fundido, previamente desulfurado y desoxidado, se obtenía que el grafito se precipitara en forma esferoidal, siempre y cuando tuviera 0.02 % de cerio residual.

Al mismo tiempo, anunció el Sr. Gangebin de la International Nickel Co. que se podía obtener la misma estructura del hierro fundido con la adición de magnesio, al cual se le nombró " el proceso del magnesio " que fué muy aceptado, sobre todo en U. S. A. Muchos contribuyeron a desarrollar la tecnología para la obtención de este material, que por sus propiedades mecánicas, y su bajo costo de producción, podía tener muchas aplicaciones en el campo de la industria y de la ingeniería .

durante la década de los 50 existió una intensa rivalidad entre la Compañía de Motores Ford y la Compañía Internacional de Níquel para obtener la patente y por un largo tiempo hubo toda clase de violaciones, por fin el grupo " Meehanite " logró un-

arreglo con ellos en el año de 1960.

Otros autores dicen: que el proceso para la obtención del hierro nodular usando magnesio como aleación nodulizante, estuvo patentado hasta el año de 1960 por la Compañía Internacional de Níquel, y que hoy en día, no hay patente para la producción de dicho hierro, y que en los últimos años, se ha incrementado mucho la producción de casi 1.000,000 de toneladas en el año de 1968 y para fines de 1971, alcanzó una producción de 2.000,000 de toneladas.

Actualmente se han desarrollado gran número de métodos para mejorar la técnica. Se sabe perfectamente que este modo de solidificación es obtenido por la aleación en pequeñas cantidades, pero definitivas del magnesio; su composición química es igual a la del hierro gris, excepto por un restringido contenido de elementos menores. A pesar de las intensas investigaciones existe todavía una incógnita en cuanto al mecanismo, y es, la razón exacta de por qué el magnesio causa que el grafito precipite como nódulos.

2).- MÉTODOS PARA EL TRATAMIENTO CON MAGNESIO .- Fundamentos Teóricos, como se verá posteriormente, el magnesio entra en ebullición a 1,100°C. En el intervalo de la fundición líquida, 1250° a 1500°C, el magnesio desarrolla, por tanto, una presión relativamente elevada, 2.5 a 10 atmósferas, cuyo control es la-

principal dificultad del tratamiento metalúrgico del hierro en fusión. Así pues, el primer objetivo de todo tratamiento es controlar por cualquier medio la presión del magnesio y su velocidad de dilución. Naturalmente, también es importante la rentabilidad del tratamiento o su posible incremento. Combinando el magnesio en forma de aleación con otro metal se ha logrado reducir la presión de vapor del magnesio. A este respecto, los mejores metales son el níquel, silicio, cobre y calcio con los cuales se alea el hierro en el tratamiento con magnesio. Otra posibilidad es la adición dosificada al hierro líquido de magnesio o una aleación de magnesio en forma granulada, con ayuda de un gas portador. Pero todos estos métodos exigen la utilización de equipo especial.

En cambio, existen varias aleaciones de magnesio que se pueden emplear sin una técnica especial, siempre que contengan relativamente poco magnesio. En tal caso la aleación, generalmente en pequeños trozos se coloca en el fondo de la cuchara y encima se verta el caldo, o bien al sangrar el hierro se va añadiendo poco a poco, también puede operarse cubriendo la aleación en la cuchara, por ejemplo; con chapa de acero, consiguiendo de esta forma mejorar el rendimiento de magnesio y, por tanto, su eficiencia.

a).- TRATAMIENTO DIRECTO. - El tratamiento directo se efectúa -

en una cuchara que debe estar caliente y limpia en el momento de la colada.

Efectuada la fusión, la composición final debe fijarse con menos de aproximadamente el 0.75 % , es decir, que si se desea un 2.75 % a través de la carga, se deberá obtener 2 % y el 0.75 % deberá ajustarse en la cuchara. Este punto es importante para que tenga efectividad la inoculación del magnesio dado que por su poder grafitizante el silicio favorece la germinación del grafito.

Este tratamiento directo puede considerarse como un doble tratamiento de inoculación.

1) De una parte la aleación de magnesio se añade a la cuchara en trozos de 12 mm. de grueso, cuando el primer caldo depositado en ella permita que dichos trozos queden cubiertos por el caldo, se va añadiendo hasta llenar la cuchara en dos terceras o tres cuartas partes, momento en que debe terminarse la adición. También puede depositarse en el fondo de la cuchara toda la cantidad de aleación, tapándose ésta con chapa de acero, que evite que el primer caldo entre en contacto con la aleación de magnesio hasta que la cuchara esté llena a la mitad, se continúa llenando hasta las dos terceras o tres cuartas partes de su capacidad, momento en que se interrumpe la colada. Por lo que la cantidad de aleación debe calcularse con arreglo

a la fórmula:

Magnesio total a inocular = 0.15 + 1.5 % S

o también:

$$\text{Mg} = 2 \% \text{ S} + \frac{\text{T}}{1,250} - 1.00$$

en donde T es la temperatura a la que se realiza la inoculación del magnesio.

Y en función del peso que se coloque en la cuchara y el porcentaje de azufre del caldo (este siempre inferior a 0,020 %).

Además, para contrarrestar el efecto nocivo de las impurezas (antigrafitizantes), plomo, bismuto etc. se añadirá al caldo junto con la aleación de magnesio, 0.75 % de mischmetal sobre el porcentaje de la aleación de magnesio.

La temperatura, medida con pirómetro de inmersión en la fundición líquida, debe oscilar entre 1,450°C y 1,480°C y la cuchara debe taparse con tapadera de chapa delgada con el objeto de evitar proyecciones.

La reacción de la aleación suele comenzar a los dos segundos de su adición y termina a los 15 ó 20 segundos.

2)- Como se dijo anteriormente, es importante añadir un 0.75 % de Silicio en la cuchara a través de ferrosilicio al 75% que contenga 0.5 % de calcio, ó también puede usarse siliciuro de calcio, siempre teniendo presente que sus impurezas deben estar por debajo de los límites de los elementos nocivos señalados.

dos y en trozos no superiores a 12 mm, comprendidos entre 1 y 10 mm.

Esta adición debe efectuarse cuando las cucharas se hayan llenado en sus dos terceras o tres cuartas partes. Se interrumpirá entonces la colada, hasta que se complete la reacción del magnesio, y después de desescoriarse se continuará llenando la cuchara y añadiendo ferrosilicio al caño de colado o piquera del horno.

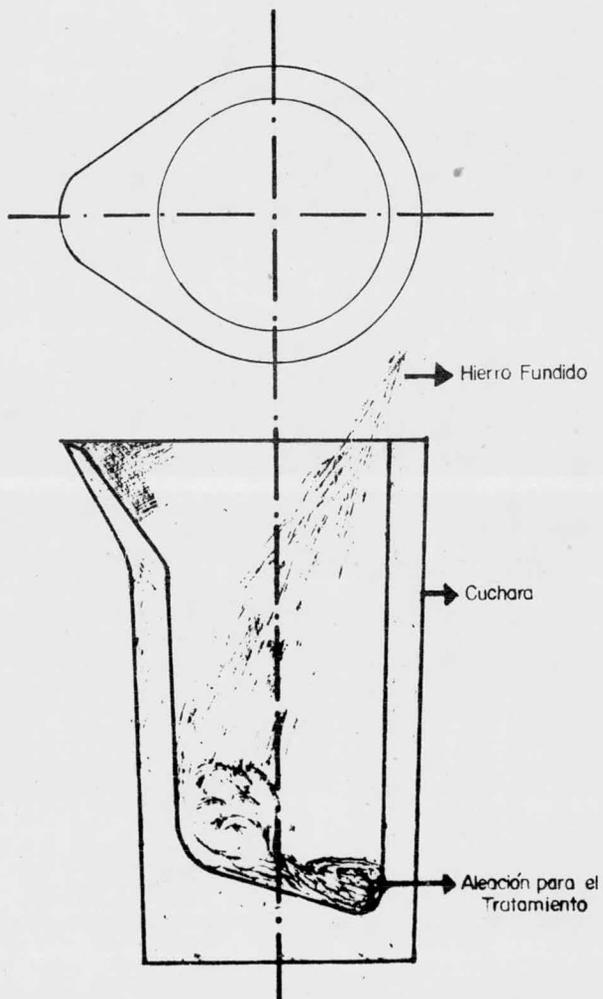
Para coladas menores de una tonelada se puede añadir primeramente la aleación de magnesio y mischmetal, desescoriar los productos de la reacción, añadir el ferrosilicio a la superficie limpia y agitar vigorosamente.

Como el magnesio es muy oxidable y se vaporiza por su bajísimo punto de ebullición, la experiencia ha demostrado que, al cabo de diez minutos si no se ha colado en los moldes, la estructura de las piezas fundidas será de grafito en forma laminar. Por tal razón debe procurarse que transcurra un tiempo mínimo desde la inoculación al llenado de los moldes. La temperatura de colado en los moldes debe oscilar entre 1,390° y 1,410°C (Fig.1)

b).- METODO DE DILUCION (TECNICA SULZER). - La técnica Sulzer aprovecha la mayor recuperación del magnesio que se obtiene tratando a baja temperatura. Se requiere colar con rapidez, aproximadamente un tercio de la cantidad total, enfriar este metal

**ESQUEMA DE LA CUCHARA PARA EL METODO  
DIRECTO EN LA OBTENCION DE HIERRO DUCTIL**

**FIG. 1**



hasta 1,440° 1,250°C normalmente 1,350°C, y añadir la cantidad total de aleación de magnesio que se requiere para la co-lada. Esta adición debe efectuarse por inmersión. Cuando ter-mina la reacción del magnesio, este caldo se diluye por adi-ción del resto del caldo a la temperatura de 1,450° 1,600°C, normalmente 1,550°C. El inoculante de ferrosilicio se añade-durante o después de dicha dilución.

Las ventajas de este procedimiento son: mayor recuperación - del magnesio para una temperatura final dada del caldo. Mayor temperatura final del caldo para una recuperación de mag - nesio standard.

c) - METODO SANDWICH.- La popularidad del método (de transfe - rencia) directo, pronto resultó una técnica de tratamiento - mejorado conocido como el método Sandwich. La centrifugación - de la cuchara permanece tan parecida como el de la cuchara pa-ra el método directo, excepto el fondo de ésta el cual se modi-fica con una cavidad o pozo (fig.2) para retener la aleación - de tratamiento.

El término Sandwich está derivado del hecho de que el material es cubierto por una capa de pedacería de acero por ejemplo, - con el objeto de retardar la reacción de la aleación esferoidi-zante al agregar el hierro fundido. Cerca de 1 a 2 % de adi-ción de rebaba de acero es probablemente el más usado como -



cubierta del material, aunque no es el único . En suma a la -  
reacción retardada, la cubierta de material enfría el metal -  
en la proximidad inmediata de la reacción del magnesio y la -  
velocidad del magnesio se incrementa cuando la temperatura -  
del metal disminuye (fig. 3).

Ambos ferrosilicio al 50 % y 75 % son usados como material -  
para cubrir y mejorar la recuperación del magnesio y al mismo -  
tiempo, inocular o incrementar el contenido de silicio en el -  
hierro a nivel deseado.

Una recubierta de arena de resina o carbonato de calcio son -  
otros dos materiales algunas veces usados como capa de Sand -  
wich en aplicaciones extendidas para retener el tiempo de -  
reacción.

La capa de arena cuando está propiamente colocada fundirá y -  
prohibirá la efectividad de la aleación esferoidizante para -  
la reacción, hasta que la arena cristalizada esté perforada -  
a través de la superficie por el hierro fundido .

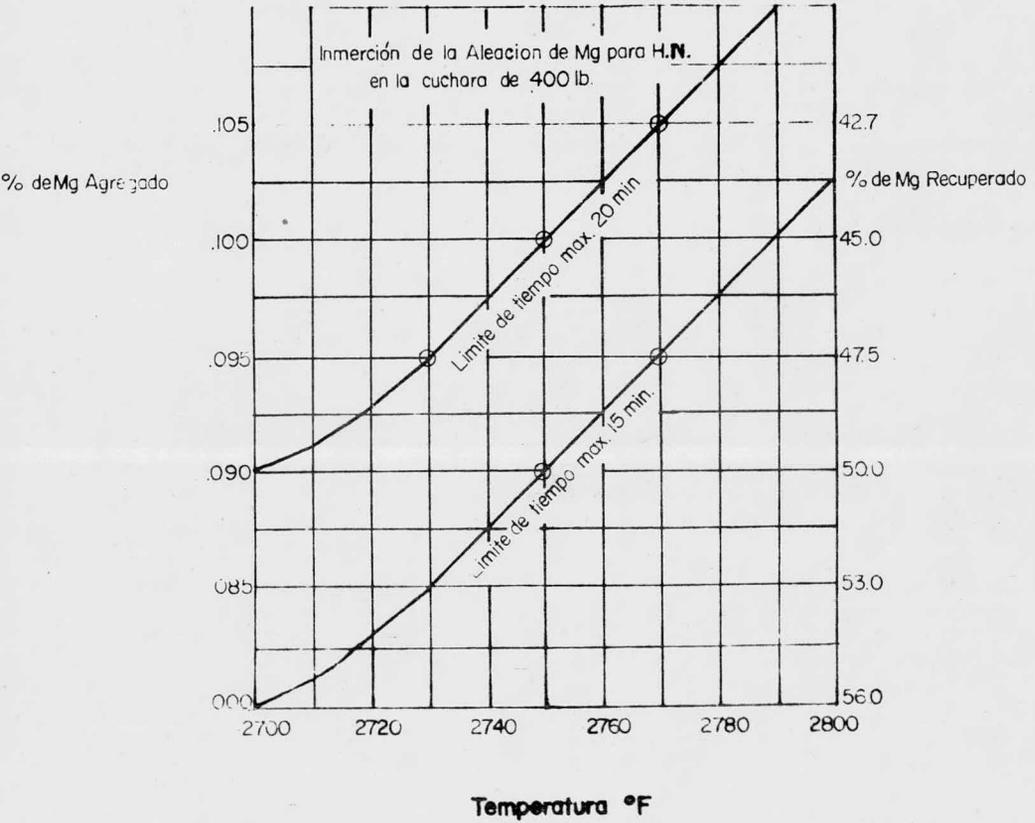
La recubierta del magnesio es sustancialmente mejorada con el  
tratamiento del Sandwich y puede ascender de 40 % a 45 % .

#### A.- Ventajas.

- 1).- El proceso de transferencia es muy flexible. -  
puede ser usado para pequeñas cantidades, o -  
grandes tonelajes.

Mg REQUERIDO CUANDO LA ALEACION Mg ESTA  
 EN UNA CUCHARA DE 400LB CON ALEACIONES DE  
 1/3 de Ni-Mg y 2/3 Si-Mg Ce

FIG. 3



2).- Este procedimiento no es caro, implica equipo ya existente.

3).- El tiempo de tratamiento puede ser muy corto. Si no usa postinoculante, el tiempo se limita a lo que tarde el magnesio en introducirse.

B.- Desventajas.

1).- La recuperación del magnesio es baja provocando un aumento de costo al elaborar la cantidad de aleante con magnesio.

2).- Se forman grandes cantidades de escoria, si esta no es removida perfectamente se tiene una fundición de baja calidad.

3).- Existe la posibilidad de revigorizar el silicio por el aumento de aleante de magnesio .

4).- Formación de grandes cantidades de humos de óxido de magnesio, si no se extraen se reduce la visibilidad en el lugar de trabajo.

5).- Los operadores están sujetos a un intenso calor y al fuego .

C.- Equipos necesarios para el proceso de transferencia.

1).- El equipo es el ordinario en una fundición.

D.- Contenido del magnesio en los aleantes usados con este procedimiento, a temperaturas que van de 1,487°C - -

1,564°C.

T A B L A I .

TIPO	% Mg	% NI	% SI	% CA	% C	% Fe	Mg RECU PERADO.
NI-Mg	14-16	82	-	-	-	-	- - -

Puede llevar ~~car~~io o no, se agrega con el fin de ayudar a elimi-  
nar elementos perjudiciales todos ellos a bajas temperaturas -  
mejoran su magnesio recuperado. (fig.4).

Sin embargo, en la práctica al bajar la temperatura se puede -  
presentar problemas tales como gases atrapados y escoria.

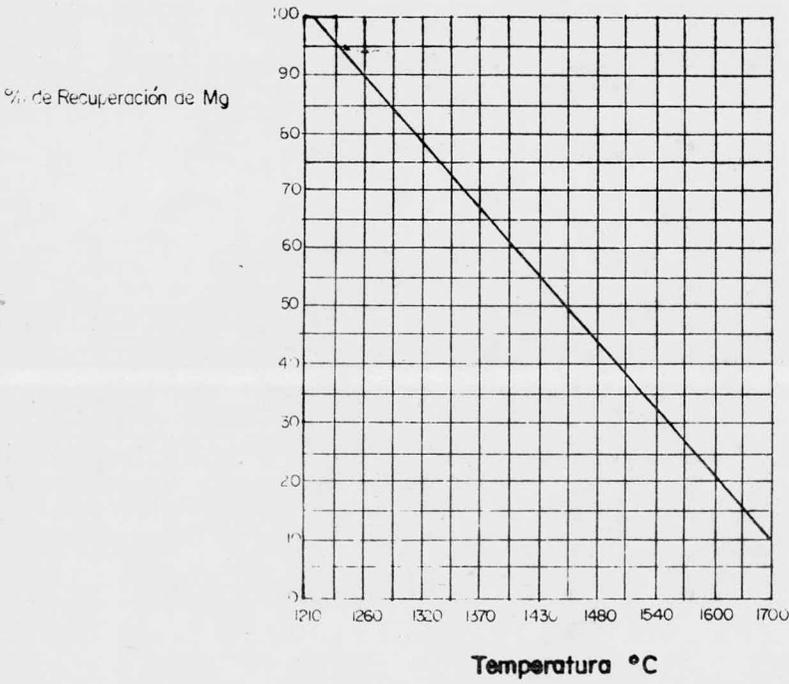
La recuperación del magnesio se ve afectado por la velocidad de-  
transferencia del metal sobre el aleante. Si es agregado lenta -  
mente, una gran cantidad de magnesio se quemará y no se aprove -  
chará para producir grafito esferoidal .

La velocidad promedio será de 4 toneladas/ 1 minuto para canti -  
dades pequeñas y medianas. Algunas cantidades más grandes han si -  
do transferidas a la velocidad de 40 toneladas/ 1 minuto. En to -  
do caso la velocidad debe ser de acuerdo con los límites de se -  
guridad del equipo.

El mejor de los aleantes para dar mayor magnesio recuperado es -  
el Ni-Mg ; por tener mayor densidad y porque el níquel se alea -

TEMPERATURA DE TRATAMIENTO  
Y RECUPERACION DE Mg

FIG.4



con facilidad al magnesio.

La recuperación del magnesio puede ser mejorada utilizando una hoja de acero limpia, entre el aleante y el líquido. Esta técnica tiene el efecto de separar por un momento el calor del metal del aleante, dando tiempo para que se introduzca todo el metal. Generalmente se forma con el refractario una cavidad en el fondo de la olla para depositar en ese lugar la aleación como ya se mencionó anteriormente .

#### E.- Procedimiento General.

- 1).- Precalear las ollas por utilizar
- 2).- Pesar la cantidad de aleante de magnesio en una olla especial.
- 3).- Checar la temperatura del hierro que va a ser tratado.
- 4).- Pesar la cantidad de hierro que va a ser tratado.
- 5).- Transferir el hierro sobre el aleante, a una velocidad mínima de 4 toneladas/1 minuto.
- 6).- Después de la reacción, eliminar la escoria.
- 7).- Agregar el ferrosilicio a la corriente, cuando se pasa de la olla de tratamiento a la olla de vaciado.
- 8).- El ciclo del tratamiento puede variar de segundos cuando se tratan pequeñas cantidades a minutos cuando son muchas toneladas, una variación común de éste proceso es la cuchara simple o método 2/3-1/3. Esta variación-

tiene dos ventajas.

PRIMERA: La cuchara de tratamiento puede ser usada como olla de vaciado, esto reduce tiempo y manejo.

SEGUNDA: La caída de temperatura es menor con menos segundos de manejo.

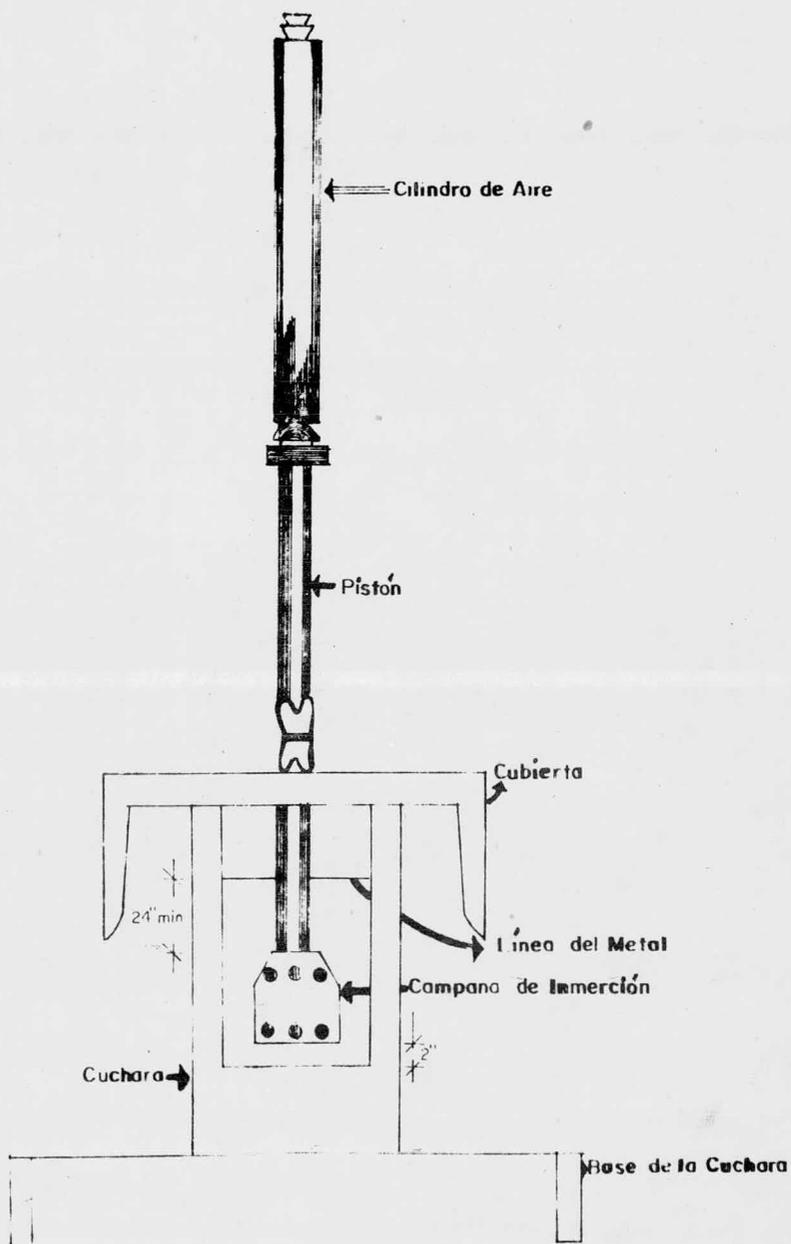
La primera desventaja en ésta técnica es la estrecha variación del contenido de silicio en la fundición, hay una mezcla incompleta de Fe-Si. El resultado es una variación de dureza en la pieza.

d).- METODO DE INMERSION.- Entre otras cosas la reacción entre el hierro fundido y la aleación esferoidizante determina la eficiencia del proceso individual del tratamiento. Los métodos previamente descritos trabajan efectivamente, pero en algunas instancias una técnica de inmersión es superior. Un refractario en forma de campana conteniendo el material esferoidizante es sumergido profundamente dentro del hierro (fig.5) ésta inmersión y sostenimiento del material bajo la superficie del hierro previene al material de flotar y por supuesto, usualmente resulta en un incremento para recobrar el magnesio. El material esferoidizante es sumergido también por una lámina de metal u otro recipiente adecuado .

El tratamiento de inmersión es altamente usado y es versátil. prácticamente todas las formas de material esferoidizante son -

ESQUEMA DEL TRATAMIENTO  
POR INMERSION PARA HIERRO DUCTIL

FIG. 5



usados incluyendo el coque impregnado de magnesio y aleaciones de combinaciones de tierras raras.

El magnesio se recupera altamente en la inmersión y puede fácilmente exceder el 50 %. Por que de éste método, la inmersión tiene la ventaja de requerir menos material esferoidizante que el directo o el Sandwich. Este proceso de inmersión causa menos humo, y fuga de Mg en forma de  $MgO$ , crea menos escoria, metal más limpio y reduce el costo de la aleación. El costo añadido de la campana de inmersión reúne trabajo, sin embargo, puede reducir el costo de la inmersión. Otra ventaja es que éste método no requiere una cuchara vacía para cada tratamiento, como el método directo o el de Sandwich. La primera desventaja, es una pérdida de temperatura más grande, debido a la masa de la unión más fría en la inmersión. El proceso no es flexible para cantidades de tratamiento variable. En suma el tiempo del ciclo es usualmente más largo que los otros mencionados.

e).- METODOS DE TRATAMIENTO ESPECIALES.- Un número de métodos de tratamientos especiales fué ideado por fundidores para incrementar la eficiencia y su proceso de tratamiento particular o para tomar ventaja de los materiales de tratamiento especial .

