



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

**SIGNIFICADO Y EFECTO DEL CARBON EQUIVALENTE
EN LA FUNDICION**

T E S I S

SALVADOR VAZQUEZ BELMONT

Carrera: INGENIERO QUIMICO METALURGICO

México, D. F.

1980

M-18005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

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

PRESIDENTE: Ing. Kurt H. Nadler Gundeisheimer.

VOCAL: M. en C. Ma Eugenia Noguez Amaya.

SECRETARIO: Ing. Francisco Herrera Castañeda.

1er. Suplente: Ing. Teresa Robert Nuñez.

2o. Suplente: Ing. Raúl Arellano Angeles.

Sitio donde se desarrolló el tema:

FHASA.- Departamento Metalúrgico de

Fundiciones de Hierro y Acero S.A.

Fundidora Lerma S.A. de C.V.

Sustentante: Salvador Vázquez Belmont

Asesor del tema: Ma Eugenia Noguez Amaya.

CON CARINO PARA

MIS PADRES

Y PERSONAS QUE AYUDARON EN LA ELABORACION

DE ESTE TRABAJO.

SIGNIFICADO Y EFECTO DEL CARBON
EQUIVALENTE EN LA FUNDICION

	Pags.
I.- INTRODUCCION	1
II.- ANTECEDENTES	
A) Diagrama de Maurer	3
B) Los Diagramas de Uhlitzsch y Weichelt	6
C) Los Diagramas de H. Leplenche.	8
D) El Diagrama de Greiner y Klingenstein.	12
E) Las Reglas de B. Ossan.	13
F) El Diagrama de Sipp.	15
III.- EL CARBON EQUIVALENTE	
A) Definición de Carbon Equivalente y de Grado de Saturación.	16
B) Desarrollo de diversas Fórmulas de Carbon Equivalente.	
B-1) Desarrollo de la fórmula $CE = \%C + \frac{\%Si}{3} - \frac{\%P}{2}$...	21
B-2) Desarrollo de la fórmula $CE = \%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}$...	24
B-3) Desarrollo de la fórmula $CE = \%C + \frac{\%Si}{9} + \frac{\%P}{3.5}$..	28
B-4) Desarrollo de la fórmula $CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{2}$	31
C) Formas de obtener el Valor de Carbon Equivalente.	

	Pags.
C-1) Quimica.	34=
C-2) Instrumental.	35
D) Relaciones entre Carbon Equivalente y Propiedades Fisicas.	43
D-1) Relaciones entre Carbon Equivalente y Resistencia a la Tracción.	43
D-2) Relaciones Gráficas con varias Propiedades Fisicas	47
IV.- PARTE EXPERIMENTAL	
A) Objetivo y Plan de Experimentación.	49
B) Descripción del Equipo y Material que involucra, el Desarrollo Experimental.	51
C) Desarrollo Experimental.	61
V.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	
A) Curvas de Enfriamiento de varios Hierros y su Determinación de CE.	65
B) Curvas de Enfriamiento y CE de Hierros Solidificados como Grises y Blancos.	67
C) Determinación de las Curvas de Enfriamiento y de CE, variando la Composición y la Sección de las Barras de varios Hierros Grises.	69

	Pags.
D) Registro de Propiedades Químicas, Físicas y Metalográficas de las pruebas con diferentes Diametros.	73
VI.- DISCUSION Y CONCLUSIONES	
Discusión.	83
Conclusiones.	90
APENDICE A (El Proceso de Solidificación)	92
APENDICE B (Métodos de Analisis)	106
BIBLIOGRAFIA	115

INTRODUCCION

A causa de la gran aplicación del hierro gris en la industria de la fundición y a que el hierro gris en la fundición tiene aproximadamente el 50% de la producción Nacional total de la fundición ferrosa y no-ferrosa, se hace necesario un estudio un poco más a fondo de uno de los parámetros de control metalúrgico de uso más común; éste parámetro es el "Carbon Equivalente".

En este trabajo se pretende profundizar en el concepto de Carbon Equivalente, ya que éste ha variado en su concepción y forma de medirse a través del tiempo.

Es decir se pretende desglosar el significado del Carbon Equivalente, como se obtiene y como se usa y por lo tanto contribuir más eficazmente a la utilización de este concepto reportado en la literatura, y tan ambiguamente usado en la práctica diaria industrial; para llevar a cabo estos propósitos se hizo una investigación en dos aspectos:

Primero.- La evolución del concepto de Carbon Equivalente en la literatura metalúrgica.

Segundo.- En forma experimental en una fundición ---
industrial midiendo el Carbon Equivalente de varios ---
hierros con el fin de comprobar las relaciones repor---
tadas en la literatura entre propiedades Fisicas, Qui---
micas y Carbon Equivalente.

ANTECEDENTES

IIa.- El Diagrama de Maurer

Desde principios del siglo XX se han hecho estudios que relacionan la composición y la microestructura de los hierres.

El diagrama de Maurer es uno de los primeros que se --
dió a conocer, a continuación se relata como fué que lo --
ideó Maurer: (2)

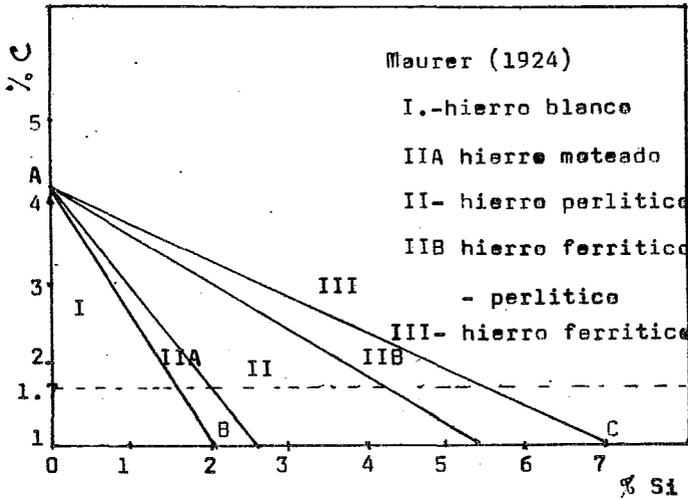


fig. II.-1

Basado en una analogía del diagrama para aceros de --
Guillet en el cual las líneas rectas se intersectan en --
1.5 % de Carbono, Maurer selecciona el punto Eutéctico en
4.3 % de Carbono para hierres.

El traza la línea AB a 2 % de Silicio porque sus pruebas-

de fractura en aceros demostraron que aceros con 2% de Silicio podían ser colados con un contenido de hasta 1% de Carbon. Sin que hubiera precipitación de grafito.

Tomó del diagrama de Guillet el punto a 7% de Silicio y traza la línea AC.

De esta manera obtuvo tres áreas que corresponden a hierros blancos I, perlíticos II, y Ferríticos III.

Las líneas de transición IIa y IIb se obtuvieron de las proyecciones de las intersecciones con la línea --- que representa el contenido 1.7% de Carbon y el eje X - que representa el contenido de Silicio. Obteniendo así las regiones correspondientes a hierros moteados y, a hierros ferrítico-perlíticos.

El diagrama de Maurer tiene dos importantes errores: El primero fué el trazo de un sólo diagrama para todos los casos, eliminando factores importantes como la velocidad de enfriamiento.

Posteriormente (2) en 1927 Maurer indica que su diagrama puede ser aplicado solamente a barras de 30 mm de diametro y que las líneas son desplazadas hacia la izquierda a velocidades de enfriamiento más bajas y, hacia la derecha a velocidades de enfriamiento más altas.

El segundo error fué que supuso que las líneas limitantes de las microestructuras eran rectas, lo que nos da que los hierros con más de 4.3% de Carbon tienen

invariablemente una matriz ferrítica y, a que hierros -- con 0.5% de Silicio y 4.4% de Carbon podrían ser ferrí-- ticos lo cual sabemos que no es cierto.

Maurer (3) supuso también iguales condiciones de --- cargas del horno, igual clase de horno(cubilote), igual temperatura de sobrecalentamiento de colada y, finalmen-- te igual enfriamiento de molde; es decir moldes de are-- na secados en estufa.

IIb.- Los Diagramas de Uhlitzsch y Weichelt (1)

Como consecuencia de un gran número de experiencias en la industria, estos autores establecieron el diagrama tridimensional que a continuación se presenta fig.II.-2

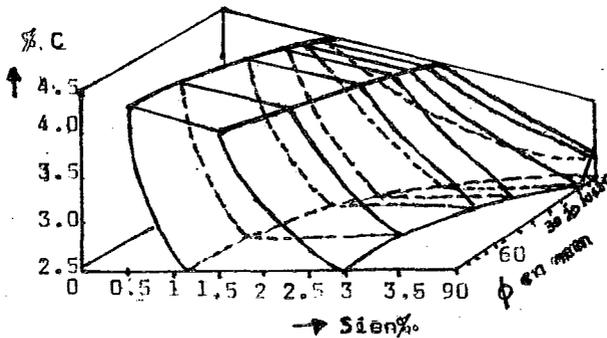


Fig. II.-2

En este diagrama se tiene presente la variación en anchura y el corrimiento de los campos dentro de los cuales se obtienen las fundiciones perlíticas en función del diámetro de las barras que sirvieron experimentalmente como variables de espesor. De este diagrama Uhlitzsch y Weichelt propusieron nuevos diagramas estructurales para hierros y las áreas limitantes ahora fueron curvas. ver fig. II.-3 (2)

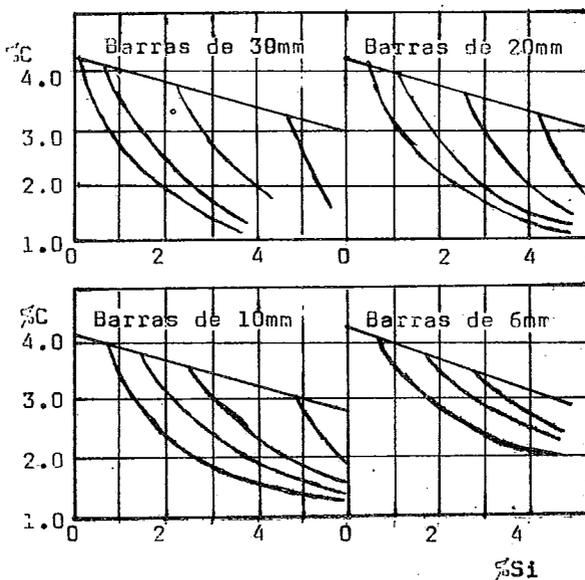


fig. II.-3

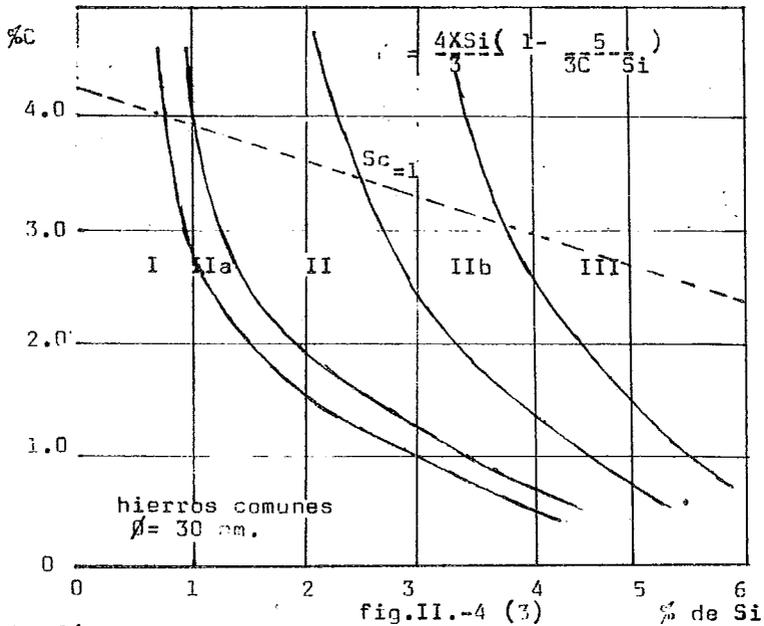
Cada diagrama es para un factor, en una sección transversal del diagrama tridimensional con ejes; % de Carbon, - % de Silicio y, velocidad de enfriamiento; ésta, corresponde al diámetro de la barra colada bajo esas condiciones, además establecieron reglas para relacionar los diámetros de las - barras y los espesores de la pared de pieza de tal manera - que se cumplieran las relaciones siguientes:

Para moldes secados a la estufa o piezas de corazones:
Desde pequeños espesores hasta 30mm; espesor de pared = a la mitad de diámetro; en espesores mayores de 30mm, espesor de - pared = al diámetro.

IIc.- Los Diagramas de H. Laplanche

Los resultados de los investigaciones posteriores por Laplanche (2y3) sobre la composición química de los carburos contenidos en los hierros blancos, su solubilidad en austenita, y su descomposición durante la solidificación, tuvieron como resultado una fórmula que nos relaciona la tendencia a la grafitización en función del % de Carbon, el % de Silicio y la velocidad de enfriamiento.

Con éstos parámetros él traza el diagrama siguiente- ver fig. II.-4



La fórmula obtenida por Laplanche es:

$$K = \frac{4XSi}{3} \left(1 - \frac{5}{3C} Si \right)$$

Los valores de K varían cuando la velocidad de enfriamiento de la aleación se cambia, por ejemplo si el diámetro de las pruebas se reduce, las curvas limitantes se mueven hacia la derecha; con una velocidad de enfriamiento suficientemente alta, un hierro con un índice de 1.2 (él cual debe tener una matriz perlítica) puede dar una estructura moteada e igual una estructura de hierro blanco.

Los límites para barras de 30mm de diámetro vaciadas en arena en verde fueron los que se presentan a continuación (de la fig. II.-4):

límite entre hierros blancos (zona I) y hierros moteados $K=0.65$

límite entre hierros moteados (zona IIa) y hierros perlíticos $K= 0.85$

límite entre hierros perlíticos (zona II) y hierros perlítico-ferríticos $K= 2.05$

límite entre hierros perlíticos-ferríticos (zona IIb) y hierros ferríticos (zona III) $K= 3.10$

Así los límites para barras de 10mm de diámetro con referencia a los límites dados arriba son:

$K= 1.05$, $K= 1.50$, $K= 2.35$, $K= 3.50$.

Laplanche construyó un diagrama más completo (ver -- fig. II.-5) en él las líneas rectas corresponden al contenido de Carbon del Eutectico en el sistema Fe-C para -- cada valor de Silicio dado. De acuerdo con la fórmula del manual "Operación del Horno de cubilote" la cual es:

$$E' = 4.3 - 0.3 \%Si$$

También se obtienen datos en el diagrama donde a cada línea recta corresponde un valor de:

$$S_c = \frac{\%C}{4.30 - 0.3\%Si}$$

Sobre el diagrama, la estructura de los hierros se determina mediante los coeficientes S_c y K , el coeficiente S_c se determina por la posición de la aleación, como el Eutectico $E' = 4.30 - 0.3 \%Si$ (este puede ser hipo ó hipereutectico).

El coeficiente K se determina para la estructura deseada (blanca, moteada, perlítica, perlítica-ferrítica ó ferrítica).

La intersección de un valor de S_c (líneas rectas) y un valor de K (líneas curvadas) dan los contenidos de Carbon y Silicio los cuales pueden ser usados para una estructura deseada.

Laplanche's Structural Diagram for Cast Iron

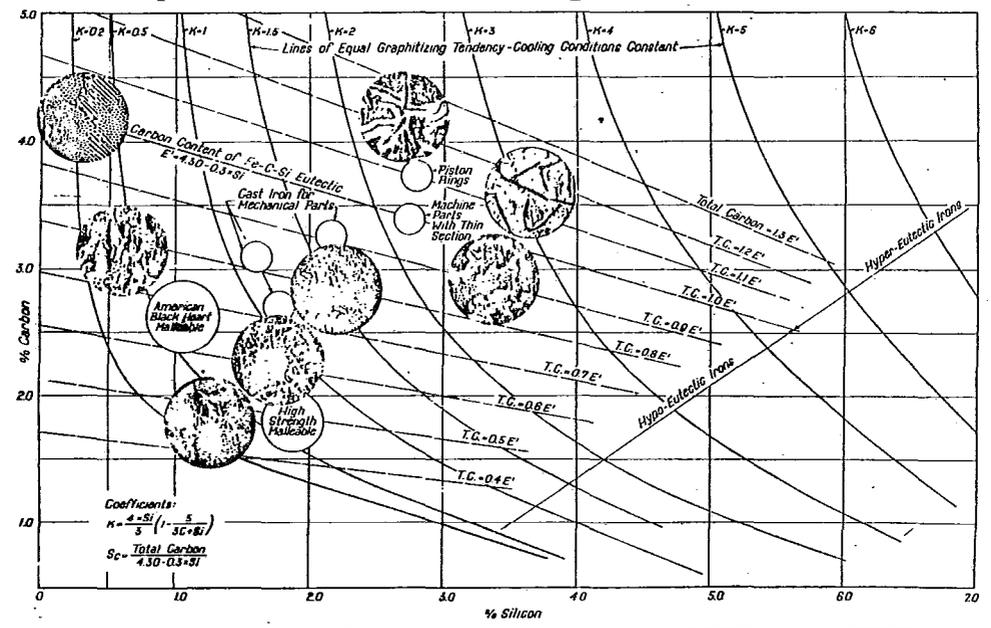


fig. II.- 5 (2)

II d.- El Diagrama de Greiner y Klingenstein (1)

Estos autores toman los espesores de pared como ---
abscisa y la suma de %C + %Si como ordenada y establecen -
el diagrama de la figura II.-6 en el cual la zona rayada -
es la referente a la fundición perlítica en donde:

Zona I = fundición blanca

Zona IIa = fundición moteada

Zona II = fundición perlítica

Zona IIb = Paso de la fundición ---
perlítica a ferrítica.

Zona III = fundición ferrítica.

