

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



OBTENCION DE HIERRO MODULAR A PARTIR DE
FIERRO ESPONJA EN HORNOS DE INDUCCION.

T E S I S

Que Para Obtener el Título de

~~QUIMICO~~ ~~FARMACOLOGICO~~ **BIOLOGO**

P r e s e n t a n :

JOSE L. CABRERA MUÑOZ

MIGUEL MARTINEZ MADRID

México, D. F.

1978



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.

Mt. ~~100~~ 68



J U R A D O A S I G N A D O

Presidente: Ing. Kurt H. Nadler Gundeisheimer.
Vocal: M. en C. Fernando Maldonado Mendoza.
Secretario: M. en C. Alejandro Espriú Manrique de Lara.
1er. Suplente: Ing. Humberto Malagón Romero.
2o. Suplente: Ing. Francisco Herrera Castañeda.

Sitio donde se desarrolló el tema:

UNAM. Facultad de Ingeniería. Anexo.
Laboratorio de Fundición.

UNAM. Facultad de Química.

Laboratorios de Metalúrgia.

IMP. Laboratorio del Dep. Tecnología de Materiales.

Sustentantes: José Luis Cabrera Muñoz. _____

Miguel Martínez Madrid. _____

Asesor del Tema: Alejandro Espriú Manrique de L. _____

CON CARINO PARA
NUESTROS PADRES.

A MARCELA.

OBTENCION DE HIERRO NODULAR
A PARTIR DE FIERRO ESPONJA
EN HORNO DE INDUCCION

I.- INTRODUCCION

A) Tipos de Fundición.

II.- HIERRO NODULAR

A) Generalidades.

B) Clasificación del Hierro Nodular según su microestructura. Propiedades Mecánicas, Físicas y Químicas.

C) Influencia de los elementos aleantes.

C.1) Carbón equivalente.

C.2) Manganeso.

C.3) Azufre.

C.4) Fósforo.

C.5) Magnesio.

C.5.a) Tratamiento de Esferoidización.

C.5.b) Adición de Magnesio.

C.5.c) Cálculos para las cantidades necesarias de Magnesio.

C.6) Sumario.

III.- OBTENCION DEL HIERRO NODULAR

A) Modos de Fusión, condiciones y equipo.

B) Procesos de obtención.

- C) Modo de Operación.
- D) Inoculación.
- E) Evaluación del Inoculante.

IV.- INSUMOS

- A) Chatarra.
 - A.1) Generalidades.
 - A.2) Especificaciones de Compra.
- B) Fierro Esponja.
 - B.1) Generalidades.
 - B.2) Fabricación, Producción y calidad del fierro esponja en México.
- C) Fusión del fierro esponja en hornos de inducción:
Condiciones específicas de operación, desgaste y requerimientos del metal refractario.

V. PROGRAMA DE INVESTIGACION APLICADA

- A) Líneas Generales de Trabajo.
- B) Descripción de los materiales y equipo que involucra el programa.
- C) Diseño Experimental.
 - C.1) Objetivo.
 - C.2) Esquema y explicación de la ruta propuesta de experimentación.

- D) Modo de realización de las pruebas.
- D.1) Operaciones Pre-fusión.
- D.2) Operaciones Auxiliares.
- D.3) Fusión. Características y limitantes.
- E) Registro de las propiedades Químicas y Físicas del producto obtenido.

CONCLUSIONES.

Bibliografía.

HIERRO NODULAR

CAP. I.- INTRODUCCION

Debido a las extensas aplicaciones del Hierro Nodular en la industria Metal-Mecánica (principalmente la - automotriz), se hace necesario analizar el estado actual de éste en nuestro país.

El Hierro Nodular en México presenta una producción insuficiente en comparación a la del resto de fundiciones, siendo ésto de interés considerable pues se - ha visto la posibilidad de mejores resultados al substituirse las piezas obtenidas teniendo como base el hierro maleable para Hierro Nodular, entre otras muchas aplicaciones.

Las producciones correspondientes en el año de 1975 según estimaciones hechas, son las siguientes: (ver tabla I.1)

	TONELADAS	% DE LA PRODUCCION TOTAL DE FUNDICION FERROSA Y NO FERROSA
Hierro gris	310 000	50.0
Moldes de Lingote	160 000	25.1
Hierro Nodular	25 000	4.0
Hierro Maleable	25 000	4.0
Total de Hierros	520 000	83.1

TABLA I.1

Una de las causas principales de la baja producción del Hierro Nodular es el Número tan pequeño de fundidoras que se dedican a la producción de éste relativamente nuevo material, siendo éste número del orden de 13, las cuales representan el 3% del total de fundidoras en la República; además a este problema se le puede añadir la falta de información de las ventajas que significa el uso de este hierro en la industria, pues sus propiedades son superiores a las de los demás hierros.

De lo anterior se observa la necesidad de incrementar la producción de Hierro Nodular pues económicamente representa beneficios y técnicamente ofrece ventajas interesantes por el modo de operación que éste implica.

Se consigna a continuación las características y propiedades generales del Hierro Nodular.

Considerando que el Hierro Nodular es un tipo específico de fundición, se citan los tipos de éstas que existen:

A) Tipos de Fundición.-

La mejor manera de clasificar las fundiciones es por la estructura metalográfica que presentan, siendo un factor preponderante la condición y forma física en que se encuentra el carbón (forma de segregación).

Como consecuencia existen cuatro variables que influyen en forma determinante en las condiciones anteriores, a saber:

- a) Contenido de carbón.
- b) Contenido de elementos de aleación e impurezas.
- c) Velocidad de enfriamiento.
- d) Tratamiento térmico.

Considerando lo anterior, existen:

- Fundiciones Blancas o Blancas; el carbón se en encuentra en forma de cementita, se caracteriza por su du reza y resistencia al desgaste, siendo muy quebradiza y difícil de maquinar.

- Fundiciones Maleables; el carbón se encuentra formando partículas redondeadas irregulares (también co nocido como carbón revenido).

Esta fundición es muy utilizada por su gran - maquinabilidad, en la fabricación de piezas automotri-- ces, ferroviarias, etc.

- Fundición Gris; en este caso, el carbón se en encuentra en forma de grafito o carbón libre (laminillas) este tipo de fundición es la más generalizada por contar con propiedades mecánicas muy variables, y por lo - tanto, sus aplicaciones son muy extensas.

- Fundiciones en Coquilla; su núcleo está formado por fundición gris y sus superficie por blanca. Su uso es limitado y generalmente se aplica en materiales- de fricción.

- Fundiciones Aleadas; sus propiedades y estructura son similares a las ya mencionadas y varían de --- acuerdo a los elementos aleantes usados.

- Fundiciones Nodulares; también se conoce como fundición dúctil. El carbón adopta formas esféricas bien definidas gracias a la adición de elementos especiales llamados nodulizantes.

CAP. II.- HIERRO NODULAR

A) Generalidades.-

Como ya se citó, en este caso el carbón se encuentra en forma esferoidal compacta, y es por ésto que también se le conoce bajo el nombre de Fundición Grafito--Esferoidal, Fundición Esferulítica y como Fundición Dúctil o Nodular.

La composición química del Hierro Nodular es similar a la del hierro gris. La fundición esferoidal difiere metalográficamente de la gris en que la estructura nodular se obtiene directamente en la solidificación y presenta partículas redondeadas de carbono en forma regular, mientras que en el hierro gris normalmente las hojuelas de grafito son largas y delgadas actuando éstas como discontinuidades en la estructura, y sus puntas como concentradores de esfuerzos; provocando ésto que el material tenga una resistencia a la tracción depreciable.

Debido a que la estructura del Hierro Nodular es esférica, no se producen las concentraciones de esfuerzos desarrollados internamente en un hierro gris, por lo tanto, el Hierro Nodular permite una flexibilidad y trabajo mecánico aceptable, siendo ésto imposible en un hierro gris.

La fundición nodular se diferencia de la maleable en que se obtiene directamente en bruto de fundición sin necesidad de tratamientos térmicos posteriores y -

los nódulos presentan forma más esférica y regular que los aglomerados de carbón recocido más o menos irregulares que aparecen en la fundición maleable.

Naturalmente que el Hierro Nodular no puede presentar la misma ductilidad que un acero bajo en carbón, pero sus condiciones de trabajo son más económicas y sencillas que este tipo de acero. Esto se debe a que el Hierro Nodular funde a temperaturas bajas.

La formación de nódulos es ocasionada por la adición de elementos especiales (elementos de esferoidización o de nodulación) como magnesio, cerio, calcio, litio, sodio y otros, los cuales se agregan exactamente antes del vaciado del hierro líquido en la olla de ---- transferencia.

Según algunas teorías la acción de estos elementos en la formación de nódulos se debe a que éstos alteran la energía interfacial entre el grafito cristalizante y el fierro fundido, controlándose así sus características de crecimiento.

El agente nodulizante más usado (por cuestiones de eficiencia y economía) es el magnesio, el cual normalmente se agrega en forma metálica, aleado con otros elementos como el níquel, cerio, silicio, calcio y fierro, dependiendo del tipo de hierro a obtener y sus características serán las que dicten el tipo de aleación nodulizante a usar.

Hay que hacer notar que el hierro líquido base de-

be tener un porcentaje máximo de 0.03% de azufre, pues éste tiene gran afinidad con el magnesio a formar sulfuro de magnesio, provocando baja eficiencia del agente nodulizante.

B) Clasificación del Hierro Nodular según su microestructura. Propiedades Físicas, Mecánicas y Químicas.-

La Microestructura de las matrices, el metal que rodea el exceso de carbón en hierros fundidos, establece las propiedades de cada tipo de hierro.

La microestructura de la matriz dependerá, como ya se dijo, de la velocidad de enfriamiento, tratamientos térmicos y composición química.

En base a esto, el Hierro Nodular se clasifica según su microestructura en:

- Hierro Nodular Ferrítico.

Matriz formada esencialmente con ferrita y - hasta un máximo de 10% de perlita.

Esta estructura es la que proporciona una ductilidad máxima, así como una buena tenacidad y maquinabilidad. Estas fundiciones, bien en bruto o tras haber sufrido un normalizado, pueden presentar también una matriz perlítica.

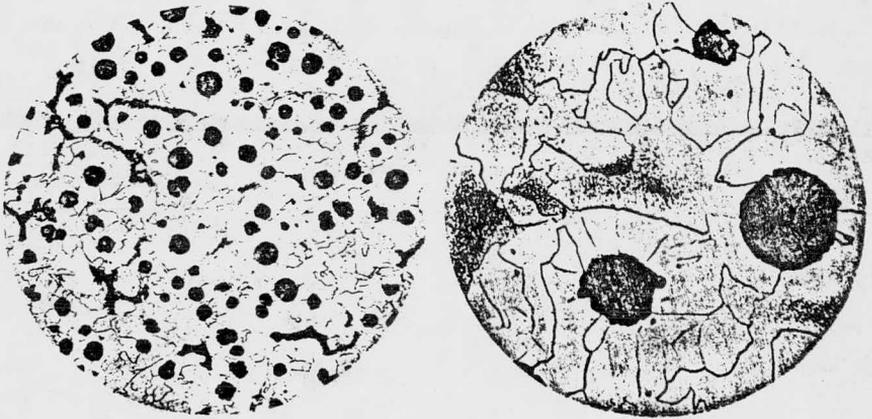
La ferrita podemos considerarla como un hierro puro con un bajo contenido de carbón (0.020% de carbón), - siendo por lo tanto un constituyente suave, similar a -

un acero bajo en carbón o un hierro dulce; pero la ferrita "nodular" contiene de 1 a 3% de silicio disuelto, causando un incremento de dureza, resistencia a la tracción y desgaste.

La matriz ferrítica puede ser obtenida en condiciones de fundición con algunos tipos de hierro, pero es el resultado generalmente, de un recocido.

En la mezcla de estructura en la matriz, los granos de ferrita aparecen junto al grafito, debido a que el carbón, en solución en la ferrita, puede difundirse rápidamente y precipitar en forma de grafito durante el enfriamiento. En Hierro Nodular la aparición de una banda de ferrita alrededor de las esferas de grafito se llama "ojo de buey"

(Ver Fig. II.1)



ATAQUE CON NITAL ?

FIG. II.1

MATERIAL	Hierro Nodular Ferrítico de Alta Ductilidad
GRAFITO	Esferoidal
MATRIZ	Ferrita con bajas cantidades de Perlita

- Hierro Nodular Perlítico.

La perlita proporciona alta dureza, resistencia a la tracción, resistencia al desgaste y alta maquinabilidad en comparación de la fundición nodular ferrítica, variando estas propiedades con la finura de sus laminillas.

El contenido de carbón en la perlita de un acero es de 0.80%, pero en la fundición nodular, el carbón que está combinado en la perlita es variable y depende de la velocidad de enfriamiento y la composición química.

El contenido de carbón 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 duro, con moderada ductilidad, alta resistencia a la tracción, buena resistencia al desgaste, moderada resiliencia, baja conductividad térmica, baja permeabilidad magnética, alta pérdida de histéresis, buena maquinabilidad y barato de obtener.

(Ver Fig. II.2)



ATAQUE CON NITAL ?

FIG. II.2

MATERIAL	Hierro Nodular de Alta Resistencia
GRAFITO	Esferoidal
MATRIZ	Perlita Fina con Bajas Cantidades de Ferrita

- Hierro Nodular Bainítico.

Se produce por aleaciones Ni-Mo (0.3-0.8%) y/o tratamiento térmico. Más duro y fuerte que la perlita, baja ductibilidad, moderada resistencia al impacto, muy buena resistencia a la fatiga y a la tensión. Adecuada-maquinabilidad, más caro que los grados precedentes.

- Hierro Nodular Martensítico.

Su formación se favorece con alto contenido de carbón y enfriamiento rápido. Es un componente muy duro y quebradizo, siendo deseable cuando se requiera una alta resistencia al desgaste. Variando las condiciones de enfriamiento y aleantes se puede obtener una variedad de propiedades de resistencia a la tracción y resistencia al desgaste.

Como se ve, la martensita sin revenir es un -- producto no dúctil y difícil de maquinar; su obtención -- es cara.

- Hierro Nodular Austenítico.

Es un componente esencialmente puro, con un -- arreglo cristalino cúbico centrado en las caras (f.c.c.).

Presenta alta resiliencia a bajas temperaturas, baja resistencia a la tracción y alta ductilidad. Su expansión térmica puede ser controlada dentro de estrechos límites con contenidos de níquel, siendo éste requerido en altas concentraciones (min. 0.18% níquel) para produ-

cir una matriz austenítica. Excelente resistencia a la corrosión y al calor, al creep y a la ruptura a temperaturas de 700°C. Buena resistencia al desgaste, corrosión y erosión. No magnético; fácilmente maquinable y caro.

- Carburos.

Compuesto de fierro y carbón; este componente es raramente deseado en el Hierro Nodular. Es requerido sólo cuando se desea una alta resistencia al desgaste, baja ductilidad, baja resistencia a la tracción y - pobre maquinabilidad.

Se puede hacer una clasificación del Hierro Nodular en base a lo anterior y a sus propiedades mecánicas elementales:

Clase 1.- Hierro dúctil, muy resistente. Su matriz puede ser bainítica o martensita revenida.

Se produce con aleantes y tratamientos térmicos.

Resistencia a la fluencia mínima: 90 000 psi, 6 64 Kp/mm².

Clase 2.- Hierro dúctil resistente. Matriz perlítica. Producido por aleantes o por tratamientos térmicos.

Resistencia a la fluencia mínima: 70 000 psi, 6 50 Kp/mm².

Clase 3.- Hierro dúctil; matriz perlítica-ferrítica, con predominio perlítico. Como regla es usado en -

condiciones como fundición. Resistencia a la fluencia-mínima: 60 000 psi ó 42 Kp/mm².

Clase 4.- Hierro dulce dúctil o hierro dúctil blando. Matriz ferrítica-perlítica con predominio ferrítico. Como regla, es usado en condiciones como fundición (as cast condition). Resistencia a la fluencia mínima: 45 000 psi ó 32 Kp/mm².

Clase 5.- Hierro dúctil muy blando; matriz ferrítica, Producida através de un tratamiento térmico de recocido. Resistencia a la fluencia mínima: 35 000 psi ó 25 Kp/mm². % mínimo de alargamiento: 15%. (En el caso anterior es de 8%).

Propiedades Mecánicas.

La influencia de los nódulos en las propiedades mecánicas es mínima, siendo por lo tanto, la estructura de la matriz la que determine éstas propiedades.

ESTRUCTURA DE LA MATRIZ	DUREZA BRINELL	GRADO
Ferrítica	149-187	60-40-18
Ferrita + Perlita	170-207	65-45-12
Perlita + Ferrita	187-248	80-55-06
Perlítica	217-269	100-70-03

Los datos asentados en la tabla anterior obviamente cumplen con las definiciones anteriores; pero en la realidad la clasificación mencionada no es la usualmen-

te utilizada.

En México se utilizan las normas del American Standard Testing Materials, no siendo el Hierro Nodular la excepción. Por lo tanto, se anexan una serie de tablas en las cuales, las clasificaciones que se hacen son según el ASTM y Stephen I. Karsay. (Ver Tablas II.1 hasta II.5)

TIPOS PRINCIPALES DE HIERRO NODULAR

(ASTM A 536-67)

GRADO O CLASE	RESISTENCIA A LA TRAC. MIN psi x 10 ³	LIM. ELAS. MINIMO psi x 10 ³	% ELONG. 2"	TRAT. TERMICO
60-40-18	60	40	18	Rec.
65-45-12	65	45	12	Rec.
80-55-06	80	55	06	Rec.
100-70-03	100	70	03	Norm.
120-90-02	120	90	02	Temp.

TABLA II.1

APLICACIONES Y CARACTERISTICAS

(ASTM A 536-67)

TIPO NO.	DUREZA BRINELL	CARACTERISTICAS	APLICACIONES
60-40-18	149-187	Matriz totalmente ferrítica. Máxima ductilidad y baja temperatura de -- transición.	Partes resistentes al impacto, piezas a presión, válvulas y cuerpos de bombas.
65-45-12	170-207	Esencialmente matriz ferrítica. Excelente maquina bilidad y ductilidad.	
80-55-06	187-248	Esencialmente matriz perlítica. Alta resistencia como colada	Maquinaria de equipo pesado, cigueñal, engranaje y rodillo.
100-70-03	217-269	Matriz de perlita fina uniforme. Excelente combinación de resistencia a la tracción, resistencia al medio y ductilidad.	Engranajes con alta resistencia a la tracción. Piezas automotrices.
120-90-02	270-350	Matriz de martensita revenida. -- Puede ser aleada para proveer templeabilidad, máxima resistencia a la tracción y resistencia al medio	Piñón, engranaje, rodillo y cremallera.

TABLA II.2

TABLA COMPARATIVA DE DUREZAS
EN LOS CINCO GRADOS DE HIERRO NODULAR

GRADO	RANGO APROXIMADO DE DUREZA BRINELL
1	280 - 400
2	220 - 300
3	170 - 240
4	150 - 200
5	115 - 170

TABLA II.3

TABLA COMPARATIVA DE PORCIENTO DE
ELONGACION EN LOS CINCO GRADOS
DE HIERRO NODULAR

GRADO	% DE ELONGACION (2")
1	2
2	3
3	5
4	8
5	15

TABLA II.4

TABLA COMPARATIVA DE RESISTENCIA
AL IMPACTO EN LOS CINCO GRADOS
DE HIERRO NODULAR

GRADO	RESISTENCIA AL IMPACTO. ENSAYO CHARPY	
	SIN ENTALLE ft-Lb/cm ²	ENTALLE EN V ft-Lb/cm ²
1	2.2	0.7
2	5.0	1.4
3	7.1	3.6
4	36.1	7.1
5	72.1	11.3

TABLA II.5

Tablas de Propiedades Físicas.

Como puntos de referencia se anexan las diferentes propiedades físicas, que serán de utilidad en el diseño experimental, en las siguientes tablas. (Ver Tablas -- II.6 hasta II.11)

GRAVEDAD ESPECIFICA
Y DENSIDAD

GRADOS

	2 y 3	4 y 5
Gravedad específica gram/cm ³	7.1-7.5	6.8-7.2
Densidad Lb/pulg ³	0.255-0.270	0.245-0.260

TABLA II.6

CALOR ESPECIFICO

TEMPERATURA	CALOR ESPECIFICO Cal/gram°C	
	GRADO 3	GRADO 5
0-100°C 32-212°F	0.17	0.12
1000°C 1832°F	todos los grados: 0.16	

TABLA II.7

CONDUCTIVIDAD TERMICA

COEFICIENTES DE CONDUCTIVIDAD
TERMICA. Cal/cm - seg^oC

TEMPERATURA	G R A D O S	
	2 y 3	4 y 5
68 ^o F - 20 ^o C	0.060 - 0.070	0.070 - 0.085
212 ^o F - 100 ^o C	0.070 - 0.075	0.085 - 0.105
752 ^o F - 400 ^o C	0.065 - 0.070	0.075 - 0.085
1832 ^o F - 1000 ^o C	0.055	0.055

TABLA II.8

EXPANSION TERMICA

RANGOS DE TEMP. COEFICIENTES PROMEDIO DE EXPANSION TERMICA

	<u>G R A D O S</u>			
	$^{\circ}\text{F}^{-1} \times 10^{-4}$ <u>2 y 3</u>	$^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$	$^{\circ}\text{F}^{-1} \times 10^{-6}$ <u>4 y 5</u>	$^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$
20-200 ^o C 68-392 ^o F	6.5	11.7	6.8	12.2
20-300 ^o C 68-572 ^o F	6.9	12.4	7.1	12.8
20-500 ^o C 68-932 ^o F	7.4	13.3	7.5	13.5
20-870 ^o C 68-1 600 ^o F	8.5	15.3	8.5	15.3

TABLA II.9

RESISTIVIDAD ELECTRICA

CONTENIDO DE SILICIO %	RESISTIVIDAD ELECTRICA (Microohm/cm ³)	
	<u>2 y 3</u>	<u>4 y 5</u>
2.5		57.8
3.0	68.0	66.5
4.0		72.7

TABLA II.10

NOTA: Todas las tablas físicas y químicas fueron tomadas de los libros Miller "Ductil Iron Process" y Stephen I. Karsay. Quebec Iron and Titanium Corporation. Properties and Applications. (Ver Bibliografía)

C) Influencia de los Elementos Aleantes en el Hierro Nodular.-

Haciendo un análisis somero de la influencia que tienen los elementos de base así como de aleación, es necesario hacer un análisis, en principio, del hierro, carbono y silicio; los cuales forman una aleación ternaria.

Haciendo una revisión se verá que el silicio alterará significativamente la composición del eutectoide, del eutéctico y la solubilidad máxima del carbón en austenita, por lo tanto el contenido de carbón en la perlita será menor que en la de un acero.

C.1) Carbón Equivalente.-

Si se incrementa el contenido de carbón y/o silicio en un hierro se baja el punto de fusión de éste. -- Las composiciones con más bajo punto de fusión son las que tienen una composición eutéctica, la cual aparece con un contenido de carbón normalmente igual a 4.3%.

La influencia del silicio en el contenido de carbón del eutéctico se ve:

$$\%C + 1/3\% Si = 4.3\% \text{ (eutéctico)}$$

Ya que el carbón y el silicio influyen en la composición del eutéctico, se ha encontrado un valor combinado de carbón y silicio conocido como carbono equivalente:

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

El equivalente de carbono en un hierro fundido nos describe un análisis global en la composición eutéctica.

Si CE = 4.3% se dice que es eutéctico.

Si CE es menor de 4.3 se habla de aleaciones bajas en carbón y se le llama fundición hipoeutéctica. Para una fundición hipereutéctica es necesario que el CE sea mayor de 4.3%.

Si se toma en cuenta el fósforo en cantidades apreciables, éste tiene una influencia en el CE (carbón --- equivalente) según:

$$CE = \% C + 1/3 (\% Si + \% P) - 1/3 Cr$$

Como es aconsejable expresar el contenido de carbón equivalente directamente en términos de una composición lo más cercano posible al eutéctico, se define el grado de saturación del hierro (Sc) como:

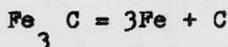
$$Sc = \frac{\% C}{4.3 - 1/3 (\% Si + \% P) - 1/3 \% Cr}$$

Si el CE de un hierro fundido es igual a 4.3; --- Sc = 1; hierros hipoeutécticos tendrán un Sc menor 1 y los hipereutécticos: Sc mayor que 1.