1 e).- METODO DE FONDO DOBLE O TAPA DESMONTABLE.- El fondo -  
doble o tapa desmontable da forma a una cuchara de dos partes  
una barrera de refractario perforado forma las dos secciones-  
de la cuchara, la cual fué designada para el tratamiento de -  
hierro fundido con coque impregnado de magnesio (fig. 6). El-  
doble fondo perforado, en la parte media del cilindro (cucha-  
ra) donde cae el hierro fundido, y que sirve de división de -  
la parte baja donde se previene el coque impregnado de magne-  
sio, el cual flota durante la reacción. Para cada tratamiento  
se requiere una nueva división de arena apizonada .

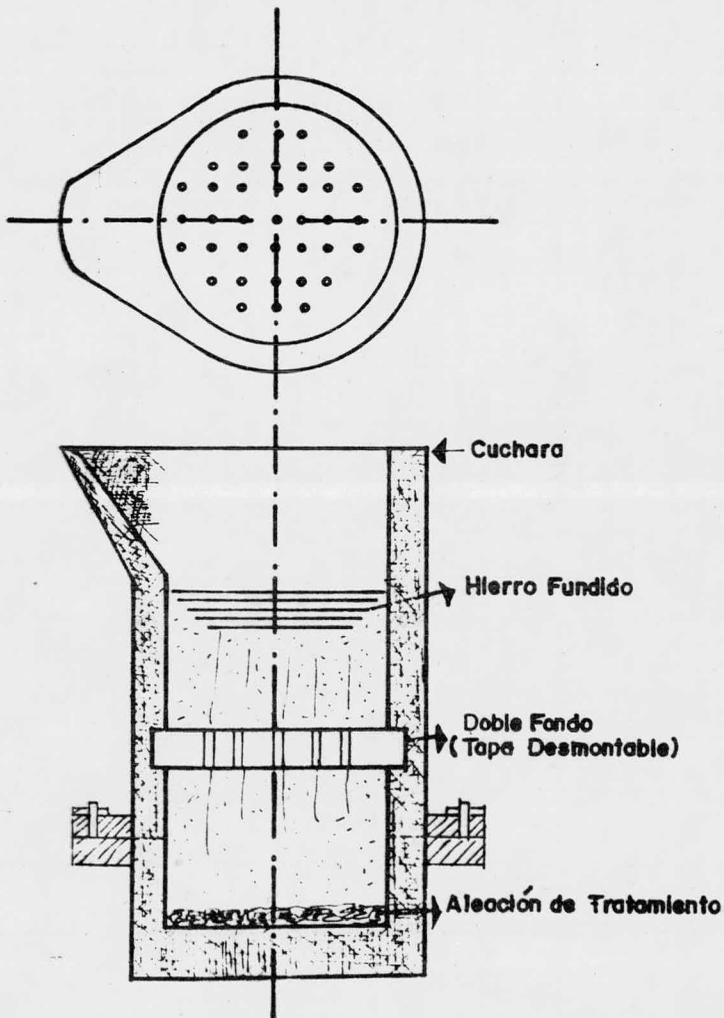
La recuperación de magnesio puede ser más alta que el de in -  
mersión y puede exceder del 50 % . Las ventajas del proceso -  
incluye la adaptabilidad de capacidad de tratamiento en la -  
cuchara, también como una buena eficiencia.

La desventaja más obvia es la necesidad para poner un nuevo -  
fondo apizonado para cada tratamiento tan bueno como se nece-  
sita y propiamente conectar y sellar las dos partes de la cu-  
chara . El uso de esta técnica no es lejanamente aceptada .

2 e).- METODO DE CUCHARA CON ENTREPAÑO O TRAMPA.- La cuchara-  
con entrepaño, es otro de los métodos para atrapar o detener-  
la reactividad en el fondo de la cuchara del material para el  
tratamiento . Lo usual es la cuchara cilíndrica, hacia arriba,  
es la misma altura para un diámetro de 3:1. Un entrepaño per-

# ESQUEMA DE LA CUCHARA CON DOBLE FONDO PARA TRATAMIENTO DE HIERRO DUCTIL

FIG. 6



forado está localizado en la parte baja de la cuchara (fig. 7). Un ligero ángulo ayuda a retener el coque impregnado de magnesio debajo del entrepaño durante la reacción. Recobrándose arriba del 50 % de magnesio.

Entre las ventajas se incluye la posibilidad del bajo costo del material de magnesio para el tratamiento y la poca emisión de humos de óxido de magnesio. La flexibilidad en las medidas de la hornada es también posible.

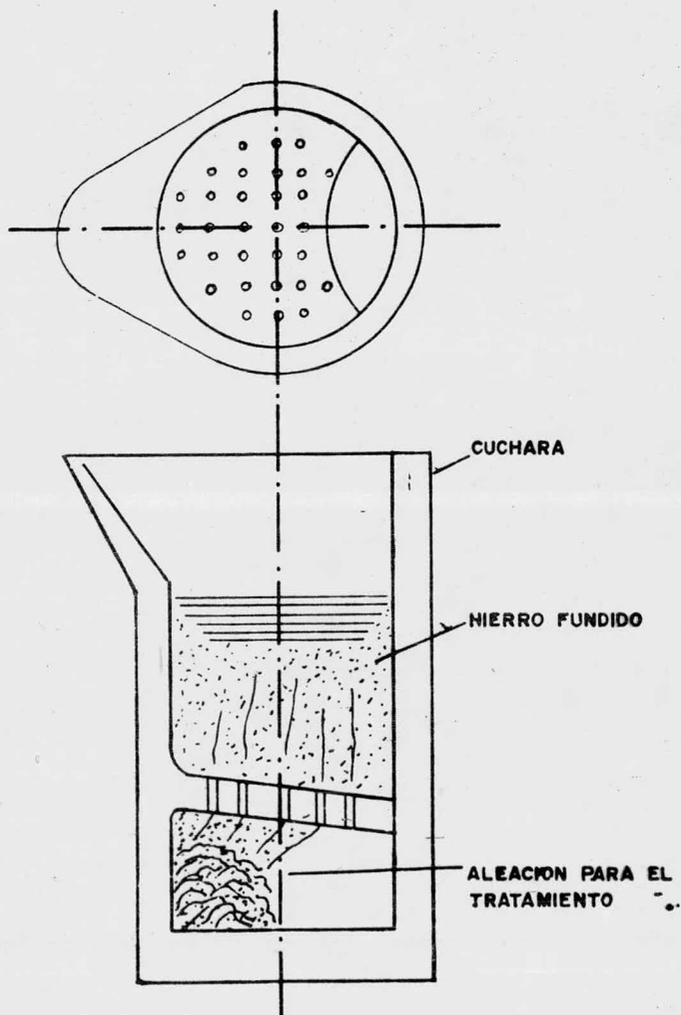
Una de las desventajas es el uso de coque impregnado de magnesio ya que es necesario usar cantidades extremadamente exactas del material. La colocación del material abajo del entrepaño es previa para la adición del hierro, lo cual requiere mucho cuidado.

### 3 e).- MÉTODOS DE TRATAMIENTO DEL PROCESO DE FLUJO SOBRE MOLDE.

El proceso de flujo sobre molde significa la introducción de la aleación esferoidizante dentro del centro de el flujo de hierro fundido o el molde durante la transferencia (fig. 8). En la parte superior la velocidad se estabiliza (del metal) con la velocidad de la aleación, para sincronizar el flujo continuo hacia el molde. El propósito de ésta técnica es la separación del hierro magnesio de la reacción del aire. Los gases inertes también pueden ser usados para proteger el área de reacción para más adelante incrementar la eficiencia.

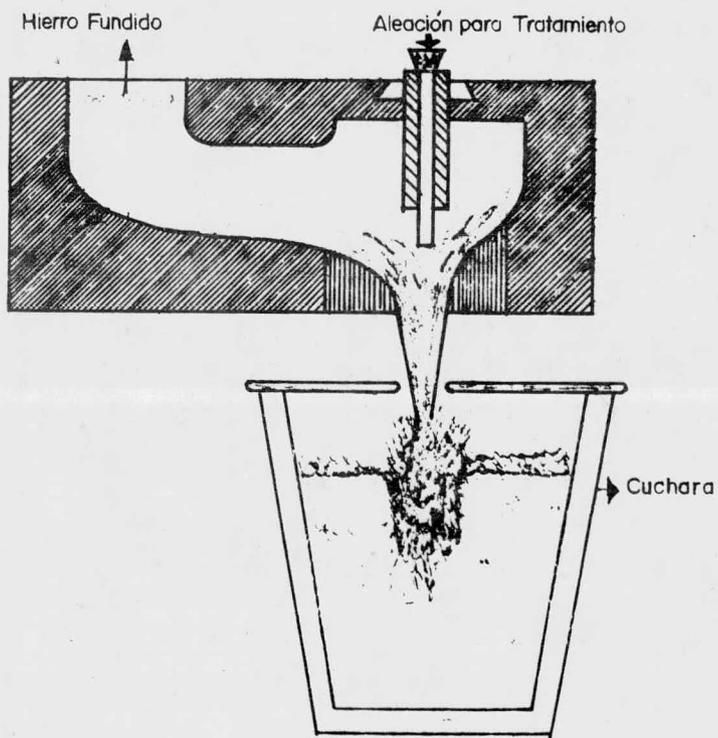
ESQUEMA DE LA CUCHARA CON ENTREPAÑO  
PARA EL TRATAMIENTO DEL HIERRO DUCTIL

FIG. 7



ESQUEMA DEL METODO DE FLUJO  
PARA TRATAMIENTO DE HIERRO DUCTIL

FIG. 8



La recuperación de magnesio es una atmósfera inerte llega a reportarse hasta un 80 % . Las ventajas de éste método incluye: bajo humo y mínima pérdida de temperatura. Las desventajas son: que se requiere controles precisos y la necesidad de una medida especial para la aleación. En el proceso tiene que ver la vida del refractario , este es un factor que no debe ser pasado por alto.

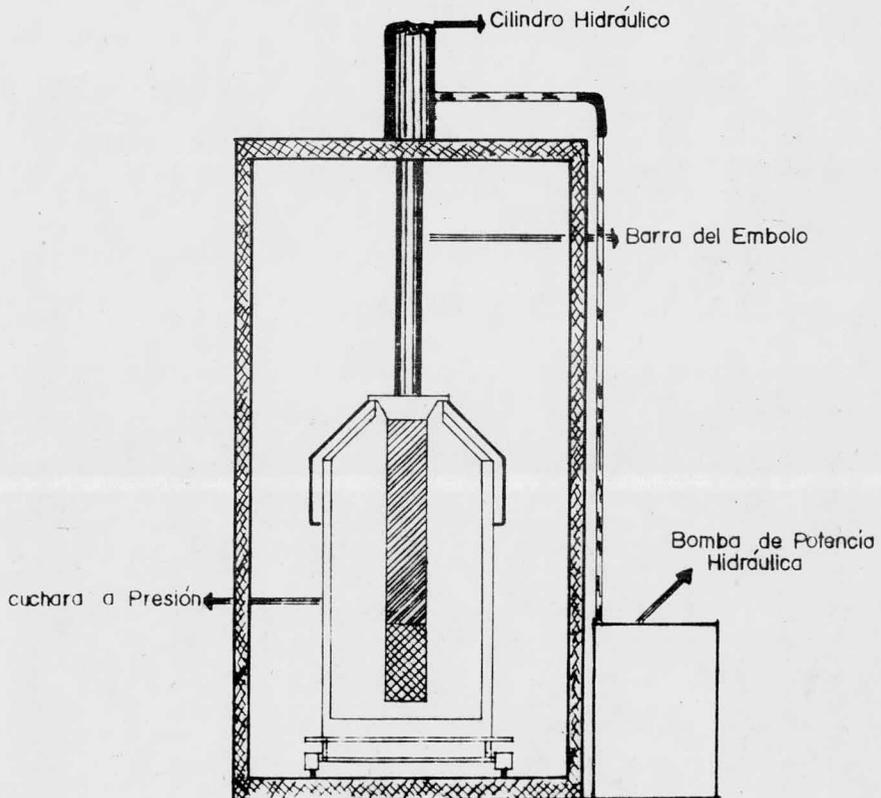
4 e).- METODO DE CUCHARA DE PRESION O CAMARA DE PRESION.- El concepto de inventos usando presión sujeta para la adición de metales de bajo punto de ebullición. Como el magnesio en este caso, para hierro fundido no es nuevo. La práctica de éste método es una de las técnicas de tratamiento no muy aconsejable-- para obtener beneficio en este país por el período de tiempo y el manejo mecánico del equipo.

Dos variaciones de el sistema de presión pueden ser usados: En uno, la cuchara de tratamiento es totalmente cerrada y con la presión del material esferoidizante que es introducido al hierro fundido (fig. 9). En el segundo método, una cuchara convencional es colocada en una cámara de presión donde el material esferoidizante es agregado (fig. 10).

En ambos la presión usada es cerca de 30 atmósferas y el metal existe en la superficie para utilizar dilución con cerca de 3 a 4 partes del metal a tratar.

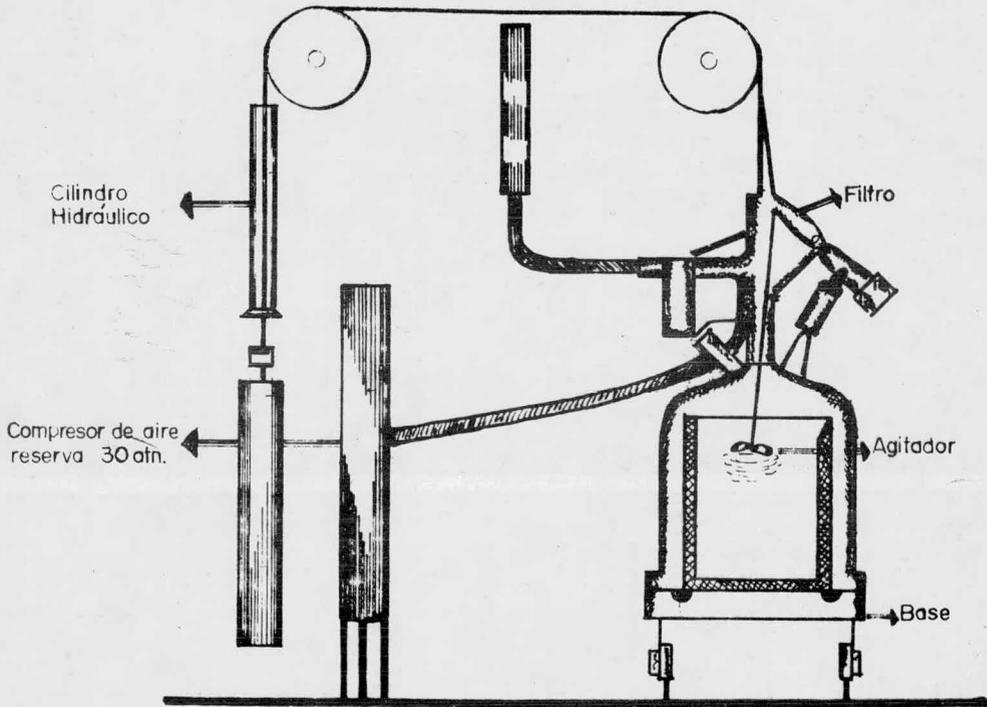
ESQUEMA DE LA CUCHARA A PRESION  
PARA EL TRATAMIENTO DE H. D.

FIG. 9



ESQUEMA DE LA CAMARA DE PRESION  
PARA TRATAMIENTO DE HIERRO DUCTIL

FIG.10



El magnesio puro es usado en ambas técnicas con el magnesio encerrado en una chaqueta de acero o cubierto si es deseado. Las ventajas de ambos métodos incluye el uso de bajos costos de material de magnesio y se recobra de 70 % a 80 %. Los hie<sup>rr</sup>os bajos en azufre no son necesarios y la ausencia de la adición de silicio durante el tratamiento pueden ser ventajas.

Las desventajas incluye la operación de equipo adicional o mantener una presión sujeta .

El riesgo asociado con el hierro fundido y el magnesio a 30 atmósferas es considerable.

El método tiene como resultado una pérdida excesiva en la temperatura inconveniente para la manipulación y tiempo del tratamiento requerido.

5 e).- PROCESO DEL CONVERTIDOR FISHER.- El proceso del convertidor Fisher es un nuevo método de producción de hierro nodular descubierto por George Fisher Schaffhausen, Switzerland.

Se puede producir arriba de 400 Kg originalmente el proceso Fisher se utilizó en Alemania y en los últimos años seis países europeos reportan el uso de este proceso.

Esta técnica de tratamiento utiliza magnesio metálico y no aleaciones de ferrosilicio con magnesio o níquel con magnesio.

Empleando este método es posible usar todo el retorno de fundi-

ción de alto contenido de silicio en el horno de fundición -  
sin la dificultad de incrementar el contenido de silicio en -  
el hierro nodular más allá de los límites razonables, lo cual  
ocurre cuando las aleaciones de silicio magnesio son usadas.

El convertidor de Fisher (fig. 11) es un recipiente el cual -  
es muy parecido en configuraciones y en operación a el conver -  
tidor Bessemer. En un recipiente con una línea de refractario  
montado sobre un muñón como se ve en la fig.

El refractario está perforado en el fondo donde se lleva a -  
cabo la reacción . Una descripción del tratamiento es el si -  
guiente :

1.- La posición del convertidor con el metal base está -  
en posición horizontal . vease que el magnesio para la reac -  
ción está arriba del metal base y no entra en contacto en es -  
ta posición.

2.- Mientras el recipiente está en posición horizontal y -  
después cambia, la cámara donde se efectúa la reacción se -  
carga con la cantidad adecuada de lingote de magnesio puro.

En la parte de atrás se pone el tapón y la puerta de carga se cierra a base de un cilindro de aire.

3.- El tratamiento ocurre cuando el recipiente se encuentra en posición vertical. El metal base rodea la cámara de reacción y entra por orificios causando que el magnesio se vaporice. El hecho de que la tapa cubra el metal cargado causa una presión interna de 4 a 5 psia. Para tratamiento de una tonelada se requiere de 60 a 70 segundos.

4.- Después de la reacción la tapa es abierta y el convertidor es colocado para vaciarse. El hierro tratado es vaciado en cucharas e inoculado con ferrosilicio.

El magnesio recuperado es de un 50 a 65 % . La mayoría de los fundidores europeos usan estos convertidores para desulfurar y nodulizar metal base hecho en cubilote ácido.

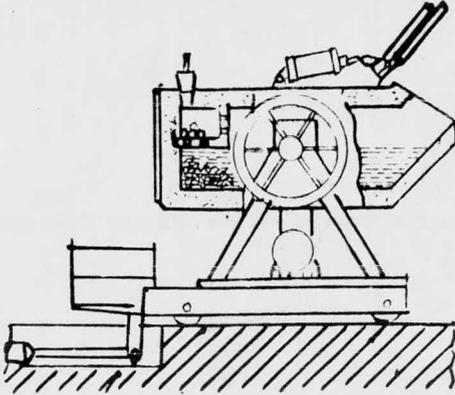
La reacción en el recipiente es muy violenta, de ahí que se debe tener extremo cuidado y precaución en el mantenimiento y operación de este convertidor para evitar accidentes.

La limitación en la operación del convertidor Fisher es la vida del refractario de la cámara de reacción . Los fundidores europeos reportan 150 tratamientos o más antes de hacer reparaciones . Sin embargo, en Estados Unidos se tienen resultados menores.

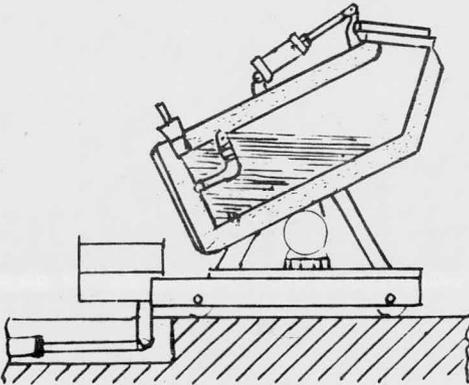
Las ventajas del convertidor Fisher son:

1.- El metal obtenido en el cubilote ácido puede ser satisfactoriamente tratado.

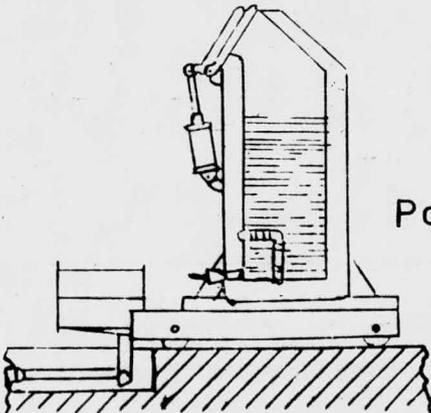
FIG.11 · CONVERTIDOR FISHER



Posición de carga



Posición de reacción



2.- El hierro nodular producido en el convertidor es más limpio y contiene menos escoria y produce menos humos de MgO .

3.- No hay limitación en la cantidad de retorno de fundición la cual puede ser usada como carga de hierro base.

4.- Se tiene control en la composición del hierro nodular y la pérdida de carbón es baja.

3).- UNIDADES DE FUNDICION (TIPOS DE HORNOS).- Una consideración general es la característica operante de las diferentes unidades de fundición.

a).- CUBILOTES.- Los cubilotes (fig. 12) fueron una unidad de fundición establecida cuando el hierro nodular fue introducido primeramente a la industria de la fundición y continúa sirviendo en la actualidad. En el cubilote la tecnología de operación ha cambiado para mejor adaptación para la producción del hierro dúctil. Sin embargo, en años recientes fundiciones con hornos eléctricos han aumentado grandemente en número, reemplazando mucho de los más pequeños cubilotes, los cubilotes grandes aún funden una mayor porción de hierro nodular base. Los equipos de control de contaminación son necesarios para todos tipos de operaciones en fundición de cubilotes.

PRACTICA ACIDA.- La escoria ácida del cubilote es la más-

fácil de operar, tiene buena recuperación de silicio buen control de temperatura del hierro fundido y buen control de carbón, sin embargo, el hierro resultante es alto en azufre y requiere un procedimiento de separación por desulfuración o el uso de mucha aleación adicional de esferoidizante los cuales son procedimientos costosos. El hierro al carbón es más difícil de obtener con una escoria ácida.

PRACTICA BASICA.- El cubilote operado con una escoria básica tiene la habilidad de fundir altas proporciones de chatarra de acero para recomenzar un metal alto en carbono y bajo de azufre con buena temperatura. Las desventajas de fundir con escoria básica incluye una pérdida de 3-35 % de la carga de silicio, una fundición más lenta requiere coque extra e incrementa la necesidad de control, por las operaciones de fundición.

ESCORIA DE CUBILOTE.- Las escorias son usualmente clasificadas por una fórmula simple de constituyentes básicos o constituyentes ácidos. Para propósitos de práctica, la fórmula :  $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$  es inadecuada, una fórmula usualmente considera la escoria ácida y otras fórmulas más grandes las escorias básicas.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es algunas veces usada en el denominador para efectos de fluidez más que de

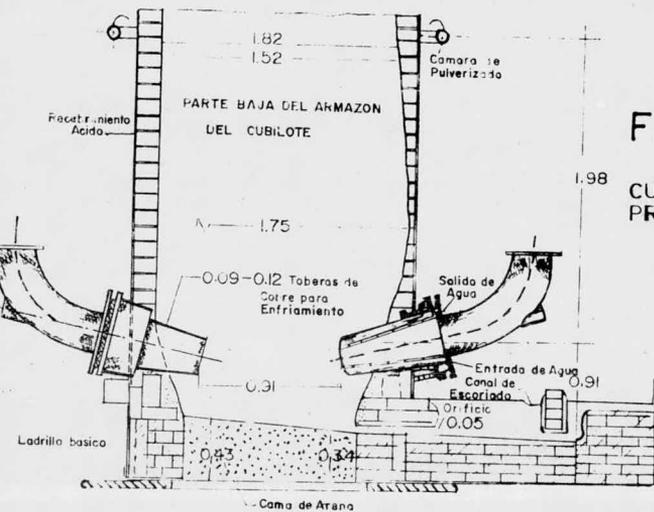


FIG.12

CUBILOTE DESIGNADO PARA LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR

SECCION TRANSVERSAL DE UN HORNO LE ARCO

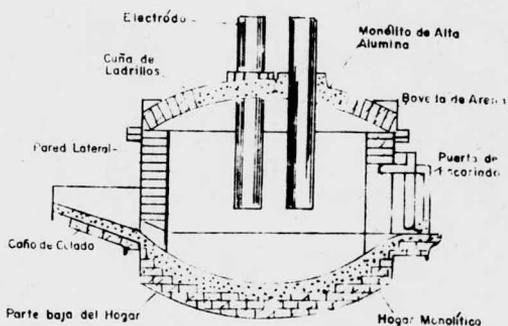


FIG. 13

reacción . Las composiciones de las escorias típicas son:

CONSTITUYENTES DE ESCORIA EN %

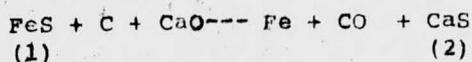
	SiO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	FeO,S	Fórmula base.
Acida	47	14	28	6	3	bal	0.72
Media básica	35	12	35	12	3	bal	1.34
Básica	26	7	49	15	1	bal	2.46

HORNO ELECTRICO.- Hay hornos con un mayor poder de fundición y - pueden también ser equipados con bajo poder para servir como un equipo duplex.

b).- HORNO DE ARCO.- El revestimiento puede ser ácido o básico - si bien éste último se usa más generalmente (fig. 13).