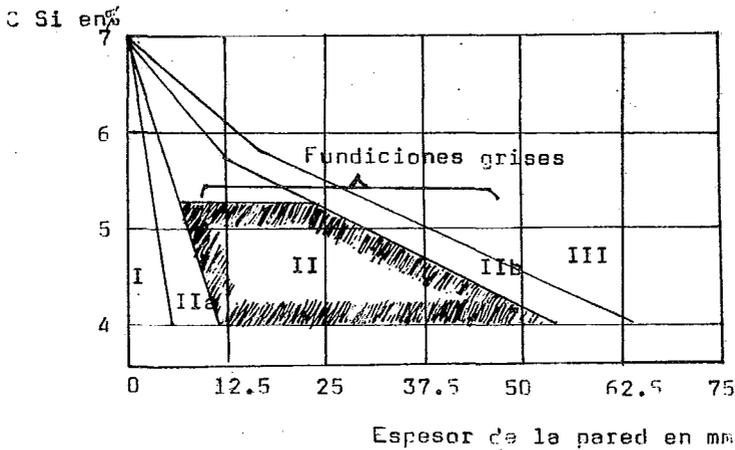


fig. II.-6

Ile.- Las reglas de B. Ossan (1)

Este autor construyó el gráfico de la figura II.7 con cuyos valores se obtienen fundiciones hipoeutecticas con un S_c de alrededor de 0.85. (aunque en realidad, en realidad, Ossan decía obtener con esas composiciones fundiciones eutecticas).

Para tener en cuenta la distinta velocidad de enfriamiento según el espesor de pared éste autor suma o resta cierta cantidad de Silicio con arreglo a la tabla, y para equilibrar el carbono disminuido por el eutectico fosforoso, suma otra corrección en Silicio, según el porcentaje de fósforo de la aleación.

Dos ejemplos, expuestos en el trabajo de Ossan facilitan el ejemplo de sus reglas.

Supongamos que se trata de fundir una placa de 2.5 mm de espesor, con un contenido en C= 3.5% y P= 1%.

Según el grafico la mezcla debe tener 0.8%Si. Las correcciones serán:

$$\begin{aligned} \%Si &= 0.8\% + \text{corrección según espesor de la pieza} + \\ &\quad \text{corrección según \% de P} = 0.8 + 1.1 + 0.3 = 2.2\% \end{aligned}$$

En el caso de una pieza gruesa, por ejemplo, un cilindro de 1m de diámetro, con C=3.1% y P = 0.4%, el Silicio será:

$$\%Si = 1.6\% - 1.3\% - 0.0\% = 0.3\%$$

TABLA II.-1
Igualación según espesor de pared en mm

Espesor pared	%Si	Espesor pared	%Si
1000	-1.3	30	0.20
500	-0.9	25	0.25
250	-0.75	20	0.30
150	-0.55	15	0.45
100	-0.40	10	0.60
75	-0.20	5	0.85
50	0.00	2.5	1.10
40	0.10		

TABLA II.-2

Igualación por el fósforo			
P%	Si%	P%	Si%
0.1	-0.15	0.6	0.10
0.2	-0.10	0.8	0.20
0.3	-0.05	1.0	0.30
0.4	0.00	1.5	0.35

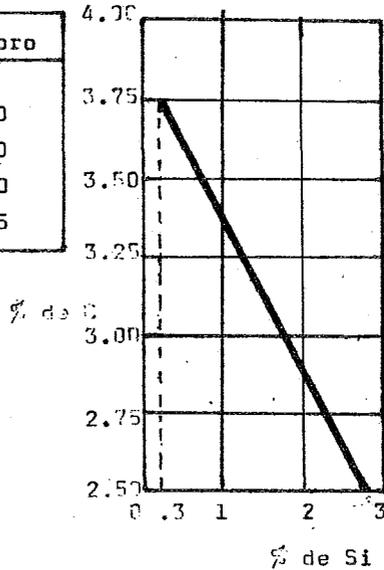


Fig. II.-7 (')

II f.- El Diagrama de Sipp

Como un valor de la suma de %C + %Si puede hacerse -- con muy distintos valores de cada uno de dichos elementos y el grado de saturación (S_c) (S_c esta definido en el capitulo siguiente) engloba ambos elementos, parecía lógico intentar hacer un diagrama de las posibles matrices de una fundición en función de tal concepto. K. Sipp (1) publicó en 1941 el diagrama de la fig. II.-8 en el cual se hace la suposición de que el espesor de pared de una pieza es equivalente en sus condiciones de enfriamiento, al diametro de un cilindro dos veces mayor que el espesor.

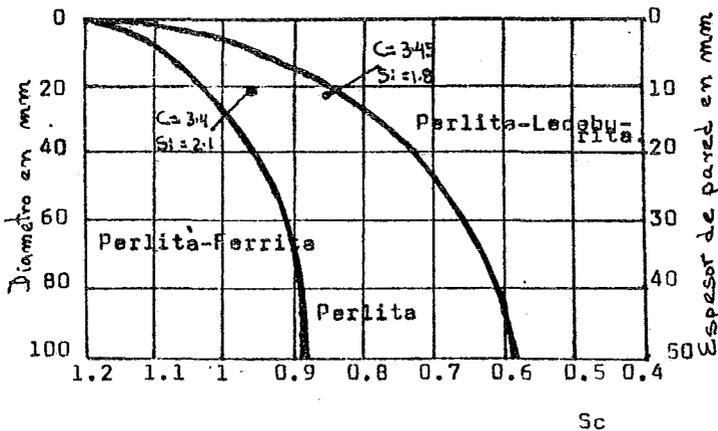


fig.II.-8

S_c = grado de saturación.

(esta definido en el capitulo siguiente)

CAPITULO III.- EL CARBON EQUIVALENTE

A) Origenes del Carbon Equivalente.

En el capítulo II se trataron algunos diagramas que relacionan el contenido de Silicio y el contenido de Carbon con la microestructura de los hierros. A continuación se tratará la forma como fueron obtenidas las relaciones de Carbon Equivalente y Grado de Saturación, esta última se tratará primero ya que fué dada a conocer antes que la relación de Carbon Equivalente.

Se tratará en primer término el sistema Fe-C-Si que origen a la relación de Grado de Saturación.

Los porcentajes de Silicio que intervienen en la fundición gris modifican sustancialmente las líneas del diagrama Fe-C como se puede observar en la fig. III.-1 (4) en ella se puede apreciar el efecto del aumento de los porcentajes de Silicio en el sistema Fe-C, ahora bién limitándonos a la proyección del sistema Fe-C-Si, sobre el plano horizontal (La figura del sistema ternario no se da aqui), se obtiene la fig. III.-2

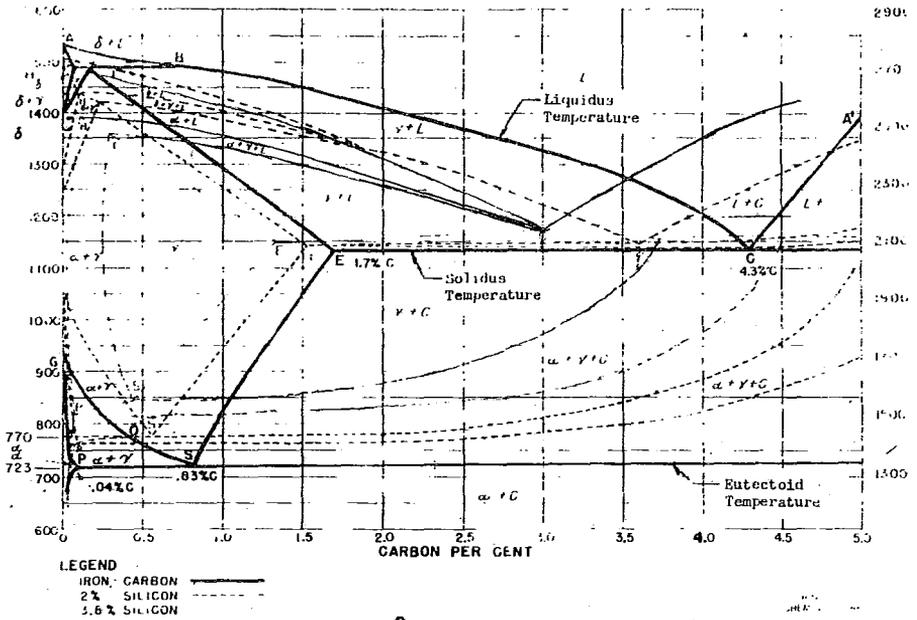


Fig.III.-1

El diagrama del sistema Fe-C, en esta figura se aprecia el efecto de diferentes contenidos de Silicio sobre el sistema Fe-C.

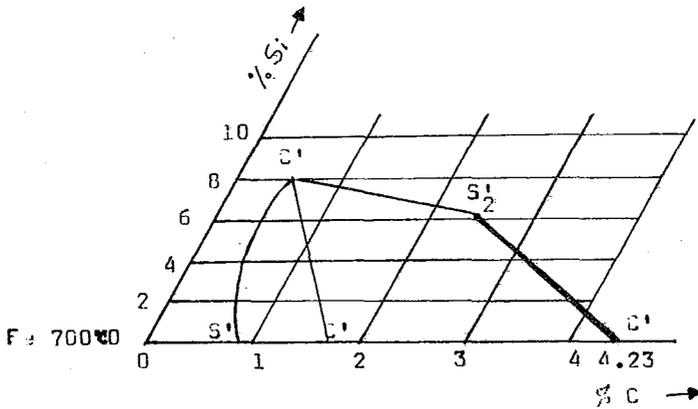


fig. III.-2 (1)

Proyección sobre el plano horizontal del sistema Fe-C-Si

En la fig.III.-2 la línea más importante es la S_2-C' -- en la cual la ecuación es:

$$\%Si = -3.2\%C + 13.54$$

Y representa el desplazamiento que sufre el punto Eutectico al aumentar el porcentaje de Silicio.

Si de la ecuación lineal anterior despejamos el porcentaje de Carbon la ecuación nos queda así:

$$\%C = \frac{13.54}{3.2} - \frac{\%Si}{3.2} \quad ; \quad \%C = 4.23 - \frac{\%Si}{3.2}$$

Así el contenido de Carbon Eutectico es:

$$4.23 = \%C + \frac{\%Si}{3.2}$$

y acomodando los términos nos quedan así:

$$1 = S_c = \frac{\%C}{4.23 - \frac{\%Si}{3.2}}$$

Esta relación fué designada por Heyn ⁽¹⁾ como " grado de saturación", (Es decir el hierro fundido va disolviendo carbono hasta un cierto límite que depende del contenido de Silicio). Su saturación en carbono es pues una función principalmente del contenido de Silicio.

Cualquier composición de Carbon y Silicio indicada por dicha línea de la fig. III.-2 , daría un cociente -- igual a la unidad, los puntos situados a la izquierda de la línea darán un cociente menor que la unidad y los situados a la derecha de la línea darán valores mayores -- que la unidad.

"El grado de saturación" S_c indica, según sea mayor igual o menor que la unidad, las composiciones de Carbon y Silicio que darán mezclas hipereutecticas, Eutecticas e hipoeutecticas respectivamente.

La resistencia de la fundición gris como origen de la relación de Carbon Equivalente.

Según los trabajos de Gimmy ⁽¹⁾ puede decirse en términos generales que un 0.1% de Silicio baja la resistencia a la tracción de 0.45 a 0.9 Kg/mm². Y cada 0.1% de Carbon que se aumenta baja la mencionada resistencia de 1.92 a 4.16 Kg/mm².

Hechos los cálculos en porcentajes de resistencia dicho autor da las siguientes cifras de carácter medio:

Cada 0.1% Si baja la resistencia alrededor de 2.25%

Cada 0.1% C baja la resistencia alrededor de 8.6%

Como se ve carece de valor el tomar, (como en muchas relaciones se hacía), la suma de Carbon más Silicio, como caracterizadora de la fundición gris.

Dividiendo los porcentajes arriba mencionados se encuentra la relación:

$$\frac{2.25}{8.67} = \frac{1}{3.8}$$

Puede indicarse que 3.8 partes del contenido de Silicio equivalen a una parte del contenido de Carbon, por lo que a variación de resistencia se refiere, basándose en éstos hechos y suponiendo cifras redondas se puede decir que un contenido de Silicio actúa como un tercio del contenido de Carbon.

Y así diferentes investigadores han utilizado el parámetro $\%C + \frac{\%Si}{3}$ ó $\%C + 0.3\%Si$ porque es más sencilla de aplicar que el grado de saturación, a este parámetro encontrado le han llamado "Carbon Equivalente".

B) Desarrollo de las diversas fórmulas de Carbono Equivalente

En las paginas anteriores en la sección de Carbono Equivalente se desarrolló una fórmula que relaciona el Carbono -- y el Silicio con la composición Eutectica, esta fórmula es:

$$4.23 = \%C + \frac{\%Si}{3.2} \quad \text{ó} \quad S_c = 1 = \frac{\%C}{4.23 - \frac{\%Si}{3.2}}$$

La mayoría de los investigadores en la actualidad ---- han utilizado fórmulas más exactas, a continuación se des-- cribirán algunas de las fórmulas más conocidas.

B-1) Desarrollo de la fórmula $CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3}$

La temperatura de liquidus tiene una marcada influencia en la fluidez y gobierna parcialmente la resistencia, y la capa "chill" por lo tanto es útil conocer la relación entre - el Carbono, el Silicio, el Fósforo y las temperaturas de li-- quidus y Eutectica en los hierros colados; de acuerdo con --- esto, el sistema Fe-C ha sido estudiado, y se han investigado secciones de varios contenidos de Silicio; a cerca de lo an-- terior se puede decir, que la variación de la temperatura de liquidus con el contenido de Carbono esta bién establecido.

Para aleaciones en los rangos de contenidos de Carbono similares a los hierros colados, la relación entre la temperatura de liquidus y el contenido de Carbono es lineal y el gradiente es de alrededor de $120\text{ }^{\circ}\text{C}/1\% \text{C}$.

Sin embargo los hierros colados tienen otros elementos importantes como Silicio, Fósforo, Azufre, y Manganeso; un incremento en el contenido de Silicio ó el contenido de Fósforo se sabe bien, bajan la temperatura de liquidus en los hierros hipoeutecticos, mientras que variaciones de --- Manganeso y Azufre de rangos normales de ocurrencia en los hierros causan cambios sin importancia.

El efecto del Silicio y el Fósforo juntos no había -- sido investigado en detalle en relación a su influencia -- combinada sobre la composición del punto Eutectico del --- sistema; esta relación ha sido descrita, con una sensibilidad limitada por la siguiente fórmula:

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

Para hierros colados hipereutecticos a mayores contenidos de Silicio y Fósforo aumenta la temperatura de la -- detención de liquidus, en el sistema estable.

Newman (5) da la relación determinada por experimentación para hierros hipereutecticos que a continuación se muestra:

$$\%C = 1.3 - 2,57 \times 10^{-3} T^{\circ}C - 0.33 \%P - 0.31 \%Si$$

La cual muestra que para hierros hipereutecticos, 1 %P reduce la solubilidad de Carbon en el hierro liquido en -- 0.33 % y 1 %Si la reduce en 0.31 %.

Por lo tanto la fórmula puede ser usada para calcular el efecto del Silicio y el Fósforo sobre la composición Eutectica esto es:

$$4.27 = \%C + 0.33 \%P + 0.31 \%Si$$

Asi la aproximación aceptada generalmente es:

$$4.3 = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

Y a la relación:

$$\%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

se le ha llamado " Carbon Equivalente "

B-2) Desarrollo de la fórmula $T_L = \%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}$

Los resultados de las investigaciones de J. C. HUMPHRY

(5) para hierros hipoeutecticos conducen a las siguientes -
figuras III.-3a y 3b.

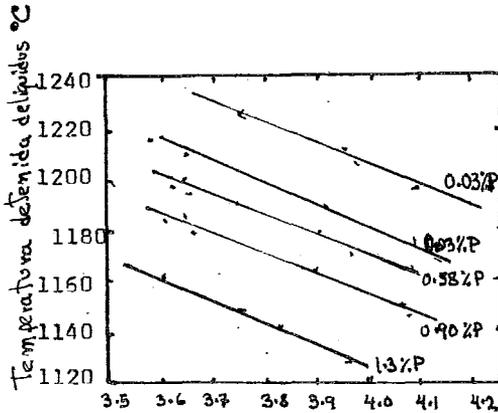


fig.III.-3a

T_L VS $\%C + \frac{\%Si}{4}$

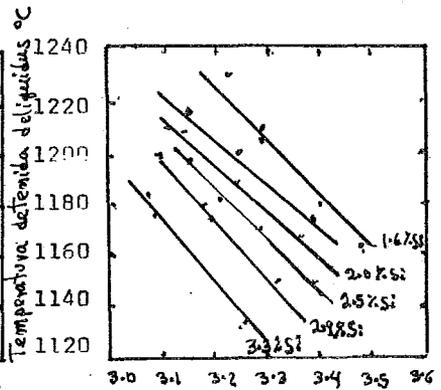


fig.III.-3b

T_L VS $\%C + \frac{\%P}{3}$

En las cuales se graficó temperatura de liquidus contra $\frac{\%Si}{4} + \%C$ variando el contenido de Fósforo fig.III.-3a y en la fig.III.-3b se graficó la temperatura de liquidus contra $\%C + \frac{\%P}{3}$ variando el contenido de Silicio; en las figuras se aprecia una serie de líneas rectas las cuales son paralelas unas con respecto a otras; también se observa que la pendiente de las líneas de la fig.III.-3a es la mitad -- aproximadamente de la pendiente de las líneas de la fig.III.-3b

Esto sugiere:

Primero.- que un contenido de Fósforo dado reduce la temperatura de liquidus por lo menos dos veces más que una misma cantidad de Silicio.

Segundo.- que la fórmula de CE = $\%C + \frac{\%Si}{4} - \frac{\%P}{2}$

no puede ser usada para describir la línea de liquidus de los hierros hipoeutecticos del sistema Fe-C-P-Si.

De acuerdo a la primera sugerencia HUMPHREY graficó temperatura de liquidus contra % de Carbon más % de Silicio sobre cuatro y temperatura de liquidus contra % de Carbon más % de Fósforo sobre dos, fig.III.-4a y fig.III.-4b --- respectivamente, en esta ocasión las líneas paralelas de las figuras tienen aproximadamente la misma pendiente.

