

672.2



ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

CONTROL RAPIDO DE LAS CARACTERISTICAS
DE LAS FUNDICIONES GRISES

TESIS DE GRADO
PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO

PRESENTADA POR:

CARLOS A. CISNEROS MORENO

GUAYAQUIL - ECUADOR

1.981

A G R A D E C I M I E N T O

A la Escuela Superior
Politécnica del Litoral

A los profesores del
Dpto. de Ingeniería
Mecánica.

Al Sr. Ing. Ignacio Wiesner F.
Director de Tesis, por su ayu
da en la realización de este
trabajo.

A la Srta. Lila Amaya C.
por su colaboración en
la copia mecanográfica.

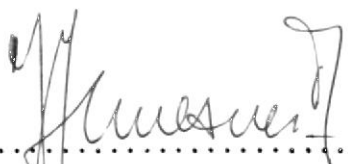
A la Srta. Arq. Silvia
Arellano, por los grá-
ficos realizados.

DEDICATORIA

A mis queridos padres: Simón Cisneros Hernández
Leonny Moreno de Cisneros

A mis hermanos: John
Walter
Jaime
Gabriel

A mis hermanas: Mirna
Susana
Alicia
Patricia

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ignacio Wiesner F.', is written over a horizontal dotted line.


ING. IGNACIO WIESNER F.

Director de Tesis

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL)



CARLOS ALBERTO CISNEROS MORENO

R E S U M E N

Este trabajo está destinado a las empresas dedicadas a la fabricación de piezas de hierro fundido y podrá ser utilizado como una alternativa para mejorar la calidad de las fundiciones.

Se establece que conocida la composición química de la fundición se pueden predecir las características mecánicas que presentarán las piezas elaboradas con este material.

El método desarrollado está basado en las interrelaciones existentes entre la microestructura, composición química, velocidad de enfriamiento y propiedades mecánicas. Es rápido de ejecutar y de fácil aplicación en cualquier taller de fundición.

INDICE GENERAL

	Pág.
TITULO	I
AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	III
DECLARACION EXPRESA	V
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABLAS	XV
LISTA DE ABREVIATURAS	XVI
CAPITULO I	
A.- Introducción	1
CAPITULO II	
IMPORTANCIA DE LA NECESIDAD DE UN CONTROL RAPIDO DE LAS PRO PIEDADES DE LAS FUNDICIONES GRISES	
A.- Objetivo	4
B.- Justificación del trabajo	5
1.b.- Situación actual del control de las fundiciones ferrosas en Guayaquil	5
2.b.- Posibilidad de obtener fundiciones grises de dife	

	Pág.
rentes características	7
C.- Plan General del programa	8
 CAPITULO III	
 EL HIERRO GRIS	
A.- Generalidades	11
B.- Principales propiedades de las fundiciones grises	15
C.- Factores que influyen en las características mecánicas de las fundiciones	21
1.c.- Influencia del silicio en las fundiciones	21
2.c.- Influencia de la velocidad de enfriamiento	27
3.c.- Influencia del azufre, fósforo, manganeso, oxígeno e hidrógeno	30
4.c.- Influencia de la composición química y de la micro estructura	36
D.- Tipos de control en las fundiciones	45
1.d.- Pruebas metalúrgicas inmediatas	45
1.d.1.- Temple	46
1.d.2.- Colabilidad	46
1.d.3.- Rechupe	51
1.d.4.- Sensibilidad al espesor	51
2.d.- Carbono equivalente	54

CAPITULO IV

TRABAJO EXPERIMENTAL Y ENSAYOS A REALIZARSE

A.- Introducción	58
B.- Obtención del hierro gris	59
1.b.- Materias primas usadas	60
2.b.- Cálculo de carga del cubilote	62
C.- Muestreo realizado con contenidos diferentes de carbono y silicio en las coladas	68
D.- Cuña de temple	71
1.d.- Medida del espesor de temple	71
2.d.- Determinación de cuña óptima	71
E.- Barra ASTM	74
1.e.- Ensayos mecánicos	74
2.e.- Análisis químico a partir de viruta	78
2.e.1.- Determinación de los porcentajes de: Car- bono , silicio, fósforo y azufre	78
2.e.2.- El carbono equivalente como medio de deter- minación de las propiedades mecánicas de las fundiciones grises	82
3.e.- Ensayos de dureza	85
4.e.- Análisis metalográfico	88
4.e.1.- Metalografía sin ataque	88

	Pág.
4.e.1.1.- Determinación de la forma del grafito	89
4.e.1.2.- Determinación de la distribu- ción del grafito	89
4.e.1.3.- Determinación del tamaño del grafito	90
4.e.2.- Metalografía con ataque	101
F.- Resultados obtenidos	106
 CAPITULO V	
DISCUSION Y ANALISIS DE RESULTADOS	107
 CAPITULO VI	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	125
DIAGRAMAS Y TABLAS	128
BIBLIOGRAFIA	131