El contenido de carbón en piezas fundidas de hierro nodular incrementará a mayor tamaño de piezas, siendo recomendable un incremento de éste. En el Hierro Nodular de grado ferrítico, el carbón ocupa aproximadamente el 9% como carbón esferoidal, así que al incrementar el contenido de carbón se promueven nódulos de mayor tamaño, además de incrementar la fluidez del metal y un decremento a la tendencia de rechupe.

El carbono es el doble de efectivo en prevenir contracciones al solidificar el hierro, en cambio el silicio es más efectivo en conservar una sección delgada -- sin endurecerse.

El silicio actúa como agente grafitizante, o sea, aumenta el número de nódulos de grafito favoreciendo la siguiente reacción:



Es recomendable operar con un rango de 1.3 a 2.0% de Silicio.

El ferrosilicio es usado como inoculante (en rangos aproximados de 0.40 a 1.20%), contribuyendo esto a la eliminación parcial de carburos.

Al aumentar el contenido de silicio, disminuye el contenido de carbón de la composición eutectoide y la transformación eutectoide se verifica en un intervalo más amplio.

El silicio endurece al hierro y lo hace más quebradizo, siendo por lo tanto el silicio perjudicial para la resistencia al impacto.

Para aumentar la resiliencia, el silicio se debe mantener abajo del 2%.

En cantidades mayores del 6% de silicio, éste es usado para aumentar la resistencia a la oxidación, pero la fundición se vuelve sumamente quebradiza, obligando a ser manejada con temperaturas controladas. (Ver diagrama de Maurer, Fig. II.3)

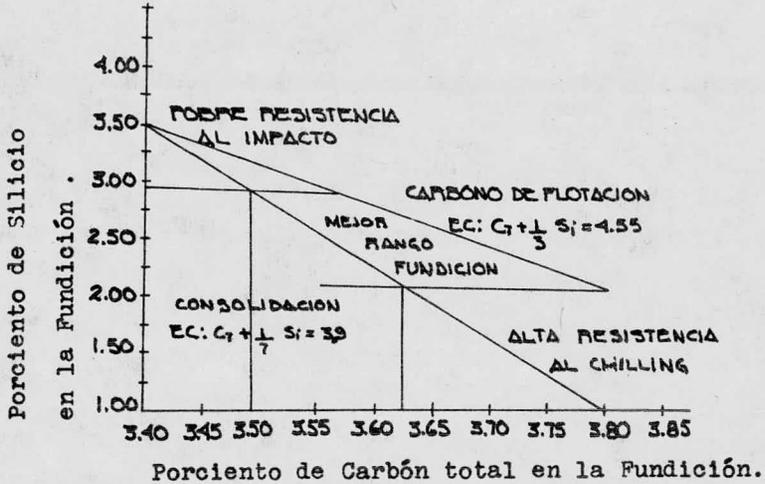


FIG. II.3 Diagrama de Maurer

Por medio de este diagrama se observa que tanto el carbón de flotación, como la consolidación, son defectos que se pueden presentar en la piezas de Hierro Nodular.

C.2) Manganeso.-

El manganeso estabiliza la perlita, por lo que será necesario para obtener mayor ductilidad, evitar altas concentraciones de éste.

Para producir un grado perlítico en secciones pequeñas y medianas, se necesitan de 0.5 a 0.7% de manga-

neso. Un contenido mayor de 1% favorece la formación de carburos.

La función normal del manganeso es su combinación con el azufre para formar el sulfuro de manganeso.

En el Hierro Nodular, la mayoría del azufre ha sido removido y parte reacciona también con el magnesio, así que la mayoría del manganeso queda en libertad, y actuando, entonces como potente aleante.

C.3) Azufre.-

El azufre se combina fácilmente con el magnesio, dando sulfuro de magnesio, el cual es ligero y flotará como escoria, la cual debe ser removida del baño.

El máximo contenido de azufre en el material base debe ser menor de 0.03%.

El azufre es perjudicial en el Hierro Nodular, porque al reaccionar con el magnesio, disminuye la concentración de éste, que es esencial para la formación de nódulos, lo que originaría una nodulización imperfecta y esto vendría en deterioro de las propiedades mecánicas de la pieza.

C.4) Fósforo.-

El fósforo, al combinarse con el fierro y el carbón disminuye la baja temperatura de fusión del hierro.

Aparentemente, el fósforo es rechazado a temperaturas escasamente arriba de la temperatura de solidifica-

ción del eutéctico Fe-C-Si.

Este mecanismo dá como resultado una solidificación sucesiva de austenita, eutéctico austenita-grafito y eutéctico de fósforo, éste tiene la tendencia a rodear los contornos de los primeros constituyentes formados; este constituyente de fósforo se llama esteadita (FeP), el -- cual es extremadamente duro y quebradizo,

El contenido de fósforo en el Hierro Nodular que se mantiene entre 0.02 y 0.03% tiene poco efecto en las propiedades pero un incremento de 0.04 a .1% aumenta la resistencia a la tensión y la dureza, reduciendo la elongación y la resiliencia, incrementa el límite elástico.

C.5) Magnesio. -

En hierros altos en carbón el magnesio actúa en --- forma de desoxidante y desulfurador, así como alterador de la energía de interfases, causando que el carbón solidifique en forma de esferas.

Usualmente, el contenido de magnesio se mantiene entre 0.04 y 0.055%; en cantidades menores ocasiona una -- grafitización incompleta o defectuosa.

Como al metal base se le ha eliminado el azufre y el oxígeno presentes, una cantidad de 0.020% de magnesio puede ser efectiva para la esferoidización.

Cantidades superiores de 0.06% de magnesio crea cantidades excesivas de escoria, originando la formación de

esferas irregulares en composiciones hipereutécticas, - reduciendo una pérdida de propiedades: en los hierros - hipereutécticos, un exceso de magnesio hace que el grafito se agrupe reduciéndole también sus propiedades.

Si el incremento de magnesio es muy grande, el grafito adquiere la forma de láminas y por lo tanto origina un detrimento en sus propiedades mecánicas.

Un alto contenido de silicio en secciones delgadas causará horadaciones como lo hace el aluminio. La combinación del magnesio con otros elementos como el antimonio, impide la esferoidización, sucediendo lo mismo - con el azufre y el oxígeno.

Debido a que la temperatura de ebullición del magnesio es baja al agregarse éste al líquido, tiende a -- evaporarse rápidamente y quemar el aire presente.

La solubilidad máxima del magnesio en el hierro es aproximadamente 3% dependiendo del contenido de carbón, silicio y la temperatura.

Normalmente se utilizan aleaciones de níquel-magnesio con un 40 a 80% de níquel y un 8 a 50% de magnesio, más 0.5 a 1.5% de cerio.

También se emplean aleaciones cuaternarias de hierro-silicio-cobre-magnesio, ó hierro-silicio-níquel-magnesio, empleando éstas dos últimas aleaciones, no suele ser necesario la adición posterior de inoculantes.

Las aleaciones nodulizantes más usadas actualmente se pueden clasificar en varios grupos, según la natura-

leza del elemento portador.

a) Níquel como elemento portador:

13-16% de Mg	50-55% de Ni	26-32% de Si
15-18% Mg	80-85% Ni	

Estas aleaciones se emplean en la obtención de Hierros Nodulares perlíticos y se introducen al hierro fundido por diferentes procesos del inmersor.

b) El Silicio como elemento portador:

5- 7% de Mg	43-48% de Si	1 a 1.5% de Ca	0.5% Ce*
8-10% de Mg	43-48% de Si	1 a 1.5% de Ca	0.6% Ce*
13-15% de Mg	43-48% de Si	1 a 1.5% de Ca	0.6% Ce*
18-22% de Mg	50-55% de Si	1 a 1.5% de Ca	0.6% Ce*

* Más el resto de Fierro.

También se fabrican otras aleaciones a base de hierro, silicio, calcio, magnesio con alto contenido de calcio (20-30%). Estas aleaciones tienen la desventaja de ser demasiado ligeras y reactividad muy débil; además tienen la tendencia a desintegrarse lentamente por la oxidación de la atmósfera.

Existen aleaciones nodulizantes especiales basadas en carbones minerales impregnados con un 45% de magnesio metálico. Su empleo requiere de técnicas especiales.

C.5.a) Tratamiento de Esferoidización.-

Se acostumbraba la adición de cerio, obteniendo buena esferoidización, pero esta idea se ha ido dese---

chando porque exige condiciones de composición química muy precisas y difíciles de seguir como:

- a) Que la fundición solidifique gris sin adicionarle cerio.
- b) Que sean fundiciones hipereutécticas.
- c) Que la utilización del silicio se mantenga - preferentemente arriba de 2.37%.
- d) Que el porcentaje de azufre sea muy bajo y después del tratamiento inferior al 0.02%, - análogamente que el fósforo se mantenga inferior al 0.1%.

Aparte del cerio y magnesio como agentes nodulizantes, se puede citar a elementos como el calcio, itrio, litio y el sodio como formadores de grafito esferoidal; pero similarmente, como el cerio, para que estos elementos trabajen se requieran condiciones muy precisas de operación y es por esto que para la obtención del Hierro Nodular se utiliza al magnesio como agente nodulizante principal, con bajas cantidades de cerio.

Debido a que al añadir el magnesio al metal líquido éste actúa como enérgico desoxidante, desulfurante y estabilizador de carburos, es indispensable mantener los contenidos de oxígeno y azufre menores de 0.02% y 0.005 a 0.02% respectivamente.

La cantidad mínima residual de magnesio requerida para proporcionar el grafito esferoidal varía aproximadamente de 0.018 a 0.05%.

C.5.b) Adición del Magnesio.-

Debido a que el magnesio reacciona violentamente con el metal líquido originando desprendimiento de humos, proyecciones de metal líquido y pérdidas importantes de magnesio, no conviene añadir el magnesio en forma metálica al baño de fundición.

C.5.c) Cálculos para las Cantidades Necesarias de Magnesio.-

Se basan generalmente en la cantidad de magnesio necesario para remover el azufre presente (con un magnesio residual de al menos de 0.05%).

Se debe agregar un factor de eficiencia, obtenible por la experiencia y es característico de cada método empleado.

$$\text{Mg requerido para nodulización} = \frac{\text{Mg deseado (\%)} \times \text{Mg necesario para desulfurar}}{\text{Eficiencia} + \text{Mg residual}}$$

Para evaluar el factor de eficiencia en la práctica, se hace normalmente con la cantidad de magnesio suministrada para la nodulización consistente. Por ejemplo, si se requiere de 0.20% de magnesio para la esferoidización con un magnesio residual de 0.05%, el factor de eficiencia será: $0.25 - 0.05 = 0.20$

Otro cálculo importante es el de la recuperación de Magnesio:

Mg recuperado = $\frac{\% \text{ Mg retenido}}{\% \text{ Mg agregado} - \% \text{ azufre en hierro gris}}$

C.6) Sumario.-

<u>Elemento</u>	<u>Rango %</u>	<u>Efecto</u>
Carbón	3.0-4.0	Presente como grafito o carburos. Altos niveles, especialmente en secciones gruesas, puede provocar la flotación del grafito.
Silicio	1.8-3.0	Endurece la ferrita. Promotor de la grafitización. Incrementa la temperatura de transición dúctil-frágil, como resultado del endurecimiento de la ferrita.
Magnesio	0.02-0.08	Provoca que el grafito solidifique en forma nodular. Mantener los niveles de oxígeno y azufre bajos.
Aluminio	0.003-0.06	Niveles mayores tienden a formar laminillas cortas y anchas de grafito; haciéndose este efecto mayor en secciones gruesas. Cantidades de 0.005% pueden causar porosidades, particularmente con la presencia de titanio.
Antimonio	0.005	Efecto muy fuerte en las esferas de grafito, particularmente cuando hay presencia de tierras raras.

Degenera la nodulización a 0.25% de antimonio. Para asegurar la matriz perlítica se requieren cantidades cercanas a 0.05-0.10% antimonio.

Bismuto	0.01	En ausencia de tierras raras, el bismuto promueve la formación de laminillas de grafito (0.05% Bi), pero en presencia de éstas favorece la formación de nódulos.
Boro	0.0005	Alrededor de 0.005%, forma carburos que son resistentes al recocido.
Cerio	0.0-0.30	Promueve la formación de nódulos - así como la formación de carburos en grados austeníticos.
Cromo	0.02-0.13	Alto formador de carburos, los cuales son resistentes al recocido. Para ferrita de colada se debe mantener bajo 0.04% y en cantidades no mayores del 0.10% para perlita.
Cobre	0.01-0.90	Ningún efecto en la calidad del nódulo o en los carburos primarios. Tiene un efecto significativo en la tendencia a formar perlita (0.50%) pero esto depende del tamaño de la sección y de ---

otros aleantes presentes.

Hidrógeno 0.0002-0.0015 Forma porosidades.

Níquel 0.01-1.25 Promotor de perlita y/o bainita.

Nitrógeno 0.002-0.008 Baja tendencia a formar carburos.

Puede contribuir a ciertos problemas de porosidad. Gas nitrógeno-seco no disuelve en el hierro.

Fósforo 0.05

Forma fosfuros. Se debe guardarlo más bajo posible. Incrementa la temperatura de transición.

Telurio 0.005

Se añade para controlar la porosidad en Hierro Nodular.

(1-2 gramos/100 lbs.)

Estaño 0.10

Favorece la formación de perlita.

En cantidades superiores al 0.10% provoca la formación de grafito - no esferoidal.

Vanadio 0.04

Forma carburos muy estables resistentes al recocido.

EFFECTO DE LOS ALEANTES EN EL HIERRO NODULAR

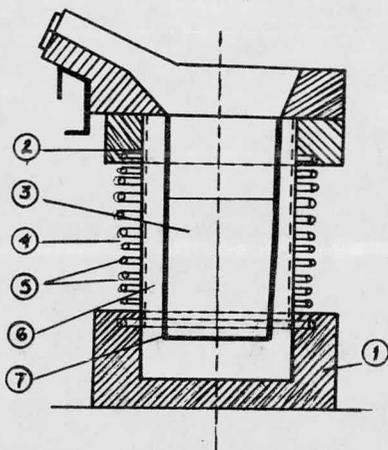
ELEMENTO %	Mg	Mo	Ca	Pb	P	S	Al	Cr	O	Mn
LIMITE PARA GRADO FERRITICO	0.02-0.08	0.03 max	Insoluble	0.002 max	0.08 max	0.05 max	0.06 max	0.04 max	0.003 max	0.20 max
LIMITE PARA GRADO PERLITICO	0.02-0.08	1.00 max	Insoluble	0.002 max	0.008max	0.05 max	0.06 max	0.10 max	0.003 max	0.90 max
FUNCIONES	Mejora ducti- lidad	Endurece	Inoculan- te	Promotor Grafito Laminar	Fragili- za	Fragili- za	Forma Grafito Laminar	Potente Forma- dor Carbu- ros	Oxi- dante Enér- gico	Aumenta dureza
OBSER- VACIONES	Noduli- za	Formador de car- buros. Promueve la Perli- ta y/o Bainita	Distribu- ye los nódulos.	Muy Noci- vo	Forma Esteadi- ta	Forma Sulfuros	Aumenta Porosi- dades.		Dismi- nuye el Mg libre. Provo- ca por- ros.	Estibi- liza- dor Perli- ta

CAP. III.- OBTENCION DEL HIERRO NODULAR

A) Modo de Fusión.-

El horno más adecuado y común de operación es el llamado horno de inducción, en donde el calentamiento se produce en la carga debido a corrientes parásitas inducidas por bobinas de corriente alterna.

El más utilizado es el horno de inducción sin núcleo el cual presenta ventajas sobre el resto de los hornos para este caso. (Ver Fig. III.1)



Elementos fundamentales de un horno eléctrico de inducción sin núcleo.

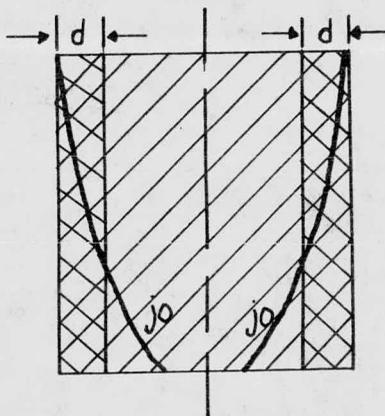
1. Fondo refractario
2. Anillo de mica
3. Crisol
4. Capa de amianto
5. Arrollamiento
6. Masa calcinada
7. Molde o plantilla

FIG. III.1

Los hornos sin canal o de crisol, pueden considerarse como transformadores, cuya bobina primaria es el arrollamiento que rodea al horno y siendo la carga misma la bobina secundaria. El principio de funcionamiento de estos hornos es el siguiente: el campo magnético creado por la corriente que circula en una bobina que rodea al crisol, induce otra corriente en el seno del material y los funde por el Efecto Joule.

Como en un cuerpo conductor, la corriente tiende a circular por la superficie, la potencia útil se distribuye partiendo de la superficie externa del material contenido en el crisol y progresando hacia el interior hasta una profundidad denominada Profundidad de Penetración.

(Ver FIG. III.2)



d: Profundidad de penetración
jo: Curso de la corriente y de la potencia en el material que llena el crisol.

FIG. III.2

En general, las frecuencias que se recomiendan para los hornos de crisol o sin canal respecto a su capacidad son las siguientes:

De 50 a 500 Hz Hornos de 2 o más toneladas
De 500 a 1 000 Hz Hornos de 500 Kg a 1 tonelada
De 1000 a 3 000 Hz Hornos de 50 a 500 Kg
De 3000 a 10 000 Hz Hornos de 10 a 50 Kg
De más de 100 000 Hz Hornos Hasta de 10 Kg

El efecto contrapuesto de las corrientes que recorren la bobina provoca un movimiento del baño, es decir, por el correspondiente campo electromagnético y las corrientes inducidas desde el campo al interior del baño las cuales están defasadas en aproximadamente 180 grados con relación a las corrientes inductoras. Este movimiento, producido por las atracciones y repulsiones de dichas corrientes inducidas en el baño, es tanto más vivo cuanto más baja es la frecuencia. Es decir, que a menor frecuencia tendremos mayor agitación en el baño.

Generalmente, el movimiento del baño forma los anillos que se muestran en la figura III.3.

Campo (a) y líneas de flujo en el interior de la fusión.



FIG. III.3

El revestimiento refractario de los hornos de inducción sin canal, es una de las partes más delicadas, pues se ha de limitar su espesor a un rango que va de 50 a 100 mm para no perjudicar el rendimiento eléctrico y ha de soportar la carga que puede alcanzar en varios casos-- hasta algunas toneladas. Más adelante se tratará este punto en función de los fines de este trabajo.

Entre las características que hay que considerar en el manejo de un horno de inducción sin canal cuando se opere convencionalmente con chatarra, aunque no lo parezca es importante para el momento en que se realice la -- sustitución con Fe-esponja, están:

- Consumo de potencia del orden de 500 Kw/ton cuando se trata de carga fría y llegando a la temperatura de 1480°C.

- Buena eficiencia térmica (hasta arriba del 65%).

- Un incremento de 60°C en la temperatura de una tonelada de hierro líquido requiere de 13 a 15 Kwh por lo que éste opera teniendo una economía óptima cuando no se remueve más del 20% del líquido contenido llenándose enseguida con carga fría.

- A pesar de lo anterior, el crisol puede ser vaciado hasta 30% del líquido total y cargado, en frío, en la siguiente secuencia: carburizante, chatarra de acero, retorno de chatarra y arrabio. En algunas ocasiones --- existen diferentes tamaños disponibles de chatarra siendo acomodados los pedazos de tamaño más grande en primer lugar y en segundo lugar los más pequeños tan cerca como

sea posible entre sí de manera que quede una masa compacta.

Un decremento significativo del consumo de potencia resulta del precalentamiento de la carga fría con gas; - aún cuando la eficiencia térmica del gas precalentado no iguala a la eficiencia del horno de inducción, el costo disminuye. Los ahorros de energía pueden alcanzar de 100 a 150 kwh/ton y el rango de fusión se incrementa de 20 a 25% con un gas precalentado de 540 a 870°C.

B) Procesos de Obtención. -

Actualmente existen muchos métodos distintos de tratamiento para la fabricación de Hierro Nodular. Todos - involucran la introducción de magnesio, solo o combinado con cerio y otros elementos más como las tierra raras. En la mayoría de los casos, el tipo de tratamiento del - material influencia grandemente la calidad y eficiencia de las técnicas de tratamiento. Las prácticas de fusión son también un factor determinante en aquellos métodos - de tratamiento que se usarán en la producción de hierro dúctil.

Después de haber tomado en cuenta estas consideraciones esenciales, la mayoría de los productores evalúan el método de tratamiento en base a la cantidad de magnesio y otros materiales que sean requeridos para obtener una nodularidad consistente de grafito en el hierro, y la conveniencia del proceso para fabricar el hierro a la temperatura y cantidad requeridas para el tamaño y --

fundición a producir. Por estas razones no todas las -- prácticas de tratamiento son satisfactorias para todas -- las fundiciones productoras de hierro dúctil, y es por eso que en este capítulo sólo se enuncian tres métodos -- que son fácilmente reproducibles a nivel laboratorio y -- ampliamente usados en la Industria; haciendo notar que -- el último proceso, inmold, está sufriendo una serie de -- cambios por estar en etapa de desarrollo, pero es ya usa do en muchas fundiciones por su alta eficiencia y aplica bilidad. Existen también otros procesos como los del mé todo PLUNGER en el cual el agente nodulizante es sumergi do al metal líquido; existe también el método de inyec-- ción, en donde tanto el desulfurante como el nodulizante son inyectados al metal líquido en dos pasos distintos; otro método es el de la cámara a presión o presurizada, -- en donde se es cambiado el punto de ebullición del magne sio debido a la alta presión de la cámara; existe tam--- bién el método de la cuchara sellada, en donde en una cá mara a presión es sumergido un lingote de magnesio por -- medio de un tubo de acero; existe otro más general como el STIRRING PLUG POROUS, el cual es usado básicamente -- cuando la fusión fué efectuada en un horno de cubilote; -- otro como el proceso T-NOCK, en donde es otro proceso de inyección y otros procesos más como el de los convertido res fisher o el Pont-a-Mousson or M.A.P.

La descripción detallada de los procesos SANDWICH, POUR-OVER e INMOLD se presenta en los siguientes párra fos de éste capítulo.

1.- Proceso POUR-OVER:

Es teóricamente posible el tratamiento del hierro base usando magnesio puro, pero debido a la violencia de la reacción entre el hierro y el magnesio puro, - éste método no es de uso común. Bajo condiciones prácticas de producción es necesario el uso de un compuesto de magnesio aleado con otros elementos, los cuales puedan moderar la velocidad de evaporación del magnesio y controlar así la reacción con el hierro base. El método más simple capaz de producir hierro dúctil es vertiendo el metal líquido sobre una aleación magnesio-níquel, la cual tenga una gravedad específica mayor que el hierro base. Este fué el primer método comercial práctico de producción de Hierro Nodular y requiere el uso de una aleación de 85% de níquel y 15% de magnesio. Usando esta aleación se obtiene una recuperación de magnesio superior al 60%. Actualmente se ha podido obtener una recuperación superior al 90%, usando una aleación de níquel-95% y 5% de magnesio.

La tabla III.1 es un resumen de las aleaciones usadas en el proceso y sus respectivas recuperaciones de magnesio.

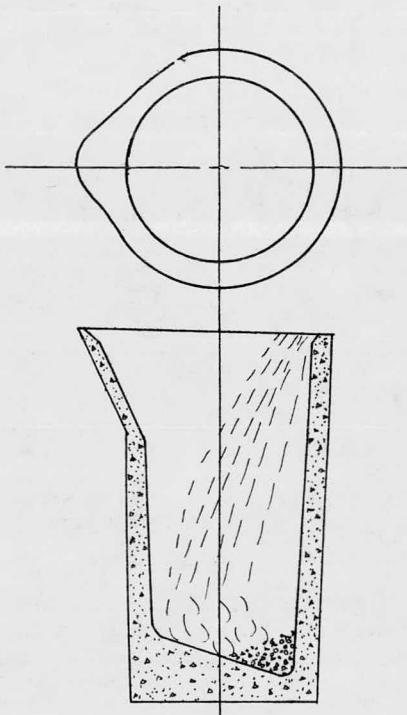
La máxima recuperación de magnesio es posible obtenerla cuando la profundidad de la cuchara de tratamiento es aproximadamente tres veces el diámetro de la misma.