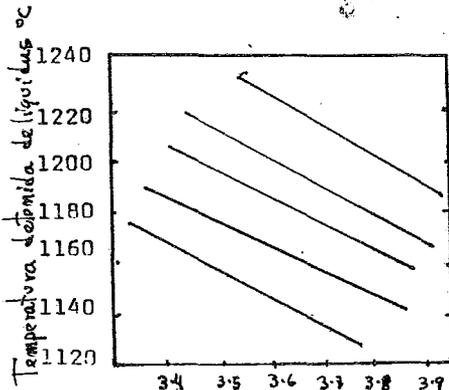


fig.III.-4a

$$T_L \text{ VS } \%C + \frac{\%Si}{4}$$

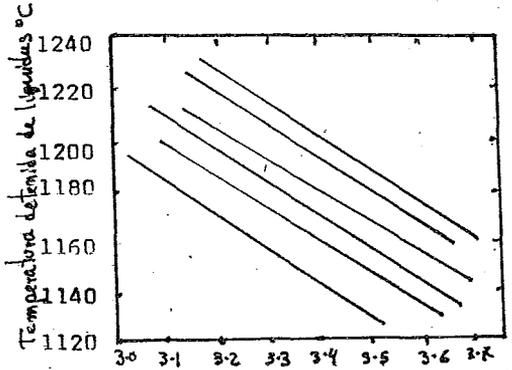


fig.III.-4b

$$T_L \text{ VS } \%C + \frac{\%P}{2}$$

A continuación él trazó el diagrama que se presenta

a continuación: (fig.III.-5)

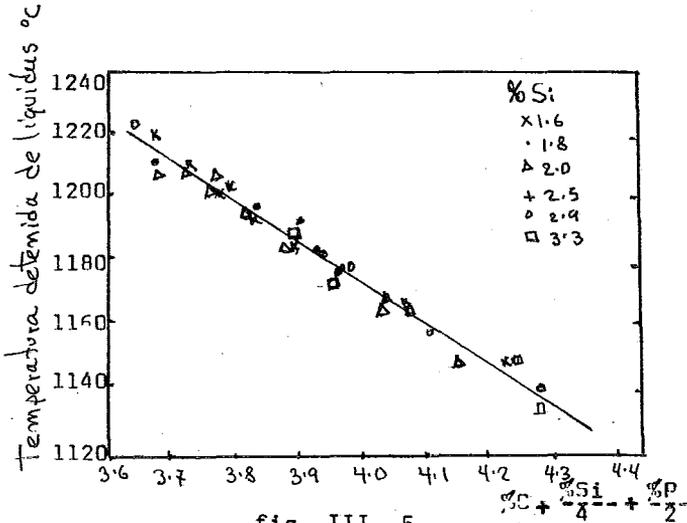


Diagrama de T_L VS $\%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}$

El cual muestra una buena relación entre la nueva función y la temperatura de liquidus en los hierros hipoeutecticos estudiados por este investigador. Asi la ecuación de la linea recta de la gráfica es:

$$T_L = 1669 - 124 \left(\%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2} \right)$$

donde $\%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}$ es una relación de CE.

Antes de continuar con la siguiente fórmula cabe hacer una aclaración. En la fórmula $\%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} = 4.25$ la función $\%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3}$ se refiere al valor de CE del hierro gris Eutectico (CEV) se usan las siglas tal y como se usan en Ingles que son (Carbon Equivalent Value).

La fórmula de CEV indica por lo tanto la proximidad de una composición particular a la composición Eutectica.

Cuando la temperatura de liquidus es relacionada por los investigadores como HUMPHREY cuya fórmula ya antes descrita

es:

$$T_L = 1669 - 124 \left(\%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2} \right)$$

La expresión $\%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}$ se conoce algo equivocadamente como Carbon Equivalente de Liquidus (CEL).

Por definición todos los hierros colados hipoeutecticos tienen el mismo valor de temperatura cuando comienzan a solidificar; así por medición de la temperatura de liquidus el valor de (CEL) = $\left(\%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2} \right)$ puede ser inferido puesto que hay una relación lineal como ya se vió antes.

Por lo tanto si una mayor seguridad de CE se requiere se usará una nueva relación de CE esta es:

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{9} + \frac{\%P}{3.5}$$

B-3) A continuación se hace un breve desarrollo de como se llegó a esta nueva relación de CEL.

Moore (7) mediante analisis de regresión encontró relaciones entre la temperatura de liquidus, temperatura eutectica y composición experimentando con -- hierros blancos. Los rangos de composición por él fueron 3.05- 3.76 %C , 0.61 - 2.83%Si y 0.01 - 1.92 %P

Las constantes y los coeficientes de regresión se presentan en al tabla III.-lsiguiente:

Relación:	Constante:	Pendiente:	Coeficiente de regresión:			Límite de conf.:	Coef. de corr.:
			C	Si	P		
T_L	1650	-121	1	0.22	0.54	± 0.05	0.995
T_e^w	1104	9.8	1-1.23	-3.0		±0.45	0.989

Estos datos nos dan una ecuación lineal para la temperatura de liquidus y la composición, Esta es:

$$T_L C = 1650 - 121 (\%C + 0.22\%Si + 0.54P)$$

Por lo tanto la temperatura de liquidus puede ser usada para determinar el CEL valor definido por la función $\%C + 0.22\%Si + 0.54\%P$ en los hierros solidificados como blancos, con ± 0.05 y con 95% de limite de confianza.

La temperatura Eutectica de los hierros blancos --
fue también relacionada con la composición y el ana--
lisis de regresión mostró que la temperatura Eutectica
esta relacionada con la composición por:

$$T_e^w = 1104 + 9.8(\%C - 1.23\%Si - 3.0\%P)$$

con un coeficiente de correlación de 0.989

Debido a que las muestras usadas por Moore tienen
una velocidad de enfriamiento de aproximadamente 70 °C/min.
y esta velocidad es de no-equilibrio, se hace un análi--
sis de la dependencia de la temperatura de liquidus y -
de la temperatura Eutectica de los hierros blancos so--
bre la composición que amplie la información sobre la --
naturaleza de la región cercana al Eutectico del diagra--
ma de fases Fe-Fe₃C-Si. Asi conforme se va acercando a -
la composición Eutectica la temperatura de liquidus se -
baja, y se aproxima a la temperatura Eutectica del hi--
erro blanco.

En el limite, a la composición Eutectica $T_e^w = T_L$
asi usando las ecuaciones obtenidas del analisis de ----
regresión para hierros blancos:

$$1650 - 121(\%C + 0.22\%Si + 0.54\%P) = 1104 + 9.8(\%C - 1.23\%Si - 3\%P)$$

$$\frac{1650 - 1104 - 121(\%C + 0.22Si + 0.54\%P)}{9.8} = (\%C - 1.23\%Si - 3P)$$

$$55.71 - 13.34\%C - 1.484\%Si - 3.66\%P = 0$$

$$\%C + \frac{1.484}{13.34} \%Si + \frac{3.66}{13.34} \%P = \frac{55.71}{13.34}$$

$$\%C + \frac{\%Si}{8.989} + \frac{\%P}{3.64} = 4.176$$

y esta ecuación puede ser aproximada a:

$$\%C + \frac{\%Si}{9} + \frac{\%P}{3.5} = 4.16$$

La función $\%C + \frac{\%Si}{9} + \frac{\%P}{3.5}$ es por consiguiente

el (CEV) para hierros colados blancos.

Limitaciones:

- Se asumió que es lineal la influencia del Carbon, Silicio y Fósforo sobre la temp. Eutectica.
- En esta fórmula el valor del Eutectico de hierro blanco es solamente una aproximación.
- Es solamente aplicable dentro de un rango de composición proximo al Eutectico.

B-4) Desarrollo de la fórmula DEF = $C + \frac{Si}{3} + \frac{P}{2}$

Del trabajo sobre fluidez de L. F. Porter y P. C. Rosenthal (20); éstas personas llegan a:

$$\text{Fluidez(pul)} = 4C + 2P + 1Si + \frac{5 \times (\text{Sobrecalentamiento } ^\circ\text{F})}{100}$$

Al aplicar esta fórmula a resultados experimentales se obtienen resultados 6 pulgadas arriba, (la fluidez se mide en unidades de longitud de un molde espiral estandarizado) por lo que a la fórmula se le adiciona un factor más y entonces nos queda así:

$$\text{Fluidez(pul)} = 4C + 2P + 1Si + \frac{5X(\text{Sobrecalentamiento } ^\circ\text{F})}{100} - 6$$

Para poder aplicar esta fórmula se debe conocer el sobrecalentamiento, y para determinar la cantidad de sobrecalentamiento, se debe conocer la temperatura de liquidus, como ya sabemos la temperatura de liquidus es afectada en razón inversa a la que es afectada la fluidez del metal líquido (la máxima fluidez sucede en el punto de composición Eutéctica) es decir la temperatura de liquidus es inversamente proporcional a el valor del factor composición por consiguiente los autores dividen el factor composición entre cuatro y queda así:

$$C + \frac{Si}{4} + \frac{P}{2}$$

La expresión general para el cálculo de fluidez es la siguiente:

$$\text{Fluidez(pul)} = 14.9F + 0.05T - 155$$

donde F es el factor de composición $F = C + \frac{Si}{4} + \frac{P}{2}$

T es temperatura de vaciado en $^{\circ}F$

Debe recordarse que la ecuación anterior no funciona si la temperatura de vaciado esta dentro de la temperatura de liquidus más $370^{\circ}F$ ya que en este rango la ecuación de fluidez pierde su linealidad.

El señor Evans de BCIRA (20) en una discusión al desarrollo de la fórmula anterior, explica que él también -- derivó un factor de composición, similar, y lo expresa como una fórmula, esta es:

$$CEF = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{2}$$

Donde CEF es una abreviación para "Carbon Equivalente basado en la Fluidez", el señor Evans hace la aclaración a Porter y Rosenthal de que siendo más estrictos en su trabajo en la parte referente al efecto del porcentaje de los --- elementos Carbon, Silicio y Fósforo, 1% C aumenta la fluidez en 3.9 pulgadas, de la misma manera, 1% Si aumenta la fluidez 1.2 pulgadas, mientras que 1% P incrementa la fluidez 2 pul-- gadas.

obteniendo un factor de composición igual a :

$$3.9 \%C + 1.2 \%Si + 2 \%P$$

y como es inversamente proporcional a la temperatura de liquidus, entonces:

$$\%C + \frac{1.2}{3.9} \%Si + \frac{2}{3.9} \%P$$

esto nos da:

$$\%C + \frac{\%Si}{3.25} + \frac{\%P}{1.9} \approx \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{2}$$

Por esto el Señor Evans sugiere que la fórmula

$CEF = C + \frac{Si}{3} + \frac{P}{2}$ debe usarse como factor de composición correcto en el cálculo de la fluidez.

C) Formas de obtener el valor de Carbon Equivalente.

El valor de Carbon Equivalente desde hace algunos años se ha usado como una medida de control metalúrgico en el proceso de fundición. A continuación se desarrolla brevemente la forma como puede obtenerse un valor de -- Carbon Equivalente.

C-1) Obtención química del valor de Carbon Equivalente.

Desde que se empezaron a tomar en cuenta las primeras relaciones (como las mencionadas en el capítulo II) las cuales relacionan la composición química de los hierros con las propiedades físicas y metalográficas, se empezó a analizar principalmente los contenidos de Carbon, Silicio y Fósforo, en los hierros que se querían controlar más estrictamente en sus propiedades.

Sabiendo el contenido de Carbon, Silicio y Fósforo se obtuvo el valor de Carbon Equivalente mediante la aplicación de la fórmula $CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3}$ (mencionada en B-1) para hierros de bajo Fósforo. Pero el valor de Carbon Equivalente obtenido mediante el análisis químico es un poco lento,

ya que por ejemplo analizar el contenido de Silicio mediante el método gravimétrico lleva aproximadamente -- media hora, tener el análisis de todos los elementos lleva aproximadamente tres cuartos de hora; debido a esto se buscó la manera de acortar el tiempo para obtener un valor de Carbon Equivalente lo más rápidamente posible para --- poder modificar la composición química del hierro líquido antes de vaciarlo al molde (si esto fuere necesario).

Los métodos usados en el análisis químico se dan en el apéndice B (Procedimientos de análisis de vía húmeda de FHASA fundiciones de hierro y acero S.A).

B-2) Obtención Instrumental del valor de Carbon Equivalente

A continuación se desarrollarán brevemente los fundamentos de una medida rápida de Carbon Equivalente (instrumental).

Si la temperatura del metal se registra cuando el -- metal se está solidificando, se puede obtener una curva de enfriamiento similar a la mostrada en la fig. III.-6

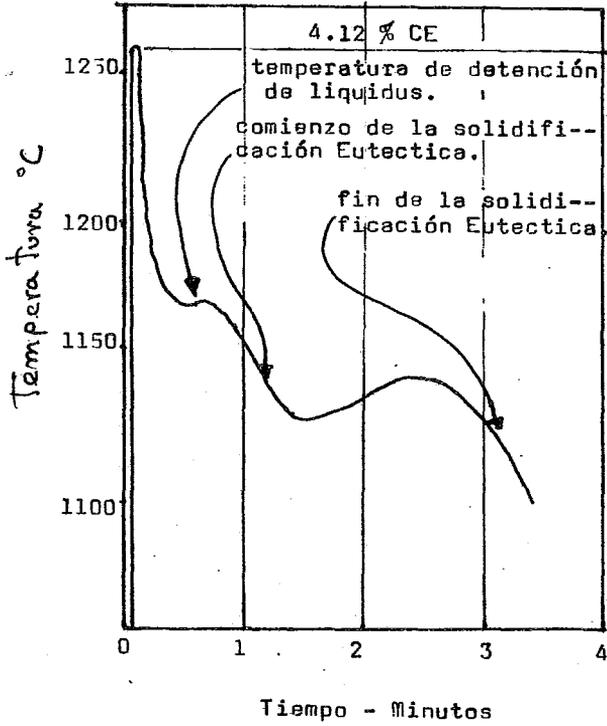


fig. III.-6

La figura muestra una curva de enfriamiento tiempo - temperatura típica de un hierro - gris hipoeutectico. (8,9)

La temperatura a la cual la austenita comienza a formarse es acompañada por un cambio en la velocidad a la -
baja la temperatura, esto se debe al calor que se des---
prende cuando se forma austenita solida, (ver apéndice A).

La temperatura a la cual la austenita comienza a ---
formarse se le conoce como temperatura de liquidus y pue-
de ser correlacionada con el contenido de Carbon Equiva-
lente (mencionado en los incisos B-2 y B-3) en el hierro
ver la siguiente fig. III.-7

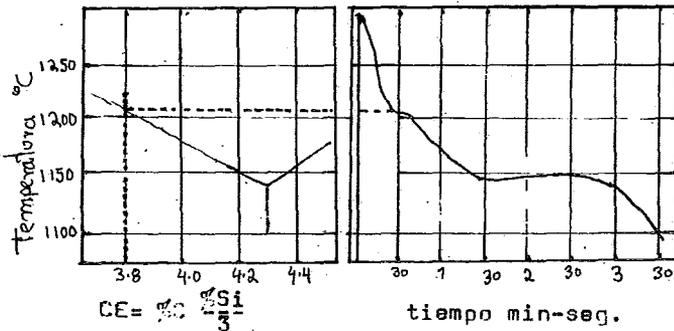


fig.III.-7a diagrama de fases con CE.

fig.III.-7b curva de enfriamiento para el hierro S (3.8% CE)

La curva de enfriamiento de la aleación S fig.III.-7b muestra la temperatura de detención de liquidus la cual puede ser correlacionada con el diagrama de la izquierda fig.III.-7a De D.F. Kease (10)

TABLA III.-2

La tabla da la relación de CE* con la temperatura de liquidus para hierros grises hipoeutecticos de bajo -

Fósforo.

CE	T _L C	CE	T _L C	CE	T _L C
3.60	1232	3.85	1204	4.10	1177
3.61	1231	3.86	1203	4.11	1176
3.62	1230	3.87	1202	4.12	1174
3.63	1229	3.88	1201	4.13	1173
3.64	1228	3.89	1200	4.14	1172
3.65	1227	3.90	1199	4.15	1171
3.66	1226	3.91	1198	4.16	1170
3.67	1224	3.92	1197	4.17	1169
3.68	1223	3.93	1196	4.18	1168
3.69	1222	3.94	1194	4.19	1167
3.70	1221	3.95	1193	4.20	1166
3.71	1220	3.96	1192	4.21	1164
3.72	1219	3.97	1191	4.22	1163
3.73	1218	3.98	1190	4.23	1162
3.74	1217	3.99	1189	4.24	1161
3.75	1216	4.00	1188	4.25	1160
3.76	1214	4.01	1187	4.26	1159
3.77	1213	4.02	1186	4.27	1158
3.78	1212	4.03	1184	4.28	1157
3.79	1211	4.04	1183	4.29	1156
3.80	1210	4.05	1182	4.30	1154
3.81	1209	4.06	1181	4.31	1152
3.82	1208	4.07	1180	4.32	1150
3.83	1207	4.08	1179	4.33	1148
3.84	1206	4.09	1178	4.34	1146

* Datos basados en la fórmula $CE = C + \frac{1}{3}Si$ (Para hierros con 0.05 - 0.09%P). Si el contenido de Fósforo es mayor de 0.10% bajará la T_L significativamente.

Datos de Gray Iron Research Institute ref.(11)

TABLA III.-3

La tabla de la relación de CE* con la temperatura detenida

de liquidus para hierros grises hipereutéticos.

CE	T _L C	CE	T _L C	CE	T _L C
4.25	1160	4.50	1130	4.75	1107
4.26	1159	4.51	1129	4.76	1106
4.27	1158	4.52	1128	4.77	1106
4.28	1157	4.53	1127	4.78	1104
4.29	1156	4.54	1126	4.79	1103
4.30	1154	4.55	1126	4.80	1103
4.31	1152	4.56	1124	4.81	1102
4.32	1150	4.57	1123	4.82	1101
4.33	1148	4.58	1123	4.83	1100
4.34	1146	4.59	1122	4.84	1099
4.35	1143	4.60	1121	4.85	1098
4.36	1142	4.61	1120	4.86	1097
4.37	1142	4.62	1119	4.87	1097
4.38	1141	4.63	1118	4.88	1096
4.39	1139	4.64	1117	4.89	1094
4.40	1139	4.65	1116	4.90	1094
4.41	1138	4.66	1116	4.91	1093
4.42	1137	4.67	1114	4.92	1092
4.43	1136	4.68	1113	4.93	1091
4.44	1135	4.69	1113	4.94	1090
4.45	1134	4.70	1112	4.95	1089
4.46	1133	4.71	1111		
4.47	1133	4.72	1110		
4.48	1132	4.73	1109		
4.49	1131	4.74	1108		

Datos basados en la fórmula $CE = C + \frac{1}{3}(Si + P)$

Datos de Leeds and Northrup Company ref. (11)

Así pues, es por lo tanto posible registrar el valor aproximado de CE por el registro de la temperatura a la cual al austenita comienza a formarse (temperatura detenida de liquidus en las curvas de enfriamiento). Cuando solidifica el eutéctico el calor adicional desprendido da como resultado cambios adicionales en la forma de la curva de enfriamiento. El uso de estos fenómenos como instrumento en la fundición facilita al operador el obtener una evaluación rápida y segura de valor de CE de los hierros.