En el proceso básico, la carga se funde bajo una escoria básica-oxidante, que consiste de cal y escamados de laminadora, estas - condiciones duplican en realidad las que se obtienen en el proce - so básico del hogar abierto, en consecuencia el silicio, mangane - so y fósforo presentes se absorben en la escoria y cuando se ve - que se ha completado el proceso se retira la escoria completa - mente, de manera que la única impureza presente en el hierro en - cantidades apreciables al final del proceso es el azufre; se pro - cede a formar otra escoria, pero esta vez la escoria es básica -

reductora compuesta con cal y antracita y su función principal es la eliminación del azufre, bajo las siguientes reacciones:



(1).- Soluble en hierro.

(2).- Insolubles en hierro se une en la escoria.

Terminando el afino se cuele el hierro en una cuchara y de ésta a moldes.

Las principales ventajas del proceso eléctrico son:

- 1.- Hay una remoción definida y efectiva del azufre.
- 2.- Las condiciones son químicamente limpias y no puede haber contaminación de la carga, la cual es posible con los combustibles gaseosos.
- 3.- La atmósfera del horno y la escoria pueden hacerse oxidante o reductora a voluntad.
- 4.- La temperatura se puede controlar fácilmente .
- 5.- El contenido del carbono del hierro se puede mantener constante haciendo así posible el ajuste dentro de los límites estrechos.
- 6.- La adición de elementos de aleación se pueden hacer con precisión.

c).- HORNOS DE INDUCCION.- Durante la primera guerra mundial se introdujo el horno de inducción, por ejemplo, el Ajax-wyatt . -

Los hornos de inducción son relativamente baratos comparándolos con los tipos de hornos de fusión, y, además ofrecen entre otras, las ventajas siguientes:

- 1.- El calor se produce en el mismo seno de la masa a calentar, y como se refrigera con agua, se pierde por radiación muy poco calor.
- 2.- Las intensidades de las corrientes creadas por inducción - pueden ser elevadas porque no salen de la masa metálica; - así, de esta manera se puede obtener la mejor utilización de la energía eléctrica aplicada a problemas térmicos, distribuyendo de modo uniforme, en la masa a calentar, las 860 calorías correspondientes a cada kilovatio-hora:
- 3.- El metal fundido en horno de inducción está sometido a una intensa agitación de origen electromagnético, lo cual hace que se consiga, en el mínimo de tiempo, un producto homogéneo cuando a la carga fundida se le adicionan elementos de aleación.

Este tipo de horno requiere unos 650 kilovatios - hora de energía incorporada por tonelada de metal fundido, y las cargas funden en 45 minutos a 1 hora.

Los dos tipos de hornos para la fusión, de metales, que llevan involucrado el principio de inducción son:

- a).- Hornos para alta frecuencia, sin núcleo.

b).- Hornos para baja frecuencia, con resistencia en su fundido.

HORNO DE INDUCCION SIN NUCLEO.- La forma general de este tipo - de hornos se indica en la fig. 14.

El conjunto consta de tres partes principales:

a).- Bobina primaria.

b).- Refractario monolítico.

c).- Armadura, comprendida los soportes y mecanismos de vaciado.

La característica distintiva de este tipo de hornos en comparación con otras disposiciones para calentar por inducción es la falta de un camino continuo de hierro para el paso del flujo magnético. La pequeña cantidad de material refractario que entra en su construcción es otra característica que le distingue de otros tipos de hornos para fusión.

Para hornos pequeños, hasta una capacidad de 225 kg. se utilizan crisoles prefabricados. La base y paredes alrededor del crisol se constituyen con material refractario granulado convenientemente apretado. El extremo superior de la pared se cierra con un cemento refractario.

Los recipientes de los hornos de mayor tamaño se construyen en el mismo lugar de emplazamiento del horno, y el procedimiento empleado es el mismo que para los hornos pequeños, exceptuando que para formar el recipiente se sustituye el crisol por un molde de hueso de acero que funde en la 1ª. fusión siguiendo la práctica

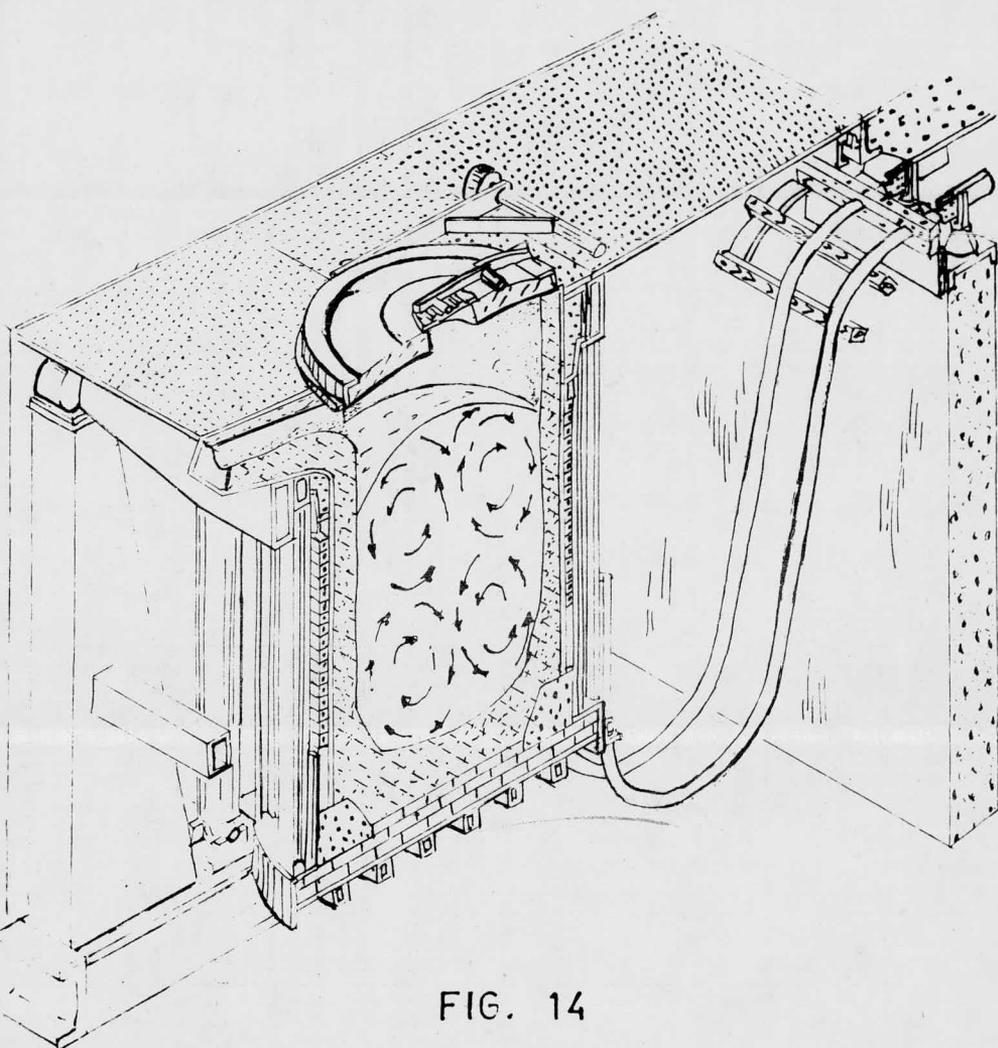


FIG. 14

CORTE DE UNA LINEA DE FRECUENCIA EN  
HORNO DE INDUCCION  
" SIN NUCLEO "

tica usual en construcciones refractarias. Según las necesida-  
des, pueden utilizarse materiales ácidos o básicos.

Con el uso, la parte inferior del material refractario de las  
paredes y base queda sinterizada hasta un cierto espesor -  
10 mm. o más, la parte exterior del refractario conserva su -  
forma granular y sirve como soporte para el revestimiento in-  
terno sinterizado, como aislante térmico y como obstáculo pa-  
ra evitar la pérdida del metal fundido en caso de producirse  
grietas en el revestimiento interior.

Para un montaje a nivel del suelo, las conexiones eléctricas-  
se efectúan por contactos de cuchillas. Esto permite el monta-  
je del horno como un cucharón para su vaciado .

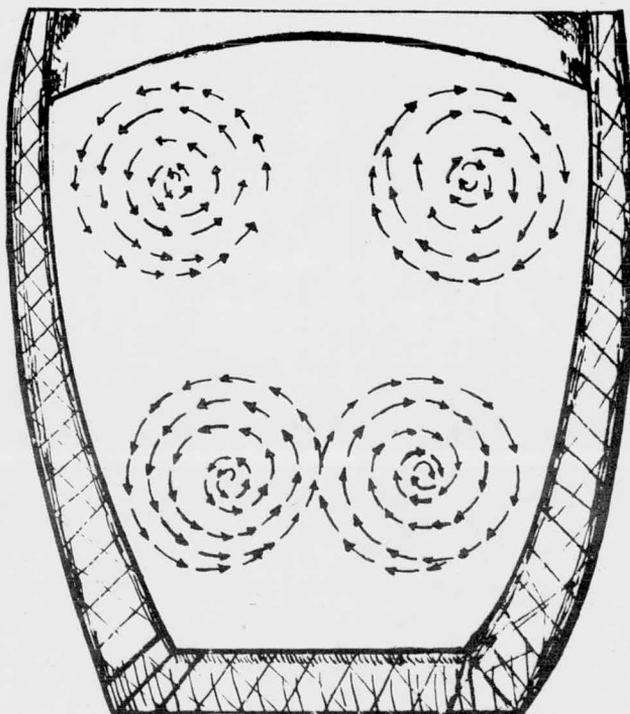
Para montajes en plataforma, las conexiones se realizan con -  
cables flexibles. Con ésta disposición puede dejarse conecta-  
do el horno durante el vaciado, una característica convenien-  
te cuando se efectúa varias coladas en un mismo ciclo térmi-  
co. Una variante que puede aplicarse a los hornos pequeños -  
es el horno de bobina desplazable. La bobina primaria puede -  
subirse o bajarse respecto al crisol, cargado.

Los tamaños normales para trabajo de fusión de hierro son los  
de capacidad de 45 hasta 100 000 kg. con tamaños intermedios.  
Las características peculiares de funcionamiento para estos -  
tipos de hornos de fusión son:

- a).- El recipiente refractario obliga a dejar un gran espacio de aire entre primario y secundario (acoplamiento flojo) con el consiguiente bajo factor de potencia, de 10 a 20 %.
- b).- Se carga con chatarra metálica fría; así, inicialmente en el circuito secundario, el paso de corriente se efectúa a través de una gran variedad de piezas de formas y tamaños distintos, por lo que gran parte de la resistencia total es resistencia de contacto, la carga se homogeniza a medida que funden los metales, disminuyen de altura y decrece el acoplamiento de los circuitos. En este momento puede o no añadirse a la carga metal frío.
- c).- Con cargas de material magnético aumenta el efecto de sus propiedades magnéticas, al principio del ciclo térmico .
- d).- Es característico de estos hornos un efecto de agitación de metal fundido. Este movimiento del baño es de gran importancia metalúrgica en la producción de aleaciones homogéneas, como se mencionó anteriormente (fig. 15 ).

HORNO CON EFECTO DE AGITACION DE METAL  
FUNDIDO

FIG.15



FRECUENCIA.- El primer factor a considerar, desde el punto de vista térmico, en la aleación de frecuencia para un horno de fundir metales, es el grado de agitación que se desea en el metal fundido. Este efecto agitador, es proporcional al cuadrado de los amperes-vuelta. Para una determinada potencia con aumento de frecuencia, la corriente disminuye aumentando la tensión.

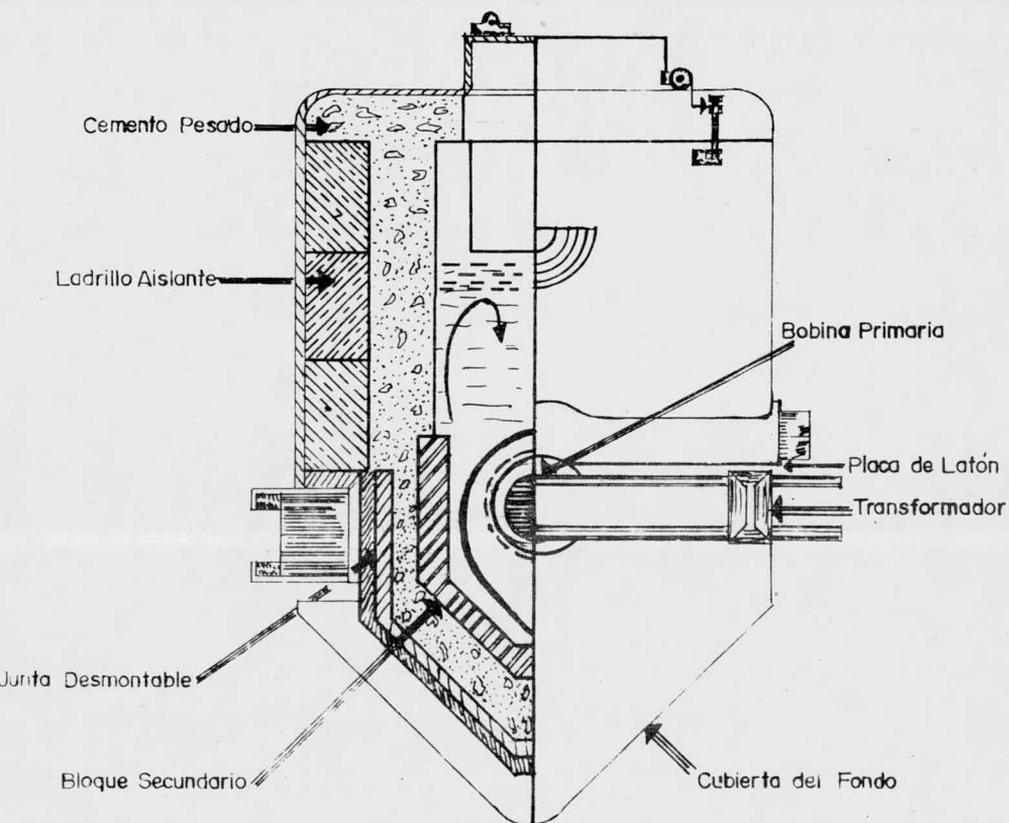
La segunda consideración a efectuar es el tamaño de la chatarra metálica que constituye la carga. Si las piezas son de tamaño muy pequeño, pueden presentarse dificultades para comenzar la fusión de la carga fría. La frecuencia debe ser lo suficientemente alta en cada caso, para elevar el potencial eléctrico, incluso en el primer período de funcionamiento.

Estas condiciones y las económicas en el servicio, hace tiempo condujeron a adoptar en Norteamérica para los hornos de fusión, una frecuencia de 960 Hz, con potencia de 100 Kw ó superior. Para los hornos más pequeños la frecuencia es de 3 000 Hz., como regla, estas frecuencias son también aplicables para la fusión de metales no ferrosos. Para hornos de laboratorios se emplean una variada gama de frecuencias.

HORNOS DE RESISTENCIA EN SU FONDO.- El aspecto general de este tipo de hornos para fusión de metales no ferrosos y aleaciones, indicado en la (fig. 16).

**HORNO CON ESPIRA EN EL FONDO  
PARA LA FUSION DE METALES FERREOS  
Y NO FERREOS PESADOS Y SUS ALEACIONES**

**FIG. 16**



La característica distintiva consiste en una única espira de metal fundido en la parte inferior del horno y conectada al baño, que hace las veces de circuito secundario. Un núcleo de tipo corriente de chapas de acero y un devanado primario-completan los elementos de un transformador.

El calor se desarrolla en la espira de metal fundido en la parte inferior de la carga. Un efecto electrodinámico origina la circulación del metal en la espira según se indica. Este movimiento sirve para transmitir el calor hacia el metal fundido en la cámara encima de la espira, agitándolo a su vez.

La puesta de la marcha del horno requiere una cantidad de metal fundido suficiente para cerrar el circuito secundario.

Al cambiar de metal o aleación es necesario vaciar al horno para un trabajo ininterrumpido siempre el mismo metal o aleación (que es el caso corriente), la carga o una porción de la misma se mantiene en estado de fusión durante la noche, aplicando al horno una tensión reducida.

### CAPITULO III

#### 1) FUSION DEL HIERRO BASE.

El hierro base para la obtención del hierro nodular, es una aleación ternaria a base de: hierro, carbono y silicio. Todos los demás elementos, tales como magnesio, fósforo y azufre, no son deseados, por lo tanto, entre menor sea el contenido de estos, facilita la obtención del hierro nodular además de mejorar las propiedades mecánicas .

Por las condiciones antes mencionadas, para la obtención del hierro base, lo más puro posible, el mejor horno con que se cuenta en la actualidad, es el horno electrónico de inducción. Por sus excelentes características para la producción de hierros colados, partiendo de chatarra de acero, se logra obtener la pureza necesaria del hierro base, lo que facilita y beneficia la producción del hierro nodular, en la clase que se quiere.

Normalmente la chatarra que se usa es recorte de lámina de troquelado profundo, este tipo de chatarra tiene bajo contenido de manganeso y de otros elementos extraños que impiden la nodulación, como veremos más adelante.

El análisis típico de este tipo de acero es el siguiente :

Carbono - 0.10 - 0.15 %

Silicio - 0.30 - 0.35 %

Manganeso - 0.35 max.

Fósforo - 0.04 max.

Azufre - 0.03 max.

Como la cantidad de carbono que contiene la chatarra de aceros es muy baja, y se pierde en la fusión, se agrega grafito para elevar el contenido de carbono al metal fundido. Este suele consistir en electrodos molidos u otra forma adecuada de grafito ( libre de azufre ).

El otro elemento muy importante que es el silicio, también se pierde durante la fusión al igual que el carbono por lo que se debe agregar ferro-silicio al hierro base, con el objeto de lograr el siguiente análisis, antes del tratamiento con la aleación nodulizante:

Carbono - 3.80 - 4 %

Silicio - 1.00 - 1.5 %

Manganeso- 0.35 max.

Fósforo - 0.04 max.

Azufre - 0.03 max.

En el análisis que nos da la chatarra de acero con las adiciones de carbono y silicio . Entre más bajas sean los contenidos de manganeso, fósforo y azufre beneficiará las propiedades fi

sicas del hierro nodular.

a) PROCESO.- Para conseguir la cristalización del grafito en forma nodular o esferoidal, el hierro debe ser sometido a dos tratamientos consecutivos.

a).- Tratamiento de nodularización.

b).- Inoculación secundaria o post-inoculación.

El primero consiste en añadir al hierro fundido una aleación que contenga un elemento nodulizante como el magnesio.

No hay que olvidar que el punto de ebullición del magnesio puro, se sitúa aproximadamente de 1,100°C a 1,500°C esta temperatura se alcanza cuando se efectúa la reacción del hierro base con la aleación de magnesio, la presión que desarrolla esta reacción, llega a ser hasta de 10 atm; por lo cual la adición de magnesio puro es muy peligrosa.

Por esta razón, el magnesio puro no puede utilizarse excepto si se recurre a técnicas y equipos adecuados; aleando el magnesio con metales más pesados, como son el Si, Ni, Cu y Fe, la presión del vapor del magnesio se reduce considerablemente, pero la reacción con el hierro fundido a la temperatura antes dicha, es bastante violenta, sobre todo si la proporción de magnesio en la aleación es superior al 50 % .

Resumiendo: con proporciones inferiores al 25 % de magnesio la

reacción no ofrece prácticamente peligro.

La cantidad de aleación que debe incorporarse al hierro base, para obtener grafito esferoidal o nodular, depende de varios factores.

El que desempeña un papel muy importante, es el azufre y por otro lado, la temperatura del tratamiento siempre y cuando no se tengan elementos nocivos como el Pb, Al, Ti, Sb, etc.

Si el contenido de azufre dentro de los límites que tiene el acero, el problema del azufre se reduce mucho, ya que prácticamente la desulfuración que ocasiona el magnesio de 0.03 % que tiene el acero a 0.012 % que queda finalmente.

Se ha comprobado experimentalmente, que para una buena nodularización, se requiere un magnesio residual en el hierro de 0.04 a 0.06 %.

Por otro lado, se debe tomar en cuenta que el rendimiento del magnesio no es del 100 %. Depende mucho de la temperatura del hierro en el tratamiento, y del proceso empleado, como se ve en la tabla siguiente:

Aleación .	Rendimiento.
% Mg.	Aprox.
Mg. puro	Se requiere equipo especial.
50 %	10 a 25 %
8 a 12 %	20 a 40 %
4 a 8 %	40 a 60 %

Teniendo en cuenta los distintos factores que acabamos de ver, la cantidad de magnesio adicional al hierro fundido para obtener buena nodularización puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$Mg_1 = \frac{Mg_2 + 3/4 (S_1 - S_2)}{e}$$

En la que:

$Mg_1$  - Magnesio total

$Mg_2$  - Magnesio residual

$S_1$  - Contenido de azufre antes del tratamiento

$S_2$  - Contenido de azufre después del tratamiento

$e$  - Rendimiento de la incorporación del magnesio.

Algunas otras fórmulas más complejas toman en cuenta también la velocidad de enfriamiento, el espesor de las piezas, el tiempo que transcurre entre el tratamiento con el magnesio y el colado de moldes, etc.

Los cálculos son usualmente en base a la cantidad de magnesio necesario para remover el azufre presente y sin olvidar nunca la indispensable presencia de al menos 0.05 % de magnesio residual. A esto debe agregarse un factor de eficiencia cuyo valor es intangible obteniendo solamente por la experiencia. Este

factor es característico para cada uno de los métodos empleados.

$$\text{Mg. requerido para la nodulización} = \frac{\text{Mg. deseado (\%)}}{\text{eficiencia(\%)}}$$

ejemplo;

$$\text{factor de eficiencia} = 30 \%$$

$$\text{Mg residual deseado} = 0.05 \%$$

$$\text{Mg. requerido para la nodulización} = \frac{0.05 \%}{0.30} = .166$$

$$\text{Mg. requerido para desulfurar} = 0.050 \%$$

$$\text{Total de Mg. requerido} = 0.166 \% + 0.050 \% = 0.22 \%$$

El valor de 0.22 % es para un cálculo unitario.

Si se van a tratar 1,000 unidades la cantidad de magnesio sería:

$$\frac{1\ 000 \times 0.22}{100} = 2.2 \text{ unidades}$$

Por último, si la aleación tiene 9 % de magnesio:

$$\frac{2.2 \times 100}{9} = 24.4 \text{ unidades de magnesio.}$$

Actualmente la mayoría de los operadores evalúan el factor de eficiencia por la práctica, de acuerdo con la cantidad de magnesio suministrada para obtener una nodularidad consistente. -  
Por ejemplo: en la práctica se requiere 0.25 % de Mg. para -  
obtener esferoidización con un magnesio residual de 0.05 % , -  
el factor de eficiencia será la diferencia entre estos valores,

es decir 20 % .

Otro cálculo necesario es el requerido para la recuperación - de magnesio. Un método simple es:

$$\text{Mg. recuperado} = \frac{\text{Magnesio retenido \%}}{\text{Mg. agregado \%} - \text{S en el hierro base \%}}$$

Ejemplo:

Mg. retenido = 0.06 %

Mg. agregado = 0.29 %

S en hierro base = 0.08 %

$$\text{Mg. recuperado} = \frac{0.06 \%}{0.20 \% - 0.08 \%} = 50 \%$$

Por otra parte, no hay que olvidar que el contenido de Magne- sio residual en el hierro líquido se pierde progresivamente - en función del tiempo transcurrido y a razón de 0.001 % por - minuto, o sea 0.01% , por cada 10 minutos.

En cuanto a la post-inoculación del hierro líquido, el trata- miento de magnesio implica la eliminación casi total de los - elementos naturales de la cristalización del grafito, de tal- forma que al no ser sometido a algún tratamiento especial, el hierro se solidificará parcialmente en forma de carburo de - hierro ( cementita ), por lo tanto, la post-inoculación o ino- culación secundaria, tiene por objeto restaurar el poder ger- minador del hierro líquido por la introducción artificial de- elementos grafitilizantes de tal forma que se disuelvan los -

carburos que el magnesio provocó durante la reacción.