LISTA DE FIGURAS

Nº		Pág.
1	Microestructura de una fundición gris hipereutética	12
2	Láminas de grafito de una fundición gris hipoeutética	13
3	Diagrama hierro-carbono estable (línea de rayas alternadas) y diagrama hierro-carbono metaestable (líneas continuas).	14
4	Gráficos representativos del ensayo de tracción de un <u>a</u> <u>c</u> ero dulce y de una fundición gris	17
5	Representación gráfica de la forma de amortiguarse las vibraciones que se pueden producir en las piezas de fundición de acero y de aleaciones de aluminio	19
6	Secciones de sistemas de aleaciones ternarias (Fe-C-Si) en dos dimensiones con: 0 %, 2 % y 4 % de silicio	22
7	Influencia del silicio en la formación de la fundición blanca o gris, en redondos de 25 mm. de diámetro	25
8	Antiguo diagrama de Maurer que señala los contenidos en carbono y silicio en piezas de 30 mm. de espesor	26
9	Diagrama de Norbury que señala los contenidos de carbono y silicio correspondientes a distintos tipos de fundiciones en piezas de 25 mm. de espesor coladas en arena.	26
10	Efecto de la microestructura de la fundición gris sobre la dureza y resistencia a la tracción	29
11	Inclusiones de sulfuro de manganeso en una fundición	31

Nº		Pág.
12	Eutético de esteadita formado por agrupaciones de fósforo de hierro sobre un fondo blanco de ferrita.	34
13	Relación entre la dureza y la resistencia a la tracción de las fundiciones y su microestructura.	38
14	Equivalencias aproximadas entre las durezas y las resistencias a la tracción de los aceros, fundiciones grises y maleables.	41
15	Relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión en las fundiciones y en los aceros.	42
16	Prueba de temple con probetas triangulares. Las probetas son ciladas en arena sintética.	47
17	Prueba de colabilidad de espiral, moldeada en verde.	49
18	Probeta en forma de K para la comprobación de la tendencia al rechupe. Se cuele en arena en verde.	52
19	Probeta de sensibilidad a los espesores.	53
20	Relación entre el diagrama de Carbono equivalente (a) a la curva de enfriamiento (b).	57
21	Macho preparado para cuña de temple con arena silicia al 8% de silicato de sodio a 40 ^o Baume y curado con CO ₂	70
22	Barra ASTM para ensayos de tracción de fundiciones grises.	75
23	Fotografía de la máquina INSTRON Modelo 1128 para ensa-	

Nº		Pág.
	yos de tracción.	76
24	Espectrómetro Modelo 139 UV-VIS Hitachi-Perkin-Elmer empleado para la determinación de Silicio, manganeso y fósforo.	79
25	Determinador de Carbono/Azufre LECO CS46.	80
26	Tipo de referencia para la forma del grafito.	92
27	Tipo de referencia para la distribución del grafito.	93
28	Tipo de referencia para el tamaño del grafito (1 a 4)	94
29	Tipo de referencia para el tamaño del grafito (5 a 8)	95
30	Probeta Nº 2 Hierro gris. Grafito I A 4 UNE 36117	97
31	Probeta Nº 21 Hierro gris. Grafito I A <u>5</u> /6 UNE 36117	98
32	Probeta Nº 20 Hierro gris. Grafito I A 6 UNE 36117	99
33	Probeta Nº 2 Microestructura de una fundición 100 % perlítica.	102
34	Probeta Nº 21. Microestructura de una fundición 100 % perlítica.	103
35	Probeta Nº 24. Microestructura de una fundición con 90% de perlita y 10 % de cementita.	104
36	Relación del Carbono equivalente previsto C_{ep} y el Carbono equivalente real C_e .	110
37	Relación entre la dureza y resistencia a la tracción en las fundiciones grises (para redondos de 30 mm. de diámetro).	112
38	Influencia del C_e en la resistencia a la tracción de	

Nº		Pág.
	las fundiciones grises.	114
39	Influencia del C_e en la dureza de las fundiciones grises.	117
40	Influencia del espesor de temple en la resistencia a la tracción de las fundiciones grises (Cuña ASTM W 3).	120
41	Influencia del espesor de temple en la dureza de las fundiciones grises (Cuña ASTM W 3).	122

LISTA DE TABLAS

TABLA Nº		Pág.
I	Materias primas usadas en los experimentos	61
II	Medida del espesor de temple en mm., en las probetas ASTM A-367-58 para diferentes cuñas de temple	72
III	Resultados de los ensayos de resistencia a la tracción	77
IV	Comparación entre el análisis previsto y el análisis químico de los porcentajes de los elementos constitutivos de la fundición	81
V	Estudio comparativo de los valores obtenidos del C_g en las experiencias	84
VI	Resultados de los ensayos de dureza Brinnell	87
VII	Tamaño del grafito (partículas de la forma I a VI)	96
VIII	Resultados de los exámenes metalográficos sin ataque	100
IX	Resultados de los análisis metalográficos con ataque	105

LISTA DE ABREVIATURAS

A.F.S.	American Foundrymen's Society
A.S.T.M.	American Society for Testing and materials
BCIRA	British Cast Iron Research Association
C	Carbono
C _e	Carbono equivalente real
C _{ep}	Carbono equivalente previsto
CF	Factor de composición
CENIM	Centro Nacional de Investigaciones metalúrgicas de España
cc.	Centímetro cúbico
Fe	Hierro
Fe-Mn	Ferro-manganeso
Fe-Si	Ferro-silicio
Fig.	Figura
gr.	Gramo
Hb	Dureza Brinnell
Kg/mm ²	Kilogramo/milímetro cuadrado
Mn	Manganeso
mm.	Milímetro
mg.	Miligramo
P	Fósforo
Pulg.	Pulgada
R.	Resistencia a la tracción
Si	Silicio
S	Azufre
Seg.	Segundo
T	Temple
t	Temperatura °F

CAPITULO I

INTRODUCCION

Con el desarrollo acelerado que ha experimentado el país en estos últimos años, se ha incrementado notablemente la demanda de piezas de hierro fundido para reposición en las máquinas en servicio.