La mayoría de las veces esta técnica se usa para composiciones hipoeutécticas. Sin embargo las composiciones hipereutécticas también pueden ser calculadas, si se toman las precauciones necesarias.

En los hierros colados hipereutécticos donde el calor involucrado durante la formación de grafito es más difícil de observar se han hecho pequeños moldes recubiertos con pintura de Teluro, los cuales se aplican a hierros hipo e hipereutécticos (ver apéndice A última parte, efecto del Teluro) por supuesto el hierro solidifica blanco, y se obtiene una relación satisfactoria entre temperatura detenida de liquidus y un valor de CE.

Si la composición de los hierros hipereutecticos es homogénea la relación entre la temperatura detenida de liquidus y el Carbono Equivalente (si el hierro solidifica como gris), sigue esta fórmula:

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

En el caso de que la muestra solidifique como hierro blanco se obtiene una curva como la de la fig.III.-8 (12)

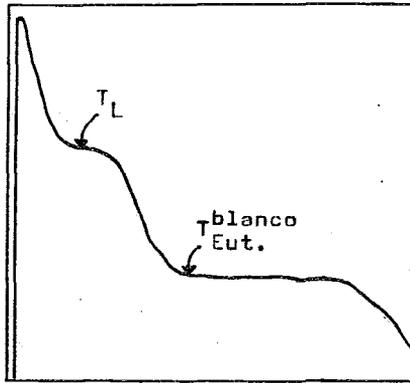


fig.III.-8

Curva de enfriamiento de un hierro blanco.

Una vez registrada una temperatura de detención de liquidus se calcula el CE, si la muestra solidifica -- como hierro blanco el determinador usa la fórmula:

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{9} + \frac{\%P}{3.5}$$

Obteniéndose un valor de Carbono Equivalente.

Cuando se obtiene la temperatura detenida del eutectico de hierro blanco se procede a calcular el %C mediante la -- fórmula: $\%C = 0.016931 T_S C - 0.00796 T_L C - 6.05$

Una vez obtenido el valor de CE, %C y conociendo el -- contenido de Fósforo en los hierros de bajo Fósforo por --- ejemplo si el fósforo es de 0.05%P con una variación de -- 0.02% el %Si puede ser estimado con una variación de -- 0.14% con la formula ya antes desarrollada:

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}$$

Despejando el contenido de Silicio tenemos:

$$\%Si = 4 (CE - \%C) - 2\%P$$

Este tipo de cálculos se pueden hacer manualmente o por medio de calculadores gráficos como uno de BCIRA (12) o mediante determinadores que contienen programas de calculo de estos parámetros (11 y13)

D) Relaciones entre CE y propiedades Físicas

El hierro gris tiene una matriz perlítica de diversos grados de fineza, ferrite, austenita, bainita ó mezclas de de éstas dependiendo de su composición, velocidad de enfriamiento y tratamiento subsecuente.

Las propiedades Físicas estarán regidas en parte por las propiedades de la matriz, por lo tanto otro constituyente importante es el grafito que posee baja resistencia y tenacidad. La modificación de las propiedades de la matriz es una función del tamaño, forma y distribución del grafito.

En los hierros grises normales el carbono es tipo A, las laminillas distribuidas al azar. El efecto de hendidura de de las laminillas de grafito reduce la ductilidad medida -- como alargamiento casi a cero. A continuación se desarrollaran algunas relaciones entre CE y propiedades Físicas.

C-1) Relaciones entre CE y resistencia a la tracción.

El carbon equivalente (su valor) es un medio conveniente para comparar hierros. Muchos investigadores lo han relacionado con la resistencia a la tracción, fluidez y otras características de los hierros grises.

Así la resistencia a la tracción puede ser aproximada por la siguiente ecuación (13)

$$T = (10000) (11.5 - 2 CE)$$

donde T = Resistencia a la tracción en lb/in²

CE = Carbon Equivalente

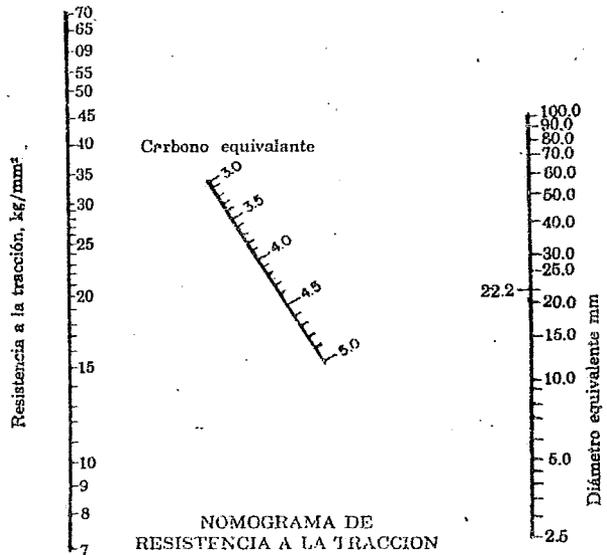
Y la fórmula en el sistema métrico decimal es:

$$T = 7.03 (11.5 - 2 CE)$$

donde T = Resistencia a la tracción en Kg/mm²

A continuación se presenta un nomograma que relaciona el espesor (diámetro equivalente), CE y la resistencia a la tracción fig. III.-9 (14)

fig, III.-9
Nomograma de resistencia a la tracción para hierros colados en arena, no aleados.



Explicación del nomograma .- Una línea trazada a través del diagrama intersectará la primera ordenada que representa la resistencia, la segunda ordenada, que representa el CE y la ordenada de la derecha representa el tamaño de la sección. Se supone que los hierros están fundidos en arena.

Si se coloca una regla sobre un CE dado y se gira alrededor de este punto, en la posición se leerá la resistencia en la primera ordenada (a la izquierda) y el tamaño de la sección en la tercera ordenada (a la derecha).

Una fórmula que relacione de una manera similar al nomograma las variables, espesor, CE y resistencia a la tracción es: (8)

$$R_T = 10,000 (11.68 - 2CE - 2.3 \log_{10} D_e)$$

donde CE = Carbon Equivalente

D_e = diametro equivalente de las fundiciones en pulgadas ó diametros de redondos colados en arena.

Calculo de $De = \frac{4 \times \text{Volumen (in}^3\text{)}}{\text{Area superficial (in}^2\text{)}}$

ó $De = 2 \times$ espesor de la sección
de un plano ó pared.

nota:

Todos éstos valores obtenidos por estas relaciones no son absolutos, pueden servir como una guía útil en la selección de las composiciones para fundiciones de sección determinada.

D-2) Relaciones Gráficas con varias Propiedades Fisicas

A continuación se mostrarán dos gráficos que relacionan las propiedades Fisicas de los hierros grises no aleados con el Carbon Equivalente y el espesor.

El primero de estos gráficos se muestra a continuación en la fig. III.- 10

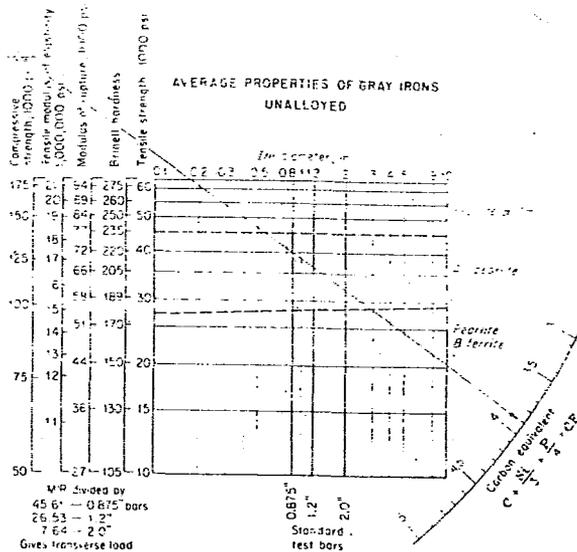


Fig. III.- 10 R. Schneidewind y R. G. McElwee

El diagrama siguiente esta basado en las dos siguientes fórmulas:

$$S_c = \frac{\%C}{4.23 - \frac{\%Si}{3.2} - 0.275 \%P}$$

$$Y \quad CE = \%C \frac{\%Si}{3} \frac{\%P}{3}$$

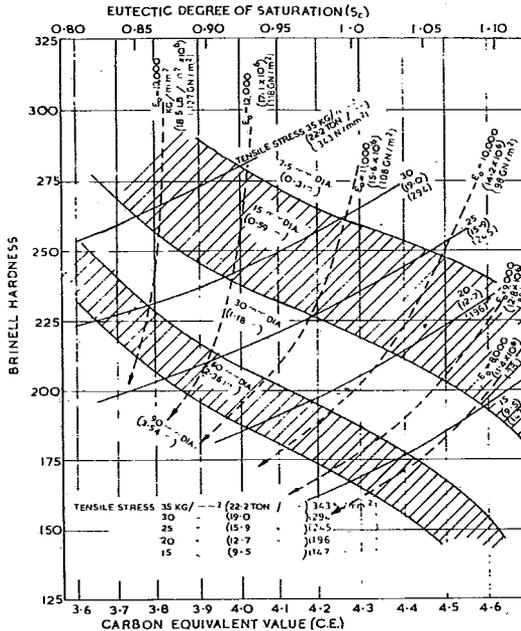


Figure 11. Relationship between the tensile strength, Brinell hardness, modulus of elasticity at zero stress, composition and bar diameter (Collaud).

La fig. III.- 11 relaciona la Resistencia a la tracción, la dureza brinell, el módulo de Elástico, Composición y diámetro de barra. De Collaud (15)

CAPITULO IV.- PARTE EXPERIMENTAL

IV-A) Objetivo y Plan de Experimentación.

Como se ha indicado en la introducción, se llevaron a cabo una serie de experiencias mediante las cuales, se obtuvo información sobre:

a) Las curvas de enfriamiento de diversos hierros -- grises (solidificados como hierros blancos por la adición de Teluro). Y de hierros de una misma composición química solidificados como hierros blancos y como hierros grises, para interpretarlas a la luz de los conceptos que hay -- sobre ellos en la literatura.

b) Las curvas de enfriamiento, propiedades físicas y estructuras metalográficas en hierros grises de diversas secciones, con el fin de encontrar las relaciones entre -- estos parámetros y compararlos con los reportados en la -- literatura.

Con esta información obtenida en una planta metalúrgica Nacional, usando las coladas de hierro preparadas -- para su producción rutinaria, se pretende lograr un -- acercamiento a las conclusiones, a las que el fundidor -- se enfrenta diariamente y por lo tanto contribuir más -- eficazmente a la utilización de los conceptos de la literatura, en la vida diaria industrial.

Para llevar a cabo los objetivos enunciados en la pagina anterior, el el plan trazado comprendió 3 partes:

1.- Se solidificaron 10 hierros grises como blancos (mediante la adición de Teluro), obteniendo sus curvas de enfriamiento y Carbon Equivalente, variando la composición química de manera de tener una composición amplia de -- carbonos equivalentes sin variar el diámetro, se anali-- zaron las curvas de enfriamiento y Carbon Equivalente.

2.- Se hicieron algunas pruebas sin variar el diámetro, esto es se obtuvieron distintas composiciones de hierros - con diversos Carbones Equivalentes; para una composición se solidificaron 2 muestras, una como hierro blanco y la otra como hierro gris, se analizó para cada una, su curva de analisis térmico y su Carbon Equivalente.

3.- Se solidificaron como hierros grises varias mues-- tras a diferentes diámetros ($3\frac{1}{4}$ ", $1\frac{1}{2}$ ", 2") se escogieron -- arbitrariamente diferentes Carbones Equivalentes para cada diámetro; se analizaron las curvas de analisis térmico, CE, propiedades Fisicas y Metalográficas; se analizaron estas - conjuntamente relacionandolos con los diferentes diámetros.

B) Descripción del Equipo y Material que involucra.

Equipo de fusión (hornos).- Se usó hierro gris proveniente de dos hornos de cubilote, éstos hornos -- están calculados para dar cuatro toneladas de hierro -- por hora.

A continuación se da un arreglo de la carga de estos hornos para su operación.

Acero de bajo carbon	100 Kg
Chatarra de hierro gris	200 Kg
Ferro-Silicio 75 %	6.5 Kg
Ferro-Manganeso 75 %	0.9 Kg
Coke del país .. 12 Kg de U.S.A. ...	24 Kg
Caliza	14.0Kg
Espato Fluor	1.0 Kg

La cama de Coke para su funcionamiento es de ..280 Kg

Los hornos de cubilote sangran el hierro líquido a un -- horno eléctrico de arco, con capacidad en el crisol para cinco toneladas de hierro líquido, este horno tiene como finalidad calentar el metal líquido y ajustar la compo--- sición para usarlo en cualquier momento en las condiciones adecuadas.

Se observa que el hierro es bastante controlado debido a que es usado para la fabricación de motores de automóvil.

A continuación se presenta un esquema de operación hasta el vaciado de las muestras en los moldes que contienen un termopar conectado al determinador de CE. fig.IV.-1

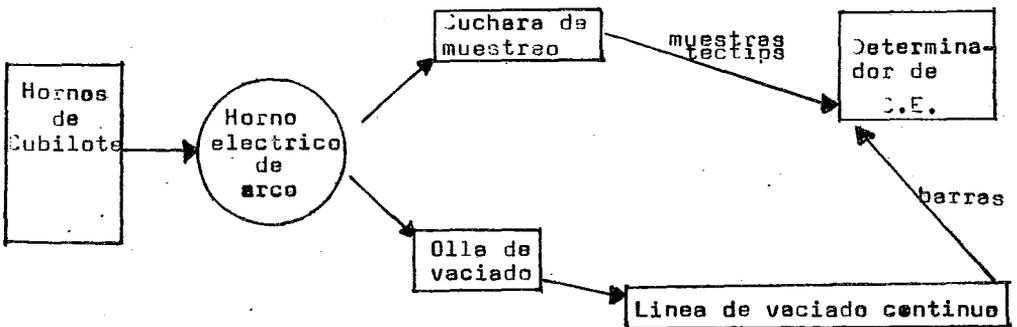
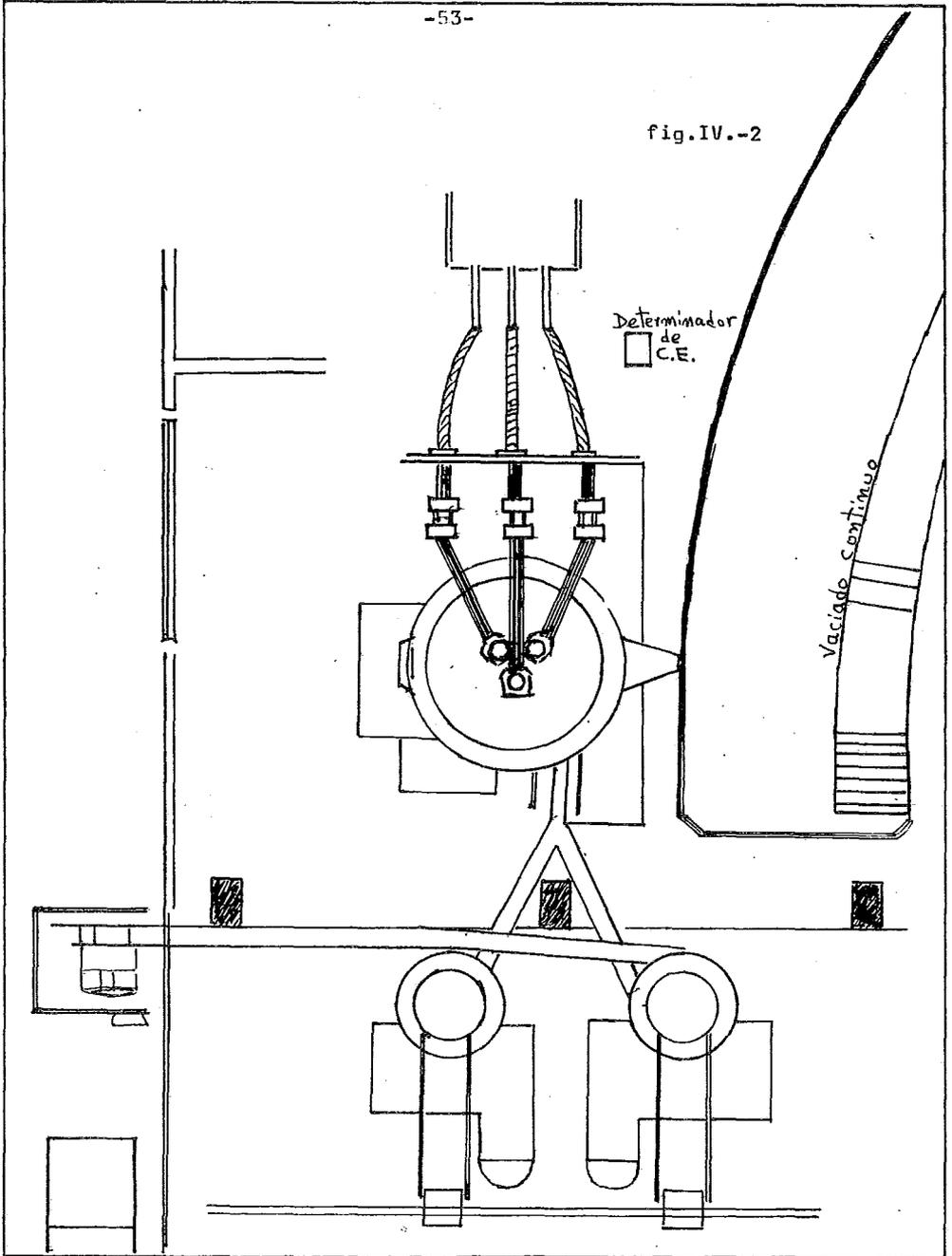


fig.IV.-1

Y despues un croquis de la ubicación de los hornos de --- cubilote y el horno eléctrico de arco, además el sitio donde esta en funcionamiento un determinador de Carbon Equivalente que funciona por analisis Térmico, de una muestra de hierro - liquido representativa ver fig.IV.-2

fig.IV.-2



Olla de vaciado.- Tiene una capacidad de 350 Kg esta suspendida en una grúa viajera pequeña de un sólo riel, esta grúa se opera manualmente desde el piso, para llevar la olla al sitio en que se necesita para vaciar el metal liquido.