La figura III.4 es un dibujo esquemático de la cuchara usada en éste método.

COMPOSICION DE LAS ALEACIONES DE MAGNESIO
USADAS EN EL METODO POUR-OVER

TIPO	Mg	Ni	Si	Ca	Ce	Fe	% RECUP. Mg
Incomag 3	4.0-4.5	95				32-36	85-95
Incomag 4	4.0-4.5	60					75-85
Incomag 1	14-16	50	35				40-50
Noduloy 5-C	5.0-6.0		44.0-48.0	0.80	0.7		15-30
Noduloy 9-C	8.5-10.0		44.0-48.0	0.80	0.7		10-25

TABLA III.1



CUCHARA DE
TRATAMIENTO DEL
PROCESO POUR-OVER

FIG. III.4

Con este método es posible utilizar hierros base -- con cantidades de azufre relativamente altas (0.07%-0.09%) pero la máxima eficiencia y recuperación de magnesio es posible con hierro base de bajos contenidos de azufre.

La forma de proceder en el tratamiento Pour-over es el siguiente:

a) Colocar la cantidad requerida de aleación apilado en el fondo de una cuchara limpia precalentada a una temperatura en exceso de $2\ 100^{\circ}\text{F}$, como se mostró en la FIG. III.4.

b) Vacíe un peso dado de hierro base sobre la aleación tan rápido como se pueda. Cuando la reacción se ha ya completado, escorifique lo mas rápido posible.

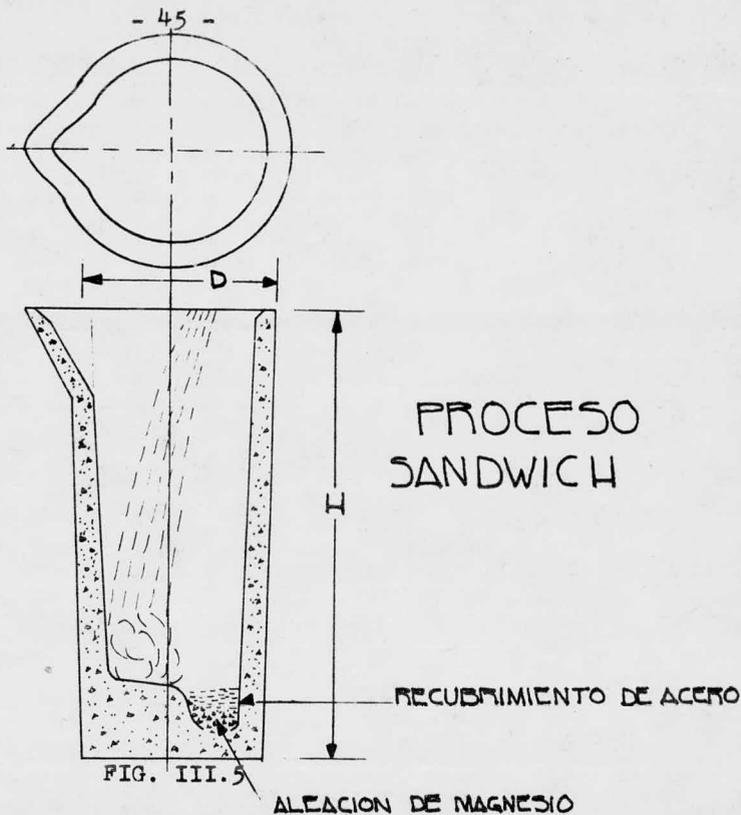
c) Inocule el hierro con inoculante en el momento - en que se pase de la cuchara de tratamiento a el molde.

2.- Proceso SANDWICH:

Probablemente este método sea el más usado en la -- producción a gran escala de partes automotrices de Hierro Nodular.

Esta técnica tiene muchas variantes aunque sus principios permanecen fijos. En ésta, se coloca la aleación de magnesio en una depresión localizada en el fondo de la cuchara y ésta es cubierta con recortes de lámina de acero.

La figura III.5 es una vista seccional de la cuchara con la aleación y su recubrimiento de acero.



La ilustración muestra también cómo el flujo de metal es dirigido lejos de la aleación y de su recubrimiento. La experiencia con este método ha demostrado que dá una mayor recuperación de magnesio que el método Pour---Over. La mayor parte de la reacción se efectúa en el fondo de la cuchara de tratamiento y es llevada a cabo a velocidades lentas probablemente debido a que la temperatura del hierro base en el área del acero y la aleación es reducida cuando el acero funde. Esta baja temperatura tiende a incrementar la recuperación del magnesio de la aleación.

Aún más, mientras que la reacción ocurre bajo la superficie del metal fundido, existe una menor oportunidad de haber pérdidas de magnesio por oxidación que en otros métodos. El resultado final es un hierro tratado con altos contenidos de magnesio por unidad de aleación añadida con menores pérdidas de temperatura que en otros métodos de adición.

Es importante que los recortes de lámina tengan un rango en espesor aproximado de 1/16 a 1/8 de pulgada, de modo que tengan una pequeña tendencia a flotar aunque -- fundirán rápidamente debido a su alto cociente área superficial-volumen, creando el gradiente requerido de temperatura en el área de reacción tan rápido como sea posible. La cantidad de recortes varía de 1.5 a 2.0% del -- hierro a tratar.

El tamaño de la aleación tratada es también muy importante en éste método. Un rango de tamaño uniforme -- del orden de 8 mallas por pulgada es ideal. Tamaños mayores reaccionarán muy lentamente y pueden causar excesiva turbulencia tardía en la reacción, mientras que tamaños -- más finos reaccionarán muy rápido y se quemarán antes -- que suficiente metal sea acumulado en la cuchara de tratamiento.

Las aleaciones de ferrosilicio-magnesio, las cuales dan mayor recuperación de magnesio en este método son No 5C y 5R. Estas dos aleaciones dan recuperaciones superiores al 60%, debido a sus velocidades lentas de -- reacción.

Temperaturas del hierro base entre 2 700 y 2 800°F pueden ser utilizadas eficientemente.

Procedimiento:

a) Añadir la aleación de magnesio dentro de su espacio destinado en la cuchara de tratamiento a temperaturas no menores a los 2 200°F.

b) Colocar el acero de recubrimiento encima de la aleación.

c) Llene la cuchara rápido y sin interrupción.

d) Escorifique hasta que cese la reacción.

e) Al transferir a la cuchara de vaciado, inocule.

3.- Proceso INMOLD:

Uno de los más modernos métodos de producción de Hierro Nodular, el cual consiste en nodularizar el metal justo en el momento antes de entrar al molde.

El agente nodulizante es colocado en una cámara especial de proceso por donde fluirá el metal fundido, -- reaccionará y por un canal especial, dentro de la misma unidad, se llevará al molde.

Debido a que este proceso requiere de bases firmemente establecidas y controladas, se describe a continuación los requisitos fundamentales para una buena operación:

a) Un suministro de metal fundido base limpio con un nivel máximo de azufre de 0.01%.

b) El flujo del hierro líquido debe hacer contacto

con el agente nodularizante de manera que ocurra una re acción controlada a una velocidad uniforme hasta que el molde sea llenado, sin que exista contaminación de cual quier residuo o inclusiones de escoria.

Se notará que la velocidad de solución de cual---- quier nodularizante dependerá de un número dado de pará metros, incluyendo composición, tamaño y forma del agen te usado; velocidad del metal através de la cámara; tem peratura y composición del metal; forma, peso y tipo de fundición a obtener, y el método de manufactura usado.

Después de investigaciones considerables, se ha es tablecido que existe una relación física estricta entre la velocidad de solución del agente nodularizante, velo cidad de vaciado y las dimensiones de la cámara de proceso. Basada en esta relación, la velocidad de solu-- ción de cualquier nodularizante puede ser variada, acor de a los requerimientos. Esta relación es significativa-- si la variación se encuentra dentro de un rango de - -- +50° F basados en las temperaturas de vaciado pre--esta-- blecidas para cada tipo de hierro.

Esta relación puede ser expresada como sigue:

$$\frac{\text{velocidad de vaciado}}{\text{dimensiones de la cámara de proceso}} = f$$

f = factor de reactividad de la solución.

Esta relación resuelve los problemas de variación-- en la velocidad de solución del nodulizante y/o la cantidad total del agente introducido al metal.

Debido a que la reacción del nodulizante y el metal fundido ocurre sin que exista contacto con el aire, es factible el aprovechamiento del 80% del magnesio introducido. Entonces la cantidad de aleación requerida es 50% menor que otros procesos como el Plunging o el Sandwich.

Para ilustrar el efecto de "f", considerar el siguiente caso:

Para una composición de nodularizante dado se ha establecido, como guía general, un factor de solución de 2.2 a 2.4, el cual dá una seguridad de que la velocidad de consumo de la aleación sea económica. Con un factor mayor de 3.0 resultará una velocidad lenta de solución, dando una nodularidad pobre, aunado a un sub-tratamiento como por ejemplo, bajo contenido de magnesio residual.

Contrariamente, con un factor menor a 1.6 se obtendrá una alta velocidad de solución, resultando que la pieza obtenida no estará totalmente nodularizada.

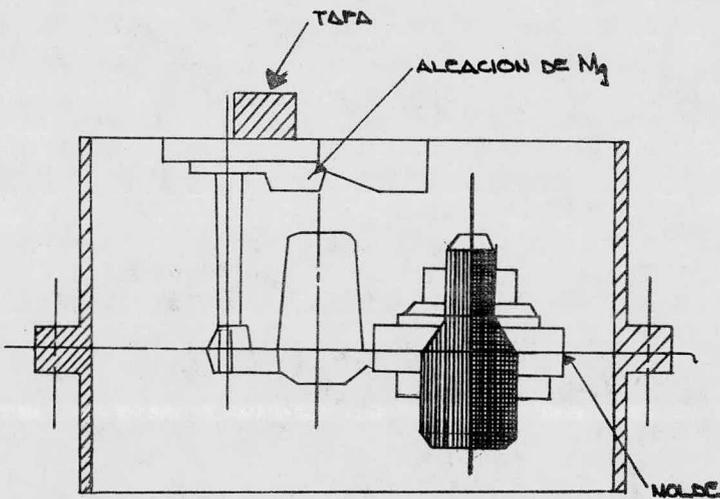
Cuando es usado un agente adicional para incrementar la velocidad de solución, ocurrirán defectos asociados con el sobretratamiento (por ejemplo alto magnesio residual), resultando entonces una baja calidad del hierro, particularmente cuando se trata de secciones pequeñas. Los hierros obtenidos con un exceso de aleación, son usualmente "carbúricos" y contienen un número considerable de inclusiones de escoria.

Pruebas hechas a nivel experimental han demostrado que las mejores aleaciones para este proceso son Incomag 1, Incomag 2 y ferrosilicio de magnesio 9% en un rango

de tamaños de 1/32 a 3/32 de pulgada. Se obtuvieron recuperaciones de magnesio de 75% a 90%.

Para minimizar los carburos y controlar la estructura de la matriz, el ferrosilicio se añade en cantidades de 2 a 5 gramos por 100 de hierro y en tamaños de 80 a 100 mallas.

La figura III.6 muestra un ejemplo típico del proceso INMOLD.



DESCRIPCION DEL PROCESO INMOLD

Las propiedades mecánicas del hierro producido por el proceso INMOLD son comparables a las producidas por otros procesos.

C) Modo de Operación.-

a) Selección y tratamiento del metal base.

La chatarra de acero deseable y más recomendable para la obtención de Hierro Nodular deberá tener -- las siguientes características:

1.- Calidad consistente.

2.- No contendrá elementos que interfieran con la esferoidización del grafito como el Pb o promuevan formación de carburos como el Cr.

3.- Tenga un contenido relativamente bajo de Mn.

4.- Sea de fácil suministro continuo.

Esta chatarra puede ser la que proviene del recorte de lámina de troquelado profundo.

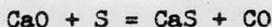
Los tratamientos que se requieren normalmente son Carburación y Desulfuración.

En la carburación, los factores determinantes son la temperatura de fusión la que mientras más alta sea, da mejores resultados; la calidad y tamaño del agente carburante (1.5 a 10 mm dependiendo del tipo de agitación); contacto íntimo entre el baño y el agente de carburación y el contenido final deseado de carbón. También se debe procurar que el contenido de azufre no aumente debido al agente carburante.

Las formas en que se añade el carburante depende de donde se quiera carburar, ya sea dentro del horno o en la cuchara de colada. Si es en el primero, se suministra el agente por medio de inyección y si es en la segunda puede ser por agitación con la cuchara además de la inyección, habiendo en ésta última, tiempo para análisis y ajuste.

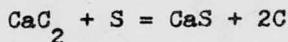
Por otro lado, se debe cuidar la adición de silicio, pues, como ya se dijo, éste disminuye la solubilidad del carbón en el hierro líquido, siendo necesario carburar primero y añadir después el silicio.

La desulfuración es necesaria pues el silicio impide la esferoidización del grafito por la gran afinidad que presenta con el Mg, siendo recomendable mantener al S abajo del 0.02%. Esto se logra con ayuda de la cal metalúrgica, CaO, según lo indica la reacción siguiente:



Respecto al uso del CaO, se deberá tener en cuenta que éste es un compuesto más estable que el CaS, por lo que la reacción se desplazará a la derecha sólo cuando grandes cantidades de CaO estén presentes en largos intervalos de tiempo.

Algunos otros agentes comúnmente usados son el CaC_2 y el Na_2CO_3 ; al parecer el CaC_2 presenta mejores resultados que el CaO ya que reacciona con el S como sigue:



y no se presenta el mismo problema que con el CaO. En teoría se requiere 0.2% de CaC para remover 0.1% de S; en la práctica se utiliza de 5 a 10 veces más de la cantidad teórica por la formación de CaO a partir de CaC₂, en lugar de CaS.

Entre los métodos más usados para la desulfuración están el agitador de tapón poroso; el dispositivo de -- agitación mecánica por medio de una pieza grande de refractario moviéndose sumergida en el hierro líquido; -- utilizando la cuchara de colada sobre una plataforma -- que rota alrededor de un eje vertical excéntrico al eje de la cuchara en una dirección o cambiando de dirección con una frecuencia adecuada para crear una turbulencia máxima en el líquido.

El tiempo total de operación mínimo se obtiene con el método de agitación de tapón poroso (2 a 5 min.) y el máximo es en el que se utiliza la cuchara girando en una sola dirección (8 a 12 min.).

D) Inoculación.--

La inoculación, metalúrgicamente hablando, proporciona al baño metálico núcleos en los cuales se forman cristales nacientes de metal los que crecen por enfriamiento. Estos núcleos pueden ser cristales finamente dispersos del mismo metal o de un metal adecuado diferente al original.

Para la producción de Hierro Nodular se requiere - de esta operación ya que definitivamente favorece la -- formación de núcleos esferoidales de grafito, siendo -- así eliminada aún más la formación de carburos.

Es importante hacer notar los factores de los cua- les depende la efectividad de la inoculación:

Influencia del Hierro Base.- La respuesta a la -- inoculación es muy diferente entre los hierros; las ra- zones para ello no son entendidas siendo pues sólo acep- tados los hechos.

Se sabe que entre mayor sea el sobrecalentamiento- del hierro, éste responderá de manera más deficiente; - por otro lado existen evidencias para creer que entre - más alto sea el contenido de silicio antes de utilizar- el Mg tratado, mejor responde a la inoculación por lo - que se recomienda mantener como mínimo el 1% de Silicio en el hierro base.

Influencia del Inoculante.- Ni el Fe ni el Si sir- ven como inoculantes sino solamente agregados en forma de FeSi, el cual siempre contiene elementos con una ba- ja concentración relativamente que resultan inoculantes activos como el Ca, Ba, Al, Sr, B.

No existe una regla que indique la cantidad óptima de inoculante a agregar debido a que los hierros con Mg tratado requieren diferentes cantidades y además la con- centración de los ingredientes activos es diferente en la gran variedad de los FeSi comerciales. Los tipos --

más comunes son los que contienen Ca entre 0.5 y 3.0% y Al entre 0.5 y 2.0%. Es recomendable que la producción de fundiciones delgadas éste último elemento esté en el menor nivel posible ya que promueve porosidad en la pieza.

Finalmente se puede decir que el rango de adiciones está entre 0.2 y 1% aunque la cantidad óptima deberá ser determinada por las condiciones locales.

Influencia del Tiempo.- Una influencia importante ejerce sobre los efectos de la inoculación el lapso de tiempo entre ésta y el vaciado. El momento en que los elementos inoculantes se añadan a la solución, el hierro está en una condición superinoculada la cual se deteriora al principio muy rápido y después muy lentamente. Es muy importante que el tiempo máximo sea establecido y estrictamente controlado. Los límites usuales de tiempo están entre 4 y 10 minutos. El hierro líquido que permanezca más allá del tiempo límite predeterminado debe ser eliminado con los desperdicios.

Influencia de la temperatura del hierro líquido.- La acción del incremento de la temperatura del hierro deteriora los efectos de la inoculación. Ese deterioro dependerá de las condiciones de trabajo ya que puede ser mayor o menor pero siempre esa será la tendencia.

Influencia del Modo de Inoculación.- La más usada y efectiva técnica es la de añadir el agente al flujo del hierro líquido en el momento en el que se traslada a la cuchara de vaciado. Un método con frecuencia sa--

tisfactorio es el tratamiento con Mg de 1/2 a 2/3 de la cantidad de hierro, se esperan unos minutos hasta que la reacción esté por terminar y entonces se añade el --inoculante al flujo mientras el resto del hierro es san grado y conducido a la cuchara. Esta práctica es justificada sólo cuando la cuchara de tratamiento sea usada para vaciado.

Influencia del Almacenamiento.- El almacenamiento del inoculante por muy largos períodos de tiempo puede presentar el deterioro del material trayendo consigo posibles defectos en la pieza terminada. Ese deterioro se lleva a cabo más rápidamente en trozos más finos.

Recomendaciones: No almacenar más del suministro correspondiente a una semana. Las dimensiones más eficientes y comúnmente usadas son de 3/8 a 1/2" (10-12 mm) como máximo y 0.078" (2 mm) como mínimo.

E) Evaluación del Inoculante.-

La efectividad de una inoculación se prueba usualmente por su capacidad para suprimir la formación de --carburos o por el número de esferoides de grafito (cantidad de nódulos). En ambos casos se usa una barra de prueba de dimensiones definidas la cual se funde con el fin de obtener rangos comparables de enfriamiento.

La tendencia a la formación de carburos puede ser medida sobre cuñas o sobre blocks de fundición contra un chilling, con la que la profundidad de la penetra---

ción del chilling es el indicador medido. El número de nódulos es normalmente establecido en muestras de 1 pulgada (25 mm). La tendencia a la formación de carburos y el número de nódulos son inversamente proporcionales.

La tabla III.2 es una base de comparación estándar establecida bajo condiciones promedio de fundición.

	PERLITA-FERRITA	FERRITA
PERLITA	PERLITA-FERRITA	FERRITA
CARBUROS		

RELACION APROXIMADA ENTRE MICRO-ESTRUCTURA, CONTENIDO DE SILICIO Y NODULOS EN LINGOTES DE UNA PULGADA.

TABLA III.2

CAP. IV.- INSUMOS

A) Chatarra.

A.1) Generalidades.-

Debido a la alta demanda de la Industria Metalúrgica de este insumo básico, las diferentes compañías Nacionales se han visto en la imperiosa necesidad de importar chatarra, principalmente de los Estados Unidos.

La alta importación de ésta se debe principalmente a que su producción es insuficiente, consecuentemente, - muy difícil su obtención y su costo elevado, debido a que los volúmenes que se manejan son tan pequeños que no justifican las inversiones necesarias para procesar y acondicionar dicho material como una verdadera industria. (Ver TABLA IV.1)

CLASIFICACION	US. DLLS.
Hierro colado de primera y automotriz	76
Hierro colado de segunda	68
Chatarra de petróleos	64
Chatarra de primera y paca prensada de primera	60
Hierro colado en general	60
Chatarra de segunda preparada	52
Chatarra de ferrocarriles	50
Chatarra de segunda y paca prensada de segunda	48
Paca desestañada A	46
Paca desestañada B y de bote quemado	42

Precios según 1971

TABLA IV. 1

Hay que hacer notar que la chatarra doméstica muchas veces es de calidad dudosa (básicamente por falta de equipo).

Por el momento, la industria metalúrgica nacional no puede dejar de importar chatarra, por la situación económica actual, y ésta se puede clasificar según sus diferentes especificaciones de compra:

A.2) Especificaciones de Compra.-

La industria del acero en México ha cooperado estrechamente con las dependencias oficiales. Así, a través de la Dirección General de Normas se ha establecido una serie de especificaciones cuya aplicación simplifica notablemente las negociaciones de compraventa. Dichas normas se transcriben a continuación, lo cual se hace con el objeto de que puedan servir de guía o establecerse en otros países de América Latina con el fin de normar criterios en cuanto a las necesidades y requerimientos de México.

Paca prensada de primera.- Debe estar constituida por desperdicios de lámina nueva de bajo carbono, permitiéndose como máximo un contenido de 0.5% de silicio, 0.05% de fósforo, además de estar libre de otras aleaciones.

Paca prensada de segunda.- Tiene que estar compues

ta por lámina de acero al carbono, procedente de carrocería, lámina negra usada y lámina galvanizada. Puede aceptarse hasta un 2% de alambre, resortes y lámina negra, ya sea pintada o litografiada. Deberán excluirse materiales estañados, porcelanizados y lámina emplomada.

Paca prensada de tercera.- Está integrada por material que no entra en los tipos y grados especificados en las clasificaciones anteriores, es decir, materiales galvanizados, estañados, porcelanizados, rebabas y demás con cualquier otro recubrimiento.

Paca desestañada, calidad A.- La forman desperdicios de hojalata desestañada.

Paca desestañada, calidad B.- Debe estar constituida por desperdicios de hojalata y bote desestañado.

Chatarra de primera.- La constituyen perfiles estructurales placa de 6.35 mm o más de espesor, con medidas que no excedan de 90 x 60 cm y debe estar preparada de manera que asegure una carga compacta.

Chatarra de segunda general.- Tiene que estar formada por perfiles estructurales y placas negras y galvanizadas, material de desperdicios procedentes de automóviles, todos con un espesor mínimo de 3.17 mm.

Chatarra de segunda preparada.- Debe estar constituida de los mismos materiales que el tipo anterior, pero sin que sus medidas excedan de 90 x 60 cm; debe estar preparada de manera que asegure una carga compacta.

Chatarra de ferrocarril.- Está integrada básicamente por material de desperdicio de ferrocarriles.

Pedacería de hierro colado automotriz.- La integran bloques de cilindros, múltiples, cabezas, volantes, cajas de cigüeñales, etc., limpios de grasas y metales no ferrosos.

Hierro colado de maquinaria.- Consiste en chatarra de hierro fundido limpia proveniente de columnas, tubos, placas y piezas fundidas diversas, incluyendo cuerpos de cilindros, tapas de motores de combustión, partes de hierro fundido de maquinaria para agricultura y otros. Debe estar libre de placas para estufas, hierro quemado, zapatas de frenos, materiales no ferrosos, y materiales extraños. El tamaño no debe ser mayor de 40 x 40 cm, ni llevar trozos con un peso mayor de 70 Kg.

Hierro colado de maquinaria de segunda.- Está constituido por los mismos materiales de la clasificación anterior, sólo que en tamaños más grandes que puedan ser quebrados con pera.

Chatarra de hierro colado general.- Puede estar formada por materiales no incluidos en las clasificaciones anteriores como placas de estufas, hierro quemado, zapatas de freno y hierro maleable nodular y blanco.

Estas son las clasificaciones más comunes en el mercado, teniendo cierta flexibilidad de acuerdo con las necesidades del consumidor.