El deseo de conseguir estos elementos en hierro gris en el mercado local, conlleva la exigencia por parte de los industriales de ciertos requisitos de calidad que los fundidores locales en su mayoría no han podido cumplir, como consecuencia del estado incipiente en que se encuentra la industria de la fundición en el país.

Debido también a que los talleres artesanales dedicados a esta actividad no poseen recursos para implementar laboratorios de control de los materiales obtenidos y por cuanto el mercado antes no lo exigía es que los fundidores poco o casi nada se han interesado en preparar un material que reúna características mínimas preestablecidas.

Viendo esta necesidad, nació el interés del autor por encontrar una alternativa que permita dar una orientación a las personas dedicadas a producir fundiciones de hierro y de esta manera mejorar la calidad que es lo que tanto se persigue.

Es sabido que en otras latitudes el control de los materiales de fundi-

ción se lo realiza con equipos muy sofisticados y costosos, pero en nuestro medio se tratará de introducir una técnica, que si bien es nueva para nosotros viene siendo empleada desde hace algunos años en otros países de igual desarrollo al nuestro y la cual, sin necesidad de introducir mayores innovaciones en planta, con el uso adecuado de los gráficos y curvas aquí presentados, los fundidores sean capaces de disponer según sus necesidades de las propiedades mecánicas de las piezas fundidas.

Por falta de facilidades en la planta piloto de la ESPOL, hubo que buscar una fundición en el medio, que preste las facilidades del caso para la toma de muestras y su posterior estudio en laboratorio.

Se realizó luego un amplio trabajo experimental que cubrió desde la selección de los materiales de carga a introducirse en el cubilote, hasta el control posterior en laboratorio mediante la realización de ensayos mecánicos, químicos y metalográficos de las muestras obtenidas por colado directo en moldes de arena sintética.

Se han experimentado aleaciones Fe-C-Si con valores de Carbono equivalente comprendidos entre 3.1 y 4.5, obteniéndose resistencias a la tracción entre 16 y 30 Kg/mm^2 y durezas Brinell desde 175 a 262 en barras de 30 mm. de diámetro maquinadas de acuerdo a normas ASTM.

La microestructura observada fue 100% perlítica y el grafito de forma I y de tamaño 3 a 6, según norma UNE 36117. Por otro lado en la cuña ASTM W3 se obtuvieron espesores de temple que variaron entre 0 y 12 mm.

Del análisis de los resultados obtenidos, se lograron encontrar gráficos y curvas que facilitarían a los fundidores el saber de una manera sencilla las posibles propiedades del material fundido, así como en base a propiedades preestablecidas determinar los porcentajes de los elementos a introducirse al cubilote para obtener esas características en el material.

CAPITULO II

IMPORTANCIA DE LA NECESIDAD DE UN CONTROL RAPIDO DE LAS PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES GRISES.

A.- OBJETIVO

Las fundiciones de hierro constituyen como regla general, el principal renglón de producción de la industria de la fundición del país. La demanda de hierro fundido está basada en la natural ventaja de estas aleaciones tanto como material de ingeniería, como también por su bajo costo.

Nuestro país experimenta un aumento creciente en la demanda de piezas de hierro fundido y paralelamente a este crecimiento, las industrias demandantes de este material, empiezan a exigir que éstas cumplan con ciertas normas de calidad basadas en requerimientos mínimos de propiedades mecánicas.

La mayoría de las empresas dedicadas a esta actividad, son en nuestro medio de tipo artesanal, y por lo tanto carentes de una infraestructura mínima como para poder implementar sistemas de control, tales como: El análisis químico, la metalografía, ensayos mecánicos, etc., que requerirían de una gran inversión, pero que permitirían cumplir con las normas de calidad exigidas.

El presente trabajo tiene por tanto como objetivo el desarrollar un método de control de propiedades mecánicas, que sea económico, rápido de ejecutar y de fácil aplicación en cualquier taller de fundición, sin necesidad de hacer nuevas inversiones en planta.

El método está basado en las interrelaciones existentes entre la microestructura, la composición química, la velocidad de enfriamiento, y las propiedades mecánicas.

B.- JUSTIFICACION DEL TRABAJO

1.b.- SITUACION ACTUAL DEL CONTROL DE LAS FUNDICIONES FERROSAS EN GUAYAQUIL.

El control metalúrgico en el proceso de fusión del hierro gris, es básico para poder obtener un material que satisfaga las especificaciones de ingeniería que sean establecidas entre productores y compradores.

Este tipo de control, debe de cubrir aspectos relacionados con la inspección de los materiales de carga del cubilote, análisis metalográfico y pruebas mecánicas del material obtenido.

De una manera más concreta, se puede decir que el control metalúrgico se basa en la inspección de cada una de las siguientes partes del proceso:

a.- Materiales de carga

- b.- Control de parámetros de operación del horno
- c.- Control de la colada: Temperatura de la colada, velocidad de enfriamiento y profundidad de temple.
- d.- Control del metal obtenido: Composición química, propiedades mecánicas y acabado de las piezas.