Constitución física de la olla :

La olla tiene una coraza de placas de acero y en el interior un recubrimiento de refractario del mismo que es usado para los hornos de cubilote, es decir refractario ácido. Las dimensiones de la olla son las siguientes:

Diámetro externo superior60 cm
Altura externa62 cm
Volumen69 dm³
Espesor de refractario 7 cm

El metal liquido ocupa normalmente las tres -- cuartas partes del volumen de la olla; la cual tiene dos manivelas de tubo de acero para que los operarios puedan maniobrar con ella, ademas consta de una tapa - para evitar perdidas de calor.

La figura IV.-4 que se muestra a continuación, -- nos da una idea más clara de la olla de vaciado.

Cuchara de muestreo:

Sus dimensiones son las siguientes:

Largo de mango ... 1.3 m, diámetro de crisol 20 cm
ver la figura IV.-3

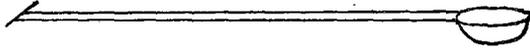


Fig.IV.-3

Euchara de muestreo

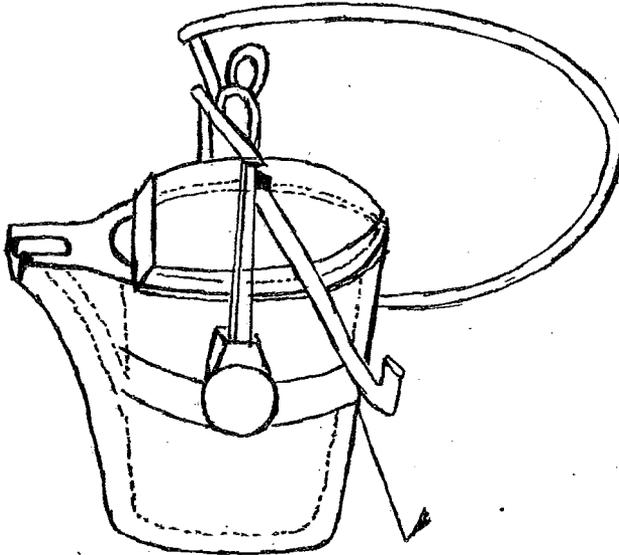


Fig.IV.4 Olla de vaciado usada para llenar la barra contenida en el cilindro de acero de tres patas de la figura siguiente.

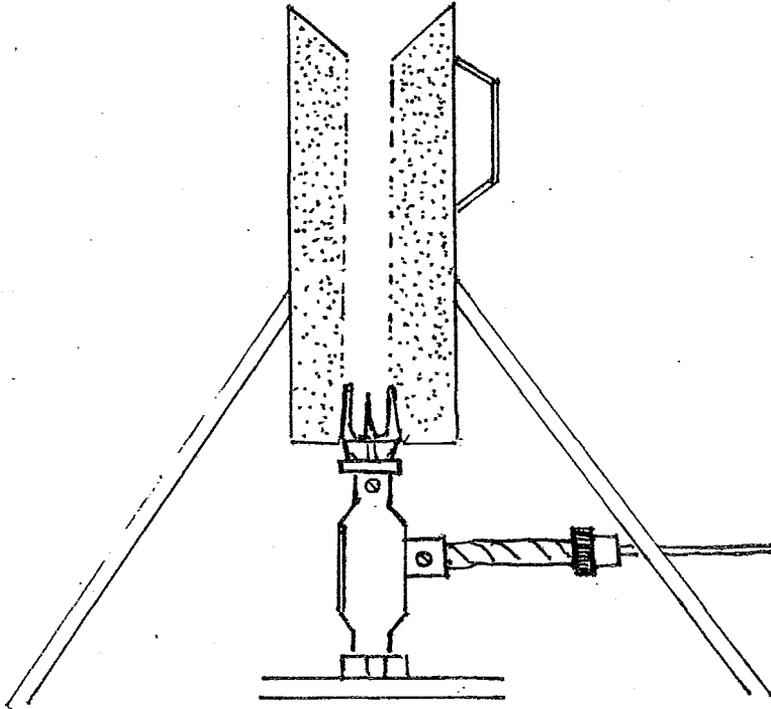


fig. IV.-5

U N A M
FAC. DE QUIMICA

T E S I S P R O F E S I O N A L

SALVADOR VAZQUEZ BELMONT

CILINDRO MOLDEADOR

Descripción del molde para vaciar las barras de hierro gris. (ver fig. IV.-5) Este molde esta formado por:

Una sección de tubo circular de acero de bajo carbon de 11.4 cm de diámetro exterior, 11 cm de diámetro interior y, de 4 mm de espesor.

El tubo consta de tres patas situadas a 120 °C una con respecto a otra, con las cuales el cilindro queda a 30 cm de altura del piso.

La altura del cilindro sobre el piso es la necesaria para que se acople la base transmisora, que a su vez tiene acoplada un tectip. (el tectip se describe en la página siguiente ver fig. IV.-6)

El cilindro también consta de orificios de 1 cm de diámetro para facilitar la salida de los gases; situados a cada 5 cm de distancia.

Equipo de medición de carbon equivalente

El medidor de C. E. usado fué uno de los más recientes de la compañía Leeds and Northup el cual nos da valores de CE , T_p , T_i , $\%Si$, $\%C$ en base a un analisis térmico de una muestra de hierro liquido. (ver fig. IV.-6)

Dimensiones físicas del registrador:

altura	41 cm
largo	38 cm
ancho	38 cm
peso	22Kg

Este medidor de CE usa unos pequeños moldes de arena -- shell para corazones que tienen un termopar de Cromel-- Alumel incrustado en la base; este pequeño molde con el termopar es llamado tectip. A continuación se muestra la figura del tectip.

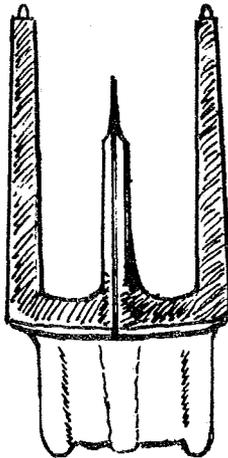


Fig. IV.7 tectip usado para determinar CE

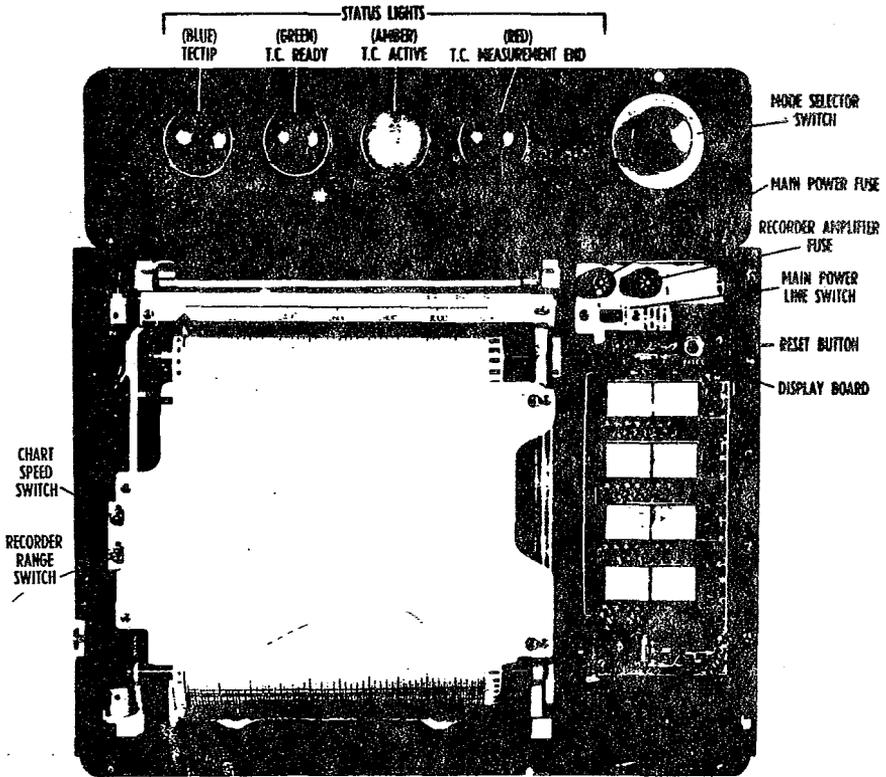


Fig. 1 - Moxilab II - Front View, Door Open

Fig.IV.6 Vista de frente de un determinador de carbon equivalente de los más recientes.

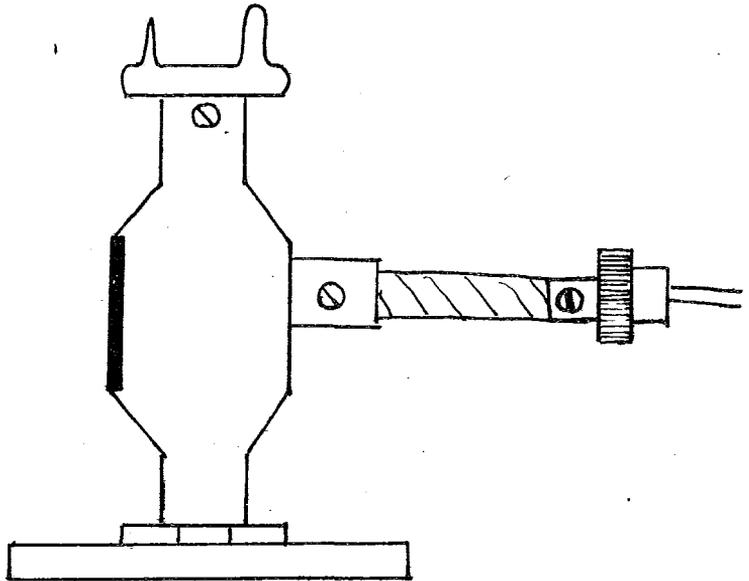


fig.IV.8 muestra la base donde se acopla el tectip.

En esta base se transmiten los milivolts que transforma el microprocesador en lecturas de temperatura, CE etc.

El metal liquido para analizarse termicamente debe introducirse 8°C arriba de la temperatura de liquidus cuando menos, además el metal debe ser hierro no aleado.

Asi cuando una temperatura de liquidus es obtenida se exhibe en el indicador de de CE. (los otros indicadores, el de $\%C$ y el de $\%Si$ permanecen en cero).

Cuando la temperatura de solidus se obtiene, el microprocesador calcula automaticamente los valores de CE, $\%C$, y $\%Si$ y pone cada uno en su respectivo indicador.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Operaciones realizadas para obtener los datos y curvas de enfriamiento de varios hierros grises (solidificados como hierros blancos).

En este caso se usaron tectips recubiertos con Teluro que se ponían acoplados a la base transmisora; y se procedía a sacar con una cuchara para muestras el hierro -- liquido necesario de la olla de vaciado. En esta etapa -- se hicieron 10 pruebas con 10 tectips recubiertos con -- Teluro, por lo tanto los hierros solidificaron como -- hierros blancos.

El determinador de CE proporcionó las curvas de enfriamiento y los datos de CE, después de cada prueba se procedía a tomar los datos de CE, %C, y %Si y se quitaba la sección del rollo de papel registrador para tener la -- curva de enfriamiento de este papel.

Operaciones realizadas para obtener los datos de los hierros solidificados como hierros grises y blancos.

En este caso se usaron solo tectips que se ponían -- acoplados a la base transmisora; y se procedía a sacar con una cuchara ^{*} hierro liquido del horno de electrico de arco.

* (ver fig. IV.-3)

(el cual tiene la función de calentar el hierro líquido) del que solamente se sacó el hierro necesario para llenar la copa del tectip, cuando se quería que el hierro solidificara blanco se usaba un tectip con Teluro y, si no lo tenía el hierro solidificaba como hierro gris.

En esta etapa se realizaron tres pruebas de hierros solidificados como hierro gris y tres pruebas de hierros solidificados como hierro blanco.

El determinador de CE proporcionó las curvas de enfriamiento y los datos de CE, para obtener la curva de enfriamiento. Después de cada prueba se procedía a quitar esa sección del rollo de papel registrador.

Moldeo

Moldeo de barras de diversos diámetros.- Para hacer una barra de tres cuartos de pulgada se procedió así:

Se hizo un modelo de madera con respectivo ángulo de salida, se moldeo en el cilindro de acero (descrito anteriormente) y con arena nueva mezclada con los aglutinantes y aditivos necesarios.

La arena que se usó fue arena Silica para fundición que en algunos casos se usa para el moldeado de corazones, es decir se usó arena nueva mezclada. A continuación se dan las proporciones de los diferentes materiales que la componen:

Arena con aceite para corazones:

arena Juanita300Kg
aceite Linoil4.5 lt.
Bentonita7.0Kg.
Dextrina5.0Kg.

Propiedades Fisicas de esta arena:

Permeabilidad195-228
R.en verde2.2-2.9
R.en seco120-130 lb/in²
Humedad 2.0-3.6%

Una vez moldeada la berra se procedia a quitar el modelo de madera y se introducía el cilindro de acero con la barra moldeada en moldeada en verde, a la estufa, durante dos horas despues de ese tiempo se procedía a sacar el cilindro; y se le acoplaba el tectip sin teluro.

Una vez hecho esto se llevaba el dispositivo a la zona donde esta el determinador de CE, se procedia a acoplar la base transmisora, como se observa en la fig.IV.-5 (donde se describe el cilindro moldeador).

Teniendo todo en condiciones, se procedia a vaciar hierro liquido con la olla de vaciado, segundos despues el determinador daba la curva de enfriamiento y un valor de Carbon Equivalente, una vez que el hierro llegaba a 1100 grados céntigrados se procedia a retirar la base transmisora y se dejaba enfriar la barra hasta la temperatura ambiente.

Este procedimiento se repitió para las barras de tres cuartos de pulgada, una y media pulgadas y dos pulgadas.

Debido a que en las barras, los hierros fueron grises el determinador nada más dió la curva de enfriamiento y el valor de Carbon Equivalente. Los porcentajes de Carbon, Silicio, Fósforo y Manganeso fueron obtenidos por analisis quimico de via húmeda segun los procedimientos del laboratorio de F.H.A.S.A. (ver apéndice B).

CAPITULO V .- RESULTADOS EXPERIMENTALES

V-A) Curvas de enfriamiento de varios hierros y su determinación de CE.

TABLA V.-1

ANALISIS DEL DETERMINADOR Nº de muestra	ANALISIS DEL DETERMINADOR			ANALISIS DEL LABORATORIO			
	CEV ₁	%C	%Si	CEV ₂ *	%Si	%C	%Mn
AV1	3.99	3.44	1.88	3.92	2.17	3.2	0.71
AV2	4.02	3.35	1.92	4.09	2.19	3.36	0.70
AV3	4.03	3.36	1.95	3.92	2.07	3.23	----
AV4	4.06	3.39	1.95	4.06	2.30	3.29	0.66
AV5	4.07	3.38	1.99	4.03	2.26	3.28	0.72
AV6	4.08	3.38	2.06	4.11	2.29	3.35	0.68
AV7	4.09	3.41	1.98	3.96	2.15	3.25	----
AV8	4.12	3.46	1.94	4.07	2.10	3.37	0.70
AV9	4.15	3.41	2.24	4.21	2.45	3.39	0.62
AV10	4.17	3.42	2.22	4.19	2.43	3.38	0.59

$$*CEV_2 = \%C - \frac{\%Si}{3}$$

La tabla V.-1 muestra los datos obtenidos de 10 hierros grises enfriados solidificados como hierros blancos mediante tactips (descritos en el capítulo anterior, en IV-B) recubiertos con una capa de Teluro.

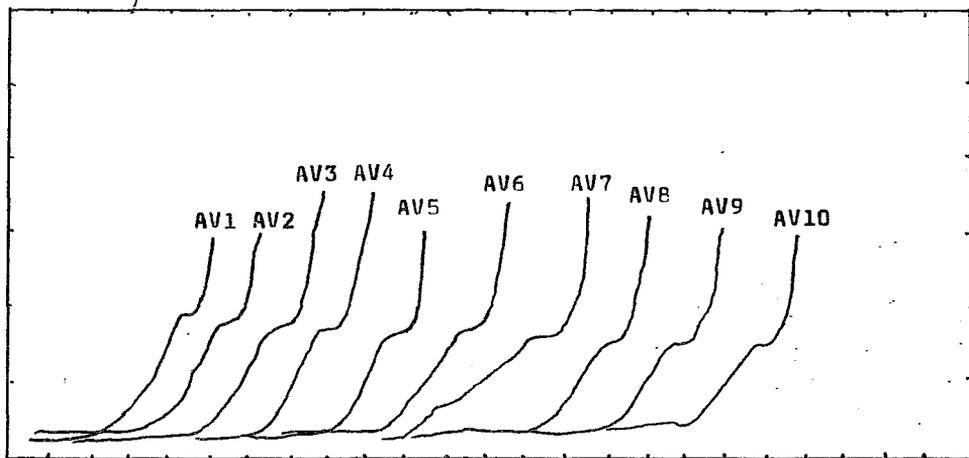


Fig.V.-1

Curvas de enfriamiento de 10 hierros grises tratados con Teluro, por consiguiente solidificados como hierros blancos. ver la composición en la tabla V.-1.

En esta figura se observa como las inflexiones de la temperatura de liquidus van bajando a medida que los hierros -- tienen mayor Carbon Equivalente.

Se observa también en estas curvas de enfriamiento que al llegar a la temperatura Eutectica no hay recalentamiento.

V-B) Curvas de Enfriamiento y CE de Hierros Solidificados como Grises y Blancos.