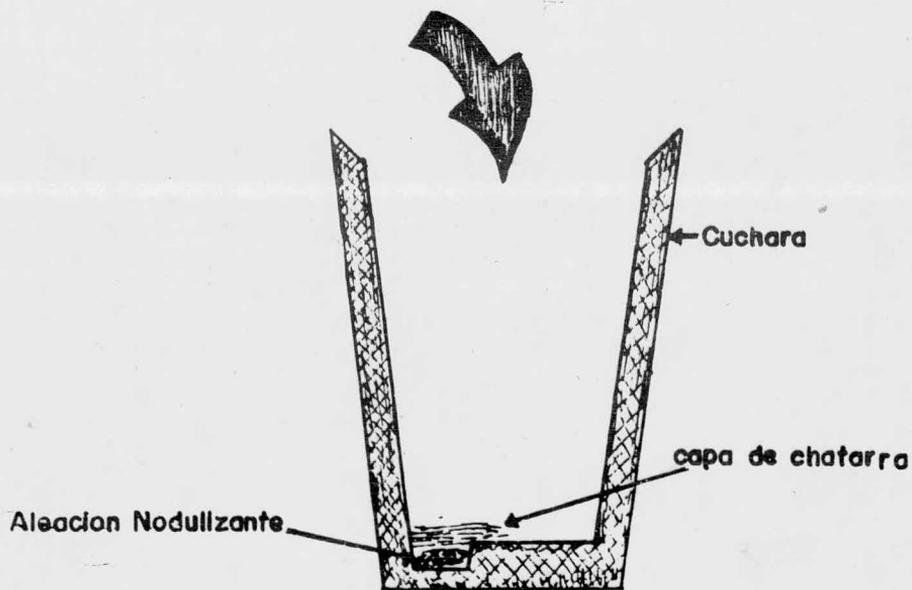
Los inoculantes normalmente usados son: Ca, Si, Fe, Zr, Ca, Ba.

b) TRATAMIENTO.- La aleación o liga se deposita en la cavidad que tiene el fondo de la cuchara y se cubre con rebaba del mismo hierro nodular y con pequeños pedazos de acero, es decir, - de recorte de troquelado. En algunas partes, se acostumbra cu-  
brir la aleación con  $\text{CaC}_2$  o con arena preparada para Shell -  
Molding ( figs. 17 y 18 ).

Una vez cubierta la aleación y teniendo la olla previamente -  
caliente se controla que la temperatura del hierro base, sea -  
de  $1,500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  enseguida se empieza a vaciar a la olla de -  
tratamiento, teniendo la precaución de que el hierro no caiga -  
directamente sobre la rebaba que cubre la aleación nodulizante,  
de tal forma que esa rebaba o pedacería de acero, sirva para -  
retardar lo más posible la reacción del hierro con la aleación,  
es decir, que cuando inicie la reacción del magnesio en la olla,  
se tenga por lo menos la mitad del hierro que se va a tratar.  
En el momento que la reacción llegue a ser demasiado fuerte, -  
conviene disminuir un poco el vaciado, y cuando empieza a bajar  
de intensidad la reacción, se vacía el resto del metal, en se -  
guida se desescorea la olla de tratamiento, pues se acumula -  
bastante escoria que se produce durante la reacción del hierro-  
fundido con la aleación de magnesio.

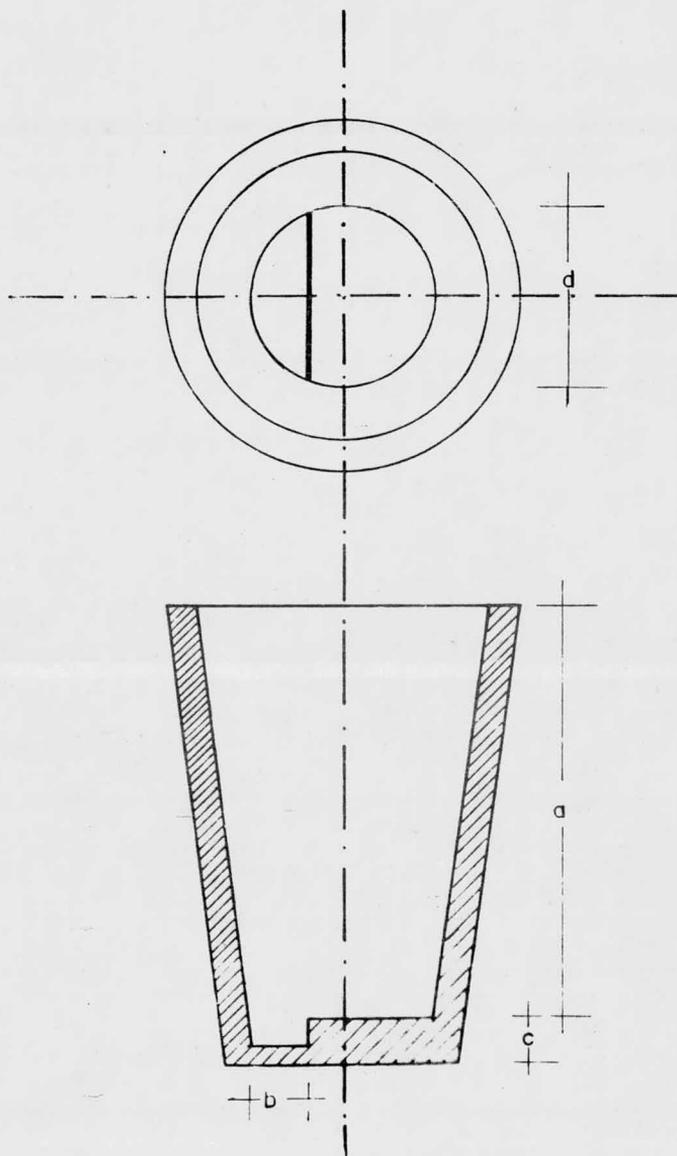
COLOCACION DE LA ALEACION EN EL FONDO DE  
LA CUCHARA CUBRIENDOLA CON PUNZONADA  
DE ACERO.

FIG. 17



DISEÑO DE LA OLLA  
PARA HIERRO NODULAR

FIG. 18



- d = diámetro
- a = diámetro x 3
- b =  $\frac{\text{diámetro}}{2}$
- c =  $\frac{a}{6}$

Después se vierte el hierro a la olla de vaciado y en ese momento de hacer la transferencia de metal, se inocula el hierro, agregando ferrosilicio combinado con algún inoculante de los conocidos normalmente ( inoculin ) .

La adición de tierras raras incorporadas a la aleación nodulizante o agregadas por separado en forma de "Michmetal" permite neutralizar la influencia de los elementos nocivos que pueden tener la chatarra, siempre y cuando la adición no rebase de los límites tolerables .

## 2) NODULIZACION.

MAGNESIO.- El magnesio puro funde a 675°C y entra en ebullición a 1,100°C por cuyo motivo se encuentra en estado gaseoso a la temperatura de la fundición líquida. La presión de vapor es de 2.5 atmósferas a 1,250°C y de 10 atmósferas a 1,500°C. Su peso específico es de 1.7 g/cm<sup>3</sup> el del hierro líquido es de 6.3 g/cm<sup>3</sup>. Su solubilidad en el hierro es baja. Los productos de la reacción del magnesio se elevan con gran lentitud a la superficie, encontrándose finamente distribuidos.

La introducción de magnesio en la fundición produce fenómenos explosivos, con proyección de metal fundido y engendrando una luminosidad muy brillante que obliga a llevar gafas azules ( azul de cobalto de preferencia sombra # 6 para hierros ). Es-

particularmente peligroso el empleo de magnesio puro por las violentas reacciones que provoca su adición a la fundición líquida. Para evitarlo se recurre a las aleaciones de magnesio conteniendo uno o varios elementos solubles en la fundición. Actúa como un desoxidante energético, desulfurante y con una proporción de elemento residual superior al 0.1 % es un energético estabilizador de carburos.

a) ALEACIONES NODULIZANTES. - Para garantizar una disolución calmada de las aleaciones, deberán contener un máximo de 15 % a 20 % de magnesio y tener un punto de fusión relativamente bajo.

Las aleaciones nodulizantes más empleadas actualmente, pueden clasificarse en varios grupos, según la naturaleza del elemento portador:

a).- El níquel como elemento portador:

13 a 16 % de Mg - 50 a 55 % de Ni - 26 a 32 % de Si

15 a 18 % de Mg - 80 a 85 % de Ni.

Estas aleaciones se emplean generalmente para la obtención de hierros nodulares perlíticos, y se introducen al hierro fundido por el proceso del inmersor o por algún otro medio o equipo adecuado para el uso de estas aleaciones.

Para la obtención del hierro nodular por el proceso Sandwich, no se emplea este tipo de aleación nodulizante por su alto contenido de magnesio.

a.- 5 a 7 % de Mg - 43 a 48 % de Si - 1 a 1.5 % de Ca  
0.5 % de Ce Fe el resto.

b.- 8 a 10 % de Mg - 43 a 48 % de Si - 1 a 1.5 % de Ca  
0.6 % de Ce Fe el resto.

c.- 13 a 15 % de Mg - 43 a 48 % de Si - 1 a 1.5 % de Ca  
0.6 % de Ce Fe el resto.

d.- 18 a 22 % de Mg - 50 a 55 % de Si - 1 a 1.5 % de Ca  
0.6 % de Ce Fe el resto.

Las dos aleaciones mencionadas previamente ( a y b ) son las que generalmente se emplean para la obtención del hierro nodular , por el proceso Sandwich.

Se fabrican también otras aleaciones a base de Fe, Si, Ca y Mg con alto contenido de calcio, es decir, con 20 a 30 % de calcio.

Estas aleaciones tiene las desventajas de ser demasiado ligeras y de reactividad muy débil; además tienen la tendencia a desintegrarse lentamente por la oxidación atmosférica, sin embargo, la aleación o proceso conocido como "OZ" perfeccionado en Japón por el Doctor Kusawa es a base de calcio con ligeras proporciones de tierras raras. Actualmente se emplea

esta aleación principalmente en Japón, sobre todo en la producción de piezas delgadas.

Otra aleación nodulizante es la llamada " MAG COKE " desarrollada por la Dow Chemical. Se trata de carbones minerales impregnados con un 45 % de magnesio metálico. El empleo de esta aleación para la producción de hierro nodular requiere una técnica bastante especial.

La eficiencia y el empleo de las distintas aleaciones de cerio se usan para neutralizar los efectos altamente nocivos del plomo y bismuto que ocasionalmente impurifican el caldo y entorpecen e impiden la esferoidización del grafito.

La eficiencia de estas aleaciones se manifiesta con la condición de 1 atmósfera de presión a la temperatura de 1,450°C , temperatura a la cual se debe efectuar doble tratamiento. Estas aleaciones se agregan a la fundición líquida en forma de virutas briqueteadas con arena de sílice o de corazones.

Las aleaciones ricas en aluminio son indeseables a causa de la fuerte viscosidad que forma ésta aleación y porque las partículas de aluminio en suspensión en la fundición impiden la formación de esferas de grafito; ocasionando grafito laminar.

### 3) INOCULACION.

La inoculación es una de las partes más importantes del proceso para la producción de hierro dúctil en el modo de solidifi-

car . Al solidificar el hierro dúctil los cristales de grafito crecen rodeados por una fase sólida ( la austenita ), la lenta difusión relativa del carbón a través de la austenita requiere más sitios de nucleación de grafito para reducir la distancia del carbón fundido, así que, la grafitización es alcanzada durante la solidificación. El número de sitios de nucleación depende de muchos factores pero la inoculación es la más influyente. La relativa importancia de la inoculación está en el hecho de que el hierro dúctil tiene un contenido de varios cientos de nódulos por milímetro cuadrado.

El propósito de la inoculación, entonces, es ayudar en proveer suficientes sitios de nucleación para que el carbón precipite como grafito, más bien que, como  $Fe_3C$ .

Muchos metales pueden subenfriarse comenzando a solidificarse con pequeños efectos en sus propiedades, pero en los hierros, este fenómeno puede causar cambios radicales en la microestructura y en las propiedades . Un fuerte subenfriamiento nos dará una fundición solidificada en el sistema meta-estable hierro - carburo de hierro y un moderado subenfriamiento podrá causar un significativo cambio en el tipo de grafito que se forme. El magnesio es un potente estabilizador de carburos y robustece bajo un severo subenfriamiento. Otros elementos los cuales pueden estar presentes solo en trazas, agravan la formación de carburos, la función del inoculante secundario es incremen-

tar el número de esferas en la solidificación y minimizar así, la formación de carburos en el subenfriamiento . Los carburos eutécticos reducen la maquinabilidad y aumenta la dureza.

El inoculante debe ser agregado al hierro cuando su temperatura está descendiendo, aprovechando de este modo un rápido abatimiento del efecto.

Un gran número de materiales son utilizados como inoculantes y su aleación depende del tipo de hierro y del efecto deseado.

El ferrosilicio, de uno u otro grado, es universalmente usado como agente inoculante . En efecto, hay menos diversidad en la práctica de inoculación que la que hay en nodulización . <

Los grados que contienen calcio son los preferidos para reducir la capacidad de enfriamiento. El tamaño óptimo de la partícula es el de 3/8 de pulgada que pase por una malla # 12 además de una partícula gruesa y otros requerimientos mecánicos - conectados con la adición del silicio los cuales deben ser tomados en cuenta para una inoculación efectiva. El incremento del contenido del silicio en la composición química no es un índice confiable de que la inoculación se ha realizado satisfactoriamente. En secciones delgadas particularmente, no podría decirse que se ha dominado completamente el efecto de chilling del magnesio.

La reciente tendencia de incrementar el contenido de calcio de-

de ser contrareestado . El calcio puede contribuir a la retención de carburos eutécticos cuando se agrega en combinación con el magnesio y en una forma excesiva. El cubilote básico y el horno eléctrico de fusión son los más sensitivos a un exceso de calcio que el cubilote ácido en donde se opera bajo condiciones de desoxidación más estrictas. En general debe recomendarse a la industria un contenido de calcio de 0.80 % a 1.10 % .

Teoría del mecanismo.- Una teoría del mecanismo de inoculación es que pequeñas partículas de grafito son precipitadas en el metal por la adición de una fuente grafitizante tal como el ferrosilicio, al estar disolviéndose incrementa momentáneamente el contenido de silicio, haciendo que en este momento la solución esté sobresaturada con respecto al carbono, precipitando pequeños núcleos de grafito. Una de las bases de esta teoría es realmente comprensible ya que las pequeñas partículas de silicio no producirían una suficiente concentración local antes de ser disipadas. En otras palabras, hay un tamaño crítico del silicio  $1/4$  a  $1/2$  para una efectividad óptima. Es también importante la importancia de la temperatura al agregar el ferrosilicio, ya que facilitará la habilidad de la concentración de silicio . La temperatura ideal para una buena inoculación es  $1,480^{\circ}\text{C}$ .

Método preferido para agregar la cantidad de silicio.- El mejor-

de los métodos consiste en fijar el silicio a la corriente durante el vaciado del hierro fundido de la olla de tratamiento a la olla de vaciado, haciendo cuanto sea posible para que cada porción del hierro sea tratado.

Un camino menos deseable consiste en depositar en el fondo de la cuchara sobre el contenido de magnesio. En este caso la temperatura del ferrosilicio puede llegar a un punto donde se pierda una considerable parte en su habilidad de inoculación (éste se ve perfectamente en el hierro gris donde el ferrosilicio no produce un efecto de inoculación). Otro efecto deseable es agregar el silicio al magnesio justamente antes de vaciar por la misma razón de que el silicio puede ser recalentado antes del vaciado, dependiendo del intervalo de tiempo entre la adición del silicio y el vaciado. Aunque no es muy recomendable ya que cuando el ferrosilicio se pone en esta forma únicamente se eleva al contenido de silicio en el metal, y no se elimina los carburos que es lo que se desea. Se hará mas énfasis en el modo de agregar el ferrosilicio. Una pieza con espesor de 3/8 de pulgada y moldeada en arena verde tiene altos carburos cuando el procedimiento de inoculación consiste en poner el ferrosilicio en el fondo de la cuchara y después de vaciar el metal. Con un simple cambio - agregando el ferrosilicio a la corriente del material cuando es vertido, se logra mejorar la inoculación y evita los carburos.

La cantidad de inoculante requerida depende de la composición del hierro, de su espesor, de su velocidad de solidificación, del tipo de horno de fusión y de la composición de la aleación por agregar. Usualmente, 0.75 % de silicio como ferrosilicio es agregado a una pieza de espesor mediano, de 3/4 a 2 pulgadas. Inoculantes grandes de 1 a 1.5 % de silicio para piezas delgadas y menos inoculante para piezas gruesas. Hierros hipoeutéctico requieren mayor inoculante que los hierros hipereutécticos. La influencia de la atmósfera del horno y la cantidad de inoculante es mayor para el horno eléctrico que para el cubilote.

Efecto sobre la estructura de la matriz.- El inoculante no solo afectará a la aparición de los carburos sino también influirá en el porcentaje de ferrita en la microestructura. Si se mantienen todos los factores iguales y se varía únicamente a la cantidad de inoculante, se obtendrá mayor cantidad de ferrita a mayor cantidad de inoculante.

Consecuentemente, si el objetivo es tener una máxima ductilidad en la fundición, el inoculante deberá ser lo más grande en lo posible de acuerdo con la composición química. Por otro lado si la estructura deseada es perlítica se debe agregar la menor cantidad posible. Siempre y cuando se disuelvan los carburos. Pérdida del efecto de inoculación.- Generalmente se considera-

en el hierro nodular que el efecto del inoculante es por un período de 10 a 15 minutos. Si las piezas son pequeñas, de 1/2 pulgada o menos, tendrá una caída del inoculante más rápida; un hierro con un potencial de grafitización bajo, con un contenido de 3.4 % de C y 1.8 % de Si, será más susceptible de retener que el tiempo que uno de alta grafitización con 3.8 % de C y 2.3 % de Si. La inoculación desaparecerá más lentamente a bajas temperaturas.

Reinoculación.- Todo el efecto de la inoculación puede ser establecido por la adición de una pequeña cantidad de ferrosilicio. Por ejemplo si una cuchara inoculada con 0.75 % de silicio se ha mantenido así por más de 15 minutos debido a alguna demora, puede establecer su efecto con la adición de 0.15 % de silicio. Para fundiciones ligeras se requiere un estricto control de la estructura lo que hace perder el tiempo, propiciando la reinoculación y la pérdida de nodulizante, que nos ocasiona grafito vermicular y laminar.

La descripción anterior puede dar origen a preguntar acerca de la posibilidad de producir secciones gruesas que requieren varias horas para solidificar, sin embargo, tales fundiciones no presentan problemas, por un lado, la capa enfriada impide la pérdida del magnesio por oxidación y por otro lado, las secciones son tan pesadas que casi no requieren inoculación. En-

efecto, bloques de yunque y ruedas de varios pies de espesor, han sido hechos sin postinoculación y han dado una estructura de grafito esferoidal satisfactorio.

Cuando se trata de piezas pesadas lo mejor es adicionar en cada molde un gramo o dos como máximo de Fe-Si al 75 % tamizado en malla # 60 AFS mínimo, si es de mayor tamaño solo es arrastrado por el metal y no lo disuelve, ocasionando la pérdida de la pieza por incrustación del Fe-Si.

#### 4) SOLIDIFICACION.

Es notorio que el hierro fundido puede solidificar con el rechazo de carbono, ya sea como carburo de fierro (sistema metaestable) o como grafito (sistema estable). La formación del carburo de fierro es más fácil que la del grafito porque no requiere la separación del Carbono, una separación atómica de fierro y carbono. Cuando las condiciones son tales que el fierro y el carbono pueden separarse completamente, se forma grafito. Estas condiciones incluyen entre otras: una baja velocidad de enfriamiento y un tiempo de transformación mayor, un alto contenido de carbono, lo que hace más fácil la formación de grafito y la presencia de elementos grafitizantes como el Silicio, el cual promueve la grafitización.

La influencia de la velocidad de enfriamiento en la solidificación puede dar una fundición blanca, dura (chill), la cual

es indeseable. La velocidad de enfriamiento influye en el tamaño y la distribución del grafito esférico; verdaderamente tiene un efecto directo en las propiedades obtenidas en cada sección de la pieza.

El uso de un molde con material que elimine calor más rápidamente que el metal fundido puede incrementar la velocidad de solidificación e incrementar la tendencia a formar fundición blanca. Un hierro el cual normalmente solidifica como grafito esférico, puede solidificar en fundición blanca cuando el metal fundido está en contacto con un molde cuyo material tiene una alta conductividad térmica tal y como en la fundición Chill, en donde hay secciones muy duras y resistentes al desgaste y otras en donde la fundición puede ser completamente maquinable.

La relativa sensibilidad del hierro a una velocidad de enfriamiento, es determinada por una prueba común al fundidor llamado Chill. Una probeta de fundición diseñada en forma tal que tenga un rango en velocidades de enfriamiento de tal forma que unas secciones solidifiquen rápidamente como fundición blanca y otras más lentamente como hierro gris. Después de que el metal ha sido vaciado en la probeta, un pedazo de esta probeta es enfriado y roto con rapidéz, la extensión de la fundición blanca del extremo enfriado hacia

la sección menos enfriada, es medida, y esto indicará la ten-  
dencia al Chilling. Varios factores influyen en la extensión-  
del hierro blanco, esta prueba no puede reemplazar a la de -  
características individuales, sin embargo, las pruebas Chill-  
pueden ser hechas rápidamente para ver la estabilidad de car-  
buros al ser vaciado el metal. Sin embargo, cuando un hierro-  
nodular está correcto, el espesor de los carburos es mínimo, -  
despreciable, pero lo que se utiliza más esta prueba para el-  
metal base.

#### ELEMENTOS Y SUS EFECTOS EN EL HIERRO NODULAR.

En la obtención de una fundición esferoidal bruta de colada -  
es necesario atenerse a ciertas condiciones :

1.- El tratamiento con magnesio puede acomodarse a un gran -  
margen de composiciones de la fundición, es decir, esta -  
puede ser hipereutéctica, hipoeutéctica, siendo de prefe-  
rir esta última, puesto que asegura una buena colabilidad  
y mejores características.

El porcentaje de carbono más favorable debe estar compre-  
n-  
dido entre 3 y 3.8 %.

2.- El magnesio actúa desde luego como desulfurante, por lo -  
que es preciso que el azufre del baño no pase del 0.020 %, -  
puesto que es solo el magnesio residual, no fijado por el  
azufre el que ejerce el efecto esferoidizante sobre el -  
grafito.

Por otra parte, si la fundición tiene más azufre se hace difícil dosificar la cantidad de magnesio para dejar el magnesio residual.

La experiencia demuestra, así mismo, que tras el tratamiento metalúrgico ha de desescoriarse el caldo, es decir, separar la escoria de la combinación magnesio-azufre y magnesio-oxígeno y por tanto, el bajo contenido de azufre permite escorar hasta el máximo posible.

Los productos de la reacción (sulfuros, óxidos y también silicatos) dificultan el llenado de las piezas y perjudican su calidad hasta el extremo de hacerlas inutilizables si antes que solidifique el caldo no se consigue separar dichos productos de reacción.

3.- El magnesio residual útil actúa como estabilizador de carburos y es por tanto, necesario tener un porcentaje final de silicio superior al 2 % dosificándolo en el baño como medio de inoculación para evitar el atruchamiento o carburos. Sin embargo, si las piezas resultaran con estructura atruchada o carburos, se pueden tratar térmicamente a condición de que el porcentaje de silicio sea lo suficientemente elevado como para dar nacimiento a los gérmenes de grafito esferoidal.

En este caso, un recocido de 1 hora por 25 mm. de espesor a 875°- 930°C es suficiente y constituye una fuente de maleabili

dad rápida y un enfriamiento lento en el mismo horno.

Por otra parte el magnesio residual puede ser tanto más bajo - cuanto menos sea el contenido de ciertos constituyentes de - hierro, como por ejemplo, azufre, titanio y cuanto más rápido - solidifique el caldo vertido. El magnesio residual debe estar - comprendido entre 0.04 a 0.1 % .

Por debajo de 0.04 la nodulización resulta imperfecta ocasionando grafito vermicular, y por encima de 0.1 de fragilidad de acritud por ser un enérgico estabilizador de carburos.

La pérdua de magnesio útil o residual puede estimarse en el - 0.001 % por minuto transcurrido entre el sangrado y la solidificación del metal.

Las cantidades de magnesio a añadir serán tanto mayores, cuanto:

a) Más elevado sea el contenido de azufre en la fundición. -

El hierro base por inocular deberá contener menos de - 0.020 % de azufre.

b) Más elevada la temperatura del caldo, pues la presión o - tensión de vapor del magnesio crece con la temperatura - ( temperatura adecuada  $1,500^{\circ} \pm 20^{\circ}C$  ).

c) Más tiempo transcurra entre el tratamiento y la solidificación.

d) Más alto el porcentaje de magnesio en la aleación.

El rendimiento medio de las diferentes aleaciones de magnesio - es de 5 a 8 % para las aleaciones con 90 % de Mg; de 10 a 25 % -

para las aleaciones con 50 % de Mg; de 25 a 40 % para las aleaciones con 8 a 12 % ;de 40 a 60 % para las aleaciones con 4 a - 8 % de Mg.

Las cantidades de aleaciones de magnesio por añadir a la fundición viene dada por :

- a) El porcentaje de azufre en la fundición.
- b) El porcentaje de magnesio en la aleación utilizada .
- c) El espesor de las piezas y sobre todo, su masividad ( peso y volúmen que nos da el enfriamiento de las piezas ).

El porcentaje de magnesio a añadir tiene un valor crítico. Si es muy pequeño procrea una disposición del grafito en forma laminar y de ser muy grande da una fundición blanca o atruchada, que contiene carburos libres, como consecuencia de la acción estabilizadora que ejerce sobre ellos.

4.- La presencia de Fósforo en la fundición no impide la formación de grafito esferoidal; sin embargo, debe estar por debajo de 0.10 % , puesto que forma un eutéctico fosforoso (esteatita), constituyente que provoca la fragilidad de la fundición y por tanto, la disminución de sus propiedades mecánicas, sobre todo de la resistencia al choque en la fundición ferrítica y de la resistencia a la tracción en la perlítica.