Después de haber visitado las fundiciones locales, se ha podido constatar que han venido operando, con pocas excepciones, sin realizar los controles precitados. En cuanto a la carga metálica introducen indiscriminadamente cualquier tipo de chatarra, lo que les impide manejar a voluntad las características de los materiales producidos.

No existe control de los siguientes parámetros relacionados con la operación, a saber:

- Coque, del cual se desconoce por completo el porcentaje de ceniza, humedad y carbono fijo que posee,
- Volumen y presión de aire, no existen elementos de control de estos parámetros.

Por lo tanto resulta imposible llegar a establecer un volumen de producción óptimo, según lo establecen los manuales de construcción de hornos.

Bastante notorio, resulta el hecho del desconocimiento de la temperatura a la cual el metal sale del horno, factor muy importante éste por cuanto relacionado con velocidad de enfriamiento y profundi

dad de temple, representa propiedades mecánicas.

Por los gastos que implicaría la implementación de un laboratorio, les resulta imposible realizar análisis de la composición química del metal obtenido y poder de éste modo estimar propiedades del material para usos de ingeniería.

De todo lo enunciado anteriormente, podemos concluir que esta falta de control en las fundiciones ferrosas, ha limitado considerablemente el campo de acción de los fundidores nacionales, por cuanto no han podido proyectar una aleación determinada con la que se pueda confiablemente reemplazar piezas en servicio.

2.B.- POSIBILIDADES DE OBTENER FUNDICIONES GRISES DE DIFERENTES CARACTERÍSTICAS.

Los estudios realizados durante años por muchos investigadores, muestran que es factible, y de hecho se lo hace en otros países, el obtener un material con características específicas determinadas a priori, en función de manejar la composición química y la velocidad de enfriamiento.

De estos estudios, se desprende que elementos tales como el Silicio y el Fósforo modifican la composición eutéctica y por tanto las condiciones de solidificación de la aleación, e influyen notablemente en la determinación del carácter de la fundición. De allí que se haya determinado un factor denominado Carbono equiva-

lente ($C_e = C + 1/3 (Si + P)$) para visualizar la influencia del silicio y fósforo sobre el porcentaje de carbono eutéctico.

Del resultado de cientos de pruebas realizadas, se ha observado que conociendo para cada fundición el valor de éste índice, se puede determinar con bastante aproximación el posible comportamiento del material de acuerdo con el espesor, obteniéndose valores bastante parecidos.

De las experiencias realizadas se puede concluir que, para valores de C_e tan bajos como 3.1, es posible obtener un material de alta resistencia a la tracción (37 Kg/mm^2) de estructura gris 100 x 100 perlítica, pero muy frágil. Mientras que para valores de C_e tan altos como 4.8, se obtiene un material de estructura ferrítica, blando y de apenas 12 Kg/mm^2 de resistencia. Entre estos dos valores considerados como extremos, se obtiene una gran variedad de propiedades de las fundiciones grises.

La velocidad de enfriamiento, que depende del espesor de las piezas, es otro factor que también ejerce una influencia notable en la microestructura de las fundiciones. Esta influencia es tan marcada que con una misma composición, al variarse la velocidad de enfriamiento se obtienen diferentes calidades con distintas durezas, resistencias a la tracción y microestructuras.

C.- PLAN GENERAL DEL PROGRAMA

Debido a la imposibilidad de efectuar el estudio en laboratorio, por no poseer las instalaciones de la planta piloto de la ESPOL un horno de fusión adecuado para el caso, previo al desarrollo de un plan de trabajo, hubo la necesidad de establecer un análisis sistemático de las fundiciones en nuestro medio, para lo cual se hizo un programa de visitas a las mismas.

La apreciación directa de las instalaciones y de los métodos de trabajo usados por nuestros fundidores, tuvo como objetivo el conocer como opera cada una de las fundiciones existentes.

Determinando en cada una de ellas las facilidades que presten tanto para el control previo de las cargas, antes de su ingreso al cubilote, como para la toma posterior de las muestras en el momento de colar.

De esta prospección, se seleccionó aquella fundición en que vimos mayores facilidades para disponer cambios en la composición química, al poder variar abiertamente los porcentajes de hierro gris y acero de cada una de las cargas.

Una vez seleccionada la fundición más idónea, se procedió a la toma de las muestras, para lo cual se prepararon cargas con materiales químicamente identificados, que nos aseguraron contenidos diferentes de Carbono y Silicio y así establecer por medio de cálculo de pérdidas y ganancias de elementos primarios, la composición química final requerida.

La información bibliográfica consultada, coincide en cuanto al tipo de

muestras que se necesitan para el estudio en el laboratorio y son: Un juego de cuatro cuñas de temple de diferentes tamaños y dos barras para tracción de 30 mm. de diámetro, en las cuales se efectuaron ensayos de profundidad de temple, dureza, resistencias a la tracción, metalografía y composición química.

De los resultados obtenidos se observaron las interrelaciones que en forma de curvas proveerán los datos suficientes al fundidor para que en base a la composición de las cargas del horno y tamaño o dimensión del espesor de las piezas, esté en capacidad de conocer las propiedades mecánicas del material que constituyen las piezas producidas.