TABLA V.-2

Nº de muestra	CE	%C	%Si	Tratamiento	tipo de hierro obtenido
H.-1A	4.03	3.39	1.83	con Teluro	hierro blanco
H.-2A	4.08	3.44	1.84	con Teluro	hierro blanco
H.-3A	4.10	3.44	2.24	con Teluro	hierro blanco

Las curvas de enfriamiento se presentan en la fig. V.-2a

TABLA V.-3

Nº de muestra	CE	%C	%Si	Tratamiento	tipo de hierro obtenido
H.-1B	4.04	--	---	sin Teluro	hierro gris
H.-2B	4.07	--	---	sin Teluro	hierro gris
H.-3B	4.09	--	---	sin Teluro	hierro gris

Las curvas de enfriamiento de los hierros de la tabla V.-3 se presentan en la fig. V.-2b

Nota:

Cuando la muestra solidifica como hierro gris el determinador de CE nada más nos da la curva de enfriamiento y el Carbono Equivalente del hierro, en este caso el determinador no nos da lecturas de %C ni de %Si.

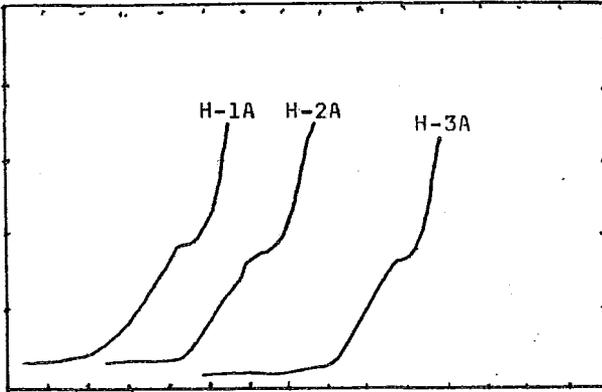


fig. V.-2a

Curvas de enfriamiento de hierros grises solidificados como hierros blancos (con Teluro), en las curvas se observa la inflexión de éstas a la temperatura de liquidus, abajo en la temperatura Eutectica, las curvas no tienen -- recalentamiento.

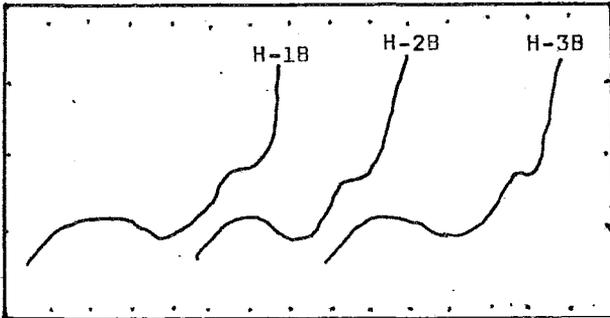


fig.V.-2b

Curvas de enfriamiento de hierros grises, en éstas se observa la inflexión a la temperatura de liquidus - (parte superior), en la parte más profunda se observa - la inflexión del comienzo de la temperatura Eutectica, éstas curvas si presentan recalentamiento.

V-C) Determinación de Curvas de Enfriamiento y de CE
variando la composición y la Sección de las Barras
de varios Hierros Grises.

TABLA V.-4 barras de tres cuartos de pulgada de diametro

Nº de muestra	CEV	%C	%Si	%P	%Mn
HD21	4.16	3.42	1.98	0.058	0.75
HD22	4.25	3.47	2.28	0.060	0.64

ver curvas de enfriamiento en la fig. V.-3

Los hierros obtenidos en esta etapa fueron hierros grises, el determinador de CE nos dió nada más el Carbon Equivalente y la curva de enfriamiento. El analisis de los elementos fué obtenido por via humeda (ver apéndice B).

TABLA V.-5 barras de una y media pulgadas de diametro

Nº de muestra	CEV	%C	%Si	%P	%Mn
HD31	3.90	3.16	2.15	0.064	0.71
HD32	3.96	3.21	2.20	0.048	0.66
HD33	4.09	3.38	2.07	0.050	0.68
HD34	4.18	3.40	2.29	0.050	0.85

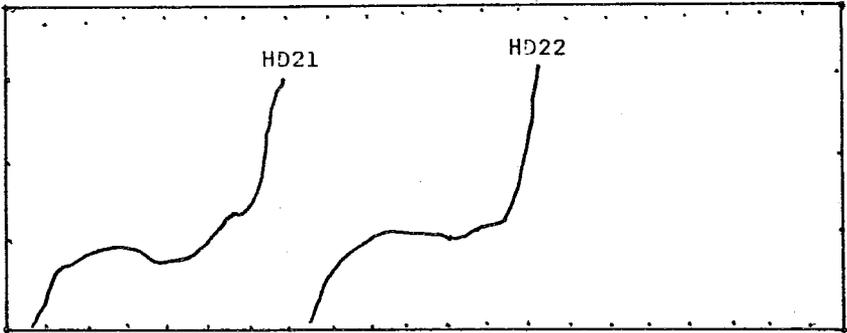


fig. V.-3

Curvas de enfriamiento de barras de hierros
grises de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diametro.

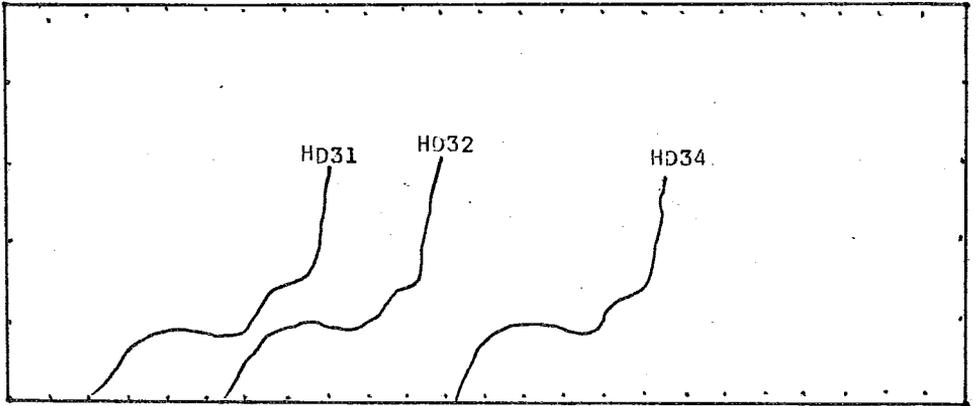


fig. V.-4

Curvas de enfriamiento de barras de hierros
grises de $1\frac{1}{2}$ pulgadas de diametro.

Descripción de la tabla V.-5 .- También en este caso los hierros moldeados fueron solidificados como - hierros grises, el determinador de Carbon Equivalente nada más dió la curva de enfriamiento los valores de -- CE fueron obtenidos de la fórmula $CEV = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3}$

Ver en la fig. V.-4 las curvas de enfriamiento.

TABLA V.- 6 barras de dos pulgadas de diametro.

Nº de muestra	CE	%C	%Si	%P	%Mn
HD51	3.91	3.15	2.24	0.050	0.59
HD52	3.96	3.20	2.22	0.056	0.69
HD53	4.03	3.31	2.10	0.048	0.68
HD54	4.08	3.27	2.37	0.056	0.70
HD55	4.24	3.40	2.45	0.056	0.67

Los hierros obtenidos en esta parte tambien se --- solidificaron como hierros grises, el determinador nada más dió las curvas de enfriamiento. Los valores de CE - fueron obtenidos con la fórmula $CEV = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3}$

Ver las curvas de enfriamiento en la fig. V.-5

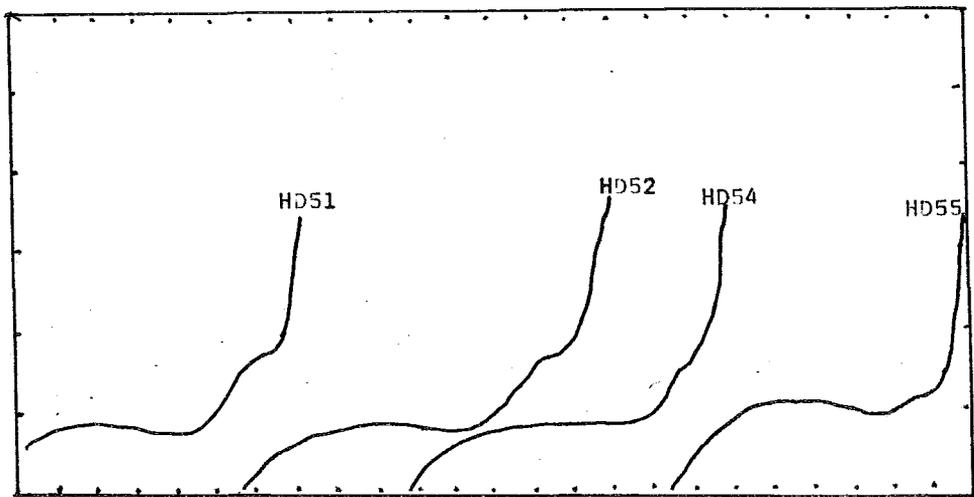


fig. V.-5

Curvas de enfriamiento de barras de hierros
grises de 2 pulgadas de diametro.

V-D) Registro de Propiedades Químicas, Físicas y Metalográficas de las pruebas con diferentes Diámetros.

Nº de muestra	Diámetro	C.E. Grafito	Tamaño	NDB	Resistencia * a la tracción
HD21	3/4"	4.10 tipo A	2 ASTM	204	28.5 Kg/mm ²
HD22	" "	4.25 tipo A	4 ASTM	200	23.5 " " "
HD31	1 1/2"	3.90 tipo A	-----	213	23 Kg/mm ²
HD32	" " "	3.96 tipo A	-----	216	22 " " "
HD33	" " "	4.09 tipo A	2y3 ASTM	210	20.5 " " "
HD34	" " "	4.18 tipo A	4 ASTM	204	19 " " "
HD51	2"	3.91 tipo A	3 ASTM	200	21 Kg/mm ²
HD52	" "	3.96 tipo A	4 ASTM	193	20 " " "
HD53	" "	4.03 tipo A	2y3 ASTM	202	19 " " "
HD54	" "	4.08 tipo A	4 ASTM	184	18 " " "
HD55	" "	4.24 tipo A	1 ASTM	172	16.5 " " "

* Los valores de Resistencia a la tracción fueron obtenidos la aplicación del nomograma fig III.-9.

Descripción de la tabla V.-7

Los valores de CE de las barras de diámetros diferentes fueron obtenidos mediante la aplicación de la fórmula ---

$$CEV = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} .$$

Los tipos y tamaños de grafito fueron obtenidos mediante las fotografías de las microestructuras (algunas de las --- cuales se muestran en las paginas siguientes) que se sacaron a 100 X sin ataque.

Los datos de dureza Brinell fueron un resultado promedio de 5 lecturas sobre cada probeta.

Los valores de Resistencia a la tracción se obtuvieron -- mediante la aplicación del nomograma de la fig.III.-9

A continuación en las paginas siguientes, se muestran algunas fotografías de las microestructuras obtenidas en las barras de hierro gris de diferentes diámetros figs. V.-6 , V.-7 V.-^a



Muestra N^o HD22 CE 4.25

Diametro $\frac{3}{4}$ "

Microfotografía a 100X

hierro gris sin ataque

Se observa grafito tipo A
tamaño 4 ASTM.



Muestra N^o HD22 CE 4.25

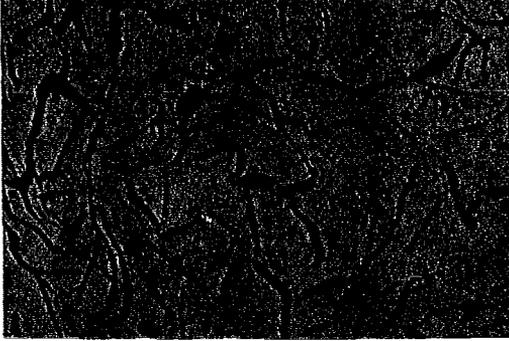
Diametro $\frac{3}{4}$ "

Microfotografía a 100X

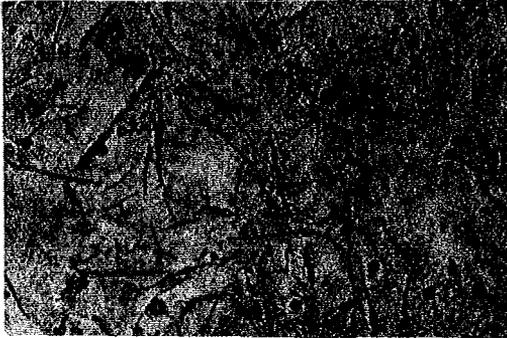
hierro gris atacado

Se observa grafito tipo A
tamaño 4 ASTM en matriz
perlítica.

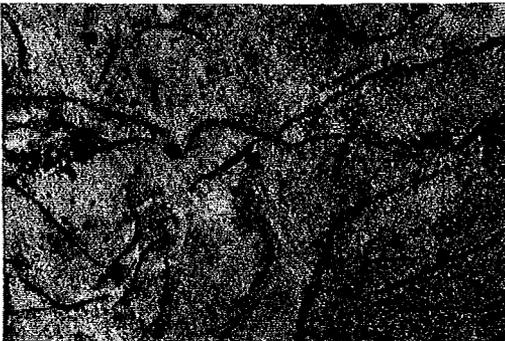
fig. V.-6



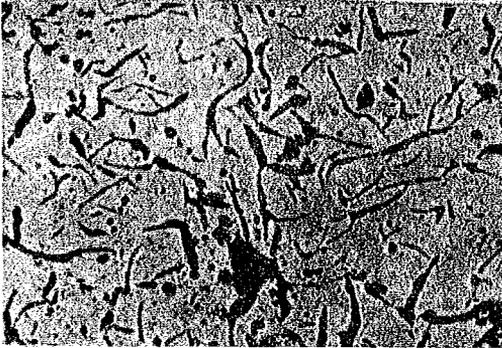
Muestra N^o HD33 CE 4.09
Diámetro $1\frac{1}{2}$ "
Microfotografía a 100X
hierro gris sin ataque
Se observa grafito tipo A
tamaño 3 ASTM.



Muestra N^o HD33 CE 4.09
Diámetro $1\frac{1}{2}$ "
Microfotografía a 100X
hierro gris con ataque
Se observa grafito tipo A
en matriz perlítica.



Muestra N^o HD33 CE 4.09
Diámetro $1\frac{1}{2}$ "
Microfotografía a 400X
hierro gris con ataque
Se observa grafito tipo A
en matriz perlítica.



Muestra N° HD34 CE 4.18
Diámetro $1\frac{1}{2}$ "
Microfotografía a 100X
hierro gris sin ataque.
Se observa grafito tipo A
tamaño 4 ASTM.

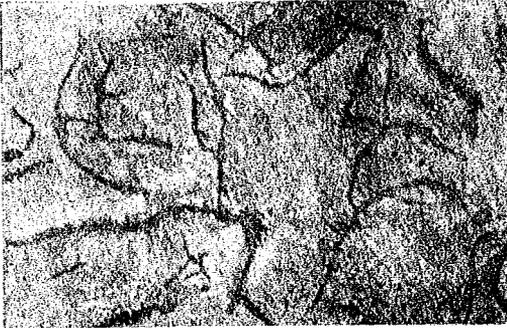


Muestra N° HD34 CE 4.18
Diámetro $1\frac{1}{2}$ "
Microfotografía a 100X
hierro gris con ataque
Se observa grafitotipo A
en matriz perlítica.

fig. V.-8



Muestra N. HD51 CE 3.91
Microfotografía 400X
hierro gris sin ataque
grafito tipo A tamaño 3
ASTM.



Muestra N. HD 51 CE 3.91
Microfotografía 400X
hierro gris atacado
grafito tipo A tamaño 3
ASTM, matriz perlítica.



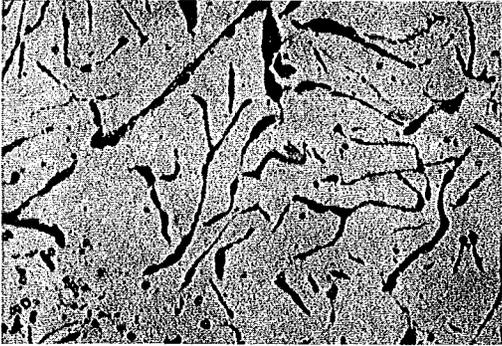
Muestra N. Hd 52 CE 3.96
Diametro 2"
Microfotografia 100X
hierro gris sin ataque
Se observa grafito tipo A
tamaño 4 ASTM.



Muestra N. HD 52 CE 3.96
Diametro 2"
Microfotografia 100X
hierro gris atacado
Se observa grafito tipo A
tamaño 4 ASTM en matriz
Perlitica.

fig.V.-10



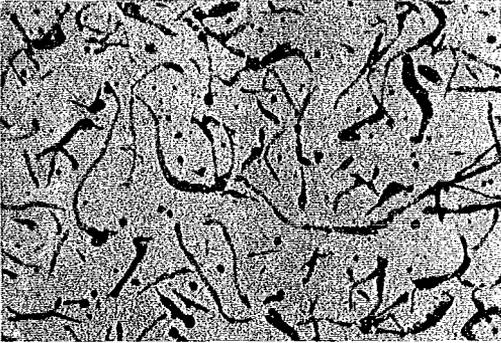


Muestra N. HD 53 CE 4.03
Diametro 2"
Microfotografia 100X
hierro gris sin ataque
Se observa grafito tipo A
tamaño 3 ASTM.



Muestra N. HD53 CE 4.03
Diametro 2"
Microfotografia 100X
hierro gris atacado
se observa grafito tipo A
en matriz Perlitica.

fig.V.-11



Muestra N^o Hd54 CE 4.08
Microfotografía 100X
hierro gris sin ataque
grafito tipo A tamaño
4 ASTM.



Muestra N^o HD54 CE 4.08
Microfotografía 100X
hierro gris atacado
grafito tipo A tamaño
4 ASTM. Matriz Perlitica.

fig.V.-12



Muestra N. HD55 CE 4.24
Diametro 2"
Microfotografia 100X
hierro gris sin ataque
se observa grafito tipo A
tamaño 1 ASTM.



Muestra N. HD55 CE 4.24
Diametro 2".
Microfotografia 100X
hierro gris atacado, se
observa grafito tipo A
tamaño 1 ASTM en matriz
perlitica.