Ahora bien, en cuanto al contenido de elementos residuales de la chatarra, a continuación se indican los límites máximos más comunes; sin embargo, esto debe ser motivo de acuerdo previo, entre proveedor y consumidor.

ELEMENTOS RESIDUALES EN
CHATARRA PARA ACERACION

	PORCENTAJE
Níquel	0.45
Cromo	0.20
Molibdeno	0.10
Manganeso	1.65

TABLA IV.2

Los elementos residuales combinados sin considerar el manganeso, no deben exceder de un 0.60%.

ELEMENTOS RESIDUALES EN CHATARRA QUE
SE UTILIZAN PARA OBTENER HIERROS COLADOS

	PORCENTAJE
Cobre	0.25
Cromo	0.20

Níquel	0.15
Estaño	0.03
Molibdeno	0.03
Aluminio	0.03
Plomo	0.01
Cromo y Molibdeno	0.20

TABLA IV.3

Por lo que se refiere a las impurezas como materiales no metálicos, materiales no ferrosos y materias extrañas de cualquier clase y oxidación excesiva, éstas no deberán pasar del 1%.

B) Fierro Esponja.

B.1) Generalidades.-

Si el fierro esponja es importante como materia prima en los procesos de aceración, lo es más aún como sustituto de la chatarra, con todas las ventajas que ofrece, para su aprovechamiento en la industria de la fundición.

Se empezará pues por definir qué es fierro esponja: fierro esponja es un término genérico para el producto metalizado que resulta de la reducción directa del mineral de hierro, en la cual los óxidos del hierro son reducidos a hierro metálico en estado sólido sin un paso de fusión intermedio. Químicamente, el oxígeno --

asociado con el fierro se remueve dejando una estructura muy porosa.

En general, la densidad aparente del fierro esponja es relativamente baja yendo de 1.5 a 4 g/cm³ y la superficie específica extremadamente alta y va de 0.05 a 4 m²/g; el valor determinado de estas dos variables dependen de la materia prima y las condiciones de operación. Normalmente, más del 90% del hierro aprovechable ha sido reducido a hierro metálico, estando el resto en forma de Wüstita (FeO).

Durante la reducción directa, la ganga permanece esencialmente inalterable, resultando que, debido a la eliminación del oxígeno con la consecuente reducción en peso, el por ciento de ganga en el fierro esponja es ligeramente más elevado que en la materia prima.

El contenido de carbono en el producto metalizado está en el rango de 0.1 a 2.5 % en peso.

A continuación, se describirá brevemente el proceso H y L de reducción directa que es el más importante actualmente en México por su ingeniosa tecnología y su alta rentabilidad siendo el principal proveedor de este producto.

B.2) Fabricación, Producción y Calidad del Fierro Esponja en México.-

Introducción.- Antiguamente, la producción de acero en el mundo se ha hecho a partir del mineral de

hierro a través del alto horno y distintos procesos de aceración, hasta llegar al convertidor de oxígeno en -- sus diferentes facetas. Aunque el Alto Horno ha evolucionado grandemente con el tiempo, en su esencia siguiendo el mismo proceso que por muchos años fue el único medio práctico y económico de obtener el fierro primario.

No fue sino hasta 1955 cuando México impacta a la industria mundial del acero aportándole una innovación fundamental al crear un proceso diferente a todo lo convencional y establecido: el primer proceso de reducción directa económico a escala industrial, inclusive -- con algunas ventajas con respecto al alto horno.

Se trata del proceso HYL (Hojalata y Lámina) que produce anualmente 95 000 tons/año de fierro esponja, -- (26% arriba de su diseño).

En la actualidad existen aproximadamente 60 procesos de reducción del mineral de fierro, los cuales se -- dividen en 2 grandes grupos; en uno están aquéllos donde el agente reductor es el carbón (hulla primaria), y en el otro están aquéllos donde se utilizan los hidro--carburos, particularmente el gas natural.

Dentro del segundo grupo podemos encontrar primeramente al proceso HYL, Midrex, Purofer, ARMCO, Acero-Nu, (Acero US), ESSo Fior, Acero-H, etc.

Evidentemente cada proceso varía en detalles considerablemente, aunque todos se rigen bajo el mismo ---

principio: "La reducción Directa"., donde la mayor parte del oxígeno es removido del mineral de hierro en estado sólido.

Debido a la facilidad de obtención del fierro esponja de HYLSA, este trabajo se verá enfocado exclusivamente a este producto.

Descripción del Proceso HYL.-

El proceso HYL convierte los minerales o pellets de fierro en un producto metálico, mediante su reducción en estado sólido con una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono obtenida por la reformación catalítica del gas natural y vapor de agua en un horno reformador (ver Figura IV.1), el cual tiene una alta eficiencia térmica para aprovechar el calor residual de los gases de combustión en la generación del vapor necesario para el propio proceso.

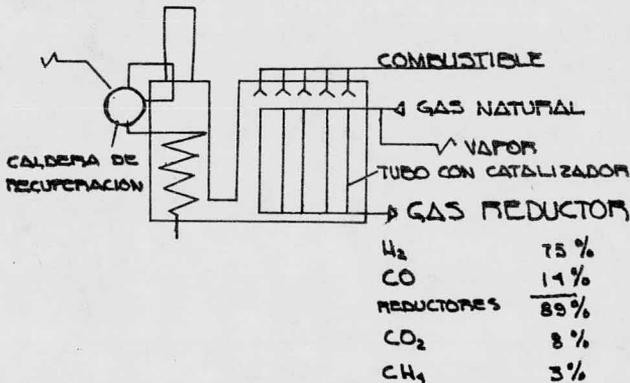
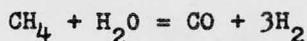


FIGURA IV.1

El gas natural es primeramente desulfurado en un desulfurador de carbón activado; posteriormente es distribuido a los cinco hornos reformadores de gas.

En cada horno el gas es mezclado con vapor y precalentado en un serpentín de convección. La mezcla de gas-vapor es dirigida a la sección radiante del horno, donde fluye através de tubos empacados con catalizador.

El gas reacciona con el vapor para producir hidrógeno y monóxido de carbono.



La operación de reformado es ajustada para producir un gas con 88% de hidrógeno y monóxido de carbono en base seca con metano remanente y bióxido de carbono.

Cuando el gas caliente abandona el horno, pasa através de un quemador de desechos, el cual aprovecha el calor residual generado para la fabricación de vapor.

La mayoría del vapor es usado en la operación de reformado para la producción del gas reductor, el resto se utiliza en otros procesos de la planta.

El proceso en sí es autosuficiente y requiere sólo de gas natural y agua como fuentes externas.

El flujo de gas reformado en los 5 hornos es parcialmente enfriado por enfriadores de aspas, conservando así agua.

Posteriormente los 5 flujos se combinan y pasan através de una torre simple eliminadora de agua. El gas seco resultante es bombeado al sistema de reducción del

mineral.

El sistema reductor consta de 4 reactores idénticos, cada reactor está ensamblado directamente a un acumulador de calor, el cual almacena el calor del gas en el momento en que éste pasa de un reactor a otro y actúa como un estabilizador termodinámico. El proceso reductor tiene una duración de 12 horas por ciclo, donde cada reactor pasa por una etapa de 3 horas por cada uno. (ver figura IV.2)

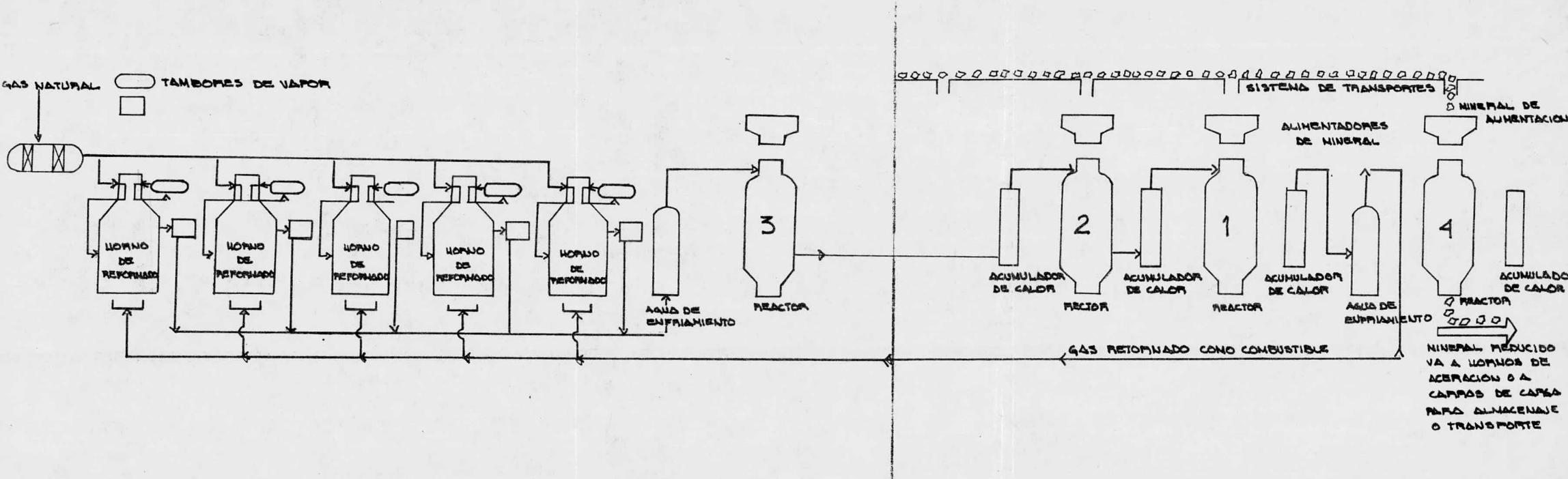


DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO HYL

FIGURA IV.2

El reactor número uno ha sido cargado con mineral crudo previamente molido y tamizado a tamaños entre -- 1/2 y 2".

El reactor estará recibiendo gas reductor parcialmente gastado durante 3 horas.

Durante este período el mineral es precalentado -- por el gas caliente y es iniciado el proceso de reducción. El reactor número dos contiene mineral que ha -- recibido un paso de gas parcialmente gastado. Este es-- tará recibiendo gas reductor durante 3 horas, el cual -- ha sido precalentado en el reactor enfriador (reactor -- número tres). La mayor porción de reducción se lleva a -- cabo en este período.

El reactor número tres está sometido a un enfria-- miento durante un período de 3 horas, con gas reductor-- fresco y frío. Durante este período, el mineral de hie-- rro adquiere aproximadamente un 2% del carbón combinado (carburización).

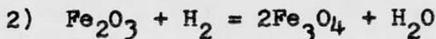
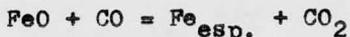
Cuando en el reactor cuatro se ha completado su pe-- ríodo de enfriamiento, el fierro esponja enfriado es -- descargado y entonces se recarga con un suministro de -- mineral crudo fresco, el cual entra al reactor através-- de un canal conectado a una tolva alimentadora que está -- colocada en la parte superior del mismo.

Cuando el reactor ha sido recargado, está listo pa-- ra entrar en el primer paso de reducción.

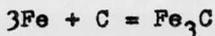
Los reactores son cambiados de un paso a otro du-- rante el ciclo de 12 horas por medio de operaciones hi--

dráulicas.

Reacciones del Proceso de Reducción.-



Carburización (Parte de Enfriamiento)



En síntesis cada unidad reductora comprende: un horno de precalentamiento donde el gas reformado se calienta hasta la temperatura óptima antes de la reducción; un reactor de lecho fijo donde el gas fluye através del mineral o pellet reaccionando con el oxígeno -- del mismo, y un enfriador de contacto donde el gas se enfría súbitamente para remover el agua que se ha formado debido a la reacción del hidrógeno y oxígeno, para fluir después a la unidad reductora.

El gas residual que aún conserva algunas propiedades térmicas se usa entonces como combustible dentro de

la planta. (Ver Figura IV.3)

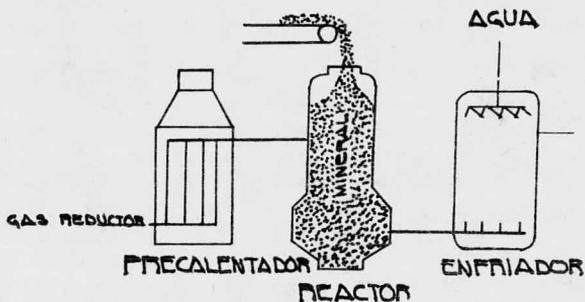


FIGURA IV.3

El Hierro Esponja Producido.-

La calidad del hierro esponja producido es de características muy superiores al mineral o al concentrado (pellet) cargado a los reactores. Los minerales usados normalmente en Monterrey varían de un 55 a un 65% en contenido de fierro y son de un bajo contenido de fósforo y azufre. El proceso de reducción remueve el 90% o más de oxígeno.

El 85% de azufre en el mineral es también eliminado; el producto tiene un 85% de metalización promedio.

Los constituyentes de la ganga no son removidos en este proceso, pero pueden serlo en las subsiguientes --

operaciones.

Como se observará en el proceso, es fácilmente controlable el porcentaje de metalización, a unos niveles superiores de 90% o inferiores a 85%, lo cual ayudará a su utilización integral en toda la gama de la Siderurgia.

Considerando que el fierro esponja a utilizar en la parte experimental será proporcionado por HYLSA, en seguida se citan las características de este material:

CARACTERISTICAS DEL FIERRO ESPONJA

OBTENIDO DEL PROCESO H Y L S A

Metalización	85.00% a 90.00%
Fe total	87.90% a 89.10%
Ganga	4.70% a 4.80%
Cal (agregada en pellet)	1.30% a 1.31%
Carbono	2.20% a 2.21%
como Fe_3C	2.1
como grafito	0.1
Peso volumétrico	1.6 Ton/m ³
Tamaño	95% +3/16" a -5/8"

TABLA IV.4

El criterio para juzgar la calidad de un fierro esponja sólo por su metalización equivalente. A este respecto se ha encontrado que un pellet metalizado 85% con 2% de carbón combinado tiene una metalización equivalente de 95%, o sea, que 1% de carbón equivale aproximada

mente a 5% de metalización.

Tomando como base lo anterior, se presenta la siguiente tabla en la que se comparan las características del hierro esponja con las de algunos de los tipos de chatarra que se manejan en México.

COMPARACION ENTRE FIERRO ESPONJA
HYL Y CHATARRAS

Características Físicas	Fierro Esponja	Chatarra Estructural y Fierro Esponja	Recorte Chatarra	Nacional No. 2	Rebaba "A"	Rebaba "B"	Estructural	Regresos Lam.	Pacas No. 2	Pacas No. 1	Chat. Imp. No. 2
Peso en Vol. cargado a Hornos en Ton/M ³	1.64	1.76 - 2.12	1.20	0.70	0.67	0.48	0.88	.155	0.42	1.10	0.76
Peso Relativo (%)	100	107 - 129	73	44	41	29	54	95	26	67	46
Impurezas	Ninguna		Pintura, Estaño, Zinc	Hule, Aceite, Tierra, Vidrio, Metales No Ferrosos	Aceite, Tierra.	Aceite, Tierra.	Pintura.		Sosa Caústica Estaño.	Hule, Vidrio, Madera, Zinc, Estaño.	Hule, Metales no Ferrosos, Aceite
Análisis Químico (Prom.)											
C	2.2 *		.06	.11	.66	.22	.08	.20	.06	.12	.17
P	.065		.016	0.23	.022	.022	.012	.015	.016	.016	.020
S	.005		.032	.045	.050	.180	.030	.022	.093	.030	.017
Cu	0		.15	.25	.25	.20	.22	.07	.08	.32	.30
Sn	0		.015	.100	.011	.010	.009	.006	.092	.017	.017
Ni	.02		.08	.05	.31	.12	.03	.04	.02	.32	.23
Cr	0		.12	.02	.48	.12	0	.04	0	.01	.10
Mo	0		0	0	.06	.01	0	0	0	.01	.02
Ganga	4.3		?	?	?	?	0	0	?	?	?
CaO	1.9		0	0	0	0	0	0	0	0	0

* Metalización 85%
Fe Total 67.5%

TABLA IV. 5

De esta figura se puede observar, tomando como punto de referencia exclusivamente el análisis químico, -- las grandes posibilidades que existen para hacer con éxito la sustitución de chatarra por fierro esponja.

Así, se iniciará el estudio de las condiciones de operación que rodean a la fusión del fierro esponja en los hornos de inducción sin canal; esta parte se dividirá en dos incisos:

- a) Condiciones de operación específicas del horno de inducción sin canal, y
- b) Desgaste y requerimientos del material refractario como factor de interés en la fusión de fierro esponja.

a) Condiciones de operación específicas del horno de inducción sin canal.--

En este aspecto, se citará primeramente lo relativo a la materia prima, fierro esponja, y sus características para esta operación.

Se ha observado que el fierro esponja para su mejor aprovechamiento, deberá tener propiedades tales como un alto grado de metalización y bajo contenido de ganga (menor % posible de S, P, Cr, Mn y otros).

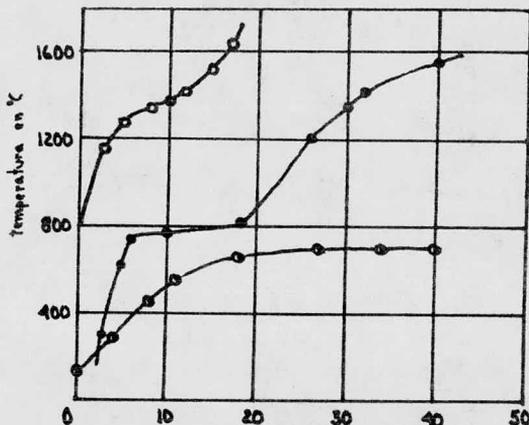
En el caso de alimentación discontinua o por pasos se ha utilizado una combinación de metal y fierro esponja en diferentes proporciones mostrando problemas por un sobre consumo de energía, agentes desoxidantes y re-

fractarios pero sin dificultades técnicas.

En cambio, para una alimentación continua la forma adecuada es la mezcla de fierro esponja sin aglomerar y pellet, con un rango del tamaño de 6 a 16 mm, haciendo notar ventajas pues al tener carga, fusión, escorificación y manejo continuamente se disminuye, en comparación con la operación discontinua, el gasto de energía, agentes desoxidantes y principalmente del refractario, el cual se recomienda cambiarlo una vez cada siete días. En el sistema continuo, aparece el problema de diseño - que precisamente lo hará continuo ya que se requiere de un horno el cual pueda oscilarse y mantenerse inclinado en todo momento (carga, fusión, escorificación y manejo); no obstante ésta alternativa no debe descartarse.

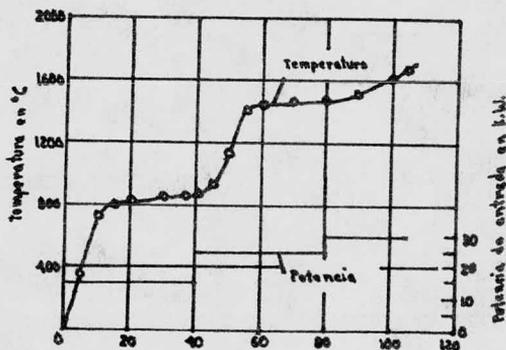
Considerando que en los hornos de inducción, entre más alta es la frecuencia aplicada, los baños resultan más tranquilos y se favorece la prolongación en la vida del refractario en el diseño experimental, se tomará en cuenta este principio. Para la objetivización de esto último, a continuación caben dos figuras en las que se relacionan, en la primera, las propiedades de tres tipos diferentes de fierro esponja con el calentamiento inductivo, y en la segunda, la potencia también con respecto a dicho calentamiento inductivo.

Prueba No.	Densidad g cm ³	Metallización %	Fe met %	Tipo de hierro esponja	Carga Kg
a	1.5	7.6	96.6	D	11
b	1.4	1.0	83.9	E	4
c	1.6	1.8	99.2	C	7



CALENTAMIENTO INDUCTIVO DE TRES TIPOS DIFERENTES DE FIERRO ESPONJA

TABLA IV.6



INFLUENCIA DE LA POTENCIA DEL HORNO EN EL CALENTAMIENTO INDUCTIVO DE PELLETS PREREDUCIDOS

TABLA IV.7

b) Desgaste y requerimientos del material refractario como factor de interés en la fusión del hierro esponja.-

Algo de gran importancia para la operación del horno de inducción es, sin duda, el empleo certero de material refractario determinado teniendo como parámetro su vida útil la que se buscará aprovechar de la mejor manera.

Generalmente, los tipos de revestimiento correspondientes a las clases de escoria de fundición, son los que se consignan en la tabla que sigue:

TIPO DE ESCORIA	REVESTIMIENTO CORRESPONDIENTE
I. <u>Acida.</u> - Proveniente de proceso dúplex o si se usan retornos contaminados con arenas de moldeo.	Alta Alumina (70-92% en apisonables) o Sílice (temperatura de trabajo mayor de 1 700°C).
II. <u>Neutra.</u> - Proveniente de chatarra limpia	Magnesita (84% de MgO y 9% SiO ₂ para temperaturas entre 1 400 y 1 600°C).
III.- <u>Ligeramente básica.</u>	Magnesita (misma composición)

Sobre este punto, sobresale lo referente a la coordinación que exista entre el control de la escoria y el revestimiento pues ésta influirá de manera decisiva en la fusión del hierro esponja como lo demuestran los expe

rimentos realizados por la compañía alemana PUROFER (1)- en este campo, se encontró que ésta coordinación se ob-- tiene al llegar a un estado de saturación, que se define como la composición química de la escoria a la cual no -- se disuelve más de un componente del revestimiento re--- fractario para lo que se requiere, pues, fijar la compo-- sición química de éste último. También se buscará que -- el estado de saturación esté lo más cerca posible de la composición de la ganga resultando con ésto minimizar -- las cantidades de escoria.

De esta forma, la vida útil del revestimiento depen de de manera importante del grado de confiabilidad en el cual la saturación de la escoria puede controlarse toman do en cuenta el ataque que por erosión sufre el revesti- miento.

Existe también una clasificación para los estados -- de saturación teniendo como base el grado de fierro es-- ponja y la composición de sus gangas:

a) Acida, silicosa.

b) Neutra, Al_2O_3

c) Básica.

De las tres, la menos común resulta ser la satura- ción ácida ya que es poco probable encontrar mineral con ganga saturada de silicatos y un bajo contenido de fósfo ro.

En el caso de saturación neutra, se requerirá de altos contenidos de Al_2O_3 en la ganga; si no hay tal con dición se necesita agregar aluminio para así reducir el

contenido de FeO y llegar al estado de saturación de la escoria.

Por último, la saturación básica presenta ventajas sobre las demás por existir mayor probabilidad de encontrar mineral cuya ganga tenga alto contenido de MgO, -- siendo saturada al agregar una pequeña cantidad de MgO y teniendo un revestimiento refractario constituido de 70% de MgO y 20% de Cr_2O_3 ; los resultados se traducen - en un menor contenido de fósforo y el mantenimiento de la vida útil del revestimiento el mayor tiempo posible.

En las páginas siguientes se detallará el diseño - experimental con el que se buscará alcanzar el objetivo de este trabajo.

- (1) The processing of Sponge Iron in the Coreless Induction Furnace.

CAP. V.- PROGRAMA DE INVESTIGACION APLICADA

A) Líneas Generales de Trabajo.-

Introducción.-

Es este trabajo se presenta un programa de investigación aplicada para evaluar las posibilidades del uso industrial de peletes prereducidos (fierro esponja) en la industria de la fundición, en concreto en la obtención de Hierro Nodular como producto primario.

Considerando los altos costos y la escasés de chatarra, se analizará la alternativa de usar el hierro esponja en sustitución de chatarra como materia prima, -- con las ventajas inherentes a las características del material, su tamaño y la predictibilidad de la composición que resultaría como aspecto principal.

Antecedentes.-

La fundición es una rama industrial por cuya protección e importancia debe ser contemplada cada vez más en los futuros programas de desarrollo industrial a nivel mundial y en particular en México.

El surgimiento de diversos usos de materiales fundidos ha sido una consecuencia del desarrollo tecnológico que requiere optimizar la diversidad y calidad de -- los productos para la industria en general.