Si se desea obtener un máximo de alargamiento, se deberá - mantener el porcentaje de fósforo por debajo de 0.60 % .

5.- El Manganeso es nocivo cuando se desea obtener una ducti - bilidad grande de la pieza bruta de colada . En ausencia - del azufre, el manganeso se comporta como elemento de alea - ción. Por consiguiente, si se desea obtener una matriz es - feroidal con un alargamiento y resistencia de choque ele - vado en estado bruto de colado, se debe bajar el contenido de manganeso a 0.25 % . Por el contrario, si se desea obte - ner una fundición de alta resistencia y bajo alargamiento, el porcentaje de manganeso debe estar comprendido entre - 0.50-0.70 % ( 0.20 max. para grado ferrítico y 0.5-0.70 % - para el perlítico ). Esto se debe a que el manganeso esta - biliza la perlita y por eso debe tenerse en cuenta cuan - do las piezas no se someten posteriormente a tratamientos - térmicos.

El Níquel produce un efecto semejante al del manganeso, - aunque fomenta la grafitización. Adiciones de hasta un 3 % aumentan la resistencia sin disminuir grandemente el alar - gamiento.

6.- Es sabido y por tanto, es importantísimo tenerlo en cuenta, que hasta ahora no se ha logrado obtener grafito esferoi - dal en un hierro colado con su contenido normal de oxígeno de unas centésimas. La desoxidación del caldo es por tanto,

condición inexcusable para que se formen esferoides que durante la cristalización aparecen al desprenderse el carbono del hierro. La desoxidación se consigue perfectamente con ayuda del magnesio no habiéndose hasta el presente hallado ningún otro medio que permita en la práctica obtener más económicamente que con el magnesio, resultados igual - mente satisfactorios y al mismo tiempo, la esferoidización.

- 7.- La adición de Silicio disminuye sobre todo en la fundición-esferoidal ferrítica la resistencia, si bién el alargamien - to aumenta. Su valor más cualificado está en la dosificación de un 2.5 a 3 % en su composición química final. Es un fuer - te grafitizante contenidos cerca de 3 % mejora la resisten - cia al calor del hierro dúctil.
- 8.- La adición de Molibdeno se efectúa en piezas de gran masivi - dad, por ser este elemento gran estabilizador de los carbu - ros. Un 0.5 % de éste elemento es apto para estabilizar la - perlita en piezas de gran espesor .
- 9.- La adición de Cromo, al igual que el molibdeno efectúan la - estabilidad de los carburos, basta en un 0.3 % para estabili - zar la perlita en piezas de gran espesor.
- 10.- El Cobre favorece la grafitización, pero su influencia es - aproximadamente la quinta parte de la del silicio. En las - aplicaciones industriales de tipo general, los contenidos de - cobre de las fundiciones varían de 0.25 a 2.5 %. Este elemen

to tiende al romper totalmente las masas de cementita o -  
a aumentar la resistencia de la matriz.

11.-Un contenido de Carbono total decreciente de 3.8 a 2.5 % -  
aumenta la resistencia a la tracción, límite elástico, -  
alargamiento y resistencia, disminuyendo así mismo, como -  
es natural, la cantidad de grafito precipitado.

Por el contrario esta reducción del carbono lleva consigo -  
una reducción notabilísima de la colabilidad por lo que es  
este medio de mejorar las propiedades mecánicas no es el más  
aconsejable.

12.-Ya que tanto el carbono como el silicio influyen en la com  
posición del eutéctico, se ha encontrado un valor combina-  
do de carbono y silicio conocido como CARBONO EQUIVALENTE.  
Este valor está dado por la siguiente ecuación:

$$CE = \% C + 1/3 \% Si$$

El equivalente del carbono en un hierro fundido nos describe -  
un análisis global en la composición eutéctica cuando el carbo  
no equivalente es igual a 4.3 % se dice que es eutéctico. Por-  
otro lado, cuando se tiene un carbono equivalente igual a 3.9%  
se está representando una aleación de bajo carbono y bajo si -  
licio, es decir, una fundición hipoeutéctica; si se tiene un -  
carbono equivalente igual a 4.60 % se habla de contenidos de -  
carbono y silicio más altos que el del eutéctico, es decir de -  
fundición hipereutéctica.

No está por demás decir que un hierro con un mismo valor de carbono equivalente puede ser obtenido con diferentes cantidades de carbono y silicio. Se anexan diagramas, págs. 79 a 83 . Las pérdidas de elementos, después de la inoculación del caldo base, son aproximadamente las siguientes :

Carbono 0.10 a 0.20 %

Manganeso despreciable

Fósforo despreciable

Azufre = 60 a 97 de la cantidad existente en el caldo antes de la inoculación, debido a la cantidad de azufre existente antes del tratamiento.

Silicio = Total de silicio existente en el caldo y 2.5 % del inoculado para un rendimiento del silicio inoculado del 97.5 %.

Las variaciones existentes pueden corregirse por inoculación de carbono en forma de grafito y de silicio en forma de ferroaleaciones.

Por lo tanto siendo el carbono y el silicio de los principales elementos del hierro nodular, se tiene:

Cálculo del valor del carbono equivalente:

a) Para fundiciones sin alear :

$$CE = \% C + 1/3 Si + \% P$$

b) Para fundiciones aleadas;

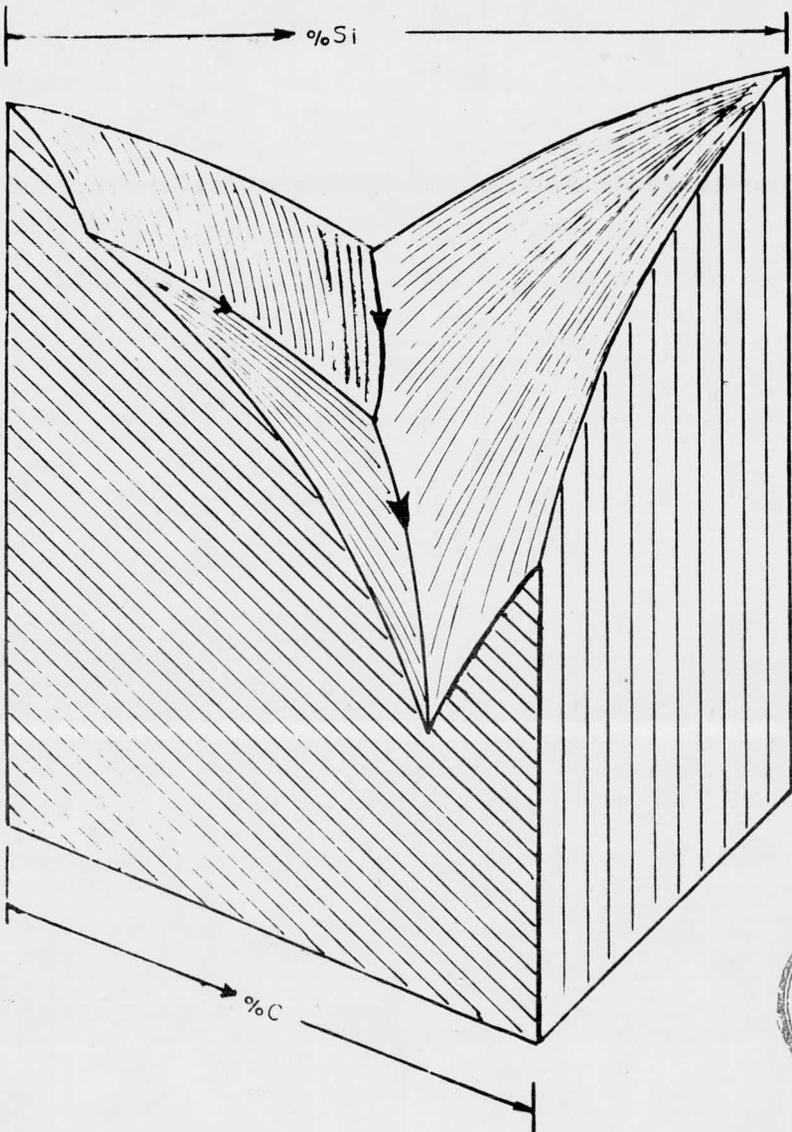
$$CE = 4.30 - ( 0.31 \% Si - 0.33 \% P + 0.078 \% Mn - 1.85 ) - 0.156 \%$$

$$Al - 0.125 \% Ti - 0.109 Ni - 0.0935 Cu + 935 \% Mo + 0.312 \%$$

$$Cr + 0.624 V ).$$

#### INDICE DE SATURACION

$$S = \frac{C \text{ total}}{C \text{ eutect.}} = \frac{C \text{ total}}{4.30 - 1/3 ( \% Si + \% P )}$$



QUIMICA

SECCION DEL DIAGRAMA TRIDIMENSIONAL HIERRO CARBONO SILICIO

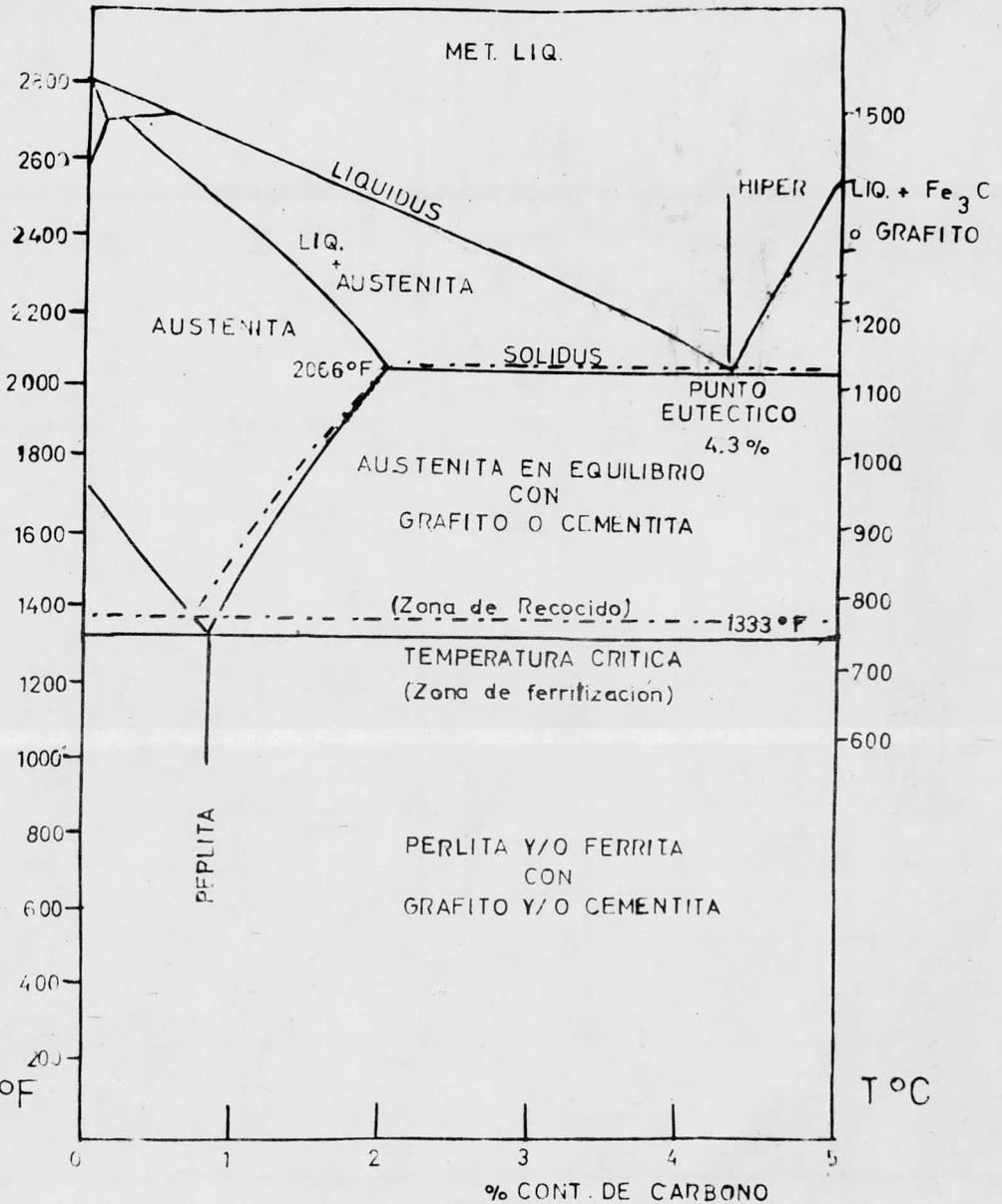


DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO CARBONO 0.0% DE SILICIO

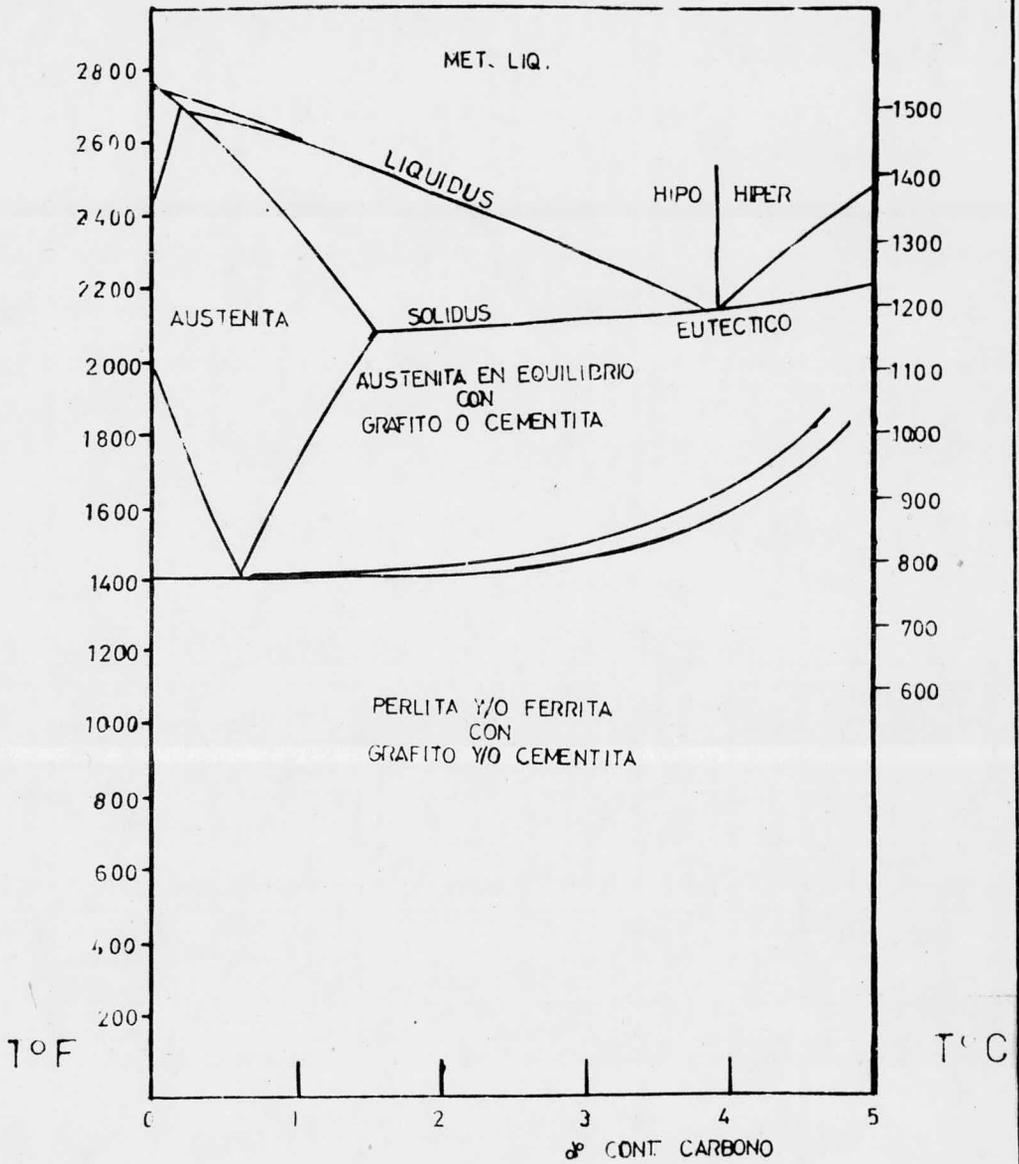


DIAGRAMA HIERRO CARBON CON 2% DE SILICIO

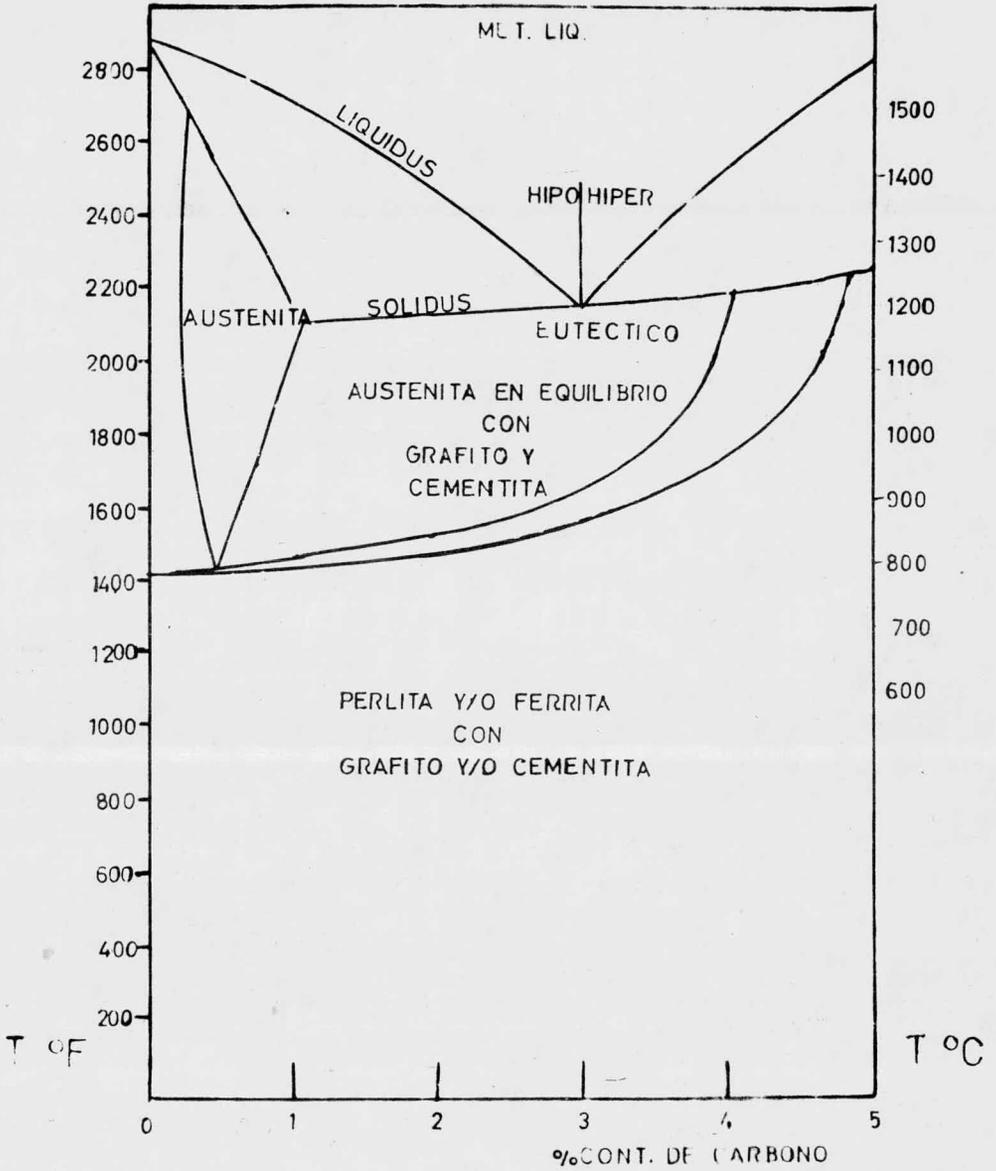
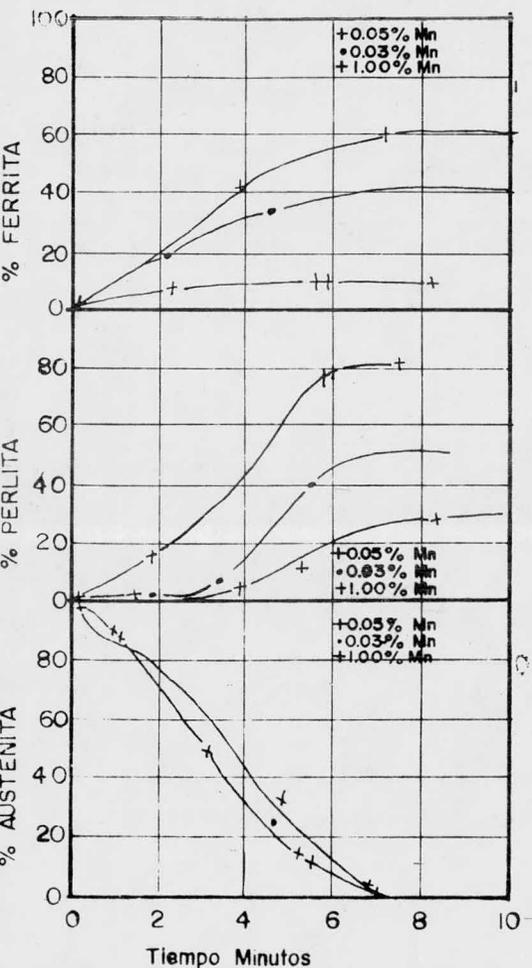
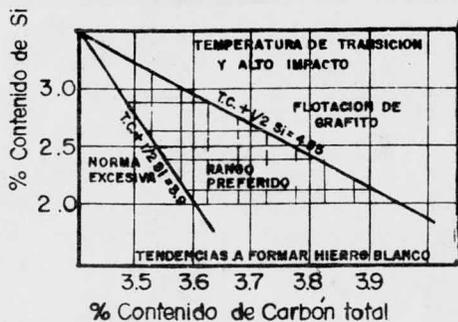


DIAGRAMA HIERRO CARBONO CON 4% DE SILICIO

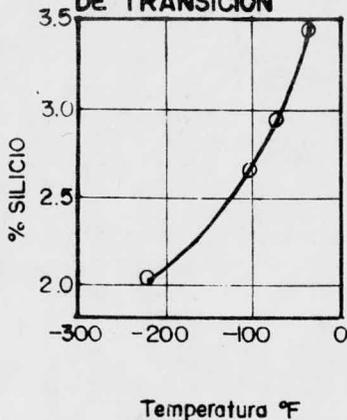
**TRANSFORMACION DE LAS CURVAS DE NORMALIZADO POR CONTENIDO DE Mn.**



**COMPOSICION DEL RANGO DE CARBONO Y SILICIO PARA EL HIERRO DUCTIL.**



**EFFECTO DEL SI SOBRE EL RECOCIDO DEL HIERRO DUCTIL EN SU TEMPERATURA DE TRANSICION**



RESUMEN DE ELEMENTOS Y SUS FUNCIONES EN EL HIERRO NODULAR

ELEMENTO	LIMITE PARA	LIMITE PARA	F U N C I O N E S	OBSERVACIONES
	GRADO FERRITICO	GRADO PERLITICO		
E L E M E N T O S   C O M U N E S				
Carbón	3.00- 4.00 %	3.00 - 4.00 %	Elemento para formar esferas	El exceso causa flo-tación.
Silicio	1.80- 3.00	1.80 - 2.75 %	Grafitiza y ferritiza	Disminuye la perlita.
Fósforo	0.035-% Max.	0.05 % Max.	Forma una matriz quebradiza.	Estabiliza la perlita.
Azufre	0.015 % Max.	0.015% Max.	Se combina con el magnesio.	Es esencial eliminarlo
Manganeso	0.20 % Max.	0.90 % Max.	Forma perlita	El exceso provoca car-buros .
Magnesio	0.06 % Max.	0.06 % Max.	Forma esferas de grafito.	El exceso provoca car-buros.
P R I N C I P A L E S   A L E A C I O N E S				
Niquel	Lo más bajo pos.	4.0 % Max.	Produce alta dureza.	Forma una matriz per-lítica.
Molibdeno	0.03 % Max.	1.0 % Max.	Produce alta dureza.	Provoca carburos in-tercelulares.
Cobre	0.03 % Max.	1.60% Max.	Aumenta la resistencia.	Potente estabilizador-de perlita.
E F E C T O   D E   E L E M E N T O S   E S P E C I A L E S				
Cerio	0.002 % Max.	0.002 % Max.	Neutraliza elementos nocivos.	Puede producir carbu-ros.
Calcio	Insoluble.	Insoluble.	Inoculante.	Reduce y distribuye -mejor los nódulos.
Telurio	0.02 % Max.	0.02 % Max.	Disminuye porosidades	Daña un poco las es-feras de grafito.
E L E M E N T O S   Q U E   P R O V O C A N   E L   G R A F I T O   L A M I N A R				
Plomo	0.002 % Max.	0.002 % Max.	Forma grafito laminar	El elemento nocivo - más potente .
Titanio	0.03 % Max.	0.030 % Max.	Forma grafito laminar	Deteriora las esferas de grafito.