Muestra N. HD 55 CE 4.24
Diametro 2"
Microfotografia 400X
hierro gris atacado se
observa matriz perlitica.

VI.- DISCUSION

VI.1 Discusión sobre las fórmulas de CE.

El concepto de CE ha variado en su concepción y forma de medirse a través del tiempo, las fórmulas que se manejan podrían dar lugar a confusiones.

La forma tradicional efectivamente representa el contenido de Carbon Eutectico $CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$ y represente el grado de acercamiento al punto Eutético de 4.25 % C en el sistema estable Fe-C.

A la fórmula clásica se le aplican las siglas CEV:

$$CEV = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

Si $CEV < 4.25$ el hierro gris es hipoeutético

Si $CEV > 4.25$ el hierro gris es hipereutético

El CEV pudiera significar Carbon Equivalente Verdadero aunque en realidad es el uso de las siglas en Inglés " Carbon Equivalent Value ".

La manera de obtenerlo clásicamente sería contar con los analisis quimicos de Carbon, Silicio y Fósforo y aplicar la formula:

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

Como se mencionó en el inciso III.B.2 la segunda ---
fórmula se usa para hierros de altos contenidos de Fós-
foro ésta es:

$$CEL = \%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}$$

La cual tiene una relación lineal de este valor y ---
la temperatura de liquidus, de ahí que se designe como -
CEL (Carbon Equivalente de liquidus).

Un hierro gris grado 14 tiene un valor de CEV en el
rango de 4.0-4.20 y serían esperados valores de CEL en el
rango de 3.8-4.0 ; la fórmula mencionada arriba no fué -
comprobada ni usada en este trabajo.

La fórmula más reciente, desarrollada para hierros
blancos es:

$$CEV = \%C + \frac{\%Si}{9} + \frac{\%P}{3.5}$$

Ha sido desarrollada mediante correlaciones mencio ---
nadas en III.B.3; se obtiene igualando la temperatura ---
Eutéctica y la temperatura de liquidus de los hierros ---
grises que solidifican como hierros blancos, este es el
método en que se basa la determinación instrumental---

instantánea de Carbon Equivalente, por ciento de Carbon y por ciento de Silicio. El valor del contenido de Carbon Eutéctico de esta fórmula es de 4.16.

Existe también la fórmula:

$$CEF = \%C + \frac{1}{3}\%Si + \frac{1}{2}\%P$$

donde CEF significa (Carbon Equivalente basado en la Fluidéz); esta fórmula es un factor de composición en el cálculo de la fluidéz (ver III.B.4); de la misma manera que el caso anterior esta fórmula no fué comprobada ni usada en este trabajo.

De lo anterior se desprende que hay que ser cuidadosos en la aplicación de cada fórmula ya que cada una -- ha sido desarrollada de una forma diferente y para un uso específico.

VI.2 Discusión sobre los ensayos realizados.

En las curvas de analisis térmico, para hierros grises solidificados como hierros blancos por la presencia - de Teluro fig. V.-1,

se observa claramente la ausencia de recalentamiento en la temperatura Eutectica; esto ayuda a notar más claramente la temperatura de detención de liquidus y la temperatura Eutectica; este comportamiento es debido a la acción del Teluro, también se observa en la tabla V.-1 que el valor de CEV_1 y CEV_2 son diferentes.

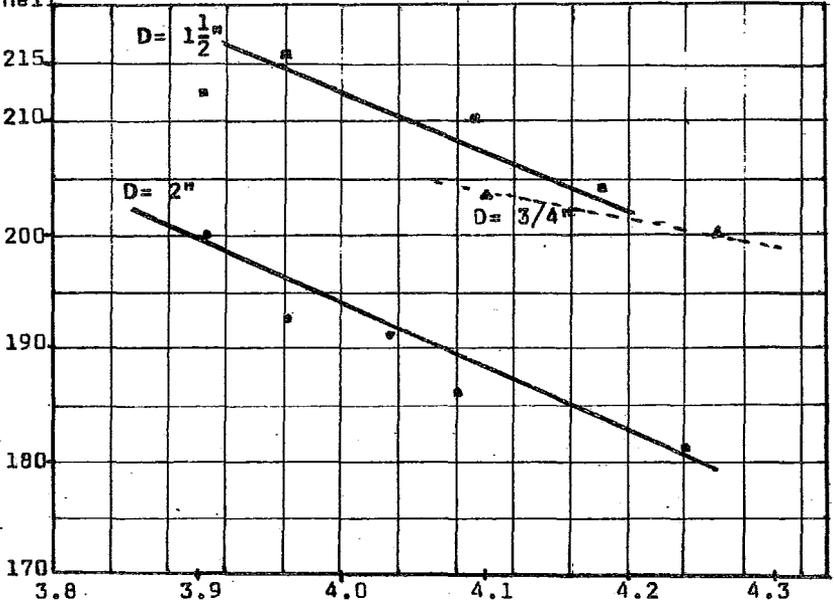
En la comparación que se hizo de las curvas de enfriamiento de las figuras V.-2 y V.-3 de los hierros grises -- solidificados como hierros blancos y grises, para una misma composición se observó que los hierros grises presentan un recalentamiento al llegar a la temperatura Eutectica -- debido a una rápida evolución de calor en la formación del Eutectico.(9)

Las curvas de enfriamiento de los hierros solidificados como hierros blancos no presentan este recalentamiento.

Se pudo comprobar para la relación Carbon Equivalente y Dureza Brinell que conforme va aumentando el contenido de Carbon Equivalente disminuye la dureza en los hierros grises y que conforme aumenta el diámetro de la barra de los hierros grises disminuye la dureza como se puede apreciar en la --- figura VI.-1.

Dureza

Brinell



$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

Fig. VI-1

Estos resultados estan de acuerdo con lo reportado en la literatura en (8y 15) . En las pruebas de tres cuartos de pulgada no se tuvieron los suficientes datos para trazar una recta.

De la relación entre Carbon Equivalente y resistencia a la tracción fig.VI-2 se observa que a mayor Carbon Equivalente menor resistencia a la tracción para un diametro de barra dado.

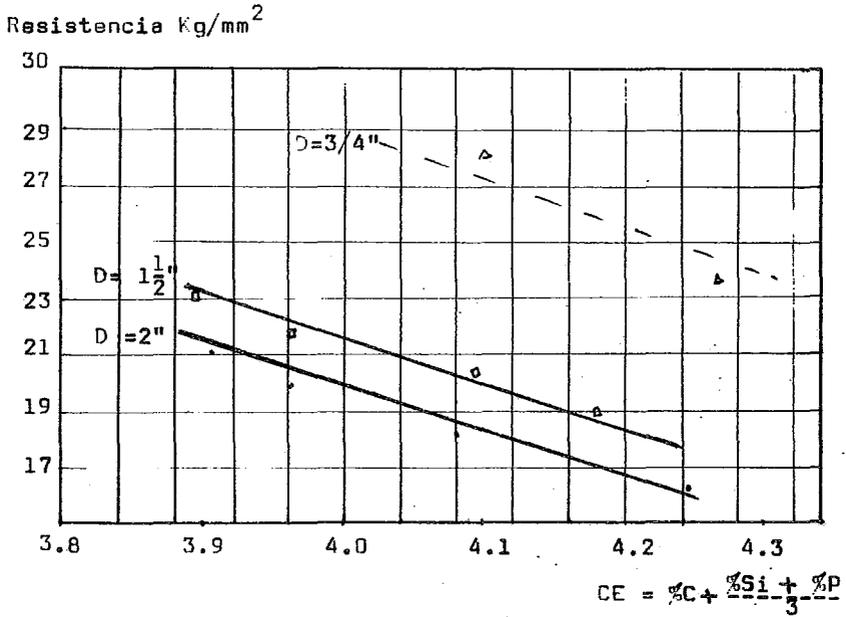


fig. VI.-2

y que mayor diámetro también menor resistencia a la tracción, éstos resultados estan de acuerdo con los reportados en la literatura(8,9). Aunque este comportamiento es similar al de la dureza, debemos hacer la consideración de que en los hierros grises una mayor dureza no necesariamente implica una mayor resistencia a la tracción, ya que existe una discontinuidad en la matriz de éstos debido a la forma y tamaño de las laminillas de grafito.

Debemos tomar en cuenta las limitaciones de las -- propiedades predichas a partir de un valor de Carbon -- Equivalente, ya que puede haber una variación en los -- valores reales. Las desviaciones pueden ser causadas -- por una variedad de variables de fundición y colado, -- las más importantes son:

- 1.- Material del molde, 2.- Sobre calentamiento, 3.- -- Temperatura de colado, 4.- Naturaleza de la carga meta- lica del horno, 5.- tipo de unidad de fusión empleada, y
- 6.- Tratamiento del hierro fundido en la cuchara.

Por ejemplo, el valor de resistencia a la tracción -- mediante el nomograma de la fig. III.-10 predice la re-- sistencia a la tracción con $\pm 2-3 \text{ Kg/mm}^2$ en el 85 % de los casos debido a lo arriba expuesto.

Así, si en una fundición se desea usar el valor de CE como una medida de control metalúrgico se deben hacer -- pruebas de resistencia a la tracción, dureza, estudios -- de microestructura etc. Para conocer las relaciones reales del Carbon Equivalente con éstas propiedades para ésta -- fundición en particular.

CONCLUSIONES

1.- Existen cuatro fórmulas para expresar el concepto de "Carbon Equivalente":

$$1.- CEV = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3}$$

$$2.- CEL = \%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}$$

$$3.- CEV = \%C + \frac{\%Si}{9} + \frac{\%P}{3.5}$$

$$4.- CEF = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{2}$$

Cuyas condiciones de uso se anotan a continuación:

- 1.-Se usa para hierros grises hipoeutecticos e hipereutecticos de bajo Fósforo.
 - 2.-Se usa para hierros grises hipoeutecticos de contenido alto en Fósforo.
 - 3.-Se usa para hierros que solidifican como hierros blancos hipoeutecticos.
 - 4.-Se usa como factor de composición en el cálculo de fluidez de hierros grises de alto contenido de Fósforo.
- 2.- Es claramente notoria la diferencia que existe al solidificar el hierro gris en una copa sin Teluro y con Teluro,--

en este último caso que solidifica como hierro blanco, se aprecia la total ausencia del recalentamiento de la -- temperatura Eutectica.

3.-El valor del Carbon Equivalente es uno, entre muchas otras variables a considerar en el control metalúrgico de la -- fundición; las relaciones que existen reportadas en la -- literatura son una ayuda limitada para los fines de este -- control.

APENDICE A

EL PROCESO DE SOLIDIFICACION

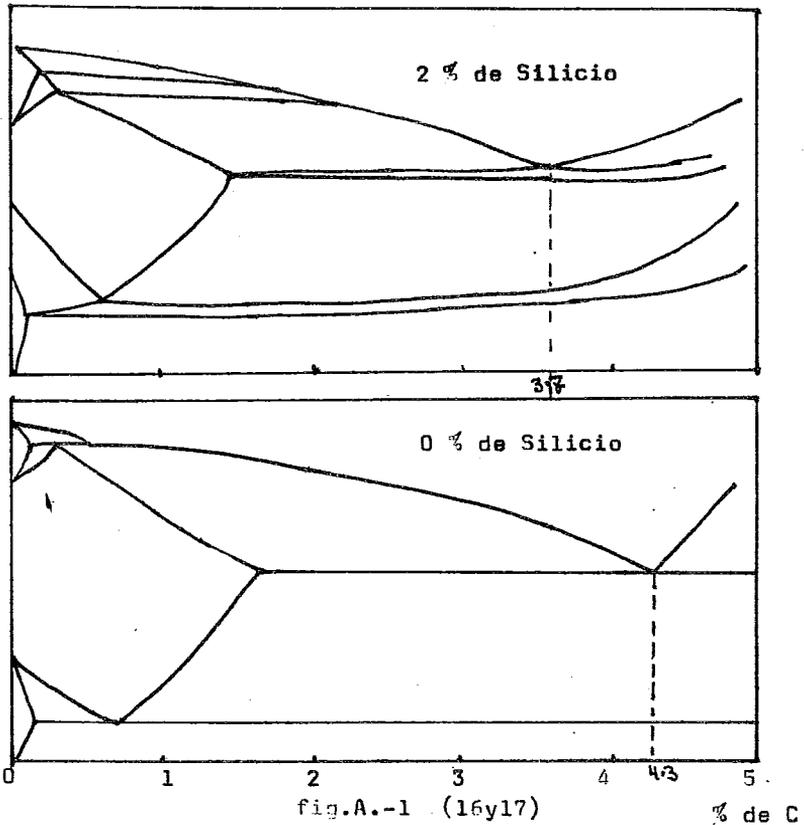
La diferencia entre el hierro gris, el hierro moteado y el hierro blanco se marca claramente durante el proceso de solidificación.

Los fundamentos del proceso de solidificación se relacionan con la naturaleza del sistema ternario de equilibrio Fe-C-Si.

El proceso de solidificación en el sistema Fe-C-Si se ha estudiado ampliamente, sin embargo los procesos de solidificación en los hierros comerciales son mucho más complejos, ya que están presentes también otros elementos que no son considerados en el diagrama de equilibrio.

Las aleaciones simples Fe-C con Silicio que han sido estudiadas han esclarecido tres estados de grafitización los cuales son los siguientes:

- 1.- La grafitización durante la solidificación.
- 2.- La grafitización por precipitación de Carbono durante la disminución de solubilidad del Carbono en la austenita.
- 3.- La grafitización durante la transformación Eutectoide (en el estado sólido).



La composición de estas dos graficas ilustra la influencia del Silicio, se compara con una composición de 2% de Silicio, porque se considera la más representativa.

En el diagrama superior se puede observar como la composición Eutectica es desplazada a la izquierda aproximadamente una tercera parte del contenido de Silicio.(2%)

En los hierros grises hipoeutecticos, el proceso de solidificación da como resultado la producción de dendritas de austenita primaria, seguidas por el crecimiento de celdas Eutecticas de grafito entre las ramas de dendritas. En la fig.A.-2 se muestra el mecanismo involucrado.

El grafito Eutectico se presenta en forma de colonias de laminillas, las cuales se inclinan unas alrededor de las otras, ver la fig.A.-3 la cual muestra una especie de agrupamiento de hojuelas las cuales tienen una parte hacia arriba y la otra inclinada, esta estructura se podría ver en una microsección de un hierro hipoeutectico típico.

Si la composición es cercana a la eutectica las dendritas de austenita son relativamente pocas, y las laminillas de grafito Eutectico se distribuyen uniformemente a través de la pieza colada.

Si, no obstante que el contenido de carbono sea bajo, ocurre un apreciable crecimiento de dendritas antes de que la solidificación Eutectica comience, las laminillas de grafito serán confinadas a las regiones entre las dendritas.

Ilustración esquemática de la solidificación de hierros grises hipo e hipereutecticos según Morrogh y Williams (18)

H. Hipoeutectico H. Hipereutectico

Dendritas de Austenita en el liquido.



Kish de grafito en el liquido

Se forman los cristales primarios arriba de la región del Eutectico.

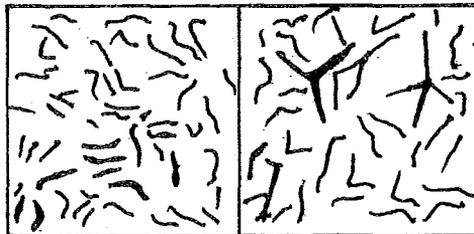
Dendritas de Austenita y crecimiento de celdas Eutecticas de Austenita y grafito.



Kish de grafito y crecimiento de celdas Eutecticas de Austenita y grafito.

En la detención del Eutectico la Austenita y el grafito solidifican con un frente esferoidal.

Laminillas de grafito en una matriz de Austenita.



Laminillas de grafito en una matriz de --- Austenita.

Al completarse la solidificación la Austenita de las dendritas y la del Eutectico -- forman un todo continuo.

fig. A.-2



Fig. A.-3
Colonia de laminillas de grafito
segun Morrogh (18)

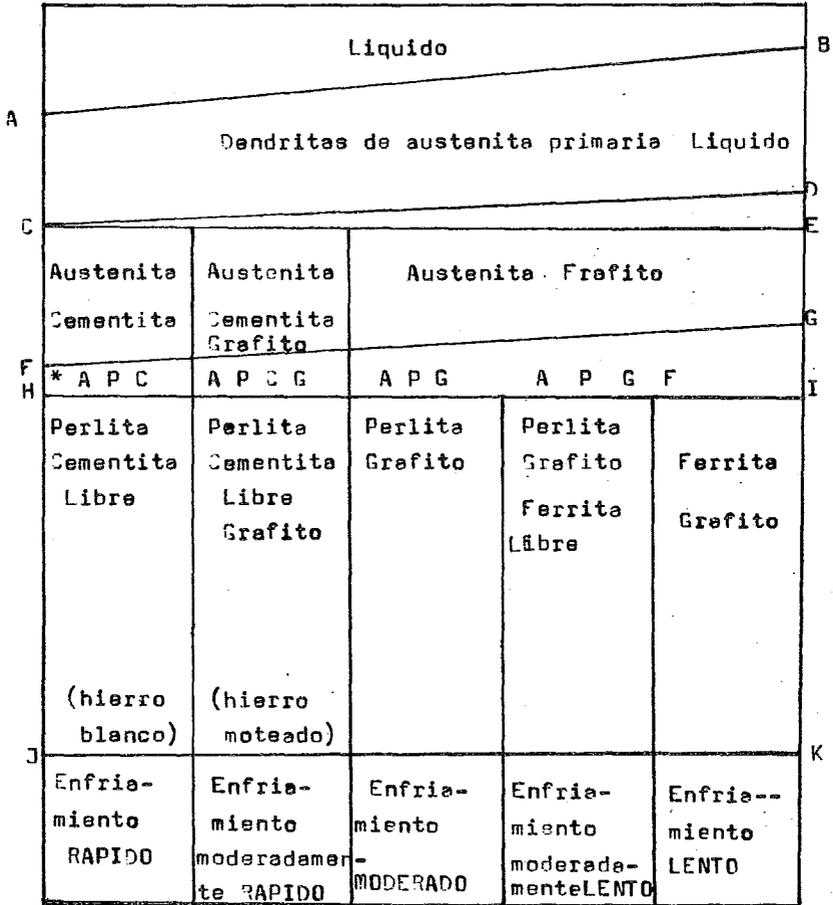
La solidificación de los hierros hipoeutecticos -- involucra procesos más complicados. Si la solidificación sigue la secuencia normal hay un depósito primario de grafito conocido como "Kish" los cuales tienden a flotar sobre la superficie del liquido.