La producción de piezas de Hierro Nodular, hierro-

gris, hierro maleable y fundiciones de acero constituyen la base estructural de la fundición en México. En la actualidad, se encuentran registradas, en la Cámara respectiva, aproximadamente 460 fundiciones en el país; clasificándolas bajo el criterio de "volumen de producción anual" (empresas grandes aquellas con una producción superior a las 5 mil toneladas; medianas las que producen entre mil y 5 mil toneladas; y pequeñas con una producción inferior a las mil toneladas), se encuentra que del número total de empresas registradas, 14 -- son grandes, 32 medianas y el resto pequeñas.

Por otro lado se tiene que el 71% de la producción total de piezas fundidas son fabricadas por empresas -- grandes; 24% por las empresas medianas y sólo el 5% restante por las pequeñas empresas. En una gran proporción esta rama de la industria se caracteriza por la -- proliferación de un gran número de fundiciones con baja capacidad de producción, poca inversión y uso mínimo de tecnología avanzada. El bajo costo de las materias primas empleadas, la abundancia de mano de obra, el costo-reducido de la fabricación del herramental necesario, -- así como los requerimientos poco estrictos en el control de emisión de humos, polvos contaminados y la habilidad para vender sin importar la calidad de las piezas, fueron factores propicios para el crecimiento de la industria de la fundición en México, en la forma que tiene en el presente.

Actualmente, la elevación del costo de los insumos básicos como el coque, chatarra, ferroaleaciones, energía eléctrica, servicios y la exigencia de equipo anti-contaminante y de más alta calidad de los productos, ha tenido una gran repercusión provocando en casos extremos que muchas pequeñas fundiciones tengan que cerrar, y que otras estudien alternativas que les permitan reducir la importación de materias primas caras y sustituir las por unas de calidad constante como una medida tendiente a reducir los costos de operación.

La chatarra (doméstica e importada) es un insumo básico tanto para las Industrias Siderúrgicas como para las fundiciones del país.

En México, donde las industrias manufactivas metal mecánicas producen 1/6 del producto nacional bruto, la porción asociada con la industria de la fundición ferrosa, puede estimarse cercana al 10% del total. Sin embargo, para mantener este volumen de producción, se tiene que importar por un lado casi 200,000 tons. de chatarra de hierro, es decir, un 50% de las necesidades anuales, con un costo superior a los 300 millones de pesos.

Esta importación representa una fuga de divisas -- que afecta la economía del país en dos formas: primero directamente, hay una salida en moneda extranjera de -- más de 400 millones de pesos; segundo y más importante, es que al fundidor nacional, la chatarra le cuesta más cara que en los países de donde provienen, y que como resultado el precio de sus productos son considerable--

mente mayores que en aquellos países de donde se compra la chatarra.

Por otra parte, en el año de 1976 el consumo --- global de chatarra, (fundición, acerería, etc) en el - país, alcanzó la cifra de 3.5 millones de Toneladas---- con un valor de 5,000 millones de pesos que en su ma yor parte provinieron de chatarra importada.

La fluctuación en precios y calidad de la chatarra ha constituido desde hace varios años, un motivo de preocupación en la industria de la fundición y de la si derúrgica en general. De hecho, ésta ha sido la causa y motivo generador de nuevas materias primas empleadas co mo sustitutos.

En México, en particular, los pellets pre-reduci-- dos han ofrecido una fuente atractiva de materias pri-- mas como consecuencia del bajo volumen de chatarra re-- circulada, la baja calidad de carbón coquizable y de los grandes depósitos naturales de combustible gaseoso-- existentes.

Es así como el proceso HyL (Hojalata y Lámina),--- por varios años y en diferentes países, ha logrado atra-- vés de un producto más barato y de calidad homogénea -- (Hierro Esponja), sustituir en gran parte la chatarra - empleada en los hornos eléctricos de arco.

Muchas de las publicaciones e información relativa

a estos productos: minerales, pelets o al gomerados pre-reducidos, ha sido dedicada a la producción de acero --- (alto horno, horno de arco, oxiconvertidores) lo cual es natural considerando la enorme cantidad de este producto que se maneja en el mundo.

Un aspecto relevante es la estimación de que tanto los costos de inversión como los de producción de acero líquido, para capacidades de plantas inferiores a 1 millón de toneladas anuales, son menores vía procesos reducción directa-horno eléctrico que para la ruta convencional alto horno-oxiconvertidores.

Lo cierto es que, bajo condiciones favorables, el costo por tonelada de pelets pre-reducidos (hierro esponja), ha sido menor que el de la chatarra especialmente en los últimos años y ésto se refleja en el hecho de que en las acerías se ha ido incrementando gradualmente la proporción utilizada de este material hasta constituir en el presente un 5% de la producción mundial de acero (700 millones de toneladas).

Existe poca información publicada con respecto a la aplicación de pelets pre-reducidos a la producción de fundiciones ferrosas, en contraste con las numerosas --- fuentes de referencia que hay para la producción de acero.

Sin duda alguna se están llevando a cabo estudios para determinar la aplicabilidad de estos materiales en la industria de la fundición (especialmente en Europa); sin embargo, a los autores no les ha sido posible tener-

acceso a ellos hasta el momento. Lo que es palpable, - es que el retraso en la popularidad y desarrollo en --- nuestras fundiciones de estos materiales con respecto a la industria siderúrgica, parece deberse entre otras ob servaciones al hecho de que casi todas las aplicaciones y experiencias para producir acero han sido utilizando- unidades de hornos eléctricos de arco de los cuales muy pocos son empleados en la industria de la fundición. Otra característica que resulta pertinente mencionar,-- es la composición química de los pelets pre-reducidos,- ya que estudios previos concernientes a las prácticas - de aceración indican que ésta es una variable crítica - para una fusión eficiente en el horno eléctrico.

Una encuesta entre productores de pre-reducidos - (Suecia, Brazil, Canadá, México, E. U. A., etc.,) reve- la el siguiente rango de análisis químico:

Contenido de Fe -----	85 - 87 %
Oxidos de Fe -----	6 - 7 %
Otros Oxidos -----	3 - 8 %
Fósforo -----	0.001 - 0.02 %
Azufre -----	0.003 - 0.008 %

Se estima que la alta concentración de óxidos es - causa de efectos nocivos en las operaciones de fundi--- ción.

Una gran ventaja de estos materiales son sus com-- posiciones relativamente bajas en azufre, las cuales ha cen muy atractiva su aplicación en la obtención de hie- rro dúctil.

Programa.-

El objetivo básico del proyecto es el de estudiar las variables de proceso, caracterizando aquellos parámetros que afectan la productividad y calidad de las piezas fundidas a partir de pelets pre-reducidos.

En general, esto requerirá de un estudio detallado del proceso de fabricación total: desde fusión de la carga (incluyendo gasto de energía, eficiencia y pérdidas de metal), tratamiento (comprendiendo procedimientos de modificación e inoculación), hasta limpieza e inspección de los productos terminados.

En todas las etapas del programa, serán necesarias evaluaciones económicas, desde el punto de vista consumo de materiales, para comparar y demostrar, en su caso, la viabilidad de usar el hierro esponja.

Como desarrollo del programa se estudiará la fabricación de piezas de Hierro Nodular. Para los procesos se considerarán los pasos característicos de cada uno dentro de los lineamientos siguientes:

- 1) Selección y Clasificación de Insumos (Cálculo de cargas).
- 2) Fusión.
- 3) Tratamiento.
- 4) Inoculación.
- 5) Colada.
- 6) Limpieza.
- 7) Tratamiento Térmico (Opcional).

- 8) Maquinado.
- 9) Inspección.

Cada uno de estos pasos será examinado en detalle-
utilizando las siguientes variables:

- Horno de Fusión.

- Inducción de alta frecuencia sin núcleo
y de 30 Kgs para la obtención de Hierro-
Nodular.

- Caracterización de la carga.

- Porcentaje de pelets.
- Chatarra y retornos de fundición.

Como variables dependientes, se considerarán:

- Práctica de fusión (energía de fusión y-
tiempo).
- Práctica de tratamiento.
- Práctica de inoculación.
- Práctica de tratamientos térmicos.
- Propiedades de piezas coladas (físicas,-
mecánicas)
- Costo del Hierro (Consumo de Materiales).

Hierro Nodular.-

Como se mencionó anteriormente, la producción de -
Hierro Nodular en México es relativamente nueva, por lo
que el número de empresas que lo producen es reducido -

(25 aproximadamente).

La producción es del orden de 25-30 mil toneladas-
anuales unicamente, sin embargo, la utilización de este
material ha ido en continuo ascenso por el hecho de que
es un sustituto adecuado de productos de hierro malea-
ble, gris y aceros forjados.

La producción de Hierro Nodular será estudiada en
dos hornos de inducción sin núcleo de 30 Kg de capaci-
dad.

Caracterización de la Carga.-

Considerando el alto precio de la chatarra de ace-
ro en México, este programa intentará reemplazar chata-
rra clasificada con pelets.

Típicamente, la chatarra se carga en una relación-
de 20 a 50%; el resto está formado por chatarra de hie-
rro, arrabio y retornos de fundición (de 30-50%).

Se tratará de utilizar varias fracciones de pelets
sustituyendo a la chatarra (10 a 75% del total de chata-
rra cargada). Un detallado balance de masa será lleva-
do a cabo a lo largo de todo el estudio así como la ---
energía requerida para transformar la carga en metal lí-
quido.

La caracterización de los pelets se prevee como --
una tarea difícil. Se tratará de obtener muestras de
diferentes proveedores (principalmente de HYLISA) y se
estudiarán los efectos de la composición de elementos -

no-metálicos; su distribución, así como el tamaño de pelet y sus propiedades mecánicas.

Práctica de fusión.-

- Orden de carga de los componentes y adiciones durante la fusión.
- Cantidad de escoria obtenida.
- Tiempo requerido para la fusión de carga y sobre calentarla.
- Energía requerida para la fusión, en función de la relación carga.

Práctica de Tratamiento.-

Se estudiará y determinará la cantidad de agente nodulizante requerido para la obtención del hierro dúctil en base al análisis químico del metal base y al proceso de obtención Sandwich.

Práctica de Inoculación.-

Esta fase es importante para asegurar que la forma, distribución y cantidad de grafito sea la adecuada para las fundiciones de hierro gris y dúctil.

Práctica de Tratamientos Térmicos.-

Los hierros grises son muy raramente tratados. En

cambio, los hierros dúctiles son más comúnmente tratados térmicamente para producir una matriz con estructura metalográfica más deseable.

Propiedades de las piezas fundidas.-

Cada una de las pruebas deberá satisfacer estándares específicos de:

- Resistencia a la tracción.
- Módulo de elasticidad.
- Porcentaje de Alargamiento.
- Dureza.

Con objeto de determinar estas propiedades, se realizarán pruebas específicas con estándares ASTM reproduciendo prácticas convencionales. Considerando que la estructura no representa una propiedad específica, ésta se dará normalmente como una indicación de la calidad, por lo que este término será empleado a través de todo el estudio proporcionando información sobre las variaciones de los procesos. Determinando el tipo de matriz obtenida, forma y tamaño del nódulo, posibles defectos, etc.,- bajo condiciones de colada y con tratamiento térmico.

B) Descripción de los materiales y equipo que involucra el programa.

B.1) Equipo de Fusión.

B.1.a) Horno de Inducción.-

El horno de inducción de alta frecuencia está instalado en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería (edificio anexo), concretamente en la zona de fundición. Sus características principales son las siguientes:

Marca AJAX MAGNETHERMIC CO. de 30 Kw. de capacidad de generación nominal, con 400 volt. en las terminales de salida que proporciona una frecuencia de 4200 Hz.

El horno en sí, consiste de: Una unidad motogeneradora de energía eléctrica de alta frecuencia y dos crisoles además del conjunto de elementos de protección y acoplamiento.

La máquina es una estructura vertical enfriada por agua, construída de placas de acero soldado, consistente de un motor, de un generador de alta frecuencia, de un extractor de calor integral aletado de cobre. Todo el conjunto tiene una funda que confina el aire y protege a la unidad del polvo y la contaminación del exterior. El rotor del motor así como el del generador están montados en una misma flecha. Tanto el motor como el generador cuentan con dos tapas: una inferior y otra superior. La tapa superior del motor está sujeta-

a la parte alta de la estructura; mientras que el estator del generador se sujeta a la estructura por medio de su tapa inferior.

El motor es de inducción, de 50 Hp, trifásico, diseñado para operar a 50/60 Hz. tiene dos polos con una velocidad de operación de 3550 r.p.m. en sistema de 220 volts. nominales entre fase y fase y con un factor de potencia de 0.85.

Este motor impulsa el rotor del generador que produce el tipo y la cantidad de potencia para lo que fue diseñado.

El rotor del motor y del generador están montados en una flecha común, en posición vertical.

El hecho de que la unidad moto-generadora esté en posición vertical hace posible la reducción del área de instalación, sin que por esto obstaculice el acceso a todos los elementos del conjunto.

La fuente de poder está cubierta por bastidores de lámina de acero, atornilladas al armazón de acero estructural, de tal modo que puede desarmarse fácilmente, dejando la unidad y todos sus componentes (controles y demás dispositivos) libres para fácil mantenimiento; el panel pesa entre 10 y 12 Kg.

La puerta delantera cuenta con interruptores que evitan que el generador opere si las puertas no se encuentran bien cerradas. La estructura protectora del generador sirve de soporte a todos los elementos de control y manejo del conjunto.

La unidad moto-generadora cuenta con un sistema de enfriamiento combinado de agua y aire. El enfriamiento se obtiene de un ventilador doble de alta capacidad, -- montado sobre la misma flecha del motor. El aire, además de circular por el entrehierro actúa sobre un intercambiador de calor fabricado con tubo de cobre de paredes delgadas, dentro del cual circula agua que proviene del sistema de enfriamiento. La presión mínima del --- agua requerida es de 2.2 Kg/cm^2 . Esta presión en el - presente caso requiere de la instalación de una bomba - apropiada.

La presión media del agua de enfriamiento en operación deberá ser 3.16 Kg/cm^2 .

Sistema de Enfriamiento.- El sistema de enfria--- miento del horno de inducción suministra de agua a la unidad moto-generadora, capacitores, transformador de - alta frecuencia y crisoles uno y dos. Es un circuito - abierto, se le llama así ya que el agua está en contac- to con el aire, y las partes de las que está compuesto- son las siguientes:

- 1) Una torre de enfriamiento por evaporación y ae- ración, la cual consta de cuatro platos con 41- barrenos cada uno.
- 2) Dos tanques de almacenamiento de agua, los cua- les tienen un recubrimiento con pintura antio- rrosiva, debiendo estar siempre limpios y cerra- dos.
- 3) Dos bombas centrífugas. Una bomba está acciona

da por un motor trifásico de 5 HP 1715 r.p.m. - con lubricación por goteo natural. La otra bomba es accionada por un motor monofásico de 1/2 HP.

- 4) Un manómetro, el cual nos indica la presión de entrada del agua de enfriamiento al horno.

Crisol.-

Construcción.- Nuestro sistema cuenta con un par de crisoles del tipo que se denomina "prefabricados".

El calificativo de prefabricado se deriva del hecho de que este crisol cuenta con un "pozo" construido de material refractario primario lo suficientemente resistente para servir por un lado de apoyo del material refractario definitivo y por otro para contener las uniones a fin de que el conjunto pueda apoyarse sobre las bases de un sistema de volteo.

Este pozo de material refractario se conoce generalmente con el nombre de "respaldo".

Alrededor de este pozo por la parte externa se fija la bobina de calefacción, sobre unas anclas que se encuentran incrustadas en el mismo.

Dicho respaldo tiene los siguientes objetivos:

- 1) Proteger la bobina de calefacción de daños que pudieran ser causados por golpes desde el exterior.
- 2) Recibir en su interior el recubrimiento del refractario para altas temperaturas.

- 3) Ser el sostén de todo el conjunto.
- 4) Contener todos los elementos de manejo, tales - como:
 - a) Ancla o asa para la sujeción de la garrucha para voltear el crisol en caso de sangría o carga del mismo.
 - b) El eje de rotación del crisol.
 - c) Anclas de fijación de la bobina.

Como podemos ver, todas sus funciones inciden básicamente en resaltar la necesidad de que sea resistente a esfuerzos mecánicos. Por ello su capacidad de aislamiento es baja. El material con que está construido es una mezcla especial de sílice-cuarzo con amalgama de materiales ferrosos.

En general, los hornos de Ajax Magnethermic para pequeñas capacidades se suministran con este tipo de pozos montados sobre los soportes y ensamblados con la bobina de calefacción, listos para recibir el recubrimiento refractario por el interior.

Existe diversidad de tipos de refractario que pueden ser aplicados al interior del pozo, cuya selección fundamentalmente depende del tipo de trabajo a realizar y del metal que será fundido en él. En este caso, se utilizó refractario básico de zirconio, marca Taylor -- Zircón 717 - D - Ramming. Suministrado por Amerrey Ingenieros, S. A.

Las dimensiones del crisol ya con el recubrimiento son:

Diámetro interno 16 cm.
Profundidad 30 cm.
Volúmen 6.1 litros.

B.1.b) Equipo complementario.-

La cuchara de tratamiento tendrá una capacidad - útil de 30 Kg., y estará adaptada para poder ser usada- como cuchara de tratamiento o reacción del proceso Sand wich.

Tendrá una coraza de acero soldado y con un recu- brimiento refractario igual al del Horno de Fusión (ba- se Zirconio).

Las dimensiones de la misma son las siguientes:

Diámetro interno 20 cm
Diámetro externo 22.5 cm
Altura interna 30 cm
Altura externa 37.5 cm
Volúmen 9.4 lts.

Las dimensiones mencionadas fueron pensadas para - minimizar las pérdidas excesivas de calor por conduc- ción y radiación principalmente y así los 30 Kg de me- tal fluido ocuparán aproximadamente las tres cuartar -- partes del volúmen asignado.

Hay que hacer mención que el volúmen destinado al agente nodulizante y a la capa de recortes de acero fue fué considerado dentro del cálculo del volúmen total.

Para ésto, se pensó en una cavidad que fuese lo suficientemente profunda para que el agente retardase la velocidad de reacción con el metal líquido, debido principalmente a que por las limitaciones del equipo no es posible llenar la cuchara rápidamente en su totalidad.

Las dimensiones de la cavidad son las siguientes:

Area total de contacto metal líquido-agente.....

1.57 cm².

Profundidad de la Hendidura..... 5 cm.

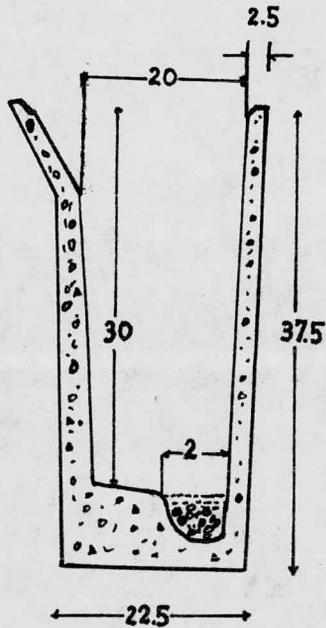
Volúmen total aprovechable 7.85 cm³.

Asímismo, para minimizar las pérdidas de calor provocadas al reaccionar el agente con el baño metálico se seleccionará pedacería de lámina de acero cuyo espesor variará de 1/16 a 1/8 de pulgada como máximo, y con área máxima de 1 cm², y en cantidades aproximadas del 2% de la carga metálica total. (Ver FIG. V.1)

La cuchara de vaciado consta de un crisol sencillo de vaciado de 20 Kgs de capacidad.

Se contará con moldes estándar de la Ford Motor Co. Los cuales son de arena sílica subangular para fundición con una pureza de 95% SiO₂, con una humedad aproximada al 4%, aglutinada con bentonita cálcica y con una granulometría de 50 mallas.

Estos moldes son fabricados en "seco" con maquinas apisonadoras automáticas. Las piezas que se obtendrán de los mismos serán para pruebas físicas como metalografía, dureza y resistencia a la tracción.



DIMENSIONES DE LA CUCHARA DE
TRATAMIENTO

FIGURA V.1

Las dimensiones de los moldes para probetas de resistencia a la tracción son las siguientes:

Dos probetas cilíndricas por molde, con diámetro -
interno cada una de 1.325 pulgadas (3.37 cm)
Altura interna5 pulgadas (12.7 cm)
Volúmen aprovechable 0.1133 lts
(113.3 cm³)
Capacidad aproximada0.55 Kgs por probeta.
Espesor mínimo de Arena2.2 cm

Para las pruebas de dureza y metalografía, se contará con un molde de las siguientes dimensiones:

Capacidad 7 Kgs.
Volúmen Interno 1.092 dm³.
Base Interna Inferior 15.2 x 2.5 cm.
Base Interna Superior 15.6 x 5.9 cm
Altura Interna 12 cm

La arena con que se trabajará será de arena sílica para fundición suministrada por Básicos Siderúrgicos, - S. A. y de especificaciones similares a la utilizada -- por Ford Motor Co.

En este caso, se utilizará también como aglutinante bentonita cálcica en una proporción del 6%, y como aditivo carbón marino en cantidades del 4% de la masa - total de arena.

El porciento de humedad con que se trabajará, también será del 4%.

La utilización de esta arena está enfocada primordialmente para la fabricación de piezas fundidas, en forma de lingotes rectangulares, que tendrán utilidad práctica futura para ensayos de emergencia y auxiliares.

Tanto los moldes como la cuchara de tratamiento y el crisol de vaciado serán precalentados con un soplete ordinario de gas comercial. (Ver FIG. V.2)

B.2) Equipo de Medición.

B.2.a) Temperatura.-

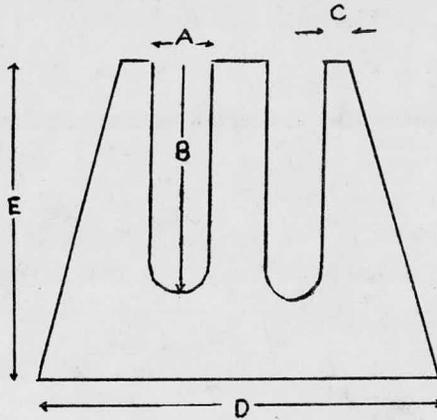
En fundiciones, es recomendable la utilización de un pirómetro óptico, pero debido a la inexactitud de sus mediciones y a su difícil calibración y costo, se optará por la utilización de un termopar de inmersión, el cual tiene como ventaja principal la exactitud en sus determinaciones, su fácil manejo, construcción, así como sencilla calibración y bajo costo.

Dadas las características del proceso, el termopar ideal de operación será del tipo platino-platino-rodio-10%, el cual determina una temperatura máxima de 1700°C y tiene una sensibilidad de 0.0095 milivolts/°C.

El termopar contará con separadores de porcelana bifilares, un termopozo de cuarzo y un cable compensador de 5 metros.

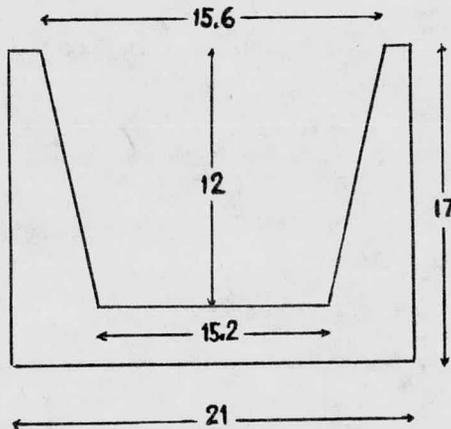
El aparato registrador, marca Hewlett Packard, consta de un graficador de rollo, con escalas en volts y milivolts, así como con un regulador de velocidades

MOLDE PARA RESISTENCIA A LA TRACCION



- a) Diámetro interno: 8.37 cm
- b) Altura interna: 12.7 cm
- c) Espesor mínimo de arena: 2.2 cm
- d) Longitud de la Base del Molde: 21 cm
- e) Altura externa del Molde: 17 cm

MOLDE PARA PRUEBAS DE DUREZA Y METALOGRAFIA



MOLDES UTILIZADOS PARA OBTENER PIEZAS QUE SE SOMETERAN A PRUEBAS FISICAS.