E L E M E N T O S Q U E P R O V O C A N E L G R A F I T O L A M I N A R

Aluminio	0.05 % Max.	0.002 % Max.	Forma grafito laminar	Aumenta las porosidades de hidrógeno.
Antimonio	0.004 % Max.	0.004 % Max.	Provoca magnesio libre	Falta de magnesio provoca laminillas.
Bismuto	0.002 % Max.	0.002 % Max.	Forma grafito laminar	Forma grafito laminar y perlita.
Zirconio	0.10 % Max.	0.100 % Max.	Forma grafito laminar	Deteriora las esferas de grafito.

<u>E L E M E N T O</u>	<u>L I M I T E P A R A G R A D O F E R R I T I C O</u>	<u>L I M I T E P A R A G R A D O P E R L I T I C O</u>	<u>F U N C I O N E S</u>	<u>O B S E R V A C I O N E S</u>
------------------------	--	--	--------------------------	----------------------------------

E L E M E N T O S Q U E F O R M A N C A R B U R O S Y P E R L I T A

Cromo	0.04 % Max.	0.100 % Max.	Potente formador de carburos.	Retarda el recocido.
Boro	0.002% Max.	0.002 % Max.	Forma carburos de boro	Carburos que resisten el recocido.
Estaño	0.010% Max.	0.050 % Max.	Un potente perlitizante.	No forma exceso de carburos.
Arsénico	0.020% Max.	0.050 % Max.	Forma perlita	Lo hace quebradizo.
Vanadio	0.040% Max.	0.050 % Max.	Forma carburos estables.	Retarda el recocido.

E L E M E N T O S G A S E O S O S

Oxígeno	± 0.003 % Max.	-0.003 % Max.	Se combina con el magnesio.	Reduce el magnesio libre.
Hidrógeno	± 0.003 % Max.	-0.003 % Max.	Potente formador de carburos.	Produce porosidad superficial.
Nitrógeno	± 0.009 % Max.	-0.009 % Max.	Forma perlítica	Limita la solubilidad.

Recomendaciones generales del contenido de C y Si en hierro nodulares sin -  
aleación o moderadamente aleados:

Espesor en Pulgadas. Predominantemente Perlítico Predominantemente Ferrítico.

Min.	Máx.	CT %	Si %	CT %	Si %	
1/8	1/8	4.00	3.75	3.95	4.00	
	1/4	3.70	3.75	3.65	4.00	
	1/2	3.50	3.75	3.35	4.00	
	1	3.20	3.75	3.15	4.00	
	2	3.05	3.75	3.00	4.00	
	3	3.00	3.75	2.95	4.00	
	4 o más	3.00	3.75	2.95	4.00	
1/4	1/4	3.90	3.25	3.75	3.75	
	1/2	3.70	3.25	3.55	3.75	
	1	3.40	3.25	3.25	3.75	
	2	3.25	3.25	3.10	3.75	
	3	3.20	3.25	3.05	3.75	
	4 o más	3.20	3.25	3.05	3.75	
	1/2	1/2	3.85	2.75	3.70	3.25
1	1	3.55	2.75	3.40	3.25	
	2	3.40	2.75	3.25	3.25	
	3	3.35	2.75	3.20	3.25	
	4 o más	3.35	2.75	3.20	3.25	
	1	1	3.60	2.50	3.50	3.00
	2	3.45	2.50	3.35	3.00	
	3	3.40	2.50	3.30	3.00	
2	4 o más	3.40	2.50	3.30	3.00	
	2	3.60	2.10	3.40	2.75	
	3	3.55	2.10	3.35	2.75	
	4 o más	3.55	2.10	3.35	2.75	
3	3	3.60	2.00	3.40	2.50	
	4 o más	3.60	2.00	3.40	2.50	
4	4 o más	3.60	2.00	3.40	2.50	
	4 o más	3.60	2.00	3.40	2.50	

Recomendaciones para un contenido de C en hierro nodular no -  
aleados o moderadamente aleados con un contenido,

Máximo de Si.

Si = 2.5 % +

Max

Espesor más de la pared pulg.	CT %
1/8	4.40
1/4	4.10
1/2	3.90
1	3.60
2	3.45
3	3.40
4 o más	3.40

+ Es una fundición predominantemente perlítica con 1 pulgada o -  
más como mínimo en el espesor de la pared, los cuales conten -  
gan C y Si de acuerdo a las recomendaciones de la tabla 1. En -  
secciones más delgadas, la restricción en el contenido de Si -  
no permite la relación de perlita/ferrita.

Recomendaciones para un contenido de C en hierro dúctil no -  
aleados o moderadamente aleados con contenido.

Máximo de Si

Si = 2.75 % +

Max.

Espesor más de CT %

la pared Pulg.

1/8	4.35
1/4	4.05
1/2	3.85
1	3.55
2	3.40
3	3.35
4 o más	3.35

+ Es una fundición perlítica y ferrítica (ambas) con dos o -  
más pulgadas como mínimo en el espesor de la pared, conten-  
drán C-Si de acuerdo a las recomendaciones de las tablas -  
mencionadas anteriormente.

Recomendaciones del contenido de Si en hierros nodulares de  
alto C sin o moderadamente aleados.

CT	-
Espesor Máx. de la pared pulg.	Si %
1/8	3.75
1/4	2.80
1/2	2.20
1	1.25
2	0.80
3	0.65
4 o más	0.65

+ Todas estas funciones tienden a ser perlíticas. Además, los -  
carburos pueden estar presentes en secciones de 1 o más pul -  
gadas.

#### MAGNESIO RESIDUAL

0.04 a 0.01 % ( con éste magnesio el azufre será menor  
del 0.01 % ) .

Influencia de la adición de los elementos sobre la estructura de las fundiciones que modifican el diagrama Fe-C

	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	Mo	V	Cu	O
Grafitizantes	X		X		X		X				X
Antigrafitizantes		X No SMN		X No SMN		X		X	X		X
Desplazar el punto - B a la izq.	X		X	X	X	X					
Desplazar el punto - B a la der.	X										
Desplazar la línea - SS' hacia arriba	X										
Desplazar la línea - SS' hacia abajo.	X			X	X	X					
Aumentar la vel. crí- tica de temple.	X				X						
Bajar la vel. crítica- de temple.		X			X				X	X	
Desplazar el punto S - hacia la izq.	X	X		X	X	X					

CONTROL DEL AZUFRE.- Para remover el azufre es esencial antes de que el agente esferoidizante pueda entrar a la solución en cantidad suficiente a el cambio de la estructura del grafito y este puede ser costoso y al mismo tiempo consume mucho. Sin embargo lo que constituye lo más deseable de azufre en el hierro base ha sido objeto de muchos debates.

Una escuela manifiesta que hay que remover todo el azufre posible para mejores resultados nodulizantes y la calidad de la superficie de fundición. Otras experiencias indican que el hierro base con azufre por debajo de 0.005 % tendrá resultados en la estructura del grafito que algunas veces no es tan bueno como mantener el hierro ligeramente alto del nivel de azufre en la cercanía de 0.10 % . Aún otra observación se siente que particularmente para el hierro base de la sección de fundición al azufre debe ser mantenido a 0.020 % para mejores resultados. - Muchos trabajos aún se sostienen ante los efectos del azufre y se ha comprendido completamente en todas las circunstancias. Varios métodos han sido usados para controlar el nivel del azufre en el hierro para hacer hierro nodular . Este método más común es el de crisol básico el cual usa suficientes agentes fluidizantes, así como , calcita, dolmita y fluordespato para producir una escoria con un alto porcentaje de constituyentes básicos. Así como una escoria es producida para absorber, con-

tener el azufre para la operación de fusión en crisol. El azufre final en horno de crisol básico, el hierro está en el rango de 0.01 a 0.04 % .

La cantidad y tipo de escoria básica también afecta la cantidad de carbón absorbido del coque y puede resultar en el uso de altos porcentajes de chatarra de acero en la carga.

Esta recompensa en acero de alto carbono y bajo en fósforo y azufre bien fijado para producción de hierro nodular.

El azufre es usualmente controlado en los hornos eléctricos por la selección de materiales para la carga de bajo contenido de azufre. Algunas desulfuraciones puede ser hecha en los hornos de arco tipo básico.

5) DESULFURACION. - El tratamiento externo de hierro con varios agentes desulfurizantes son usados con variedad de grado en éxito. En general estos factores básicos son mostrados en nuestros procesos.

- Contacto íntimo entre el metal fundido y el agente desulfurizante.
- Tiempo de reacción.
- Simple remoción de las escorias de azufre conducido después de la sulfuración.
- Control de temperatura .
- Control de gases.

- Mantenimiento mínimo en refractario.
- Facilidad de manejar y alimentar los agentes de sulfurizantes.

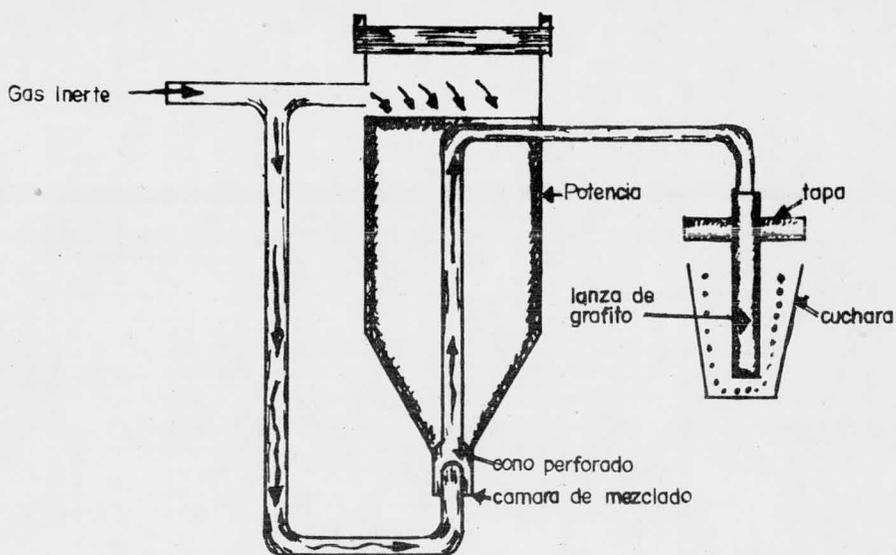
Adición a la cuchara.- Uno de los más viejos y simples métodos de desulfuración es la adición de sosa cáustica al flujo del metal hacia la cuchara (fig. 19). La entrada de sosa cáustica causa una violenta acción de ebullición, y este algo efectivo para la desulfuración del hierro con alto contenido de azufre. Este agente realiza y atrae a la superficie gases de impurezas atrapadas y acelera la salida de la escoria atrapada a través del metal. Las desventajas del proceso son: gases pesados, severa erosión en el refractario y pérdida del silicio en la adición en un 2.5 %, las desventajas de pérdidas de peso y las ventajas de que pocas fundiciones aún usan este proceso, como un paso de la producción para fundición de hierro dúctil.

a) Inyección.- La inyección ha sido usada para desulfurizar en una corriente de metal o en un baño de metal (fig. 20). En un tiempo este método fué usado extensamente pero originalmente tiene poco uso. Este proceso usa un gas inerte, generalmente nitrógeno, para llevar el agente desulfurizante, usualmente carbonato de calcio, cal o mezcla de cal-magnesio. La alta pérdida de temperatura, obstrucción de los tubos de inyección y otros problemas han resultado en cambios a otros

métodos el carbonato y otros agentes pueden ser usados en forma dividida por una gran reactividad y eficiencia, y estos agentes pueden ser disociados bajo la superficie del metal y provee más tiempo de contacto entre metal y agente. El proceso de inyección permite la reducción de azufre a bajos niveles en un continuo o tipo de operación. El costo del equipo, agente desulfurizante, tubos de inyección refractarios y el gas deben ser considerados. La pérdida de temperatura es usualmente más alta por éste método, debido al volúmen de gas burbujeado a través del metal.

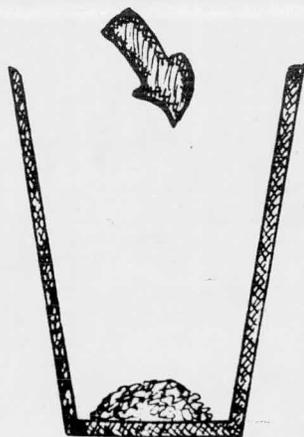
b) Tapón poroso.- El tapón poroso ofrece medio de contacto proveniente del metal y el agente desulfurante (fig. 21). Un tapón de refractario poroso es colocado en el fondo de la cuchara y un gas inerte, usualmente nitrógeno, es pasado a través de los poros del refractario de magnesita o corundum produciendo una gran cantidad de finas burbujas que origina una gran acción de mezclado y agitación. El proceso de desulfuración puede ser seguido por una adición de carbón de grafito o un tratamiento esferoidizante, y una postinoculación sin interrupción de la agitación. El consumo de gas que es inferior que en el método de la inyección y también se tiene que la pérdida de temperatura es abatida.

**METODO DE INYECCION PARA LA DESULFU-  
RACION EN LA CUCHARA DE HIERRO NODULAR**



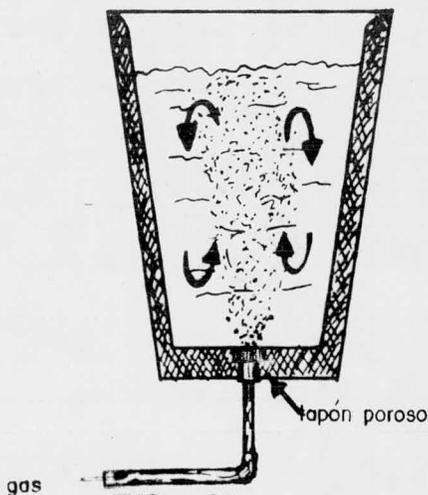
**FIG. 20**

**ADICION A LA CUCHARA PARA  
DESULFU-RACION DEL HIERRO  
NODULAR EN EL METAL BASE.**



**FIG. 19**

**METODO DE TAPON POROSO PARA  
DESULFU-RACION DEL HIERRO NODU-  
LAR EN LA CUCHARA.**



**FIG. 21**

En un ciclo se usará 1 % de carbonato 25 pies cúbicos de ni-trógeno por tonelada de metal y requerirá de 3 a 7 minutos. - Algunos usos de este proceso son sobre una base continua en un flujo de hierro. -

c) Agitación mecánica.- Numerosos inventos mecánicos son accesibles para llevar a cabo un contacto íntimo entre el agente desulfurante y el metal con una acción de agitación - continua. Los agentes desulfurantes mas comúnmente usados con estos inventos son: el carbonato de calcio o cal. Uno de es - tos es un refractario en forma de T invertida la cual es su - mergida cerca de la superficie hasta el crucero y entonces - rotado mediante un motor eléctrico (fig. 22).

El carbonato de calcio en cantidades de 7 a 10 partes, el azu-fre inicial y el tiempo de agitación en el orden de 4-7 minu- tos usualmente, es suficiente para reducir la cantidad de - azufre deseada.

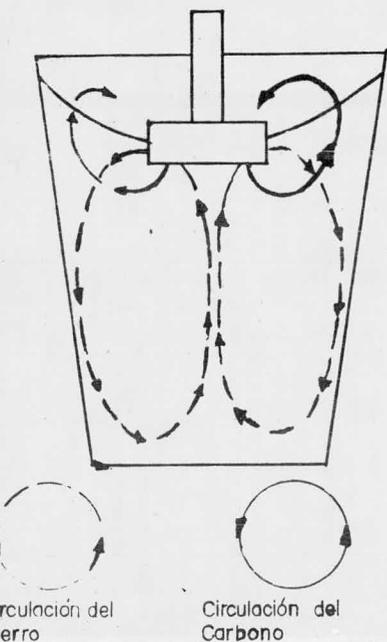
Este es el método más eficiente con hierro a alta temperatura. La cal puede ser usada también, en combinación con otros mate- riales, pero una adición del 50 % de material la cual es reque-rida, utilizando más tiempo y una temperatura adicional de cer-ca de 22°C . Este método puede ser adaptado a varios tamaños - de cucharas y requiere poca ingeniería para poner en operación. Otro tipo de agitación conocido como cuchara de sacudimiento, - el cual mueve la cuchara completamente, terminó por ser muy -

aceptado en Europa. Se desarrolla la acción de agitación por una revolución excéntrica a lo largo del cilindro refractario (fig. 23). Esta acción excéntrica desarrolla una cresta ondulada de hierro fundido que interrumpe y envuelve al agente desulfurante el tiempo requerido para la desulfuración, a niveles profundos es de 8-10 minutos requiere cerca de 1 % de carbonato de calcio. La pérdida de temperatura de una cuchara con buen aislante será del orden de 28°- 44°C.

El convertidor DM o mezclador duortical (fig. 24) es otro invento el cual usa rotación excéntrica para crear una onda de metal pero está en dirección inversa a la cuchara, para crear una acción revolvente del metal, el cual dispersa al carbonato de calcio o partículas de cal a través del metal. Usualmente 2 a 3 minutos de tiempo de mezclado, es adecuado para desulfurar niveles inferiores de 0.01 % de azufre. Intervalos de tiempos cortos también reduce la pérdida de temperatura.

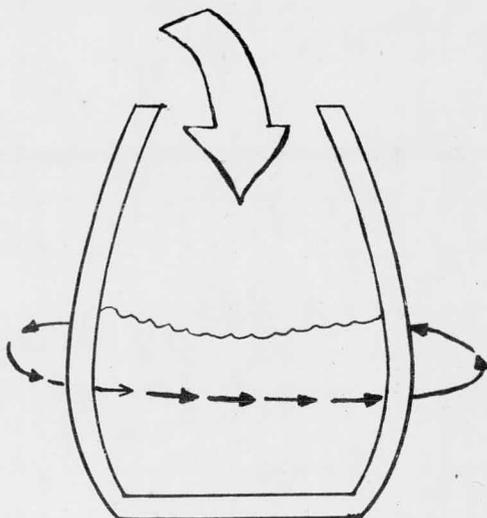
Algunos problemas del refractario se tiene en ambos tipos. El último método de agitación mecánica, el cual tiene que verse limitado su uso como un desulfurante; es un cilindro con refractario (fig. 25). A través del cual el metal fundido es pasado. El metal es contenido junto a la pared del refractario por fuerzas centrífugas en una capa de 2.5 a 5 cm. de grueso. Al tiempo de paso a través del cilindro un desulfurante es adherido cerca de la corriente del metal que cae de la cuchara. Como éste me -

**METODO DE AGITACION MECANICA  
PARA LA DESULFURACION DE HIERRO  
NODULAR**



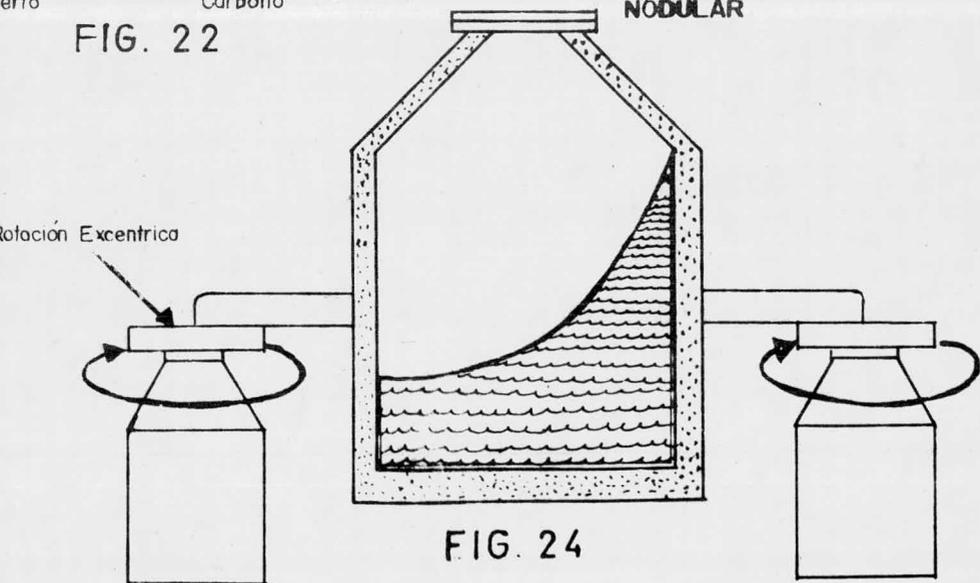
**FIG. 22**

**CUCHARA VIBRATORIA PARA  
DESULFURACION DE HIERRO  
NODULAR**



**FIG. 23**

**ESQUEMA DEL CONVERTIDOR DM  
PARA DESULFURACION DE HIERRO  
NODULAR**



**FIG. 24**

tal se comienza en la parte superior un flujo espiral toma forma junto al final de la descarga y la desulfuración tiene lugar a través de un contacto íntimo del metal y desulfurante en una área larga de superficie de contacto. Reportes indican éstas dificultades para llevar a cabo niveles bajos de azufre con éste proceso. La pérdida de temperatura es reportada en un 25°-42°C. Después el sistema alcanza la temperatura de equilibrio.

METODO DEL CILINDRO ROTATORIO  
PARA LA DESULFURACION DEL HIERRO MODULAR

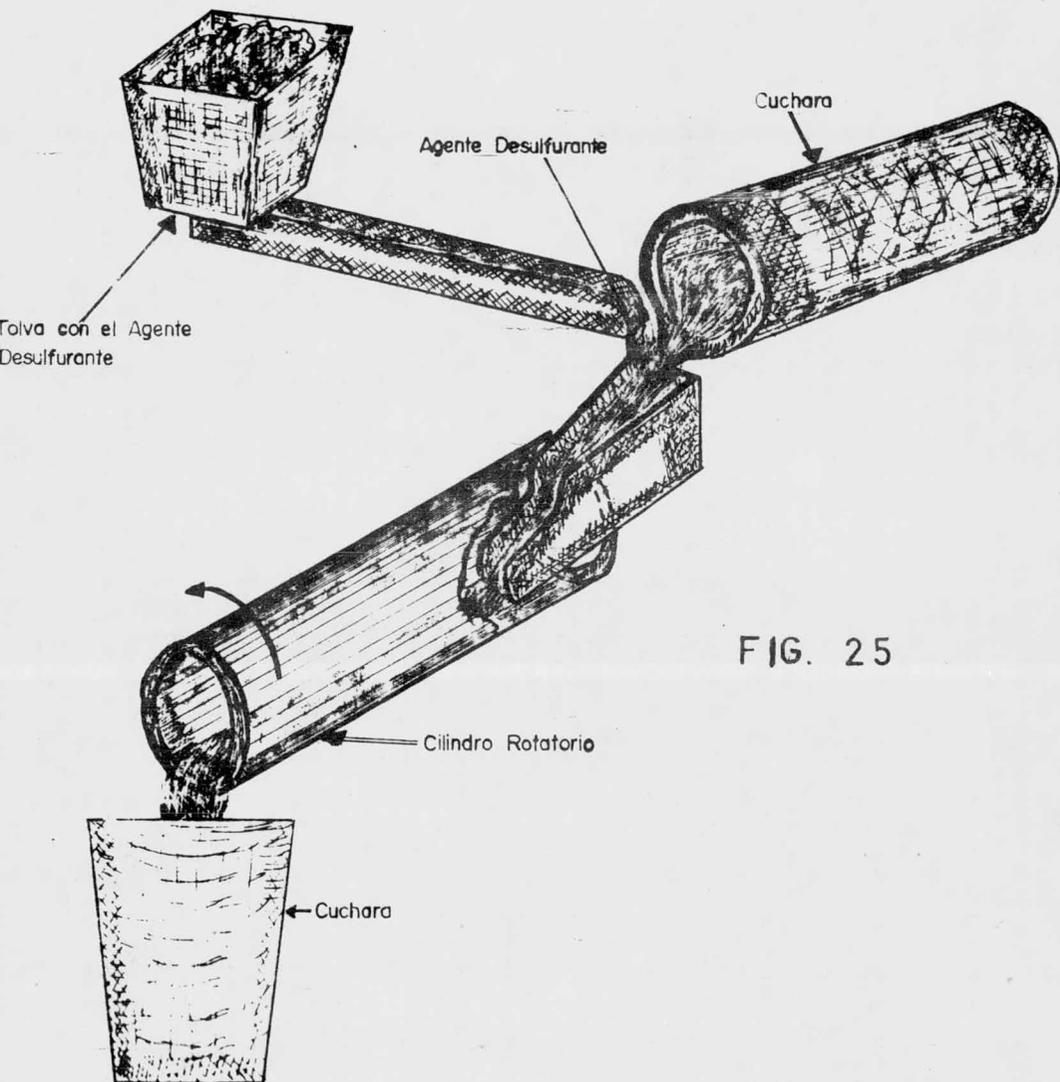


FIG. 25

## C A P I T U L O IV.

1).- CARACTERISTICAS MECANICAS.- Para conseguir las características medias óptimas, es preciso antes que el grafito se precipite enteramente en forma esferoidal .