CAPITULO III

EL HIERRO GRIS

A.- GENERALIDADES

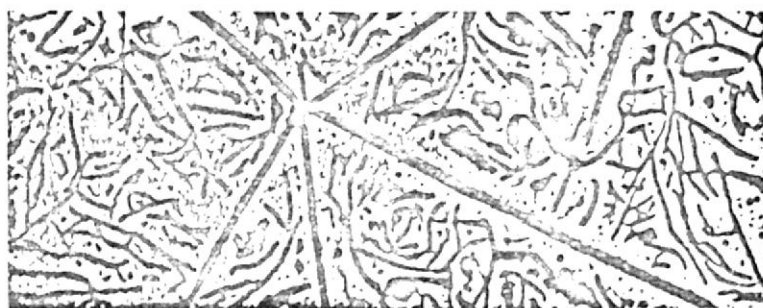
Las fundiciones de hierro, producen cerca de 100 toneladas de fundición cada mes, y así suministran más del doble de la fundición en peso, que todos los otros tipos de fundición juntas.

Las fundiciones, son en esencia aleaciones de hierro y carbono, y silicio que generalmente contienen también manganeso, fósforo, azufre, etc. Son de mayor contenido en carbono que los aceros (2 a 4.5%) y adquieren su forma definitiva directamente por colada, no siendo nunca las fundiciones sometidas a procesos de deformación plástica ni en frío ni en caliente. En general, no son dúctiles ni maleables y no pueden forjarse ni laminarse.

En las fundiciones grises, que en la práctica son las más importantes, aparecen durante la solidificación y posterior enfriamiento, láminas de grafito (Figs. 1 y 2) que al originar discontinuidades en la matriz, son la causa de que las características mecánicas de las fundiciones grises sean, en general, muy inferiores a las de los aceros.

En compensación, aparecen otras características que resultan favorables,

tales como amortiguamiento de vibraciones, maquinabilidad, resistencia al desgaste, autolubricación, facilidad de fabricación, que la convierten en un interesante material para una gran variedad de aplicaciones en motores, maquinaria y equipos.



60 X

Sin ataque

Figura 1

Microestructura de una fundición gris hipereutética.
Se observan largas láminas de grafito hipereutético.
(Hanneman)

El cubilote es la instalación más empleada para la fabricación de la mayoría de las piezas de fundición. Un porcentaje de piezas mucho más pequeños se obtiene utilizando hornos de reverbero, hornos de crisol y hornos eléctricos.



100 X

Sin ataque

Figura Nº 2

Láminas de grafito de una fundición gris hipoeutética.

(Gagnebin)

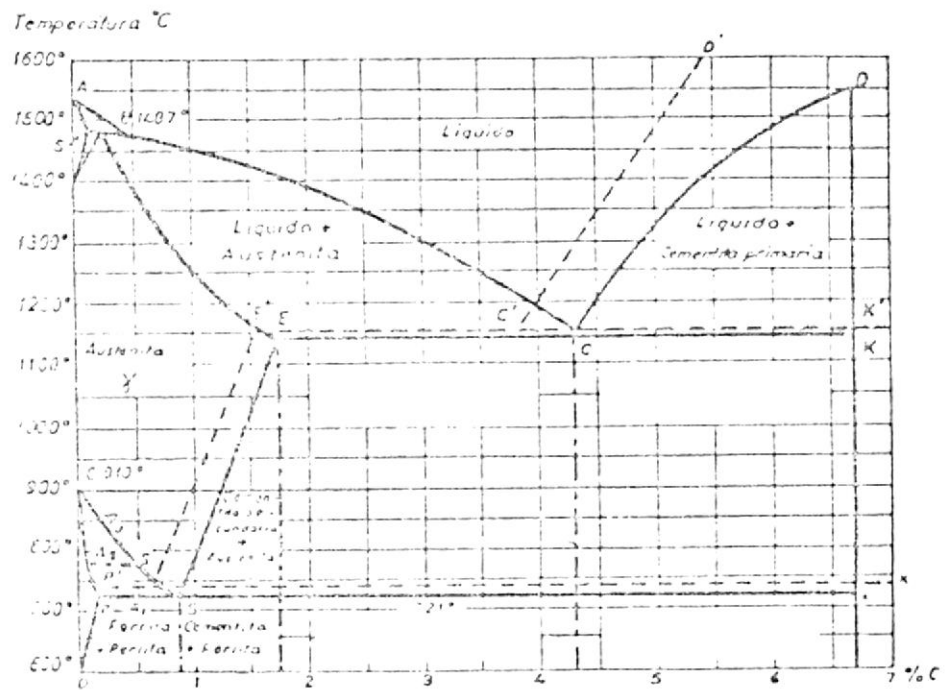


Figura Nº 3

Diagrama hierro-carbono estable (línea de rayas alternadas) y diagrama hierro-carbono metaestable (líneas continuas) . (Avner).

Teóricamente las fundiciones pueden contener de acuerdo con el diagrama hierro-carbono (Figura 3), de 1.7 a 6.67 % de Carbono. Sin embargo, en la práctica, como hemos dicho antes, su contenido varía de 2 a 4.5 %, siendo lo más frecuente que oscile de 2.75 a 3.5 %.

El contenido en silicio suele oscilar de 0.5 a 3.5% y excepcionalmente llega algunas veces a 4 %. Los porcentajes de azufre suelen oscilar de 0.01 a 0.20 %, los de fósforo de 0.040 a 0.80 % y en algunos casos llega a 1.5%.