FIGURA V.2

de desplazamiento del gráfico.

La calibración del termopar se efectuará con una temperatura estándar. La escala recomendable de operación para el proceso será de 60 mV. Se hará una compensación de 20°C por efecto de la punta fría.

B.2.b) Carga.-

Para poder medir el peso de la carga y ferrosaleantes, se utilizará una báscula sencilla con capacidad de 10 Kg. y una exactitud de ± 2 gs.

B.3) Materiales.

B.3.a) Metal.-

Se utilizarán 150 Kg. de chatarra de fundición de primera con un costo aproximado de 1700 \$/Ton y suministrado por chatarrerías comerciales.

Asimismo 500 Kg. de fierro esponja suministrado -- por HYLSA Puebla, con un costo de 1700 \$/Ton de Fe total contenido.

Los recortes de lámina de acero se adquirirán de los sobrantes existentes en el taller mecánico del anexo de la Facultad de Ingeniería UNAM.

B.3.b) Ferroaleaciones y Agentes:-

El principal proveedor será Vulcano, S. A., y los ferrosaleantes y agentes comerciales que se adquiri-

rán son:

- Agente Carburizante "Carborum" 4.75 \$/Kg.
- Agente Desulfurante: Deporo en forma de Briquet--
ta: 5.20 \$/Kg.
- Agente Inoculante del No. 4: 19.00 \$/Kg.
- Agente Nodulizante: Noduloy 9-C 34.00 \$/Kg.
- Fe-Si 75% : 20.65 \$/Kg.
- Fe-Si 45%: 14.30 \$/Kg.
- Fe-Mn 75% : 20.45 \$/Kg.

En la tabla V.1 se enuncia la composición química específica de los materiales descritos.

C) Diseño Experimental.

C.1) Objetivo.-

Se pretenderá encontrar la optimización, condiciones y dificultades técnicas del proceso en estudio, determinando los efectos que aparecen en éste, en el momento de variar las proporciones de los dos tipos de materia prima, chatarra y Fe-esponja, disponibles para la carga inicial.

C.2) Esquema y explicación de la ruta propuesta de experimentación.-

Como se menciona en el apartado V.A, el fierro esponja irá aumentando en dicha carga inicial hasta llegar a una completa sustitución de la chatarra, pudién--

COMPOSICION QUIMICA DE LOS FERROALEANTES Y AGENTES QUE SE UTILIZARAN

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ca	Ce	Mg
COMPOSICION DEL HIERRO NODULAR A OBTENER	3.73	2.65	0.35	0.03	0.015	0.10	-	-	-	-
CHATARRA	2.04	1.52	0.35	0.03	0.06	-	-	-	-	-
Fe ESPONJA	2.47	3.4	-	0.05	0.02	-	-	-	-	-
Fe Si	0.10	75.0	0.40	0.035	0.025	-	-	-	-	-
Fe Mn	7.5	1.20	73.0	0.35	0.05	-	-	-	-	-
INOCULANTE	32.5	29.0	7.25	-	-	-	-	-	-	-
CARBURIZANTE	93.0	-	-	-	0.58	-	-	-	-	-
NODULIZANTE	-	46.0	-	-	-	-	1.0	1.25	0.63	9.25
DESULFURANTE	-	-	-	-	-	-	-	50.0	-	-

TABLA V.1

- 104 -

dose entonces comparar y evaluar esta posible opción, -
tomando como punto de referencia el método convencional.

También es importante recalcar que la ruta de expe
rimentación que se cita más adelante puede ser susceptible
a modificaciones en función de los obstáculos que -
técnicamente se presenten y que de manera real hagan --
impráctica la ejecución de alguna(s) de las partes cons
tituyentes de la ruta.

Así pues, se citará en primera instancia el esque-
ma del camino "teórico" a seguir en esta investigación-
por considerarlo el más directo y ajustado al fin glo--
bal perseguido.

ESQUEMA QUE MUESTRA LA RUTA DE EXPERIMENTACION PROPUESTA

1. CHATARRA $\xrightarrow{\text{H.I.}}$ L

2. CHATARRA $\xrightarrow{\text{Inoc.}}$ G₁^{*}
 $\xrightarrow{\text{Inoc. Nod.}}$ N₁^{*}

3. Fe-esponja $\xrightarrow{\text{Inoc.}}$ G₂^{*}

4. CHATARRA + Fe-esponja (25%) $\xrightarrow[\text{Nod.}]{\text{Inoc.}}$ N₂^{*}

5. CHATARRA + Fe-esponja (50%) $\xrightarrow[\text{Nod.}]{\text{Inoc.}}$ N₃^{*}

6. CHATARRA + Fe-esponja (75%) $\xrightarrow[\text{Nod.}]{\text{Inoc.}}$ N₄^{*}

7. Fe-esponja (100%) $\xrightarrow[\text{Nod.}]{\text{Inoc.}}$ N₅^{*}

Acotaciones.-

- L - Lingote obtenido de fusión de Chatarra.
- G - Muestra de Hierro Gris.
- N - Muestra de Hierro Nodular.
- Inoc. - Práctica de Inoculación.

Nod. - Práctica de Nodulización.

* - Pruebas Químicas y Físicas.

- Análisis Químico.

- Metalografía.

- Dureza.

- Resistencia a la tracción, límite elástico y % de alargamiento.

Explicación de la Ruta Propuesta.-

1) En esta primera prueba se observarán exclusivamente las condiciones de operación del horno en la fusión de chatarra y el efecto que ejerce la forma de la carga en el desarrollo de ésta, convirtiéndose estos parámetros en constantes a lo largo de la fase experimental.

2) Aquí se practicarán, aunque no se especifiquen en el diagrama, carburización, desulfuración, adición de ferroaleaciones, así como la determinación de la cantidad de escoria siendo esta última de especial significancia para discutir en la parte final de este trabajo.

Además se llevarán a cabo las prácticas de inoculación y nodulización. Respecto a la inoculación, cabe aclarar que el obtener hierro gris por separado servirá por un lado, para definir la efectividad de esta operación, pues ésta repercutirá de manera importante en la calidad del hierro Nodular buscado y, por el otro, tener un patrón de comparación cuando se haga esto mismo

con el fierro esponja.

En lo que toca a la nodulización, se encontrará el rendimiento del agente nodulizante.

Toda esta prueba, se considera el método convencional de fabricación del producto en estudio.

3) Al tomarse el fierro esponja como materia prima se verá si las operaciones mencionadas, a excepción de la nodulización, que se harán de igual manera que en el apartado anterior, arrojan resultados similares.

4, 5, 6 y 7) Antes de mencionar la meta a alcanzar en este conjunto de pruebas, se debe asumir como premisa que las prácticas de carburización, desulfuración, - etc., están bajo completo control. Siendo así, se puede decir que el orden ascendente en que se colocaron estos puntos, persigue la sustitución paulatina de la carga por el fierro esponja así como detectar los problemas técnicos que encierra.

Llegada la culminación de la pruebas, se podrá hablar concretamente de la carga que mayores ventajas mostró (carga óptima) en el transcurso de la fusión.

D) Modo de Realización de las Pruebas.-

En base a los resultados observados, que empezarán a consignarse en los incisos posteriores, fué necesario hacer cambios en el plan trazado originalmente, tratando de no perder el objetivo y sin alterar la esencia --

del estudio para que las conclusiones a las que se lleguen, se tomen en cuenta para futuros trabajos que versen sobre temas afines a éste.

En virtud de lo anterior se plasmará en el siguiente diagrama la ruta que resultó de las variaciones introducidas, subsecuentemente se discutirán las razones precisas que condujeron a éstas.

Las dos primeras pruebas se realizaron tal como se establecieron; en el número tres no fué posible fundir el fierro esponja debido a su baja conductividad térmica y eléctrica, siendo ésto consecuencia de su baja metalización, por lo que también se descartó el punto número siete.

Al llegar a la parte número cuatro, se notaron algunas características que hicieron pensar en otra prueba, la no. 5, que permitiera tener un control más estricto sobre una proporción menor de fierro esponja en la carga.

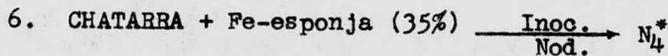
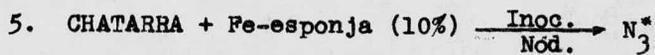
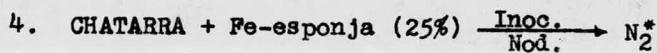
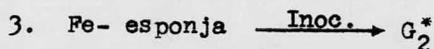
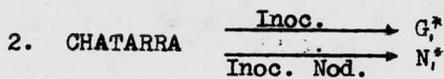
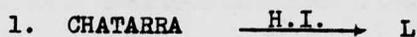
Por último, para aclarar algunas dudas surgidas en los puntos cuatro y cinco, se procedió a una prueba más, la no. 6, con una proporción mayor de fierro esponja.

Hecha la aclaración anterior, se continuará el desarrollo del estudio al entrar más en detalle con la descripción de cada una de las pruebas realizadas de acuerdo a:

Operaciones Pre-fusión.

a) Cálculo de cargas.

ESQUEMA QUE MUESTRA LA RUTA DE EXPERIMENTACION REALIZADA



- b) Acondicionamiento del equipo.
- c) Distribución de la materia prima en el crisol - del horno.

Operaciones Auxiliares.

- a) Carburización.
- b) Desulfuración.
- c) Adición de ferroaleaciones.
- d) Consumo de desoxidante.
- e) Inoculación y Nodulización.
- f) Determinación de la cantidad de escoria.
- g) Velocidad de enfriamiento.

Fusión. Características y limitantes.

- a) Comportamiento del horno al inicio, en y después de la fusión.
- b) Velocidad de fusión y la influencia que sobre ésta ejerce la carga.
- c) Perfil de temperaturas.

Enseguida se cita el desgloce de las pruebas.

1a. Prueba.

Operaciones Prefusión.

- a) Cálculo de cargas.

No procedía hacer ningún cálculo de cargas.

- b) Acondicionamiento del equipo.

Este acondicionamiento consistió en:

- Pre calentamiento del crisol del horno antes de 1-

niciar la operación para así incrementar su eficiencia,

- Precalentamiento del crisol de transferencia del metal hasta una temperatura de 1300°C , momentos antes del vaciado para evitar choques térmicos que hicieran salpicar peligrosamente al metal líquido.

- Precalentamiento de la cuchara de tratamiento, también hasta una temperatura de 1300°C , eliminando un decremento considerable de la temperatura de vaciado.

- Calentamiento ligero de los moldes para que no haya exceso de humedad, el que se presentaría por condiciones climatológicas. Esta rehumidificación ocasionaría, de nuevo, salpicaduras del metal líquido. El precalentamiento se hizo cuidando de no quemar la arena, pues ésto disminuiría sus propiedades originales.

Un soplete sencillo de gas natural fue utilizado como único equipo para lograr lo anteriormente detallado. Esta práctica fué repetida e imprescindible en el total de las pruebas.

c) Distribución de la materia prima en el crisol del horno.

En primer lugar, resulta relevante recalcar que la forma de presentación de la chatarra es como tuerca de desecho con un diámetro interno de $\frac{1}{2}$ " lo que permite -- que haya huecos ocupados por el aire, el cual presenta una elevada resistencia eléctrica convirtiéndose entonces en disipadores de calor inevitables. De esta manera, se colocó la chatarra en el interior del crisol del

horno compactándola hasta donde fue posible para así --
anular pérdidas adicionales de calor y por lo tanto de --
la eficiencia nominal del horno (80% mínimo).

Operaciones Auxiliares.

No se realizó ninguna de ellas, debido a que no --
fue necesario para lo que se perseguía de esta primera --
experiencia.

Fusión. Características y limitantes.

a) Comportamiento del horno al inicio, en y des---
pués de la fusión.

Se visualizará la intención de este renglón, al ob --
servar la tabla V.2, en la que se resumen los valores --
registrados por los controles diversos del tablero de --
la fuente de poder.

HOJA DE CONTROL

Se puede decir que se requirió de un período de --
tiempo relativamente corto, para el inicio de la fusión --
de parte de la carga, notándose decremento de la poten --
cia momento después de dar principio a la operación; no --
obstante, a partir de entonces se registró un aumento --
uniforme de potencia, hasta alcanzarse la fusión de la --
parte más profunda de la carga (1); sin variaciones im --
portantes continuó la fusión consumiendo poco más del --
doble del primer lapso de tiempo llevar a estado líqui --
do el total de la carga (2) y por último tardó igual --

Tiempo desde el inicio de operación, hrs	Control del horno	Control de voltaje	Control de capacitores	Volts	Amperes	Kilowatts	Kilovars	
							Lag	Lead
0:00	1	6	0	150	75	4	-	6
0:16	1	6	0	150	70	3	-	5
0:54	1	6	0	200	75	5	-	9
1:00	1	12	0	290	75	9	-	13
1:03	1	12	0	330	75	12	-	12
1:06	1	12	0	400	62	14.5(1)	-	8
1:10	1	12	0	400	54	15	-	7
1:29	1	12	0	400	46	13.5	-	7
1:39	1	12	0	400	42	12	-	18
2:06	1	8	4	400	72	11	-	16
2:38	1	10	4	400	68	12	-	6
3:15	1	12	2	400	54	14	-	3
3:21	1	13	2	400	48	14.5(2)	-	8
3:42	1	13	4	400	60	16	-	10
4:17	1	9	8	400	72	16	-	15
4:29	1	15	5	400	54	17	-	6
5:03	1	11	11	400	72	16	-	15
6:10	1	12	11	400	64	15 (3)	-	14

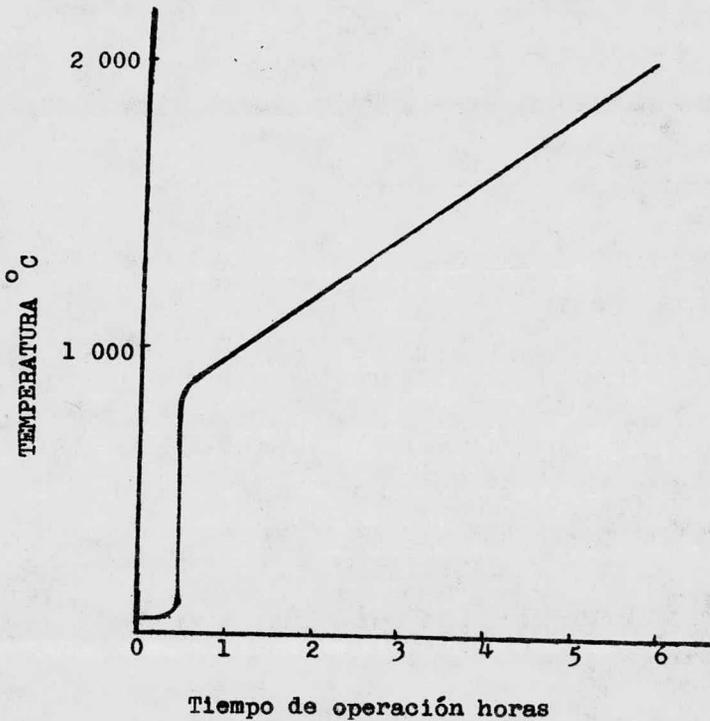
(1) Inicio de la fusión de la parte inferior de la carga.

(2) Fusión del total de la carga.

(3) Vaciado.

TABLA V.2

- 111 -



PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA PRUEBA NO. 1

FIG. V.3

tiempo que el existente entre (1) y (2) alcanzar la temperatura de vaciado (3), o sea, 1 550°C.

A lo que se puede atribuir este tiempo de operación poco usual, es, entre otros factores, a:

- El horno no estaba en óptimas condiciones (la capacitancia en el horno no es la adecuada).

- La forma de la carga (este punto se explicitará aún más en el siguiente inciso).

b) Velocidad de fusión y la influencia que sobre ésta ejerce la carga.

Un factor del cual dependió fuertemente la velocidad de fusión es, sin duda, la forma de la carga, pues, como ya se dijo, el hecho de que no representará una masa compacta permitió disipación de energía eléctrica y calorífica dentro del mismo horno y le restó eficacia.

c) Perfil de temperaturas.

Como complemento, en la página anterior se ilustró la relación que hubo entre la temperatura del baño y el tiempo de operación.

2a. Prueba.

Operaciones Prefusión.

a) Cálculo de Cargas.

Capacidad estimada del horno: 30 Kg.

Carga: 100% Chatarra

Balance de Carbón:

Requerido $\Rightarrow 30 (0.03725) = 1.1175$ Kg.

Carga: Chatarra 30 $(0.0204) = 0.612$ Kg.

Faltante 0.5055

Balance de Silicio:

Requerido $\Rightarrow 30 (0.0265) = 0.795$ Kg.

Chatarra 30 $(0.0152) = 0.456$ Kg.

Faltante 0.339 Kg.

Balance de Manganeso:

Requerido \Rightarrow 30 (0.0030) = 0.09 Kg

Chatarra 30 (0.0035) = 0.105 Kg

Está en el límite superior.

Balance de Fósforo:

Requerido \Rightarrow 30 (0.0005) = 0.015 Máx.

Chatarra 30 (0.0003) = 0.0009 Kg.

Está en el rango.

Balance de Azufre:

Requerido \Rightarrow 30 (0.00015) = 0.0045 Kg.

Chatarra 30 (0.0006) = 0.018 Kg.

Sobrante: 0.0135 Kg.

Carburizante: 93% Carbón fijo.

98% eficiencia.

$$\frac{0.5055}{(0.93)(0.98)} = 0.5540 \text{ Kg.}$$

Fe Si: 75%

Eficiencia: 85%

$$\frac{0.339}{(0.75)(0.85)} = 0.532 \text{ Kg.}$$

Desulfurante:

Recomendación de fabricante:

0.2% de desulfurante por 0.1% de azufre a eliminar.

% Desulfurante		% Azufre
0.2	-	0.1
x	-	0.45

$$x = 0.90\%$$

Cantidad de desulfurante: $(0.009)(30) = 0.270$ Kg.

Inoculante:

Recomendación de fabricante:

Para Hierro gris: 0.15%

$$15 (0.0015) = 0.023$$

Para Hierro Nodular: 0.20%

$$15 (0.0020) = 0.030$$

Nodulizante:

$$\% \text{ aleación} = \frac{\% \text{ Mg residual}}{\frac{\% \text{ Aleación}}{100} \times \frac{\text{eficiencia}}{100}}$$

$$= \frac{0.05}{\frac{9.25}{100} \times \frac{80}{100}} = 0.676\%$$

Cantidad de Nodulizante: $(0.676)(15) = 0.102$ Kg.

b) Acondicionamiento de equipo.

El acondicionamiento fue el mismo que en la prueba anterior.

c) Distribución de la materia prima en el crisol.

La distribución fue la misma que en la prueba anterior.

Operaciones Auxiliares.

a) Carburización.

La práctica de carburización se hizo agregando el agente al baño metálico a una temperatura aproximada-

Material		C	Si	Mn	P	S	Al	Ca	Ce	Mg	Canti- dad, kg.
% ,elementos											
Chatarra		2.04	1.52	0.35	0.03	0.06	-	-	-	-	30.0
Fe Si		0.10	75.0	0.40	0.035	0.025	-	-	-	-	0.532
Fe Mn		7.5	1.20	73.0	0.35	0.05	-	-	-	-	-
Inoculante	Hierro gris	32.5	29.0	7.25	-	-	-	-	-	-	0.023
	Hierro nodular	32.5	29.0	7.25	-	-	-	-	-	-	0.030
Nodulizante		-	46.0	-	-	-	1.0	1.25	0.63	9.25	0.126
Desoxidante		-	-	-	-	-	100	-	-	-	-
Carburizante		93.15	-	-	-	0.58	-	-	-	-	0.554
Desulfurante		-	-	-	-	-	-	50 *	-	-	0.270
Composición calculada para hierro gris y nodular		3.73	2.65	0.35	0.03	0.015	-	-	-	-	30
* Como Ca C O,											

- 119 -

TABLA V.3

de 1 200°C. Este modo de carburizar definitivamente no fue el mejor, pues como se puede observar, el contenido de carbón en los productos obtenidos no tuvo ningún incremento, ya que se presupone que debido a la temperatura en que se añadió el agente, existió una combustión completa de este elemento, y si además se consideran -- las pérdidas por decarburización de la materia prima, - se puede notar la disminución en % de original.

b) Desulfuración.

Se efectuó el suministro del agente desulfurante simultáneamente con la carga siguiendo instrucciones del fabricante. De nueva cuenta, no fue el momento preciso de llevar a cabo la operación, pues el Ca CO_3 principal constituyente, se descompuso mucho antes de reaccionar con todo el azufre a eliminar.

c) Adición de Ferroaleantes.

Aquí, la adición de FeSi se hizo sobre el baño ya líquido para evitar que se oxidara, lográndose un resultado aceptable.

d) Consumo de Desoxidante.

El desoxidante fue agregándose conforme el baño se tornaba más agitado, por la cantidad de óxido de la chatarra, siendo un total de 0.400 Kg lo consumido en este renglón.

e) Inoculación y Nodulización.

- Inoculación.

Los modos de esta operación se especificarán --- para la fabricación de hierro gris y la del Hierro Nodular.

Para hierro gris, se inoculó sobre el chorro de metal líquido al bascular el horno y llenar el crisol de transferencia.

Para Hierro Nodular, se inoculó después del tratamiento del metal base líquido con magnesio (nodulización) al vaciar de la cuchara de tratamiento al molde).

- Nodulización.

El método de nodulización empleado fue el llamado "Sandwich", descrito en capítulos precedentes.

El metal líquido con temperatura cercana a los --- 1 550°C se vació directamente del horno a la cuchara de tratamiento, omitiéndose el uso del crisol de transferencia, para no ver disminuida la eficiencia de esta -- práctica, ni las propiedades esperadas.

El hierro tratado (nodulizado e inoculado) llenó - entonces los moldes, dispuestos para ello.

f) Determinación de la cantidad de escoria.

Como se sabe, la menor densidad de la escoria - con respecto a la del metal líquido, hace que la primera permanezca en la parte superior del baño y por lo -- tanto, el removerla resulta sencillo, usando un rastri- llo metálico.

La cantidad de escoria resultante fue de 0.350 Kg.

g) Velocidad de enfriamiento.

Las piezas ya obtenidas permanecieron en los moldes hasta llegar a la temperatura ambiente por lo que se asume que el enfriamiento fue al aire.

Fusión. Características y limitantes.

a) Comportamiento del horno al inicio, en y después de la fusión.

El comportamiento del horno fué muy semejante al que tuvo en la primera prueba. No hay comentario al respecto. (Ver tabla V.4, pág. 123)

b) Velocidad de fusión y la influencia que sobre ésta ejerce la carga.

No hay modificaciones con respecto a la experiencia anterior.

c) Perfil de Temperaturas.

El perfil de temperaturas correspondiente aparece en la figura V.4, en la página 124.

3a. Prueba.