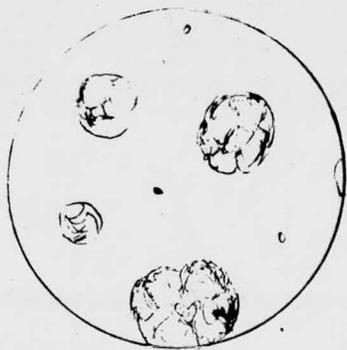
La presencia, en mayor o menor cantidad, de grafito en forma de estrellas o vermiculas (seudo láminas), influye extraordinariamente sobre las propiedades mecánicas, y, en particular, sobre el alargamiento. Este defecto puede cuantificarse.

Si la proporción de grafito en láminas oseudoláminas es del 10 al 20 % , el alargamiento del metal será inferior al 0.5 % - y llegará a 0 a medida que disminuye el grafito esferoidal . -

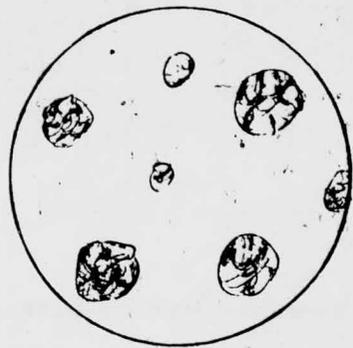
Si el grafito esferoidal aumenta el alargamiento, este puede subir al 4 % , si la matriz es perlítica, y al 20 % si es ferrítica. Se anexan forma y tamaño de grafito en H.M.

2).- COMPOSICION METALOGRAFICA.- Estructura de las matrices.-

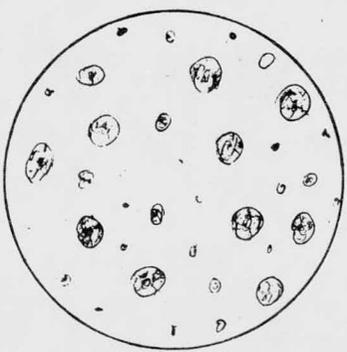
La microestructura de las matrices, el metal que rodea el exceso de carbono en los hierros fundidos, establece las propiedades de cada tipo de hierro. La estructura de la matriz que es obtenida en una fundición depende del análisis químico del metal y de la velocidad de enfriamiento durante su solidificación.-Se observará la estructura de la matriz bajo un microscopio en una muestra pulida y atacada con ácido para distinguir los diferentes componentes. La identificación de los -



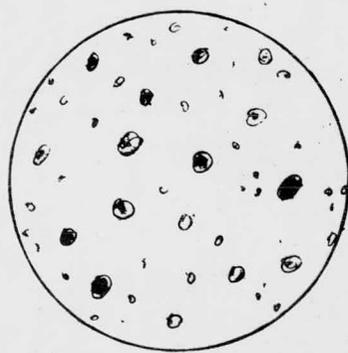
No 3



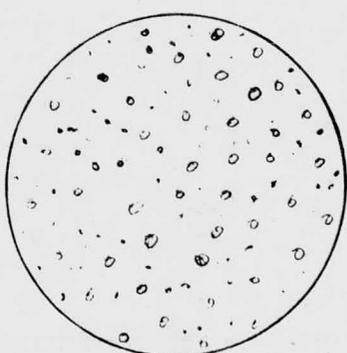
No 4



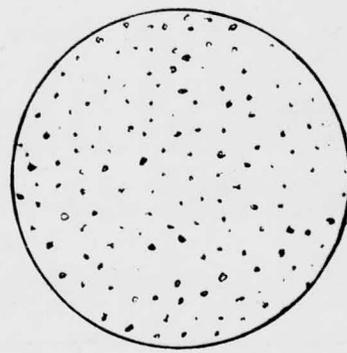
No 5



No 6



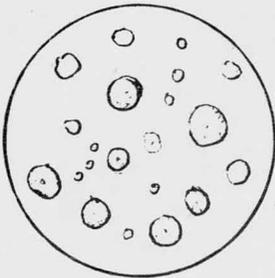
No 7



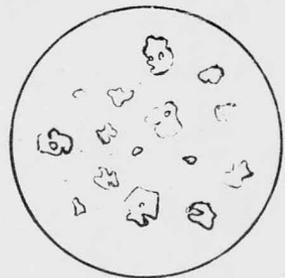
No 8

TAMAÑO DEL GRAFITO EN EL HIERRO NODULAR DE ACUERDO CON  
ASTM A 100  
AUMENTOS

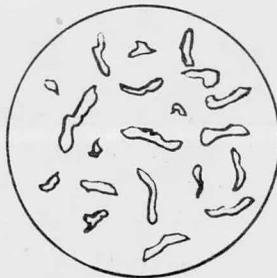
CLASIFICACION DE LAS FORMAS DEL GRAFITO  
EN EL HIERRO NODULAR A 100 METROS



ESFEROIDAL



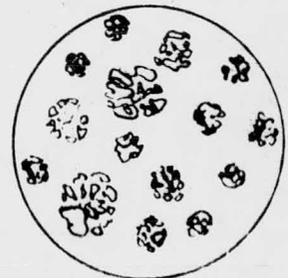
IRREGULAR



VERMICULAR



CANGREJO



EXPLOTADA

componentes o constituyentes usualmente requiere de 100 a 300 aumentos.

FERRITA.- Este microconstituyente es esencialmente hierro puro, aunque dentro de él puede haber otros metales los cuales están disueltos formando todos ellos una solución sólida. Hay elementos aleantes en la ferrita que no son evidentes bajo el microscopio, pero en general la ferrita se considera virtualmente libre de carbono contenido menos de 0.020 % .

La ferrita es esencialmente un constituyente suave, similar al del acero de bajo carbono, o al del hierro dulce. Sin embargo, la ferrita de la fundición contiene de 1 a 3 % de silicio disuelto en el; esto causa un ligero incremento en dureza, en resistencia a la tracción y al desgaste.

En general la ferrita en el hierro nodular es suave y dúctil. Con un valor a la tensión relativamente bajo. Resistencia a la corrosión pobre. Alta resistencia al impacto, relativa conductividad térmica baja, pérdida de histéresis. En algunos medios con resistencia a la corrosión, tiene buena maquinabilidad y es barato este tipo de hierro .

En el hierro dúctil la ferrita provee de alta ductabilidad .- Para aplicaciones que requieren una excelente resistencia al desgaste, la aparición de ferrita en la microestructura es generalmente indeseable.

Una matriz ferrítica no nos proporciona endurecimiento por flama o inducción.

Aunque el carbono puede ser redissuelto dentro del área de la ferrita después de que ha sido calentada. La velocidad de difusión del carbono que constituye las láminas de grafito, es muy lenta como para dar un cambio. La matriz ferrítica puede ser obtenida en condiciones de fundición con algunos tipos de hierro, pero es generalmente el resultado de un recocido.

En la mezcla de estructura en la matriz los granos de ferrita aparecen junto al grafito, debido a que el carbono que esta en solución la ferrita puede rápidamente difundirse y precipitar en forma de grafito nodular durante el enfriamiento en el hierro dúctil la aparición de una banda de ferrita alrededor de las esferas de grafito es dominada como estructura "ojo de buey".

PERLITA. - Cuando una muestra pulida y atacada es vista a bajos aumentos y tiene la apariencia de una perla madre es llamada perlita, este nombre es común para este constituyente tanto en el hierro como en el acero. A altos aumentos la perlita puede ser vista como hojas alternadas, de ferrita suave y de carburo de hierro puro; ésta estructura laminar con alteraciones suaves y duras proporciona una alta dureza. La resistencia a la tracción, al desgaste y a la maquinabilidad, varía con la finura de las láminas.

Las láminas duras pueden llegar a una dureza de 300 Brinell y son tan finas que no se observan en un microscopio ordinario. El contenido de carbono en la perlita de un acero es de 0.80% pero en una fundición de hierro, el carbono está combinado con la perlita, es variable y depende de la velocidad de enfriamiento y del análisis químico. El contenido de carbono combinado en una fundición de alto silicio puede tener una reducción de 0.50 % , sin que exista ninguna separación por ferrita.

Este componente en el hierro nodular es relativamente duro y tiene moderada ductibilidad; alta resistencia a la tensión, buena resistencia al desgaste, moderada resistencia al impacto, reducida conductibilidad térmica, baja permeabilidad, alta pérdida de histéresis, buena maquinabilidad y es barato de obtener.

BAINITA.- (Hierro acicular) producida por aleaciones y/o tratamiento térmico. Mas duro y más fuerte que la perlita, baja ductibilidad y moderada resistencia al impacto, muy buena resistencia a la fatiga y a la tensión, a altas temperaturas (aproximadamente 600°C ), adecuada maquinabilidad más caros que los grados anteriores.

MARTENSITA.- Producida a través de aleantes y por enfriamiento. Este es un componente muy duro y quebradizo es deseado

para cuando se necesita una máxima resistencia al desgaste. La martensita puede ser modificada por un tratamiento térmico a bajas temperaturas. Dependiendo de éste tratamiento una estrecha variedad de propiedades de resistencia a la tensión y al desgaste pueden ser producidas. Todos son más dúctiles y fáciles de manejar que la martensita sin temple, relativamente caro es este tipo de hierro.

AUSTENITA.- Como la ferrita, este es un componente básicamente puro con diferente rejilla cristalina, relativamente con baja resistencia a la tensión y alta ductibilidad, alta resistencia al impacto, especialmente a bajas temperaturas. Su expansión térmica puede ser controlada dentro de estrechos límites contenidos de níquel. El níquel es siempre necesario en altas concentraciones (mínimo 0.18 %) para producir una matriz austenítica. De buena a excelente resistencia a la corrosión ó al calor, muy buena resistencia al creep, a la temperatura, a altas temperaturas (700°C), muy buena resistencia al desgaste y a la resistencia combinada de desgaste, corrosión y erosión es no magnético, fácil de maquinarse, es caro.

CARBUROS.- Compuesto de fierro y carbono. Este componente raramente es deseado en el hierro nodular, excepto cuando se desea una muy alta resistencia al desgaste y baja ductibilidad, baja resistencia a la tensión y pobre maquinabilidad. La mayoría de los grados austeníticos del hierro nodular contienen

carburos.

El manganeso y el azufre son neutros en forma SMn actuando solamente el manganeso y el azufre no combinados, es decir libre. Teniendo presente los conocimientos fundamentales .

Fundición hipoeutéctica: la del valor del carbono equivalente inferior a 4.3 % o índice de saturación inferior a la unidad.

Fundición eutéctica: la de valor de carbono equivalente igual a 4.3 o índice de saturación igual a la unidad.

Fundición hipereutéctica: la fundición con valor de carbono equivalente superior a 4.3 % o índice de saturación superior a la unidad.

3) SOLDADURA.- Las soldaduras de ésta fundición nodular puede efectuarse por arco eléctrico con electrodos de aportación de níquel, o electrodos de Nodular fabricándolos en barras de 1/8 a 3/16 en este metal con un aporte de polvo de una ferroaleación Fe, Si, Mg, para evitar el retorno del grafito a la forma laminar es decir, para no destruir la esferoidal.

4) CONTRACCION DE LA FUNDICION NODULAR.- Las fundiciones que requieren estructuras específicas y tolerancias dimensionales estrechas necesitan un control estrecho del proceso.

Para una matriz perlítica la contracción es de 25 % hay un aumento de 0.41 % .

Para la matriz ferrítica no hay contracción .

Para la matriz blanca ledeburita la contracción es de 1.67 % .

Para el recocido de una matriz ledeburítica hay un aumento de - 2.5 % . Estas modificaciones deben ser tomadas en cuenta a la - hora de la fabricación del modelo, sobre todo con tolerancias - dimensionales muy estrechas .

5) PROPIEDADES FÍSICAS. - De sus principales propiedades físicas, podemos mencionar las siguientes :

Resistencia a la tracción, límite elástico y alargamiento . - Además de algunas otras tales como; resistencia al impacto módu lo de elasticidad, resistencia al desgaste, la facilidad para - ser templado, resistencia a la deformación a altas temperaturas, etc.

Al encontrarse el carbono en forma esferoidal, la continuidad - de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando se encuentra en forma laminar, esto da lugar a una resistencia a la tracción y tenacidad mayores que en la fundición gris ordinaria. La fun dición nodular se diferencia de la fundición maleable en que - normalmente se obtiene directamente en bruto de fusión sin ne - cesidad de tratamiento térmico posterior, además los nódulos - presentan una forma más esférica que los aglomerados de carbono de recocido, más o menos irregulares, que aparecen en la fun dición maleable.

El contenido de carbono total de la fundición nodular es igual - al de la fundición gris. Las partículas esferoidales de grafito

se forman durante la solidificación, debido a la presencia de pequeñas cantidades de elementos de aleación formados de nódulos.

Tomándose en cuenta las propiedades físicas, se establecen las diferentes clases de hierros nodulares como por ejemplo los siguientes de las tablas anexas.

6) TRATAMIENTOS TERMICOS. - Las fundiciones esferoidales ofrecen gran variedad de características siendo éstas, como se ha tratado de exponer, fusión de su estructura, la cual depende, además de su composición química, del tratamiento térmico a que se someten.

Los constituyentes estructurales de la fundición esferoidal se consiguen directamente del moldeo, por solidificación en función de la composición química y espesores de la pieza fundida, o por tratamiento térmico de las piezas. Dichos constituyentes estructurales, cuya matriz puede ser ferrítica, perlítica, martensítica, austenítica pueden encontrarse presentes en una misma matriz de una pieza de fundición, dependiendo de la preponderancia de uno de estos tipos del ajuste de la composición química para un espesor de las piezas, se hace preciso, ante la diferencia de espesor que suele existir en las mismas y con objeto de poder ligar todas estas variables, un posterior tratamiento térmico.

ESPECIFICACION No.	CLASE O GRADO	Rt Min. Psi.	L. E. Min. Psi.	% Elong 2"	T. T.	OTROS REQUISITOS						APLICACIONES	
						Si	Mn	P	Ni	Cr	BHM		
ASTM	D-2	58,000	30,000	8	-	-	1.5	.70	-	18	1.75	139	Abrazaderas p/válvulas, válvulas y bombas p/petroleo, H <sub>2</sub> O salada y caustica, tubos Múlt. - turbinas y partes de compresores de aire.
						3	3	1.25	.08	22	2.75	202	
	D-2B	58,000	30,000	7	-	-	1.5	.70	-	18	2.75	148	Turbina para casa, redillos.
						3	3	1.25	.08	22	4	211	
	D-2C	58,000	28,000	20	-	-	1	1.80	-	21	-	121	Anillos guía de electrodos y turbina de vapor
						2.9	3	2.40	.08	24	.5	171	
	D-3	55,000	30,000	6	-	-	1	-	-	28	2.5	139	Boquillas de turbina, - turbinas y conducciones de vapor.
						2.6	2.8	1	.08	32	3.5	202	
	D-3A	55,000	30,000	10	-	-	1	-	-	28	1	131	Anillos de alta resist. a temp.
						2.6	2.8	1	.08	32	1.5	193	
D-4	60,000	-	-	-	-	5	-	-	28	4.5	202	Tubos múlt. para Diesel y Juntas	
					2.6	6	1	.08	33	5.5	273		
D-5	55,000	30,000	20	-	-	1	-	-	34	2	139	Sistemas de guías en casa, Turb. de gas y rodillos para vidrio.	
					2.4	2.8	1	.08	36	3	193		
D-5B	55,000	30,000	6	-	-	1	-	-	34	2	139	Para sistemas ópticos, compresor.	
NIL-1 E-137 (barcos)	A	60,000	45,000	15	e	3	-	-	-	CE	-	-	Máquinas, bombas, compresores, campanas, válvulas y equipo eléctrico e hidráulico
							2.5	-	.08	4.3	-	-	
	B	55,000	30,000	7	ff	2.4	1.8	.80	-	18	1.7	-	Fund. resit. al calor a la corrosión y a imp.
					3	3.2	1.5	.2	22	2.4	190		
C	50,000	25,000	20	f	2.7	2	1.9	-	20	-	-	No magnético, para barco y hélice.	
					3.3	3	2	.15	23	.5	175		
NIL-1 22243	10 Min Charpy	55,000	37,000	20	a	-	2.2	-	.05	Ti .05	-	175	Máxima dureza a la rayadura.
ASTM A445-66 AF1504-63	60-40 18	60,000	40,000	18	a	3	-	-	-	-	-	149	Fund. para válvula al fuego, pipas y otros
							2.5	-	.08	-	-	201	

ESPECIFICACION No.	CLASE O GRADO	R <sub>t</sub> Min. Psi.	L. E. Min Psi	% Elong 2"	T T.	O TROS REQUISITOS					APLICACIONES	
ASTM A536-67	60-40-18	60,000	40,000	18	a	Su composición química es de acuerdo a sus propiedades mecánicas. Puede ir de acuerdo a arreglo mutuo.					Piezas a presión válvulas y cuerpos de bomba.	
	65-45-12	65,000	45,000	12	-						Pza. de maquinaria sujeta a golpe y fatiga.	
	80-55-06	80,000	55,000	6	-						Cigüeñal, engranaje y rodillo.	
	100-70-03	100,000	70,000	3	b						Engranaje con alta Rt. Pzas. automotrices.	
	120-90-02	120,000	90,000	2	c						Piñón, engranaje rodillo y cremallera.	
SAE J 434a	D-4018	60,000	40,000	18	a	Rango típico de dureza 137-187 BHN 149-207 3HN 179-255 BHN 229-285 BHN FOR ACUERDO					Motor de vehículos equipo de agricultura y maquinaria de perforación	
	D-4512	65,000	45,000	12	-							
MIL-1	D-5506	80,000	55,000	6	-							
1146	D-7003	100,000	70,000	3	b							
	DQ & T	-	-	-	c							
ASTM A395-60T ASME SA 395	60-40-18	60,000	40,000	18	a	Composición Si P S C 3 2.50 0.08 - - Mín Máx. Máx.					Válvulas y adaptadores para vapor, equipo de planta química y ajustadores de vapor.	
ASTM A476-67	50-60-03	80,000	60,000	3	d	3 Mín.	3 Máx.	0.08 Máx.	3.8 a 4.5 +0.3 (Si+P)		Rodillo para molino de papel (Arriba de 450° F)	
ASTM A571-66T	-	65,000	30,000	30	a	2.2 2.7	1.5 2.5	3.75 4.50	- .08	21.0 24	121 .20171	Compresor expandidor, bomba y otras partes equipo a P. Matriz a 423°
AMS 5394	-	55,000	32,000	7	f	2.4 3	2 3.2	8 1.6	- .25	18 22	1.7 140 2.4 180	Metal austenítico o resistente a altas temp.
AMS 5395	-	50,000	25,000	20	-	2.5 2	2 3	1.9 2.5	- .15	20 24	- 125 .5 175	Buena resistencia a la corrosión, puede someterse a la soldadura.

Los ciclos de tratamiento térmico más empleados son:

a) Recocido de estabilización o eliminación de tensiones, destinado a eliminar más o menos totalmente las tensiones internas creadas en la colada, la deformación y ruptura que podrían producir éstas en las piezas fundidas, sin modificar las características y, por tanto, la estructura lograda de colada.

1) Ciclo de tratamiento para piezas sin alear en que se calienta a 50°C/H. hasta 480°- 560°C, con una hora de permanencia a esta temperatura por cada 25mm. máximo de espesor de la pieza (en su mayor espesor) y enfriamiento lento de 50°C/H. en horno.

2) Ciclo de tratamiento para piezas aleadas, en que se calienta a 50°C/H. hasta 560°- 620°C, con una hora de permanencia a esta temperatura por cada 25 mm. de espesor y enfriamiento lento de 50°C/H. en horno.

3) Ciclo de tratamiento para piezas martensíticas (para piezas menos frágiles). Se calienta a 50°C/H. hasta 250° - 300°C con una hora de permanencia a esta temperatura de austenización por cada 25 mm. de espesor máximo y enfriamiento a 80°C/H hasta 800°C/H (zona eutectoide) entre 790° y los 860°C con una velocidad de 80°C/H para fundiciones nodulares con 0.20 a 0.25 % en Mn y sin alear, y hasta 10°C/H para fundiciones con 0.50 a 0.70 % de Mn y hasta un 3 % de aleación de

níquel. Si por el contrario lo que se desea obtener es perlita, la velocidad de enfriamiento debe ser superior a 80°C/H, - siendo su proporción tanto mayor cuanto más rápida sea su ve-  
locidad de enfriamiento . Se enfria en el horno de 680°C a -  
650°C/H, sacando al aire a esta temperatura.

b) Ciclo de bonificado (temple y revenido). Temple calen-  
tar a 50°C/H hasta 850°ó 900°C, manteniendo a esta temperatu-  
ra durante una hora por cada 25 mm. de espesor máximo. Enfriar  
al aire calmado, aire agitado, aceite o agua, según se desee -  
una dureza más o menos elevada, dependiendo de su composición-  
química y del contenido de elementos aleados que favorezcan la  
formación martensítica de la estructura ( una proporción de -  
perlita con un mínimo de 0.50 % de carbono combinado favorece -  
su endurecimiento) y de que forma de la pieza sea mas o menos -  
complicada .

Es recomendable un descenso rápido hasta 90°C - 150°C y proce-  
der en seguida a un revenido.

Revenido: Las temperaturas de revenido pueden oscilar entre -  
250°- 550°C, según las características finales deseadas. Un re-  
venido por encima de 550°C hace perder las ventajas obtenidas -  
por el temple. Las temperaturas de revenido comprendidas entre-  
250° a 350°C confieren al material una dureza Brinell grande -  
(puede estar comprendida entre 500 a 400 Brinell). Las tempera-  
turas de revenido entre 350° a 550°C, disminuyen la dureza del-

material, elevando la resistencia a la tracción; resistencia -  
y algo de alargamiento.

El ciclo de tratamiento consiste en calentar a 50°C/H. hasta -  
la temperatura elegida, precalentar a esa temperatura por ca -  
da 25 mm. de espesor máximo, enfriar hasta 190°C en horno y -  
sacar al aire.

En las fundiciones aleadas con níquel se hace preciso a veces,  
a causa de la austenita que suele quedar retenida, un nuevo -  
tratamiento de revenido.

#### 7) CONTROL DE CALIDAD DEL HIERRO NODULAR .

PROCEDIMIENTO. - Debe ser establecida una inspección adecuada -  
para controlar el método de producción y sus resultados. Para  
tener éxito es necesario la estandarización de un buen control  
de calidad, desde la materia prima hasta el producto elaborado.  
El siguiente programa describe el control básico realizado pa -  
ra producir una fundición de hierro nodular de buena calidad.

INSPECCION DE MATERIA PRIMA. - Toda la materia prima fue checa -  
da para asegurarse de que su composición química y sus requere -  
mientos químicos y físicos eran los adecuados para este tipo  
de fundición.

INSPECCION DEL METAL ANTES DE SER VACIADO. - Antes de que la fun -  
dición sea vaciada debe asegurarse de que ha sido agregado su -  
ficiente magnesio para producir grafito esferoidal y de que -

se ha acondicionado para tener las propiedades mecánicas buscadas. Algunos ensayos prácticos permiten prejuizar el resultado del tratamiento en las pruebas del taller.

- 1.- La fundición líquida debe presentar una superficie con reflejo rojizo.
- 2.- El metal debe dar una rotura en forma de S de grano muy pequeño semejante al de un acero Ni-Cr. El metal exhala un olor característico a acetileno al soplarle un olor a sulfuro de hidrógeno denota un tratamiento defectuoso.
- 3.- Las superficies enfriadas al aire presentan una superficie con pliegues grisáceos.
- 4.- Las piezas desmoldeadas deben dar al choque una sonoridad clara. Las pruebas de control de fabricación deben superditarse a los siguientes ensayos;

#### I.- CONTROL ANTES DEL TRATAMIENTO CON MAGNESIO.

- a).- Antes de sangrar el hierro base del horno de fusión se cuela una probeta en la habitual forma de cuña, que se enfría bruscamente y se rompe de un golpe, a fin de poder enjuiciar por el aspecto de la fractura de la cuña la composición y estado del caldo. También es posible deducir por el blanqueo del vértice de la cuña el contenido de silicio y carbono.

La operación se facilita haciendo uso de la siguiente tabla en la que se cuenta con cuñas de diferentes dimensiones;

1o. Vaciar el metal tratado con magnesio e inoculado en la probeta.

2o. Enfriar rápidamente en agua.

3o. Fracturar o cortar la muestra perpendicularmente .

4o. Pulir en los papéles progresivamente .

5o. Examinar y observar el grafito esferoidal.

La operación entera puede ser hecha en cosa de un minuto y la observación puede ser efectuada antes de vaciar el metal a los moldes.

2) Una última muestra se obtendrá al vaciar el último molde. Esta muestra será analizada microscópicamente .(fig.26) .

3) Verter muestras para el análisis químico final. La muestra puede ser usada para determinar todos los elementos, excepto el carbono. Para el carbono se utiliza una horquilla especial de fácil destrucción . Los demás elementos que se determinan son.Silicio, fósforo, manganeso, azufre, magnesio y cromo. (fig. 27). Se anexan mechas.