B.- PRINCIPALES PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES GRISES

Resistencia a la tracción.- En la práctica industrial, cada día se tiene más en cuenta la resistencia a la tracción de las fundiciones grises, y es frecuente clasificar las fundiciones por la resistencia a la tracción que con ellas se obtienen en barras fundidas según normas ASTM, de la siguiente manera (1).

- 1.- Fundiciones de menos de 15 Kg/mm^2 . son en general, fundiciones ferríticas.
- 2.- Fundiciones de 20 Kg/mm^2 , aproximadamente (15 a 25 Kg/mm^2). Son en general, perlíticas con grafito laminar.
- 3.- Fundiciones de 30 Kg/mm^2 , aproximadamente (25 a 35 Kg/mm^2). Son fundiciones perlíticas de propiedades muy parecidas a las anteriores, aunque con frecuencia suelen ser aleadas.
- 4.- Fundiciones de 40 Kg/mm^2 , aproximadamente (35 a 45 Kg/mm^2). Son en general, fundiciones aciculares con grafito laminar muy fino.

5.- Fundiciones de 60 Kg/mm^2 , aproximadamente (50 a 70 Kg/mm^2). Son en general, fundiciones con grafito esferoidal.

Resistencia a la corrosión.- Las fundiciones ordinarias tienen en general una resistencia a la corrosión al agua, a los ambientes de ciudades industriales y a otros medios ligeramente corrosivos bastante superior a la de los aceros ordinarios. Por eso, las fundiciones son muy empleadas para la fabricación de piezas de maquinaria o instalaciones que queden a la intemperie o en contacto con el agua como canalizaciones, bombas, radiadores, calderas, compresores, etc.

Experimentos realizados por investigadores, han demostrado que exponiendo en un ambiente corrosivo acero ordinario y fundición, el porcentaje de pérdida en peso del metal por corrosión, fue de alrededor un 50% menor en el caso del hierro fundido que en el acero.

Resistencia a la compresión.- Esta es otra de las más importantes propiedades de las fundiciones grises, siendo tres a cinco veces mayor que la resistencia a la tracción.

Módulo de elasticidad.- Al realizarse el ensayo de tracción de una fundición gris (Figura 4), se observa que el módulo de elasticidad no es constante como en los aceros sino que disminuye a medida que aumenta la carga que actúa sobre el material. No hay, por lo tanto, como en los aceros una zona en la que haya rigurosa proporcionalidad entre las cargas y las deformaciones.

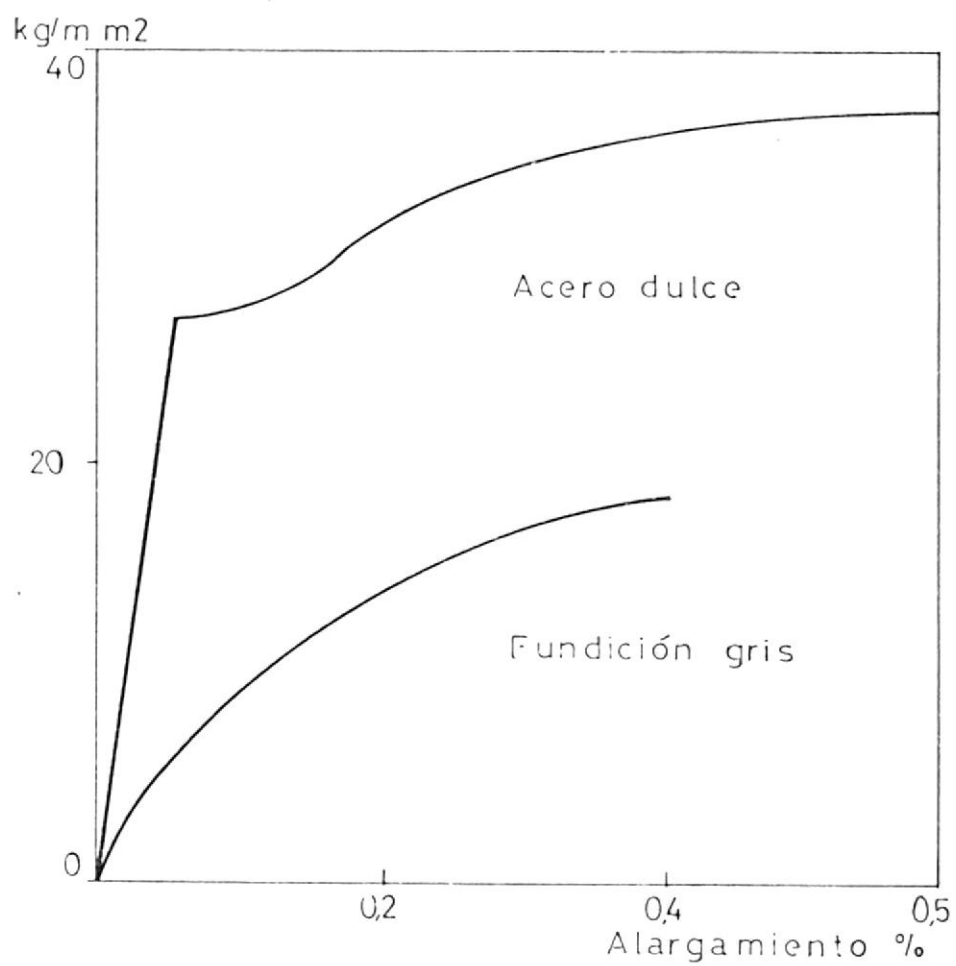


Figura Nº 4

Gráficos representativos del ensayo de tracción de un acero dulce y de una fundición gris. (J. Apraiz)

Por ello, a cada carga que actúa sobre el material corresponde un módulo de elasticidad, siendo frecuente que en la práctica se de como valor del módulo de elasticidad de una fundición, el que corresponde a una carga de un 75% de la máxima rotura.