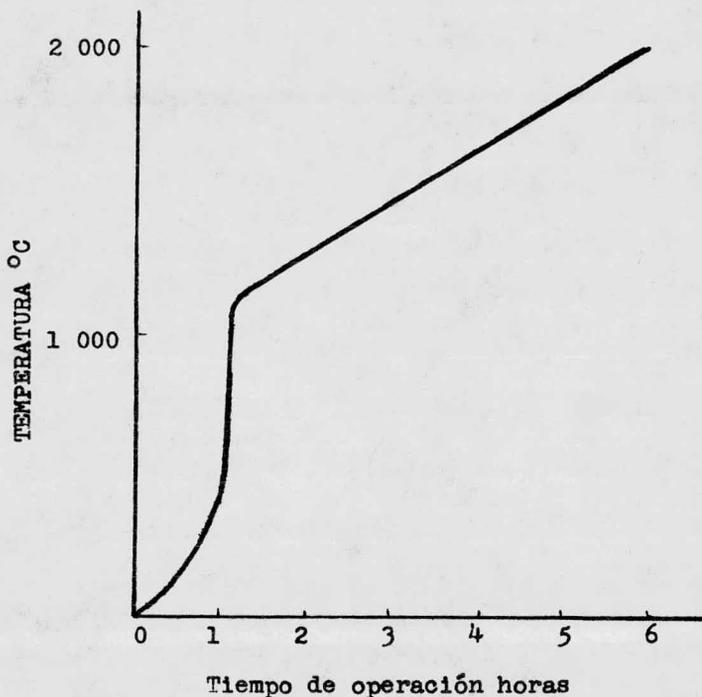
Una de las causas principales por la que se alteró el plan de trabajo original radicó precisamente al llegar a este renglón, pues el haber cargado el horno únicamente con fierro esponja de tan baja metalización, no permitió de ningún modo la fusión, aún y cuando la car-

Tiempo desde el inicio de operación, hrs	Control del horno	Control de voltaje	Control de capacitores	Volts	Amperes	Kilowatts	Kilovars	
							Lag	Lead
0:00	1	6	0	150	75	4	-	6
0:15	1	6	0	150	70	3	-	5
0:55	1	6	0	200	75	5	-	9
0:58	1	12	0	230	75	7	-	11
1:00	1	12	0	290	75	10	-	13
1:02	1	12	0	330	75	12	-	12
1:05	1	12	0	400	62	15(1)	-	8
1:07	1	12	0	400	54	14	-	7
1:30	1	12	0	400	46	12	-	7
1:40	1	12	0	400	42	11	-	18
2:05	1	8	4	400	72	12	-	16
2:40	1	10	4	400	68	13	-	6
3:15	1	12	2	400	54	15(2)	-	3
3:40	1	13	4	400	60	16	-	10
4:20	1	9	8	400	72	16	-	15
4:30	1	15	5	400	54	17	-	6
5:05	1	11	11	400	72	16	-	15
6:25	1	12	11	400	64	16(3)	-	14

(1) Inicio de la fusión de la parte inferior de la carga.

(2) Fusión del total de la carga.

(3) Vaciado.



PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA PRUEBA NO. 2

FIG. V.4

ga no daba lugar a espacios vacíos. Por ésto tuvo que omitirse además el punto 7.

4a. Prueba.

Operaciones Prefusión.

a) Cálculo de Cargas.

El método de cálculo fue el mismo que se había empleado. Se adjunta planilla correspondiente a la tabla V.5

Material %,elementos	C	Si	Mn	P	S	Al	Ca	Ce	Mg	Cantidad, kg.
Chatarra	2.04	1.52	0.35	0.03	0.06	-	-	-	-	22.5
Fe-esponja	2.47	3.4	-	0.05	0.02	-	-	-	-	7.5
Fe Si	0.10	75.0	0.40	0.035	0.025	-	-	-	-	0.518
Fe Mn	7.5	1.2	73.0	0.35	0.05	-	-	-	-	0.018
Inoculante	32.5	29.0	7.25	-	-	-	-	-	-	0.060
Carburizante	93.0	-	-	-	0.58	-	-	-	-	0.56
Nodulizante	-	46.0	-	-	-	1.0	1.25	0.63	9.25	0.216
Desulfurante	-	-	-	-	-	-	50.0 *	-	-	0.270
Composición del hierro nodular obtenido	3.73	2.65	0.35	0.03	0.015	-	-	-	-	30.0

* Como Ca C O₂

TABLA V.5

b) Acondicionamiento del equipo.

Se hizo de igual manera que en las pruebas anteriores.

c) Distribución de la materia prima en el crisol.

Se dispuso en primer término a la chatarra en el crisol del horno, manteniéndose así hasta que llegada la fusión del total de la carga, se fue alimentando de manera continua al fierro esponja lográndose así llevarlo al estado líquido. Es necesario denotar que la alimentación continua debe ser de pequeñas cantidades del material.

Operaciones auxiliares.

a) Carburización.

En esta ocasión, el agente carburizante, en base a la experiencia anterior, se cargó simultáneamente con la carga, con el fin de que conforme se vaya fundiendo el metal, el carbón se fuera aleando. No obstante, los resultados no fueron mejores que en la prueba pasada.

b) Desulfuración.

El agente se añadió sobre el baño líquido notándose una leve mejoría en su acción.

c) Adición de ferroaleaciones.

La adición ahora de Fierro y manganeso se hizo del mismo modo que la de FeSi, explicada en la prueba No. 2.

d) Consumo de desoxidante.

Dado el alto grado de oxidación que muestra esta nueva carga, la cantidad de aluminio se vió acrecentada si se compara con la de la segunda prueba, ya que se consumieron 2 Kg. en total.

e) Determinación de la cantidad de escoria.

La escoria, también se vió aumentada (otra vez la baja metalización), removiéndose 3 kg de ésta. No debe perderse de vista este dato pues será útil en la discusión final.

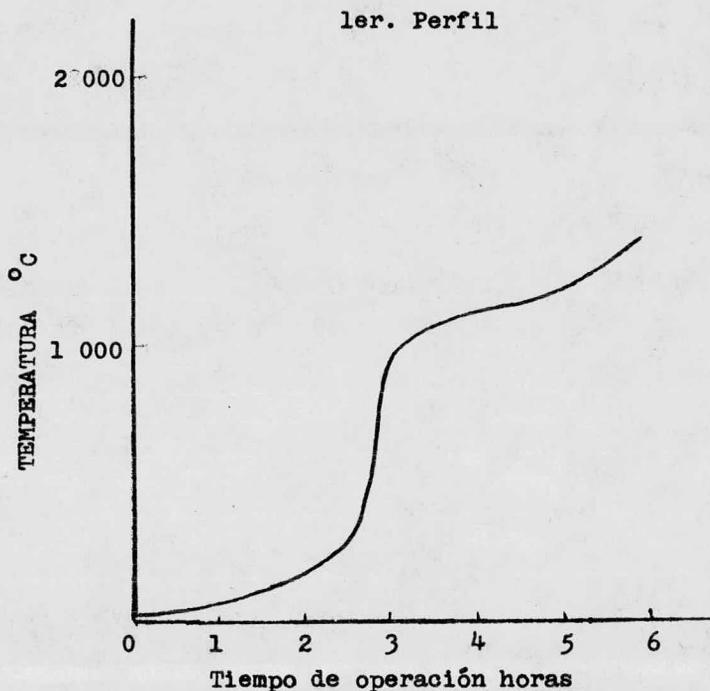
f) Velocidad de enfriamiento.

La severidad de enfriamiento fue la misma que en las pruebas anteriores.

Fusión. Características y limitantes.

a) Comportamiento del horno al inicio, en y después de la fusión.

El comportamiento del horno se vió alterado por haberse accionado de modo inesperado uno de los dispositivos de seguridad que detienen el funcionamiento del horno, al disminuir el gasto de agua en el sistema de enfriamiento del motor por haberse obstruido la manguera de suministro, restándose considerablemente la temperatura del baño, momentos antes de alcanzar la temperatura de vaciado (1550°C) ocasionando que aunque el horno se basculó de manera rápida, no se pudiera vaciar el horno completamente.



PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA PRUEBA NO. 4

FIG. V.5

Todo ésto obligó a realizar la refusión del mate---
rial, vaciándose ahora sí totalmente el horno. Obsérven
se las tablas siguientes V.6 y V.7. Nótese el mayor --
consumo de potencia al agregar fierro esponja.

b) Velocidad de fusión y la influencia que sobre ég
ta ejerce la carga.

La fusión de la chatarra ocurre sin variaciones no-
tables con respecto a las anteriores.

Lo que prácticamente influyó del fierro esponja en
la velocidad de fusión, no fue su forma sino su baja me-
talización que aminoró la temperatura del baño.

Tiempo desde el inicio de operación, hrs	Control del horno	Control de voltaje	Control de capacitores	Volts	Amperes	Kilowatts	Kilovars	
							Lag	Lead
0:00	1	7	0	150	80	3.0	-	9.0
3:00	1	5	0	290	78	7.5	-	14
3:02	1	5	0	300	75	8.0	-	15
3:05	1	6	4	360	75	9.5	-	18
3:20	1	7	4	400	74	10.5	-	18
3:25	1	7	2	400	75	10.5 (1)	-	19
5:00	4	10	2	400	70	15 (2)	-	15
5:10	5	11	4	400	72	18	-	14
5:15	6	11	8	360	78	18.5	-	13
3:25	6	16	5	400	75	22	-	10
5:50	6	16	11	330	75	22	-	5
6:00	6	20	11	310	75	20 (3)	-	2

(1) Inicio de la fusión de la parte inferior de la carga (constituida por chatarra).

(2) Fusión del total de la chatarra. Alimentación continua de Fe-esponja

(3) Fusión de la carga completa. Intento de vaciado.

Tiempo desde el inicio de operación, hrs	Control del horno	Control de voltaje	Control de capacitores	Volts	Amperes	Kilowatts	Kilovars	
							Lag	Lead
0:00	1	6	0	200	75	7	-	10
0:10	1	6	0	190	75	6	-	9
0:13	1	6	0	180	75	5	-	9
0:45	1	6	0	170	75	4.5	-	8.5
1:22	1	10	2	400	75	16(4)	-	8.0
1:25	3	15	2	400	64	22	-	5
1:30	4	15	1	400	75	25	-	6
1:50	5	20	1	400	75	26	-	3
2:10	5	18	3	400	75	27(5)	-	2

(4) Fusión del total de la carga. (5) Vaciado.

- 130 -

TABLA V.7

c) Perfil de temperaturas.

Este punto se dividió en dos partes por lo ya -- explicado, citándose en la página 128 el primer perfil, y el segundo en la parte inferior de ésta página.

El segundo perfil muestra la respuesta del horno al compacto que se formó del material que no alcanzó a salir en el momento de intentar por primera vez el vaciado.

El comportamiento de materiales y equipo condujo a revisar el plan original y se consideró pertinente hacer una prueba con un menor % de fierro esponja, describiéndose a continuación la conducta de esta carga.

PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA PRUEBA NO. 4

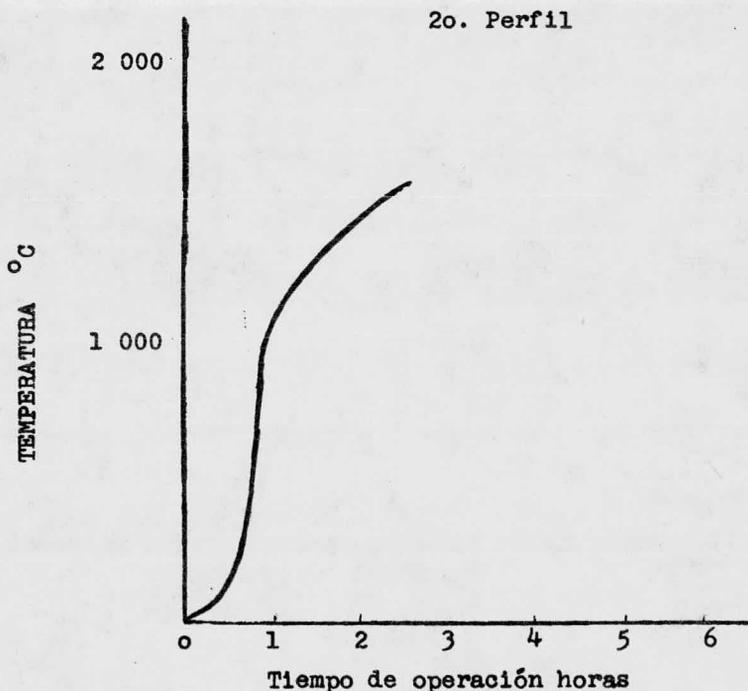


FIG. V.6

5a. Prueba.

Operaciones Prefusión.

a) Cálculo de cargas.

El método fue el mismo que en las anteriores --- pruebas. Se adjunta la planilla correspondiente en la - tabla V.8.

b) Acondicionamiento del equipo.

Se hizo de idéntica manera que en los casos ante cesores.

c) Distribución de la materia prima en el crisol -- del horno. La distribución fue semejante a la de la - - prueba No. 4

La carburización, desulfuración, adición de ferro-- aleaciones, inoculación, nodulización y el enfriamiento se llevaron a cabo siguiendo el mismo camino que en la - prueba No. 4. Sólo se harán anotaciones en lo relaciona do a:

d) Consumo de Desoxidante.

Por la poca cantidad de óxido en comparación con la carga precedente, por menor proporción de fierro es-- pónja, redujo el gasto de desoxidante a 1.200 Kg.

f) Determinación de la cantidad de escoria.

La cantidad de escoria determinada fue de 1.150 Kg.

Fusión. Características y limitantes.

a) Comportamiento al inicio, en y durante la fusión.

PLANILLA DE CARGA CORRESPONDIENTE A LA 5 a. PRUEBA

Material %, elementos	C	Si	Mn	P	S	Al	Ca	Ce	Mg	Canti- dad, kg.
Chatarra	2.04	1.52	0.35	0.03	0.06	-	-	-	-	27.0
Fe-esponja	2.47	3.4	-	0.05	0.02	-	-	-	-	3.0
Fe Si	0.10	45.0	0.40	0.035	0.025	-	-	-	-	0.755
Fe Mn	7.5	1.20	73.0	0.35	0.05	-	-	-	-	-
Inoculante	32.5	29.0	7.25	-	-	-	-	-	-	0.060
Carburizante	93.0	-	-	-	0.58	-	-	-	-	0.541
Nodulizante	-	46.0	-	-	-	1.0	1.25	0.63	9.25	0.216
Desulfurante	-	-	-	-	-	-	50.0 *	-	-	0.252
Composición cal- culada, hierro nodular.	3.73	2.65	0.35	0.03	0.015	-	-	-	-	30.0

* Como Ca C O₂

PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA PRUEBA NO. 5

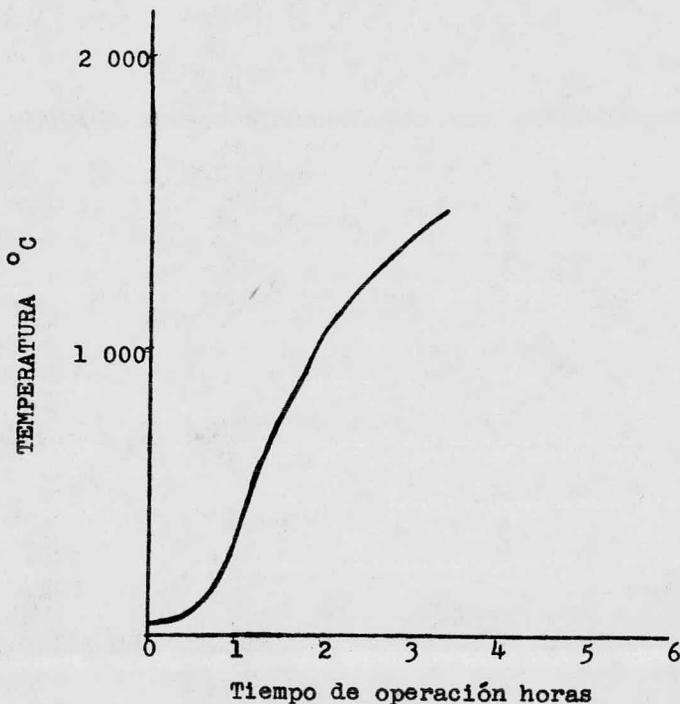


FIG. V.7

Se adjunta la tabla de control V.9

Respecto a la fusión de la chatarra no hay modificación alguna. Al agregar el mineral prereducido se eleva el gasto de potencia.

b) Velocidad de fusión y la influencia que sobre ésta ejerce la carga.

Solucionado el problema aparecido en la prueba- No. 2, el horno ha funcionado más eficientemente en --- cuanto a la fusión de chatarra aminorándose el tiempo -- total de operación. La cantidad de fierro esponja, por- ser la mínima empleada, no afecta a la velocidad de fu- sión.

Tiempo desde el inicio de operación, hrs	Control del horno	Control de voltaje	Control de capacitores	Volts	Amperes	Kilowatts	Kilovars	
							Lag	Lead
0:00	1	5	0	170	75	4.0	-	9
0:15	1	5	0	160	75	3.5	-	9
1:35	1	5	0	250	75	6.0	-	15
1:40	1	5	0	270	75	6.5	-	17
2:00	1	7	0	400	72	11.0(1)	-	18
2:40	4	12	0	400	75	20.0(2)	-	18
3:25	6	22	0	400	75	25.0	-	7.5
3:35	3	21	3	400	58	19.0	4	-
3:55	5	20	4	350	75	23.0(3)	-	0

(1) Inicio de la fusión de la parte inferior de la carga (constituida por chatarra.).

(2) Fusión del total de la chatarra. Alimentación continua de Fe-esponja.

(3) Vaciado.

TABLA V.9

c) Perfil de temperaturas.

Se registró el perfil de temperaturas correspondiente. (Ver Fig. V.7 en la página anterior.)

6a. Prueba.

Operaciones Prefusión.

a) Cálculo de cargas.

El método de cálculo fue el mismo. Ver planilla, tabla V.10.

b) Acondicionamiento de equipo.

Se realizó de igual modo que en las pruebas ya hechas.

c) Distribución de la materia prima en el crisol -- del horno.

Se distribuyó la materia prima en el mismo modo que en las dos pruebas anteriores.

Operaciones Auxiliares.

Todas estas operaciones se efectuaron de igual forma mereciéndose sólo anotar lo arrojado por:

d) Consumo de desoxidante.

El consumo fue de 3.0 Kg.

f) Determinación de la cantidad de escoria.

Se obtuvieron 4 Kg. de escoria.

Fusión. Características y limitantes.

a) Comportamiento al inicio, en y después de la ---

PLANILLA DE CARGA CORRESPONDIENTE A LA 6 a. PRUEBA

Material %,elementos	C	Si	Mn	P	S	Al	Ca	Ce	Mg	Canti- dad, kg.
Hierro gris	2.04	1.52	0.35	0.03	0.06	-	-	-	-	19.5
Fe-esponja	2.47	3.4	-	0.05	0.02	-	-	-	-	10.5
Fe Si	0.10	75.0	0.40	0.035	0.025	-	-	-	-	0.371
Fe Mn	7.5	1.20	73.0	0.35	0.05	-	-	-	-	0.0507
Inoculante	32.5	29.0	7.25	-	-	-	-	-	-	0.060
Carburizante	32.5	-	-	-	0.58	-	-	-	-	0.505
Nodulizante	-	46.0	-	-	-	1.0	1.25	0.63	9.25	0.216
Desulfurante	-	-	-	-	-	-	50.0 *	-	-	0.0244
Composición calculada	3.73	2.65	0.35	0.03	0.015	-	-	-	-	30.0

* Como Ca C O₂

fusión.

Se adjunta la tabla de control V. 11.

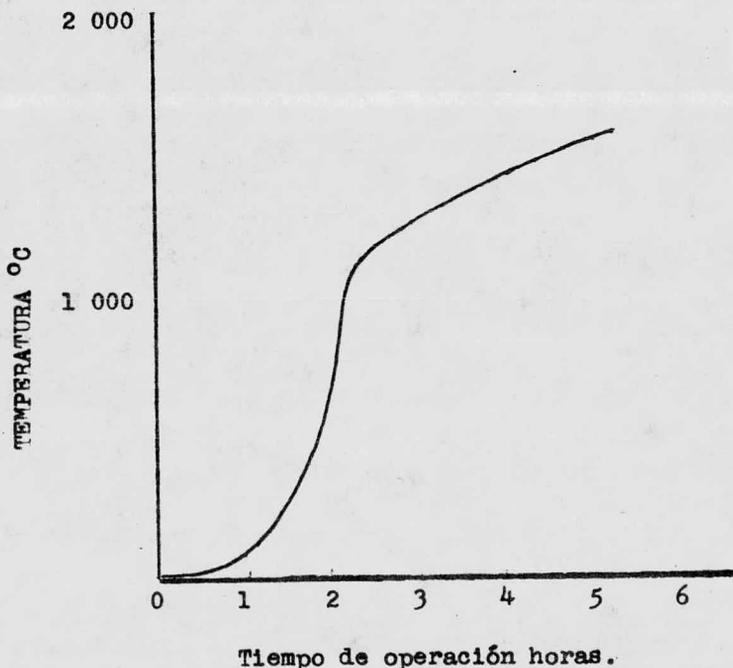
Se puede constatar la eficiencia que ahora presenta el horno al ver el tiempo en la fusión de la chatarra y en el de la fusión de toda la carga, aún comparada con las dos primeras pruebas.

b) Velocidad de fusión y la influencia que sobre ésta ejerce la carga.

La carga no operó influencia alguna que difiera de la descrita en las pruebas 4 y 5.

c) Perfil de temperaturas.

Se registró el perfil de temperaturas correspondiente.



PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA PRUEBA NO. 6

Tiempo desde el inicio de operación, hrs	Control del horno	Control de voltaje	Control de capacitores	Volts	Amperes	Kilowatts	Kilovars	
							Lag	Lead
0:00	1	6	0	160	75	4	-	8
0:40	1	7	0	170	75	4	-	11
1:15	1	7	0	210	75	5	-	13
1:37	1	4	0	325	75	8.0	-	17.5
1:52	1	6	0	360	75	9.5	-	17.0
1:55	1	6	0	375	75	10.0	-	17.0
1:56	1	7	0	390	75	11 (1)	-	18.0
2:04	2	7	1	385	75	12.5	-	15.0
2:06	2	8	0	390	75	14.0	-	15.5
2:07	2	9	0	390	70	15 (2)	-	14
2:10	2	10	1	400	74	15.5	-	15.5
2:28	4	8	1	330	75	12.5	-	14.0
2:50	3	9	1	400	75	15.0	-	16.0
3:43	5	18	0	400	60	20.5	-	2.0
3:48	5	21.7	0	400	64	22.0	-	8.0
3:53	5	24.5	0	390	70	24.0	-	8.5
4:00	5	24.5	0	390	72	25.0	-	8.0
5:07	5	26.0	0	380	74	30.0(3)	-	10.0

(1) Inicio de la fusión de la parte inferior de la carga (constituída por chatarra).

(2) Fusión del total de la chatarra. Alimentación continua de Fe-esponja.

(3) Vaciado.

E) Registro de las Propiedades Químicas y Físicas del Producto Obtenido.

E.1) Prueba Número 1.-

Como se menciona en el apartado V.5.C.2, esta prueba es de exclusivo interés en la observación de las condiciones de operación del Horno y por consiguiente no se le efectuó al producto, ninguna prueba física ni química.

E.2) Prueba Número 2.-

1) Análisis Químico obtenido.

NOTA: Todas las técnicas de cuantificación se efectuaron según recomendaciones. ASTM. Libro Anual. 1970.

A.- Hierro Gris:

C: 2.56, Si: 1.03, Mn: 0.30, P: 0.021, S: 0.052.

C. Equivalente: 2.903

B.- Hierro Nodular:

C: 2.19, Si: 1.03, Mn: 0.26, P: 0.021, S: 0.040.

C. Equivalente: 2.533

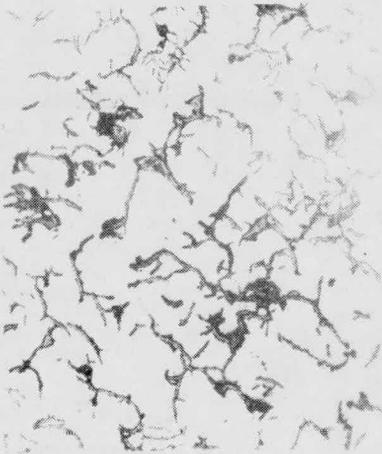
- Comentario: El carbono, silicio y azufre no ajustan en ninguno de los dos casos debido a la adición incorrecta del carburizante, Fe-Si y desulfurante al baño.

Las diferencias de carbón, manganeso y azufre existentes en ambos hierros fueron provocadas, primordialmente, por la reacción que ocurre al entrar en contacto

el agente nodulizante con el metal líquido, aunado a la existencia de oxígeno en el aire que se encuentra disuelto en el metal (por el simple efecto de vaciar), inducirá a que el carbón se combine con el oxígeno y se liberen pequeñas cantidades de CO y CO₂, asimismo, el contenido de azufre sufrió pequeñas variaciones por la afinidad que muestra por el magnesio. En ambos casos, el carbón equivalente está muy por debajo de lo buscado (entre 4.43 y 4.78).

2) Pruebas Físicas.

a) Metalografía.