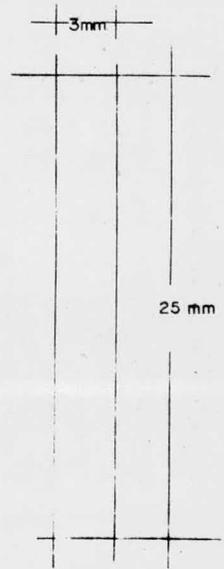
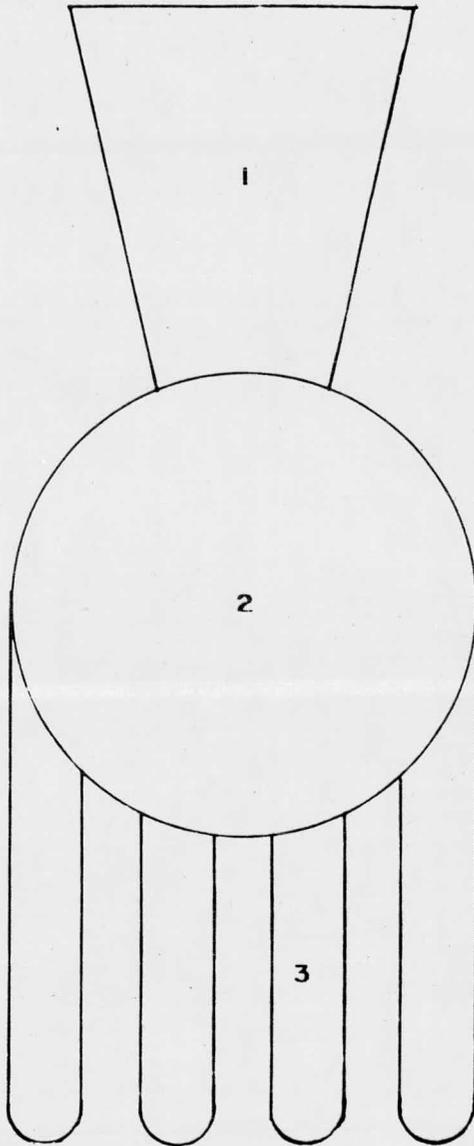
4) Prueba de tensión. Se realiza para checar las propiedades mecánicas. Con esta prueba se obtiene la evaluación de la resistencia a la tensión, del límite elástico y de la elongación, por otro lado, se correlacionan con lo observado en la microestructura .

El ejemplar se obtiene vertiendo el metal de la olla de vaciado a un molde preparado previamente . Los requisitos para esta prueba son los siguientes:



**FIG. 27**

- Colada  
- Moneda para Análisis  
Espectrográfico  
- Análisis para vía húmeda  
y Volumétrica

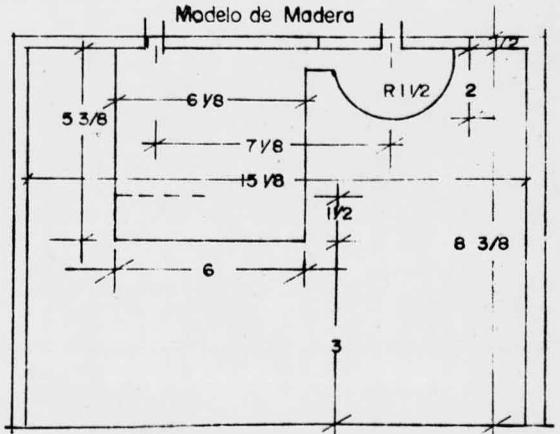
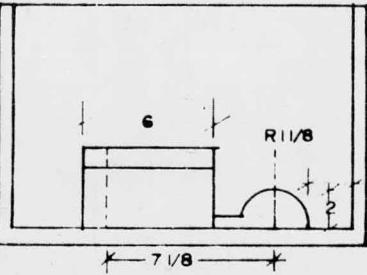
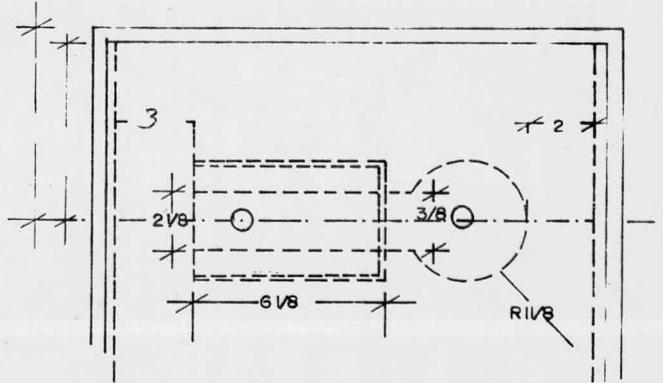
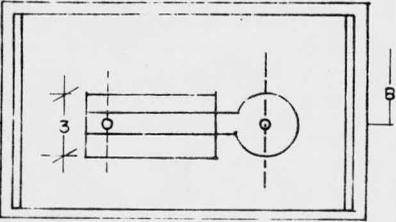
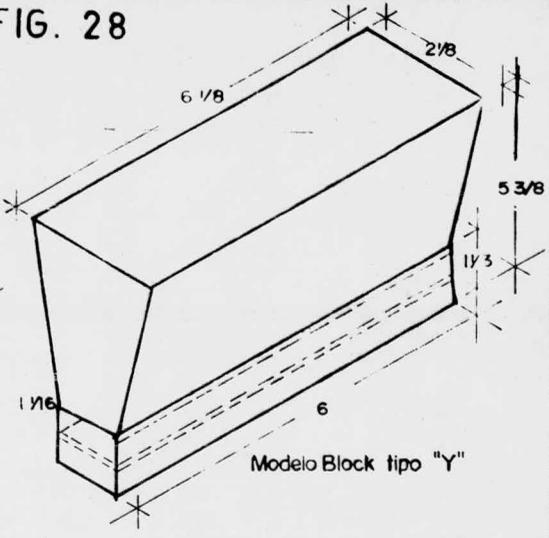
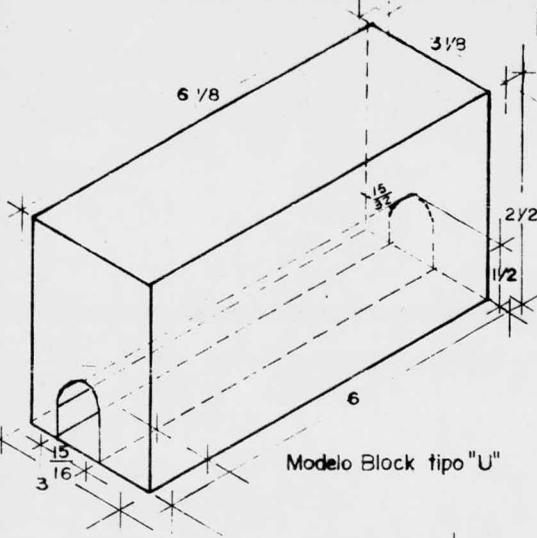


- a) Se obtendrá una barra de una pulgada de espesor, vaciando el metal en una probeta "Y" ó "U" moldeada en arena seca o verde. La forma de estas probetas está indicada en la fig. 28 .
- b) Si se desea mayor exactitud, se forma la barra de la misma pieza.
- c) La barra obtenida del molde especial puede variar con respecto a la pieza deseada cuando las velocidades de enfriamiento son diferentes . Las piezas son secciones delgadas, donde el enfriamiento tiende a ser más rápido proporciona mayor dureza y menos ductibilidad que la obtenida en la barra de prueba.
- Sin embargo, puede ser calculado por comparación de acuerdo con la siguiente tabla. ( Fig. 28 a).
- d) Las dimensiones de la barra y su forma son de acuerdo a la estandar A.S.T.M.

#### INSPECCION FINAL.

- 1.- Prueba de dureza.- Se escogerán muestras al azar para determinar su dureza. La dureza de la fundición debe caer dentro de las especificaciones.
- a) Para checar la calidad del hierro nodular suele usarse la relación de la dureza con la resistencia a la tracción . El factor es denominado "K" y es el producto -

FIG. 28



Casa Madera (con fondo)  
para los dos modelos

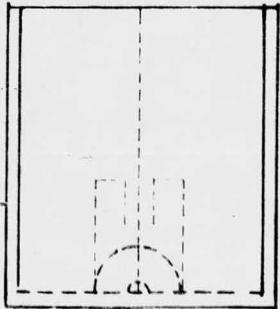
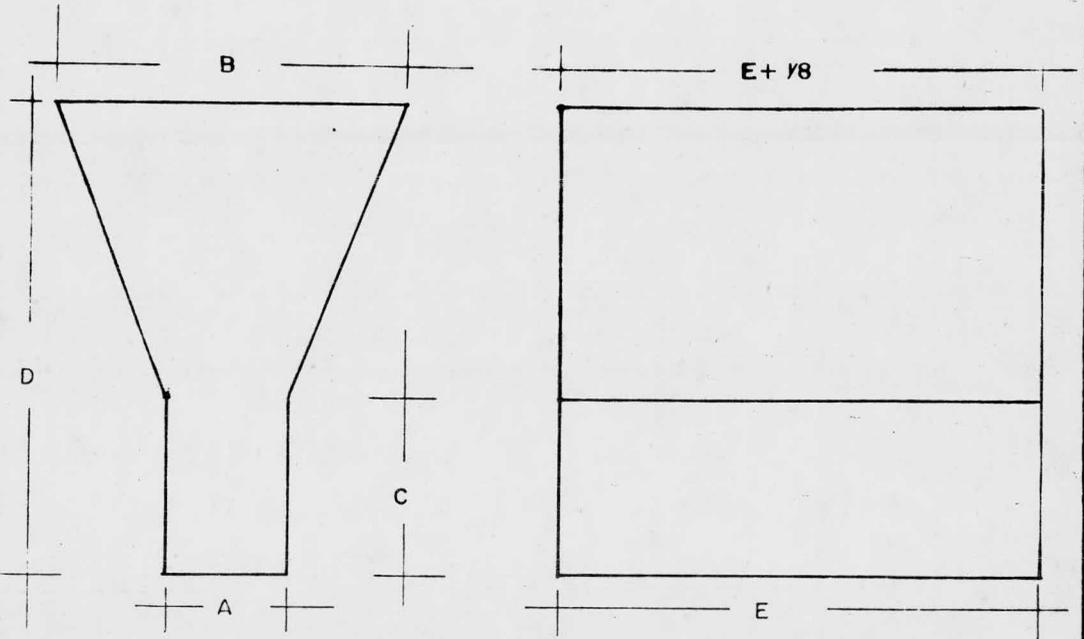


FIG. 28a



TAMAÑO DE LA PROBETA "Y"

		1/2"	1"	3"
Sección de la Pieza	Hasta	3/4"	de 3/4" a 2"	2" o más
Dimensiones de "Y" en Pulgadas	A	1/2"	1"	3"
	B	15/8"	2 1/8"	5"
	C	3/8"	1 1/2"	2 5/8"
	D	5 3/8"	5 3/8"	5 3/8"
	E	6"	6"	6"

de la resistencia a la tensión ( $\text{lb}/\text{in}^2$ ) entre la dureza (Brinell), el valor de K será :

1o. Para fundiciones sin tratamiento térmico o recocidas K debe aproximarse al valor de  $420 + 15$ .

Tipo (80-60-03) ó (60-45-10)

2o. Para fundiciones templadas o normalizadas, K de

be aproximarse al valor de  $475 + 15$ . Tipo (100-70-03) ó (120-90-02).

Ejemplo:

Valores de prueba 1 lb.

$R_t = 99800$  psias

BHN = 229

$K = \frac{99800}{229} = 435$  (nos da una fundición de buena calidad).

La variación en ésta relación puede ser por: masa de carburos, grafito laminar, por una barra de prueba defectuosa, una lectura equivocada o una dureza incorrecta.

b) Una capa ferrítica se encuentra a menudo a menos de  $1/16$ " de profundidad, se recomienda tomar la dureza después de eliminar esta superficie.

2.- Se toman muestras al azar de rebabas o pequeños defectos de la pieza, se checa su microestructura.

3.- Inspección visual. Se deberá inspeccionar buscando: rupturas, arena, polvo, sopladuras, contra -  
ciones, dobleces, etc.

4.- La prueba de dureza debe ser la Brinell, con la -  
bola de 10 mm. y carga de 3000 Kg.

## C O N C L U S I O N E S .

Para obtener un buen hierro nodular, es necesario controlar - durante el proceso de su elaboración los siguientes factores:

### 1.- MATERIA PRIMA.

- a) Tener buen control de la materia prima adquirida, - mediante un análisis químico, e inspección visual: para observar que no traiga elementos nocivos.

### 2.- FUSION.

- a) Hacer un análisis químico del metal base para ha - cer los ajustes requeridos sobre todo en la compo - sición de C y S .
- b) Tomar cuña de temple.
- c) Controlar la temperatura.

### 3.- TRATAMIENTO

- a) El agente esferoidizante adecuado para el proceso - es aquel con un contenido de 14% de Mg.
- b) Tener la temperatura controlada para el tratamien - to.
- c) Cuña de temple.
- d) Tener la estructura del grafito.
- e) Análisis químico.
- f) Prueba mecánica .
- g) Análisis metalográfico.

#### 4.- Inoculación efectiva.

#### 5.- PRODUCTO FINAL.

- a) Análisis químico.
- b) Pruebas mecánicas.
- c) Estructura de la matriz y del grafito.

Las perspectivas que el hierro nodular presenta dentro de la industria de nuestro país se encuentran solo limitadas por nuestro actual nivel de industrialización. Conforme las tasas de crecimiento lo vayan presentando, el hierro nodular se introducirá de lleno varias industrias, dada la gama de aplicaciones. Mercados que tradicionalmente han estado cubiertas por importaciones o que han pertenecido a los aceros al medio carbono, y, en algunos casos, al hierro maleable, serán tomados aceleradamente por la industria nacional del hierro nodular. Campos tales como la fabricación de tubería, válvulas y conexiones, la industria de equipo agrícola, la manufactura de equipo para la fabricación de papel, de equipo eléctrico, de equipo para la industria minera, etc., son algunas de las aplicaciones industriales donde el hierro nodular hará sentir el impacto de sus ventajas en los próximos años en nuestro país.

(ANEXO DE MARCHAS PARA ANALISIS QUIMICO EN HIERRO NODULAR)

DETERMINACION DE CARBONO Y AZUFRE POR EL METODO-  
GASOMETRICO POR COMBUSTION DIRECTA.

REACTIVOS:

Se preparan de acuerdo con las instrucciones del fabricante del equipo.

PROCEDIMIENTO:

Debido a la gran variedad de aparatos para la determinación de carbono y - azufre que existen en el mercado, no es posible fijar un procedimiento que pueda ser común a los diversos aparatos. Por lo anterior, se deben seguir - las instrucciones del fabricante del equipo, comprobando la exactitud del - aparato, procedimiento, etc., mediante muestras patron y con contenido - conocido de carbono y azufre (estandares).

DETERMINACION DE SILICIO POR EL METODO DEL ACIDO  
PERCLORICO.

REACTIVOS:

- a) Solución de ácido nítrico ( 3:5 )
- b) Acido perclórico concentrado.
- c) Solución de ácido clorhídrico ( 5:95)

## PROCEDIMIENTO:

Se pesa 1.0 gramos de muestra y se lleva a un vaso de precipitados de 400 ml.

Se agregan 40 ml. de ácido nítrico ( 3:5 ) ; se cubre el vaso con un vidrio de reloj y se calienta suavemente hasta que la reacción cese.

Se agregan 40 ml. de ácido perclórico concentrado y se evapora hasta humos blancos , se cubre el vaso y se continua calentando de tal manera que el ácido perclórico refluje en las paredes del vaso por 15 ó 20 minutos . Se enfría un poco , se agregan 125 ml. de agua destilada caliente y se agita. Se filtra inmediatamente pasando todo el residuo del vaso al papel filtro , se lava el papel y el residuo con agua caliente y solución de ácido clorhídrico ( 5: 95 ) , cinco o seis veces con cada uno.

El papel y el residuo se calcina a 1100C en un crisol de porcelana previamente tarado ( peso constante ) , se enfría en un desecador y se pesa.

## CALCULOS:

$$\% \text{ Si} = \frac{\text{A} \times 0.4675}{\text{B}} \times 100$$

Donde: A= gramos de  $\text{SiO}_2$  ( gramos del precipitado calcinado ).

B= gramos de muestra empleada.

0.4675= factor gravimétrico obtenido en tablas recopiladas en A.S.T.M.

DETERMINACION DE MANGANESO POR EL METODO DEL  
PERSULFATO.

REACTIVOS:

- a) Mezcla ácida .- Adicione 100 ml. de ácido sulfúrico a 525 ml. de agua-destilada y enfríe , adicione 125 de ácido fosfórico y 250 ml. de ácido-nítrico.
- b) Solución de nitrato de plata .- 8 gramos/litro.
- c) Solución de persulfato de amonio.- 250 gramos/litro.
- d) Solución de arsenito de sodio.- 20 gramos/litro.

PROCEDIMIENTO:

Adicione 30 ml. de solución ácida a una muestra de 0.10 a 1.0 gramos, caliéntele hasta disolución total y ebullición total ( desaparición de vapores nitrosos ). Se agregan al matraz 100 ml. de agua destilada caliente, 10 ml. de solución de nitrato de plata y 10 ml. de solución de persulfato de amonio. Se lleva a ebullición activa por 60 ó 90 segundos. Se enfría a 30 °C y se tritura rápidamente con solución de arsenito de sodio hasta un color amarillo claro.

CALCULOS:

$$\% \text{ Mn} = \frac{\text{AB}}{\text{C}} \times 100$$

Donde: A= Mililitros de solución de persulfato de sodio requeridos para titular la muestra.

B= Factor obtenido al valorar la solución de arsenito de sodio con una muestra estándar de % de manganeso conocido.

C= Gramos de muestra empleada.

## DETERMINACION DE MAGNESIO EN FUNDICIONES.

### REACTIVOS:

Acido clorhídrico concentrado.

Acido nítrico concentrado.

Acido perclórico concentrado.

Acetato de isobutilo.

Solución de acetato de sodio.- Se disuelven 272 g/l de agua.

Solución de cupferron.- Se disuelven 6 g/100 ml. de agua.

Cloroformo.

Solución de dietilditiocarbamato de sodio.- Se disuelven 20 g/100 ml. de -  
agua.

Solución de eriocromo negro T en cloruro de sodio.- Se mezcla una parte en  
peso del indicador eriocromo negro T y 93 de cloruro de sodio.

Solución reguladora pH - 10 . - Se disuelven 67.5 g. de cloruro de amonio -  
en una solución formada con 570 ml. de hidróxido de amonio y 300 de agua  
y se lleva a un litro.

Solución 0.1 N de E.D.T.A.- Se disuelven 3.72 g. de etilendiamino-tetra-  
acético en agua y se diluye a un litro (empleando un reactivo puro no se re-  
quiere valorar la solución).

### PROCEDIMIENTO:

Se pesa 1.00 g de la muestra y se disuelve en un vaso de precipitados de-  
100 ml. con 10 ml. de ácido clorhídrico y 3 ml. de ácido nítrico . Se calien-  
ta ligeramente para acelerar la reacción. Cuando el ataque cesa, se enfría -

y se filtra a través de lana de vidrio recibiendo el filtrado en un embudo de separación de 150 a 200 ml; se lava con ácido clorhídrico hasta que desaparezca el color amarillento.

Se agregan 30 ml. de acetato de isobutilo y se agita durante 30 minutos, dejando reposar para permitir la separación de las dos fases. Se separa la capa inferior (la ácida) sobre un vaso de 400 ml., enjuagando el interior del vástago del embudo con una poca de agua (la capa orgánica se desecha).

Se agregan 2 ml. de ácido perclórico a la solución ácida y se evapora a humos densos, dejando durante 3 minutos. Se agregan 5 ml. de agua y se lleva a ebullición. Se filtra a través de papel filtro de poro cerrado, recibiendo en un embudo de separación y se lava de 4 a 5 veces con agua fría.

Se deja enfriar y se agregan 10 ml. de solución de acetato de sodio, 2 ml. de solución de cupferron y 6 ml. de cloroformo. Se agita durante 30 minutos y se dejan separar las fases. Se separa la capa inferior (cloroformo) y se desecha.

A la solución del embudo se agregan 8 ml. de solución de dietilditiocarbamato de sodio y 10 ml. de cloroformo. Se agita durante 30 segundos y se deja separar las capas. Se desecha la capa inferior.

Se enjuaga, con cloroformo el cuello y el tapón del embudo y se agregan 2 ml. de cloroformo y 1 ml. de solución de dietilditiocarbamato de sodio, con lo cual debe obtenerse un precipitado blanco que indica que se han

separado totalmente el manganeso y el cobre. Se agita para extraer este precipitado con el cloroformo ( si el precipitado es coloreado, se agregan más dietilditioicarbamato y se extrae en los 2 ml. de cloroformo ).

Se separa la capa de cloroformo y se efectúan extracciones con 2 ml. de cloroformo cada una , hasta obtener una capa totalmente clara de cloroformo. Antes de separar los últimos 2 ml. de cloroformo, se agregan 2 ó 3 - gotas de solución de cupferron hasta que el precipitado, si lo hay sea blanco, lo cual es señal de que se ha eliminado todo el fierro.

Se continúa extrayendo con porciones de 2 ml. de cloroformo hasta obtener nuevamente una capa incolora, la cual se elimina.

Se transfiere la capa acuosa, a través del cuello del embudo a un vaso de precipitados de 400 ml. Se diluye aproximadamente a 250 ml. con agua y se calienta a 40 ó 50°C . Se agregan 20 ml. de la solución reguladora pH-10 y un poco de la solución de eriocromo negro T en cloruro de sodio . A continuación se titula con solución valorada de E.D.T.A. hasta que el color cambie de rojo a azul.

#### PRUEBA EN BLANCO:

Se efectúa una prueba en blanco empleando el mismo procedimiento y usando las mismas cantidades de todos los reactivos.

#### CALCULOS:

$$\% \text{ Mg} = \frac{(A-B) C}{D} \times 100$$

A = mililitros de la solución de E.D.T.A. requeridos para titular la muestra.

B = mililitros de la solución de E. D. T.A. requeridos para la prueba en blanco.

C = Equivalente en magnesio de la solución de E.D.T.A. en gramos por mililitro ( igual a 0.0002432 g/ ml. cuando la solución E.D.T.A. es 0.1 N).

D = Gramos de muestra empleados.

Cálculo de carga para un horno de inducción de 1250kg.

Para los cálculos se tomó en consideración un pozo fijo y las fórmulas usadas fueron:

$$A = \frac{B \times C}{D}$$

Donde

A = Kg. de aleación necesarios.

B = kg. de metal.

C = Puntos faltantes en centésimas de por ciento.

D = Por ciento de aleación que contiene la ferroaleación por la eficiencia del mismo.

Y para calcular la cantidad de aleación de magnesio las formulas de la página ( 53 ).

Estas formulas se puede aplicar para cualquier capacidad de horno; tomando en consideración un análisis para el acero (chatarra) y el retorno de nodular el siguiente:

	<u>Chatarra de acero</u>	<u>Retorno Nodular</u>
% C.	0.10	3.80
% Si	0.30	2.70
% Mn	0.20	0.40

Las ferroaleaciones con la siguiente composición:

Gráfita al 90% y 20  $\eta$

Fe Si al 75% y 90  $\eta$

Fe Mn al 75% y 90  $\eta$

Y para el tratamiento con magnesio briquetal al --  
14% de mg y 30  $\eta$  .

Kg.	%	Material	Análisis preliminar			Análisis deseado		
			C	Si	Mn	C	Si	Mn
700	0.56	Pozo	3.80	2.20	0.40	2.13	1.23	0.22
300	0.24	Acero	0.10	0.30	0.20	0.02	0.07	0.05
250	0.20	Ret.Nod.	3.80	2.70	0.40	<u>0.75</u>	<u>0.54</u>	<u>0.09</u>
						2.90	1.84	0.36
18		Grafito	70	---	---	1.26	---	---
7		FeSi	---	67	---	---	0.47	---
0.7		FeMn	---	---	67	---	---	<u>0.04</u>
						4.16	2.31	0.40
			Menos 1% por temp.			<u>0.41</u>	<u>0.23</u>	
						3.75	2.08	0.40

Se van a tratar 600 kg.

Se va a utilizar briqueta al 14% de Mg y 30 .

$$\frac{600 \times .22}{100} = 1.32$$

$$\frac{1.32 \times 100}{14} = 9.5$$

Se van a utilizar 9.5 kg de briqueta.

Postinoculación.

$$A = \frac{600 \times .62}{.75 \times 90} = 5.5 \text{ kg.}$$

Se va a utilizar 5.5 kg de Fe Si para inocular.

B I B L I O G R A F I A .

- A F S Ductil Iron Molten Processing.  
1974  
Pags. 1 - 32
- A S M Metals Handbook.  
Sección IV  
1960  
Pags. 195 - 200
- A S T M  
1971  
Pags. 251 - 291
- Gray and Ductile Iron Casting Handbook.  
Published by Gray and Ductil Iron Founders' Society Inc.  
Claveland.  
1971  
Pags. 98 - 102 139 - 144
- Revista Krafft.  
WIN 135 Abril . . 1971  
WIN 136 Mayo . . . 1971  
WIN 137 Junio . . 1971  
WIN 138 Julio . . 1971  
WIN 140 Octubre . 1971

WIN 142 Diciembre 1971

WIN 144 Febrero . .1972

- Introducción a la Metalurgia Física.

Sidney H. Havner.

Mc. Graw Hill.

1975

Pags. 184 - 196      350 - 353

- Revista Fundición.

Año XIX No. 143 Enero 1972

Año XIX No. 145 Marzo 1972

Año XIX No. 146 Abril 1972

Año XIX No. 147 Mayo 1972