Durante el ensayo, en un momento determinado del mismo tendremos:

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{\text{Carga que está actuando}}{\text{Alargamiento que ha producido}} \quad (1)$$

En general, el módulo de elasticidad varía entre 7.000 y 13.000 Kg/mm². Al disminuir el tamaño y cantidad de las láminas de grafito, aumenta el módulo de elasticidad y también la resistencia a la tracción de las fundiciones.

El alargamiento plástico y permanente de las probetas en la mayoría de las fundiciones ordinarias es muy pequeño puede decirse que casi nulo, ya que no suele llegar al 1% mientras que en los aceros son normales los alargamientos que oscilan entre 10 y 20%.

Resistencia a la torsión.- Es aproximadamente 1.20 a 1.40 veces la resistencia a la tracción.

Capacidad de amortiguación.- Una propiedad muy importante de las fundiciones, debida precisamente a la presencia de láminas de grafito, es su gran capacidad de amortiguación a las vibraciones, muy superior a la de los aceros.

En la figura 5, se representa esquemáticamente las vibraciones que se pro



Figura Nº 5

Representación gráfica de la forma de amortiguarse las vibraciones que se pueden producir en las piezas de fundición de acero y de aleaciones de aluminio. (American Foundrymen's Society)

ducen ensayando en las mismas condiciones varillas de fundición, de acero y de aleación de aluminio. Se observa que las vibraciones se amortiguan en la fundición mucho antes que en el acero y que en la aleación de aluminio, lo cual en general, es muy ventajoso cuando se emplea este material para la fabricación de bancadas de máquinas, motores, etc.

Resistencia al desgaste.- Las fundiciones grises y en especial las fundiciones grises perlíticas, dan excelente resultados cuando se emplean para la fabricación de piezas de motores y máquinas que deben resistir al desgaste.

Pruebas realizadas nos muestran que cuando se comparan fundiciones grises de la misma familia, composición bastante similar, el desgaste disminuye considerablemente a medida que aumenta la dureza del material.

Otro factor a considerarse es, el tamaño de las láminas de grafito y para obtener los mejores resultados no conviene que el grafito sea muy fino. La presencia de ferrita es muy desfavorable y el desgaste aumenta con el porcentaje de ferrita, y por lo tanto, aumenta también al disminuir el porcentaje de carbono combinado.

En los casos de rozamiento metal con metal, la fundición gris da resultados muy buenos, aún con mala lubricación debido a la presencia del grafito, que actúa en cierto modo como lubricante. Por medio del tratamiento térmico y con el empleo de elementos de aleación, se aumenta la dureza de las fundiciones y se mejora también su resistencia al desgaste.

C.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS CARACTERISTICAS MECANICAS DE LAS FUNDICIONES.

1.c.- INFLUENCIA DEL SILICIO EN LAS FUNDICIONES

El diagrama hierro-carbono (Fig. 3) que se señala al estudiar los aceros, se denomina diagrama metaestable y corresponde a aleaciones hierro-carbono de muy bajo contenido en silicio.

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

En la figura 3 se ha señalado el diagrama estable correspondiente a 1.5% de silicio, que es un contenido que se puede considerar como medio entre los utilizados en las fundiciones grises de uso corriente.

La actividad del silicio se observa claramente en la figura 6, en donde se puede comparar el desplazamiento que sufren las líneas de transformación y el punto eutéctico hacia la izquierda a medida que se incrementa el porcentaje de silicio.

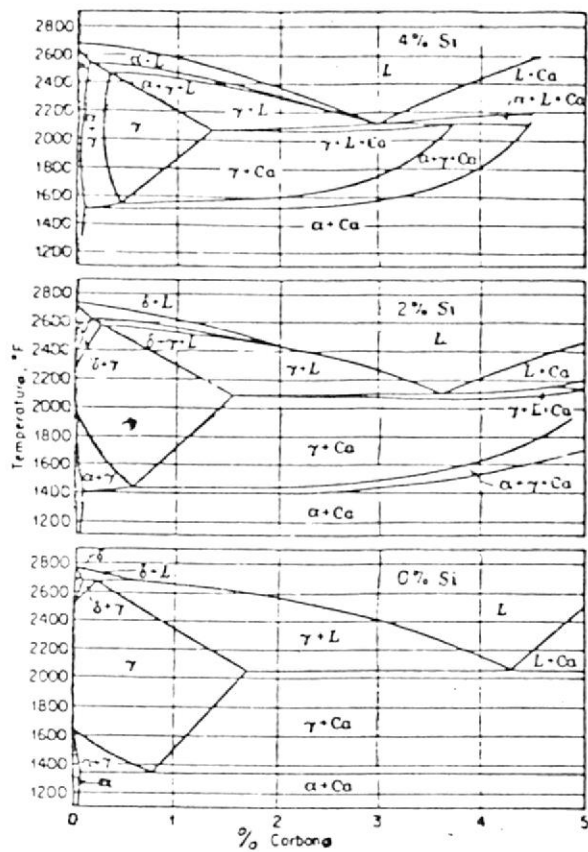


Figura 6

Secciones de sistemas de aleaciones ternarias (Fe-C-Si) en dos dimensiones con: 0 %, 2 % y 4 % de Silicio (A F S)