La solidificación continúa con la depositación Eutectica de las laminillas de grafito a temperaturas más bajas, y hay una tendencia de las laminillas de grafito del Eutectico a crecer fuera de los cristales primarios.

En el enfriamiento por debajo del Eutectico el constituyente austenitico del Eutectico de hierro gris ---- precipitan su exceso de Carbon, y en concordancia a la proporción de Silicio y otros elementos, esta precipitación puede ser de grafito o de cementita.

La descomposición a la temperatura Eutectoide puede tambien involucrar los sistemas estable y metaestable, -- y la composición y la velocidad de enfriamiento determinan la microestructura final, como se verá a continuación en la fig. A.-4.

COMPOSICION GENERAL 3% C Y 2% Si



* A = Austenita, P = Perlita, C = Cementita
G = Grafito, F = Ferrita

Fig. A.-4 Referencia.. (16 y 17)

Influencia de las velocidades de enfriamiento
Sobre la estructura.

Se asume que el hierro contiene aproximadamente 3 % de Carbon y 2 % de Silicio, se vacía en un molde y se deja -- enfriar.

Cuando el metal se enfria a la temperatura representada por la línea A B de la fig,A.-4 comienzan a cristalizar -- dendritas de austenita primaria en el liquido. Estas den-- se comienzan a formar a una temperatura alrededor de 1260^oC dependiendo sobre todo de la rapidez de enfriamiento como -- se indica por la la inclinación de la línea A B, esta aus-- tenita contiene un maximo de 1.5 % de Carbon; conforme baja -- la temperatura, más dendritas se forman, el contenido de -- Carbon en el liquido residual se incrementa hasta que una -- temperatura indicada en la línea C D es alcanzada y el li-- quido remanente contiene aproximadamente 3.6 % de Carbon.

C D, representa la temperatura Eutectica la cual esta -- alrededor de 1149 ^oC, el liquido Eutectico comienza a soli-- dificar cuando la temperatura se hace constante, como se -- indica por el area C D E, esta transformación también toma -- lugar sobre un rango estrecho.

La estructura resultante de esta transformación y el mecanismo por la cual es producida varia, de acuerdo con la rapidez de enfriamiento.

Numerosas teorías han sido propuestas para explicar el proceso de solidificación Eutectica, durante la solidificación moderada o lenta, el liquido Eutectico comienza a solidificar y se forman centros de cristalización los cuales tienden a crecer igualmente en todas direcciones obstruyendo el esqueleto de las dendritas.

Resulta una formación semejante a una celda, con las impurezas las cuales son segregadas durante la solidificación, concentradas en los bordes, a medida que la celda se forma, la grafitización toma lugar y las laminillas crecen radialmente de los centros de cristalización. Una capa de austenita solida permanece alrededor de cada laminilla y únicamente entonces la mayoría de la depositación de grafito se efectua por difusión a través de esta capa.

A medida que la aleación se enfría entre las temperaturas representadas por las líneas CE y FG, el carbon es -- rechazado de la austenita solida remanente y depositado --- sobre las laminillas de grafito.

A una temperatura justo arriba de la reacción eutec-- toide, la estructura consiste de austenita, que contiene - 0.6% de C en solución y laminillas de grafito. La estruc-- tura laminar esta completa en ese momento.

Cuando la solidificación es rápida , como en una sec-- cion enfriada rapidamente la grafitización es suprimida -- el liquido eutectico solidifica como ledeburita, una for-- mación eutectica de austenita y cementita. A medida que -- se continua enfriando a la temperatura representada por - la línea F G, el carbon es rechazado a travez de la auste-- nita formando más cementita.

Una rapidez de enfriamiento intermedia da una grafi-- tización parcial y produce una estructura que contiene -- austenita, grafito y alguna cementita libre.

La línea F G marca el comienzo de la transformación -- eutectoide la cual ocurre alrededor de 843°C . A esta tem-- peratura la austenita comienza a descomponerse en perlita la estructura eutectoide de ferrita y cementita.

Esta transformación se termina a una temperatura de 788 °C representada por la línea H I . Si la rapidez de enfriamiento en el rango de esta transformación es lenta, el carburo en la perlita puede ser total o --- parcialmente transformado en ferrita y grafito.

Así, el rango de estructuras obtenible en un hierro colado dado puede ser parcialmente interpretado - por consideración de rapidez de enfriamiento.

La rapidez de enfriamiento, en una capa o sección enfriada, repercute en la formación de la estructura -- final de perlita más cementita libre o hierro blanco.

Una rapidez de enfriamiento ligeramente más lenta repercute en la grafitización parcial del carburo --- produciendo una estructura moteada muchas veces vista en regiones adyacentes a un enfriamiento.

Una rapidez de enfriamiento moderada produce una matriz perlítica.

Con una rapidez de enfriamiento algo más baja, algo de la perlita se descompone y se forma ferrita, normalmente cercana a la laminilla de grafito.

Con un enfriamiento casi imperceptible (más lento aún) una gran proporción de perlita se descompone hasta después de un lento enfriamiento o un tratamiento de recocido en producto de equilibrio ferrita y grafito ---- remanente.

La adición de Silicio u otros agentes grafitizantes tienden a actuar de una manera similar a un descenso en la rapidez de enfriamiento.

Bajar el contenido de Silicio o adicionar elementos formadores de carburos produce resultados similares a los producidos por el incremento de la velocidad de -- enfriamiento.

A el Teluro se le atribuye la habilidad de suprimir fuertemente la nucleación y crecimiento del grafito, durante el proceso de solidificación. ref. (15y19)

Esto es debido a que el Teluro es un estabilizador de carburos, en los hierros su efecto es tan fuerte, que cantidades muy pequeñas convertirían a un hierro que normalmente sería gris; en uno, el cual sea totalmente blanco.

En los hierros se debe tener cuidados extremos para el uso de Teluro cuando se quiere fabricar chill castings-- los cuales deben poseer una profundidad de hierro blanco -- definida.

Si se adiciona en cantidades tan pequeñas como 0.001% se aprecia un incremento en la profundidad en que penetra la capa de hierro blanco. Cuando se usa en exceso el Teluro tiende a formar carburos en los bordes de grano de la austenita, en las porciones grises de las fundiciones de chill casting, este exceso destruye las propiedades físicas de estas fundiciones.

El Teluro en ocasiones se usa combinado con grafito, se requiere un control cuidadoso de las adiciones de Teluro y grafito en proporciones balanceadas, para tener un chill iron adecuado es decir producir una fundición que posea posea hierro blanco resistente al desgaste en la superficie apoyada por una zona comparativamente pequeña de hierro moteado finamente disperso.

Los efectos de las adiciones de Teluro se pueden apreciar en la fig A.5 de la pagina siguiente.



Fig. 5 a

Fig. 5 b

La fig. 5 a es representativa del tipo de estructura la cual se obtiene normalmente sobre la fracture de la cuña y, se compara con el mismo hierro despues de haber sido tratado con una adición balanceada de Teluro y grafito fig 5 b (12.9gr./ton de hierro)(19)

APENDICE B

METODOS DE ANALISIS

Determinación de Carbon.- para fundiciones grises
se pesa 0.250 gr. y se siguen las instrucciones del --
aparato.

Determinación de Silicio por via húmeda.

1.- Solución para disolver la muestra:

1200 ml de H_2O

900 ml de HNO_3

300 ml de H_2SO_4

2.- Solución para precipitar:

1000 ml de H_2O

1000 ml de HCL

3.- Solución agua acidulada:

1000 ml de H_2O

120 ml de HCL

4.- Solución para disolver (opcional):

500 ml de H_2O

500 ml de HNO_3

1000 ml de $HClO_4$

PROCEDIMIENTO

- 1.- Se pesa de la 2 gr. segun el % de Silicio, normalmente se pesa 1 gr. para hierros y se coloca en una cacerola de porcelana.
- 2.- Dela solución pa disolver , se le agregan 20 ml.
- 3.- Se pone al fuego hasta disolución completa, se determina por el desprendimiento de humos blancos, se mantiene tapado el recipiente con un vidrio de reloj (se deja -- hasta sequedad).
- 4.- Se retira y se lava bien el vidrio el vidrio de reloj y las paredes de la cacerola con agua.
- 5.- Se pone al fuego hasta la ebullición unos 40a 60 segs.
- 6.- Se retira el recipiente de fuego y se lava el vidrio de reloj y las paredes de la cacerola con agua destilada.
- 7.- Se pone nuevamente a ebullición. Se retira y se pone a filtrar, lavando bien el vidrio y las paredes de la cacerola con agua acidulada caliente, para un lavado perfecto es necesario auxiliarse con un gendarme.
- 8.- El precipitado se lava varias veces con agua acidulada caliente, para eliminar el Fe (manchas amarillas), se hacen cuatro lavados.

- 9.- Se continua lavando con agua caliente hasta la eliminación del ácido, se hacen ocho lavados.
- 10.- Se retira el precipitado y se coloca en un crisol de porcelana con todo y el filtro y se calcina a una temperatura de 800 C durante media hora.
- 11.- Se saca el crisol y se deja enfriar para después pesar.
- 12.- El peso del calcinado por el factor y se divide -- entre el peso de la muestra.

nota:

Para efectuar el filtrado se usa filtro Whatman

41 y esto puede ser con pulpa o sin ella.

CALCULOS

$$\%Si = \frac{\text{peso de calcinado} \cdot \frac{Si}{SiO_2}}{\text{peso de muestra}} \cdot 100$$

Determinación de Fósforo por vía húmeda

1.- Solución para disolver:

1000 ml de H_2O

500 ml de HNO_3

2.- Solución de Permanganato de Potasio :

200 ml de H_2O

20 gr. de $KMnO_4$

3.- Solución saturada de azúcar :

100 ml de H_2O

250 gr. de azúcar

4.- Solución para precipitar:

2000 ml de H_2O

110 gr. de $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$

100 gr de NH_4NO_3

120 ml de NH_4OH

5.- Soluciones para Titular:

a) 2000 ml de H_2O b) 2000 ml de H_2O c) -----

15 gr. de $NaOH$ 27 ml de HNO_3

c) 100 ml de alcohol
1 gr. de Fenofaleína.

PROCEDIMIENTO

1.- Se pesan 2 gr. de muestra y se colocan en un matraz erlenmeyer de 250 ml.

- 2.- Se le agrega 60ml de la solución N^o 1.
- 3.- Se coloca en la parrilla a fuego lento hasta disolución completa.
- 4.- Despues agregarle unas gotas de la solución N^o2 hasta obtener un color cafe obscuro.
- 5.- Dejarlo hervir de 20 a 30 segundos para que haya una oxidación completa.
- 6.- Agregarle de 5 a 6 gotas de la solución N^o 3 dejarlo hasta que ambie a un color cafe transparente.
- 7.- Retirar del fuego y se le agrega 55 a 60 ml de la solución N^o4 y se agita constantemente hasta que esté más o menos frio y despues enfriarlo en agua de hielo.
- 8.- Durante el enfriamiento se obtendrá un precipitado color amarillo.
- 9.- Se filtra en papel filtro Whatman # 16 2, en la parte inferior del cono se le coloca pulpa de papel.
- 10.- Se lava varias veces el precipitado hasta lograr ---- quitarle los acidos.
- 11.- Al mismo matraz se le agregah se le agregan 100ml de agua y se le pone el papel con todo y el precipitado.
- 12.- Se tapa y se agita hasta la completa desintegración del papel.

13.- Se le agregan 5 ml de la solución 5a y se le agregan 3 ó 4 gotas de la solución 5c como indicador.

14.- Se titula con la solución 5b gota a gota hasta el el vire de rojo a un rosa tenue.

Calculos:

Con estandar:

X ml de sol. 5a = 5ml de sol.5b

$$\text{Factor} = \frac{\%P \text{ muestra estandar}}{\text{ml sol. 5a} - \text{ml sol.5b}}$$

$$\%P = \text{Factor} \times \text{diferencia de sols. 5a-5b}$$

Determinación de Azufre por via humeda

1.- Solución de Cloruro de Cadmio:

27- 30 gr. de Cloruro de Cadmio

1300 ml de H₂O

2.- Solución para disolver :

1000 ml de H₂O

1000 ml de HCL

3.- Solución de Almidon :

10 gr. de Almidon 1gr. de Almidon

200 ml de H₂O 100 ml de H₂O

1gr. de CLZn

4.- Solución de Yoduro de Potasio :

1.2 gr. de yodato de potasio

8.0 gr. de yoduro de potasio

0.4 gr. de hidroxido de potasio

2000 ml de H₂O

PROCEDIMIENTO

1.- Pesar 2 gr. de muestra y colocarla en un matraz balon de fondo plano de 400 ml que lleva un tubo de desprendimiento y un embudo de seguridad.

2.- En un vaso de precipitados de 400 ml poner 40 ml de la solución N^o 1 más 200 ml de agua.

3.- Introducir el tubo de desprendimiento del matraz en el vaso y añadir por el embudo de seguridad 60 ml de la solución N^o 2.

4.- Colocar el matraz sobre la parrilla a fuego lento hasta que se disuelva la muestra.

5.- Desconectar el tubo de desprendimiento del matraz.

6.- Adicionar a la solución y precipitado del vaso 40 ml de HCl conc. agitando hasta que se disuelva el precipitado.

7.- Adicionar 2 ml de solución N^o3 y revolver la solución.

8.- Valorar con la solución N^o4 hasta una coloración azul permanente.

Calculos:

$$\text{Factor} = \frac{\%S \text{ Muestra Std.}}{\text{Vol. gastado}}$$

$$\%S = \text{Vol. gastado} \times \text{Factor}$$

Determinación de Manganeso por via humedad.

1.- Solución para disolver la muestra:

1600 ml de H_2O

500 ml de HNO_3

4 gr. de $AgNO_3$

2.- Solución para precipitar:

1000 ml de H_2O

100 gr. de $(NH_4)_2S_2O_8$

3.- Solución para titular:

2000 ml de H_2O

1gr. de $NaAsO_2$

PROCEDIMIENTO

- 1.- Se pesan 100 miligramos de muestra.
- 2.- Se colocan en un matraz erlermeyer de 125 ml.
- 3.- Se le agregan 20 ml de la solución N° 1.
- 4.- Se pone a fuego hasta la disolución completa de la muestra.

5.- Se le agrega 20 ml de la solución N° 2 (con la cual la solución tomará un color violeta) se deja en completa ebullición aproximadamente 10 segs.

6.- Se retira del fuego y se pone a enfriar (hasta --- temperatura ambiente)

7.- Despues se titula con la solución N° 3.

nota:

Antes de titular se le agregan unos miligramos de NaCl (sal de cocina) para inhibir la coloración que nos - pudiera proporcionar el Cr.

Calculós:

Titulo de la Solución= $\frac{\% \text{Mn. muestra. peson.}}{\text{Vol. gastado de NaAsO}_2}$

$\% \text{Mn} = \text{Titulo} \times \text{Vol. gastado de NaAsO}_2$ de la muestra desconocida

BIBLIOGRAFIA

- 1.- J. Navarro Alcacer
Fundición de Hierro (Fundición gris de alto valor)
Editorial Dossat S.A. Madrid 1947.
- 2.- H. Laplanche
Chief Chem. and Metallurgie Clichy, France.
A New Structural Diagram for Cast Iron
Metal Progr., December , 1947.
- 3.- H. Laplanche
New Structural Diagram for Alloy Cast Irons.
Metal Progr., June 1949.
- 4.- E.A. Purins
Silicon Determination by a cooling Curve Technique
Process Development Department.
Cleveland Iron Foundry Agost , 1969.
- 5.- J.G. Humphreys, B. Eng., Ph. D.
Effect of Composition on the Liquidus and Eutectic
Temperatures and on the Eutectic point of Cast Irons.
B.C.I.R.A. Journal, September 1961.
- 6.- A. Moore
Measurement of Carbon Equivalent Liquidus Values
in Hypereutectic Flake graphite Irons.
Foundry Trade Journal December 30, 1971.

7.- A. Moore

Carbon Equivalent of White Cast Irons.

A.F.S. Cast Metal Research Journal March 1972

8.- Edited by Charles F. Wattson

Hand Book Grey and Ductile Iron Castings..

Published by Grey and Ductil Iron Founders' Society
Inc. Cleveland 1971.

9.- Loper, Heinn, and Chaudhari

Thermal Analysis for Structure Control

The Second International Symposium on the Metal Alloy
of Cast Iron. The Metallurgy of Cast Iron. .

Geneva, Switzerland. May 29-31, 1974.

10.- Heine, Loper, Rosenthal

Principles of Metal Castings.

American Foundrymens Society Second Edition.

11.- DE Leeds and Northrup Company

Manual de Operación del Determinador de Carbon

Equivalente " Maxilab II ".

12.- Alan Moore

Rapid Carbon Determination

on the Shop Floor.

Foundry M. and T. , July 1974.

- 13.- Robert G. Wassiuspi
Development of a Cast Iron Cooling
Course C.E. Computer.
Foundry Management and Technology, a Penton
Publication 1975.
- 14.- American Foundrymens' Society
El Horno de Cubilote y su Operación.
Edición 1961.
- 15.- H. T. Angus M. Sc. Ph. D.
Cast Iron: Physical and Engineering Propierties
British Cast Iron Research Association Butterworths.(1976)
- 16.- Cast Metals Hand Book
American Foundrymens Association
Third Edition, 1944.
- 17.- José Apraiz Barreiro
Fundiciones
Editorial Dossat Segunda Edición Madrid, 1963.
- 18.- W. Hume - Rothery D.B.E., F.R.S.
The Structures of Alloy of Iron
an Elementary Introduction
Edit. Pergamon Press First Edition 1966.

19.- J. V. Dawson

Effects of Selenium and Tellurium in Cast Irons

Foundry Trade Journal Feb. 19, 1970.

20.- Lew F. Porter and Philip C. Rosenthal

Factors Affecting Fluidity of Cast Iron.

Transactions, American Foundrymen's

Society, 1952 (Vol. 60) p.725.