Micrografía No. 1
100 x Atacada con Nital 5%
Condición Colada



Micrografía No. 2
500 x Atacada con Nital 5%
Condición de Colada



Micrografía No. 3
200 x Atacada con Nital 5%
Condición de Colada



Micrografía No. 4
200 x Atacada con Nital 5%
Condición de Recocido a 900°C

Observaciones:

Microestructura (1)

Estructura característica del hierro gris, la cual presenta laminillas de grafito tipo A, y con una longitud aproximada de 1/4 a 1/2 pulgada, correspondiendo a un tamaño del número 5*.

La distribución del grafito es la adecuada y se -- concluye, por lo tanto, que el inoculante cumplió bien su función.

Microestructura (2)

Estructura dendrítica, con matriz perlítico-ferrítica, donde la perlita se observa muy fina (por la velocidad de enfriamiento) pero bien definida.

Se obtuvieron valores de resistencia y dureza altos.

Microestructura (3)

Estructura de Hierro Blanco con matriz perlítica y agregados blancos de cementita. Perlita con espacios interlaminares mayores que la estructura anterior.

Se esperan valores menores de dureza y resistencia.

Microestructura (4)

Tendencia del carburo a descomponerse y formar grafito en forma de esponjas heterogéneas (hierro maleable)

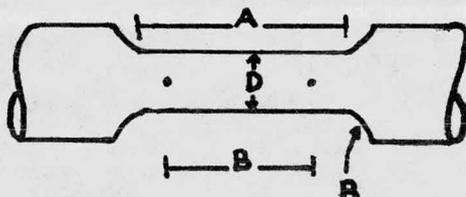
Matriz ferrítico - perlítica.

* Cuando no se especifique lo contrario, todas las determinaciones se hicieron según ASTM. Vol 7, Metals Handbook.

b) Dureza y Resistencia.-

Todas las pruebas de dureza se efectuaron con una carga de 3 000 Kg. y probetas con espesor mínimo de 1.5 pulgadas y maquinadas a caras paralelas. Los datos asentados son un promedio de varias lecturas tomadas de la misma probeta.

El ensayo de tracción se llevó a cabo en una máquina de 100 toneladas y con un disco de 20 toneladas. Las dimensiones de la probeta fueron las propuestas por Miller "Ductil Iron Process" 1976, pág. 29, y son las siguientes: (ver fig. V.9)



B: Longitud Calibrada: $2,000 \pm 0.005$ pulg.

D: Diámetro: 0.500 ± 0.010 pulg.

R: Radio del Filete: $3/8$ pulg. mínimo.

A: Longitud de la sección reducida: $2 \frac{1}{4}$ pulg. min.

DIMENSIONES PROBETA PARA RESISTENCIA
A LA TRACCION

FIG. V.9

Para determinar la carga máxima del hierro y consiguientemente la resistencia a la tracción, así como su límite elástico se efectuó por el método gráfico.

Para calcular el porcentaje de elongación, se trabajó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Elong.} = \frac{L_f - L_i}{L_i} (100)$$

L_f = Long. Final

L_i = Long. Inicial =

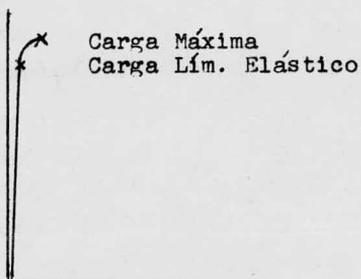
2 pulgadas.

En base a lo anterior, esta prueba reportó los siguientes datos de dureza:

El Hierro Gris reportó una dureza Brinell de 298 bajo condición de colada, mientras que el Hierro Nodular bajo el mismo tratamiento, 250 HBN.

Al someter el hierro dúctil a un tratamiento de recocido a una temperatura de 900°F se determinó una dureza de 220 HBN.

El ensayo de tracción se efectuó bajo las condiciones referidas y se obtuvieron las tres siguientes gráficas esfuerzo-deformación.



GRAFICA NO. V.1
Esfuerzo Deformación del
Hierro Gris

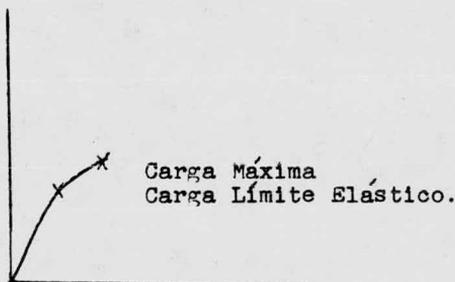
Condición de Colada

- Carga máxima: 24 500.5 Lb
- Carga de L.e.: 20 825.0 Lb
- Resistencia a la Tracción: 125 500 Lb/pulg²
- Lim. Elast: 105 000 Lb/pulg²
- % Elong. (2"): 2.8



GRAFICA NO. V.2
Esfuerzo Deformación del
Hierro Nodular.
Condición de Colada

- Carga máxima: 19 700 Lb
- Carga de L.e.: 17 730 Lb
- Resistencia a la Tracción: 100 000 Lb/pulg²
- Lim. Elast: 90 500 Lb/pulg²
- % Elong. (2"): 3.7



GRAFICA NO. V.3
Esfuerzo Deformación del
Hierro Nodular
Condición de Recocido 900°C

- Carga máxima: 11 783.5 Lb
- Carga L.e.: 7 654.0 Lb
- Resistencia a la Tracción: 59 500 Lb/pulg²
- Lim. Elást.: 37 500 Lb/pulg²
- % Elong. (2"): 7.1

Los datos reportados de la probeta de "Hierro Nodular" bajo condición de recocido se acercan a lo deseado, es decir:

65 000 Lb/pulg² de Resistencia a la tracción.

45 000 Lb/pulg² de Límite elástico.

Elongación: 12%

Obviamente que el tratamiento de Recocido fué ---- excesivo para lo que se pretendía.

E.3) Prueba Número 3.-

Por razones expuestas en el apartado V.D, no se completó la práctica correspondiente de Fusión.

E.4. Prueba Número 4.

Esta prueba arrojó una serie de observaciones interesantes, entre otras que las piezas obtenidas tenían una cantidad apreciable de poros, provocados por el alto contenido de Oxígeno disuelto en el metal proveniente de la carga parcial de 25% de Fierro Esponja.

1) Análisis Químico Obtenido.

C: 2.26, Si: 2.80, Mn: 0.38, P: 0.032, S: 0.035

C.Equivalente: 3.19

- Comentario: El oxígeno del pellet provocó un consumo notable de Carbón..

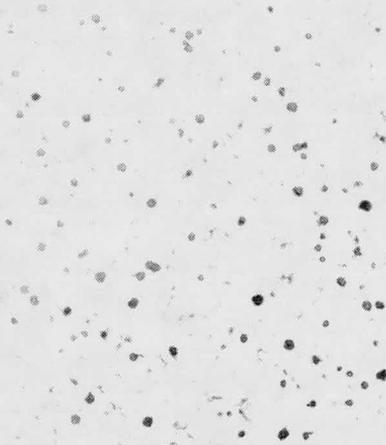
Pese al alto contenido de Silicio, el Carbón Equivalente continúa estando fuera de norma.

A excepción del Carbón y Azufre, los demás elemen--

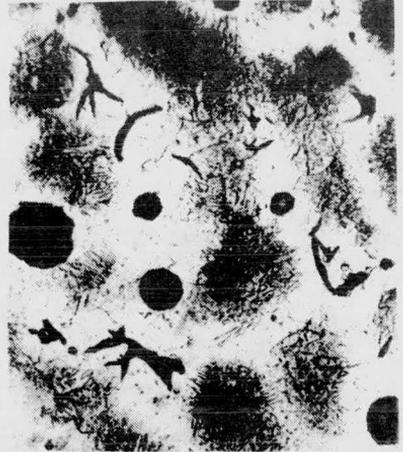
tos caen dentro de los rangos permisibles de especificación.

2) Pruebas Físicas.

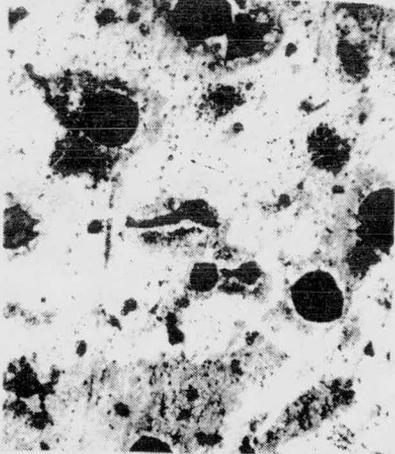
a) Metalografía.



Micrografía No. 5
100 x Sin Ataque
Condición de Colada



Micrografía No. 6
500 x Atacada con Nital 5%
Condición de Colada



Micrografía No. 7
500 x Atacada con Nital 5%
Condición de Normalizado
900°C

Observaciones.

Metalografía (8)

Buena distribución de nódulos, pero existen laminillas de grafito, producto de un sub tratamiento.

Se cuantifica 70% de nodulización, así como no

dulos de Tipo I, y en cantidades de 75 nod/mm².

La falta de nodulización completa se debe a que - la temperatura de vaciado fué relativamente baja; originando una velocidad lenta de reacción agente-metal.

Microestructura (6)

Nódulos perfectamente definidos en matriz dendrítica ferrítico-perlítica, donde la perlita no alcanza a definirse bien debido a la velocidad de enfriamiento.

Microestructura (7)

Estructura ferrítico-perlítica (25%) no muy bien resuelta.

Se esperan excelentes resultados mecánicos.

b) Dureza y Resistencia a la Tracción.

El Hierro Nodular bajo condición de Colada, arrojó una Dureza Brinell de 312, mientras que el Normalizado a 900⁰C, 230 HBN.

	Resistencia a la Tracc. Lb/pulg ²	Límite Elástico Lb/pulg ²	% Elong 2"
Condición de Colada	145 000	86 500	3.6
Condición de Normalizado	68 000	43 500	10.3

Al analizar los datos, se observa que para una dureza de 230 Brinell correspondería, en un Hierro Nodular, a una resistencia a la tracción aproximada de --- 85 000 Lb/pulg². Debido a que el material presenta imper

fecciones (poros), el valor de resistencia decreció al valor mencionado de 68 000 lb/pul².

Curiosamente, los resultados obtenidos caen dentro de especificación mecánica, a excepción del por ciento de elongación.

E.5) Prueba Número 5.-

1) Análisis Químico Obtenido.

C: 3.41, Si: 2.67, Mn: 0.20, P: 0.042, S: 0.076

Carbón Equivalente: 4.30

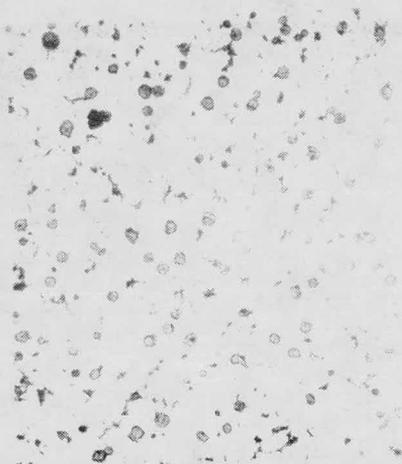
- Comentario: Debido al bajo contenido de Oxígeno en forma de Oxido, ésta composición fué la que más se a cercó a lo buscado.

Pese a que las condiciones de operación se realiza ron bajo riguroso control, no fue posible evitar que el Carbón reaccionase con el Oxígeno disuelto para formar- CO y CO₂, y bajar así su contenido en el producto fi--- nal.

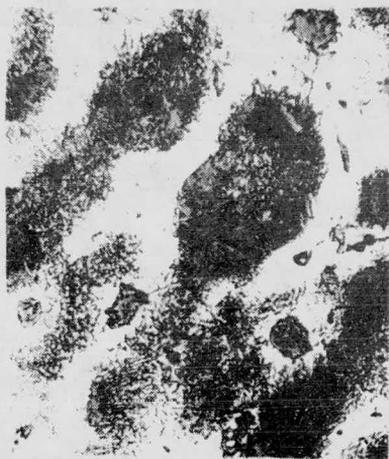
En el caso del Manganeso, también fuera de especi- ficación, se debió a la afinidad que éste tiene por el Azufre, el cual volvió a estar fuera de Norma.

2) Pruebas Físicas.

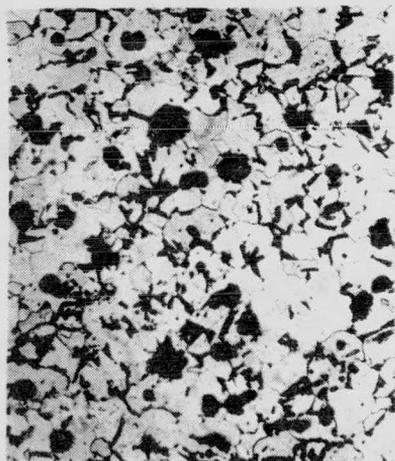
a) Metalografía.



Micrografía No. 8
100 x Sin Ataque
Condición de Colada



Micrografía No. 9
500 x Atacada con Nital 5%
Condición de Colada



Micrografía No. 10
200 x Atacada con Nital 5%
Condición de Recocido
900°C

Observaciones:

Microestructura (8)

Se aprecia una nodulización aproximada del 50%.

Las laminillas de grafito son producto de un subtratamiento que sufrió el metal líquido, debido a los altos contenidos de azufre en éste.

El tipo de nódulo de

grafito obtenido fue del número I, mientras que las cantidades /mm² fueron aproximadamente de 75 nódulos/mm².*

Es de observarse una distribución de esferas uniforme, siendo ésto atribuible al agente inoculante.

Microestructura (9)

Los nódulos de grafito no presentan una forma muy regular (subtratamiento) más, sin embargo, son bien definibles.

Matriz dendrítica ferrítico-perlítica, donde la perlita no alcanza a ser resuelta en su totalidad.

Debido a los espacios pequeños interlaminares, se obtuvieron valores elevados de dureza y resistencia.

Microestructura (10)

Matriz ferrítica provocada por el tratamiento de recocido a 900°C.

Se aprecia una irregularidad en la forma de los nódulos no deseable. Se esperan resultados mecánicos satisfactorios.

b) Dureza y Resistencia a la Tracción.-

Bajo condición de colada se registró una dureza promedio de 315 HBN, mientras que la pieza recocida arrojó 197 HBN.

En el ensayo de tracción, se obtuvieron los siguientes valores:

* Según referencia de Miller "The Ductile Iron" 1976. Págs. 85 y 86.

	Resistencia A la Tracc. Lb/pul ²	Límite Elástico ² Lb/pul ²	% Elong. 2"
Condición de Colada	127 500	93 000	2.8
Condición de Recocido. 900°C	53 500	30 500	11.0

Nuevamente, bajo un tratamiento de recocido se obtuvieron valores cercanos a lo esperado, aunque relativamente bajos.

E.6) Prueba Número 6.-

En esta prueba las piezas obtenidas presentaban --- cantidades apreciables de cavidades, lo cual representa - que se obtendrán datos mecánicos muy por debajo de lo esperado.

1) Análisis Químico Obtenido.-

C: 2.03, Si: 2.83, Mn: 0.28, P: 0.029, S: 0.056

Carbón Equivalente: 2.97

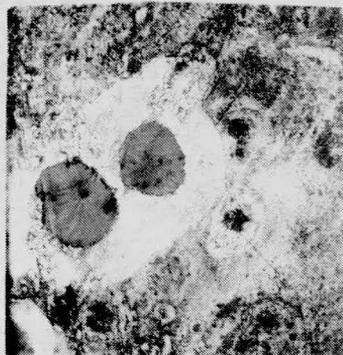
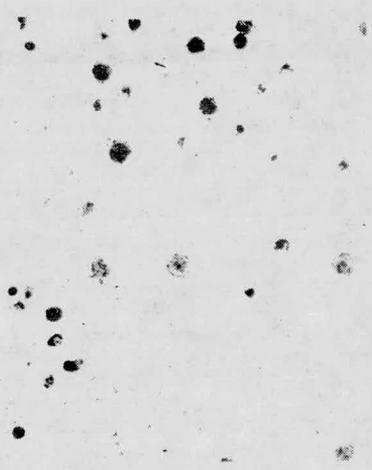
- Comentario: Como puede observarse, la mala calidad del Hierro Esponja provocó que el control del Carbón fuese caótico, así como un ligero aumento en el contenido de Silicio.

El Azufre se sale de especificación, por práctica imperfecta de Desulfuración.

Debido a lo discordante de los resultados se espera una nodulización imperfecta.

2) Pruebas Físicas.

a) Metalografía.



Micrografía No. 11
100 x Sin Ataque
Condición de Colada

Micrografía No. 12
500 x Atacada con Nital 5%
Condición de Colada

Observaciones:

Microestructura (11)

Nódulos bien conformados del tipo I aunque mal distribuidos y en poca cantidad (50 nódulos/ mm^2). Efecto-atañable a un subtratamiento producto de una composición química fuera totalmente de norma.

Microestructura (12)

Estructura perlítico-ferrítica "ojo de buey" aunque poco definida por un ataque químico deficiente.

Nódulo de grafito perfectamente definido (ideal)

NOTA: En este caso no se efectuó tratamiento térmico alguno debido a la pésima calidad del producto obtenido.

b) Dureza y Resistencia a la Tracción.

Valores obtenidos sólo bajo "condiciones de colada"

Dureza Brinell:	301
Resistencia a la Tracción:	25 000 Lb/pulg ²
Límite Elástico:	24 000 Lb/pulg ²
% Elongación:	0.9

Lo bajo de los valores obtenidos son debido, lógicamente, a la cantidad en demasía de cavidades, los --- cuales actúan como concentradores de esfuerzos.

Como cuadro comparativo, se anexa la siguiente tabla (V42), en la que se asientan todas las prácticas -- efectuadas al producto obtenido así como sus resultados.

CUADRO COMPARATIVO DE LAS PRUEBAS FISICAS EFECTUADAS

ENSAYO	CONDICION	P R U E B A N U M E R O						
		1	2		3	4	5	6
HIERRO TIPO			H.G	H.N		H.N	H.N	H.N
ANALISIS QUIMICO	C		2.56	2.19		2.26	3.41	2.03
	Si		1.03	1.03		2.80	2.67	2.83
	Mn		0.30	0.26		0.38	0.20	0.28
	P		0.021	0.021		0.032	0.042	0.029
	S		0.052	0.040		0.035	0.076	0.056
	C. E.		2.903	2.533		3.19	4.30	2.97
MICRO- ESTRUCTURA	Colada		P-F	P		F-P	F-P	P-F
	Trat. Ter.			F-P		F-P	F	
DUREZA BRINELL	Colada		298	250		312	315	301
	Trat. Ter.			220		230	197	
RESISTENCIA A LA TRACCION Lb/pulg ² x 10 ³	Colada		125.5	100.0		145.0	127.5	25.0
	Trat. Ter.			59.5		68.5	53.0	
LIMITE ELASTICO Lb/pulg ² x 10 ³	Colada		105	90.5		86.5	93.0	24.0
	Trat. Ter.			37.5		43.5	30.5	
% ELONGACION	Colada		2.8	3.7		3.6	2.8	0.9
	Trat. Ter.			7.1		10.3	11.0	

TABLA V.12

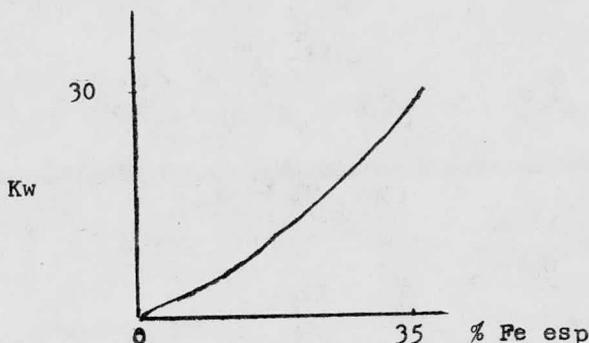
CONCLUSIONES

En primera instancia debe remarcarse el hecho de - que las conclusiones a las que se llegaron están en función de las características y limitaciones de los materiales y equipo con que se trabajó, siendo ésto razón - suficiente para que este veredicto no se considere definitivo con respecto a todo el proceso en sí.

Sin perder de vista esta aclaración, y en base a los resultados obtenidos, es válido decir que la carga inicial constituida unicamente por fierro esponja presenta problemas técnicos determinantes que no hicieron factible su fusión y por lo tanto, no es recomendable su utilización como carga inicial.

Más adelante se estableció que la única forma práctica de fusión del pellet era con un lecho metálico líquido de chatarra, debiéndose alimentar continua y lentamente, pues de lo contrario, se favorece un apreciable decremento en temperatura, así como la formación de una masa pastosa, cuya re-fusión requeriría de un excesivo gasto de energía. Aún así, el consumo de potencia fue proporcional a la carga de mineral pre-reducido, -- quedando ésto esquematizado en la siguiente gráfica.

Por otro lado, el control del baño metálico con -- fierro esponja presentó mayor número de problemas en -- comparación con la fusión de chatarra, ésto es, una agitación más violenta y una notable formación de gases disueltos en el baño, que provocaron una composición quí-



GRAFICA:
POTENCIA - CARGA PARCIAL FIERRO ESPONJA

mica fuera de especificación, y una deficiente calidad del HIERRO NODULAR OBTENIDO, pues como se sabe, el metal base requiere de altos contenidos de carbón y bajas cantidades de oxígeno en forma de óxido.

Otro inconveniente que presentó el pellet en cuestión fue la gran cantidad de escoria que se produjo, de nueva cuenta, por el elevado contenido de ganga en el mineral, lo que provocó, sumado a los efectos mencionados líneas arriba, un desgaste significativo del revestimiento refractario, según se pudo apreciar cualitativamente al concluir las pruebas respectivas.

Desde el punto de vista económico, no resulta rentable el uso de una carga parcial de mineral prereducido superior al 10% ya que los obstáculos técnicos encontrados se traducen en gastos adicionales no justificables, pues inflarán el costo de operación.

De este modo, la fusión del hierro esponja empleado en cantidades superiores al 10% de la carga total es,

desde el aspecto técnico y económico, poco prometedora para la obtención del hierro en estudio. Más, sin embargo, y tomando en consideración lo enunciado al principio de ésta parte final, cabe afirmar categóricamente que con pellet prereducido de mejor calidad, es decir, de mayor metalización, se logrará la optimización de esta nueva alternativa y sin duda alguna se resolverá, en gran parte, el problema económico y político que origina la dependencia de un solo proveedor de chatarra y la fuga de divisas existente por este concepto.

BIBLIOGRAFIA

- Stephen I. Karsay.
Ductile Iron II.
Engineering Design.
Properties. Applications.
"Quebec Iron And Titanium Corporation"

- Stephen I. Karsay.
Ductile Iron
Production Practices.
"An American Foundrymen's Society Publication"

- Stephen I. Karsay.
Ductile Iron.
The State of the Art.
Tomos 1974 y 1975.
"Quebec Iron and Titanium Corporation"

- Stephen I. Karsay.
"Quebec Iron and Titanium Corporation"
Ductile Iron Production.
Jun - 1966.

- Sidney H. Avner.
Introducción a la Metalúrgia Física.
Mc. Graw Hill.

- Robert M. Brick
Structure and Properties of Alloys.
Mc. Graw Hill.

- Humberto Pérez Solís / .
Desarrollo de Hierro Nodular en Siderúrgia Nacional, S. A.
Tesis (1974) UNAM.
- Teresita del Niño Jesús Robert Núñez.
Determinación de Manganeso en Hierro Nodular.
Tesis (1976)
- Sánchez Montiel Jorge Raúl.
Soñano Rico Heriberto.
"Hornos Metalúrgicos de Inducción".
Tesis (1975) UNAM.
- Rosenquist, Terkel.
"Principles of Extractive Metallurgy" 1974
Mc. Graw Hill.
- Miller and Company Service HandBook.
"The Ductile Iron Process"
Compendium V. 1976.
- A.S.T.M. 1970. Volúmenes anuales.
Especificaciones y pruebas físicas.
Análisis químicos.
- Diaz Toledo Oscar.
"Refractarios utilizados en hornos
de inducción y hornos eléctricos"
Curso Panamericano de Metalurgia.

- Pietsch, W.

"Use of Sponge Iron in Foundries"

International Cast Metals Journal. AFS.

- Pantke, H.D., y Queens. Chr.

"The Processing of Sponge Iron in the
Coreless Induction Furnice".

Thyssen Purofer Gabh, Düsseldorf.