Los contenidos en carbono de las aleaciones eutécticas y eutectoides del diagrama estable, varían con el contenido en silicio de las fundiciones y son inferiores a los que corresponden al diagrama metaestable. En las transformaciones del diagrama estable, para una temperatura determinada, la austenita es capaz de disolver menor cantidad de carbono que el que disuelve a la misma temperatura la austenita cuando las transformaciones se hacen de acuerdo con el diagrama metaestable. Con cierta aproximación se puede conocer fácilmente el contenido en carbono de la aleación eutéctica con ayuda de la siguiente fórmula.

$$\text{Carbono eutéctico} = 4.30 - 1/3 (\% \text{ de silicio}) \quad (1)$$

El silicio se presenta normalmente en las fundiciones en forma de siliciuro de hierro disuelto en la ferrita o hierro alfa, no pudiendo observarse por lo tanto directamente su presencia por medio del examen microscópico.

Cuando se halla presente en pequeñas cantidades, variables de 0.1 a 0.6%, no ejerce influencia importante. En cambio, cuando el silicio se halla presente en porcentajes variables de 0.6 a 3.5%, ejerce una acción muy destacada y contribuye a la formación de grafito, que modifica completamente el carácter y las propiedades de las aleaciones hierro-carbono.

En el siguiente ejemplo que se refiere a dos piezas de fundición del mismo tamaño (25 mm. de diámetro y 50 cms. de longitud) se a-

precia perfectamente su influencia.

La composición de la primera pieza es la siguiente: C= 3%; Si = 0.50%, Mn = 0.45 %; P = 0.05%; y S = 0.070 %; la segunda tiene la misma composición, excepto el contenido en silicio, que es de 2.5 % en lugar de 0.5%. Esa diferencia en el porcentaje de silicio hace que las microestructuras y propiedades de las dos piezas sean completamente distintas (figura 7). La primera es una fundición blanca, muy dura, frágil, tiene la fractura blanca, encontrándose en ella todo el Carbono formando cementita; la segunda es una fundición gris relativamente blanda, tiene fractura grisácea y un gran porcentaje de carbono en forma de grafito (figuras 1 y 2).

En la figura 8 se puede ver el diagrama de Maurer que fue uno de los primeros que señalaron de una forma clara la relación que hay entre los porcentajes de carbono y silicio y la clase de fundición que se obtiene en cada caso. Este diagrama que es muy sencillo y claro, ha sido perfeccionado y modificado por otros investigadores, siendo en la actualidad el Norbury (figura 9) uno de los más aceptados. Estos dos diagramas se refieren a un determinado espesor y una clase de molde y no se destaca en ellos la influencia de la velocidad de enfriamiento.

El carbono, como se desprende de las figuras 8 y 9, tiene una influencia tan importante como la del silicio, y así, muy pequeñas variaciones de carbono, hacen que en determinadas circunstancias

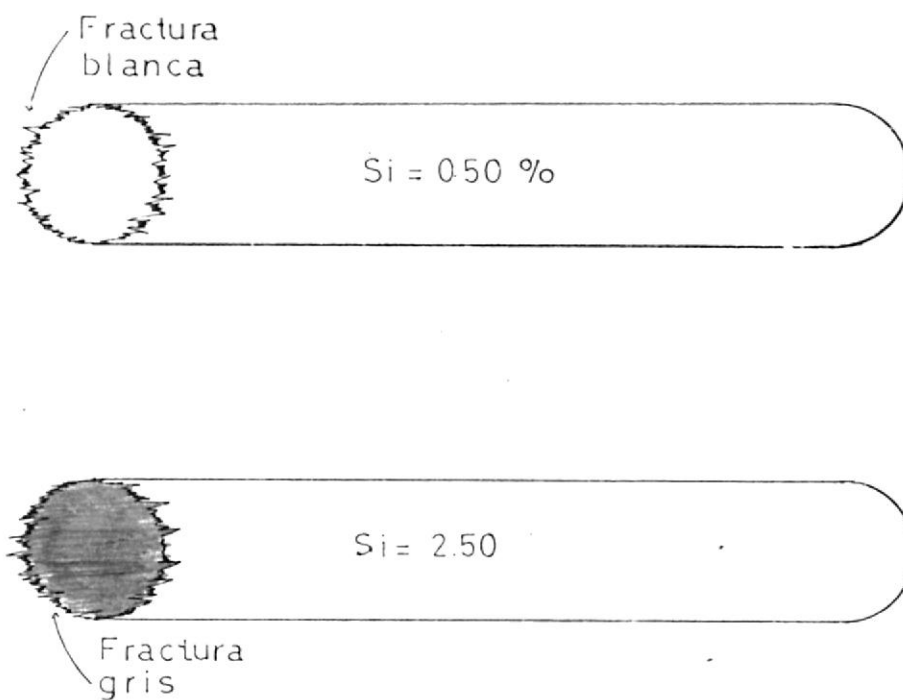


Figura Nº 7

Influencia del silicio en la formación de la fundición blanca o gris, en redondos de 25 mm de diámetro de la siguiente composición base: C= 3%; Mn = 0.45%; P=0.050%; S = 0.07 % (J. Apraiz)

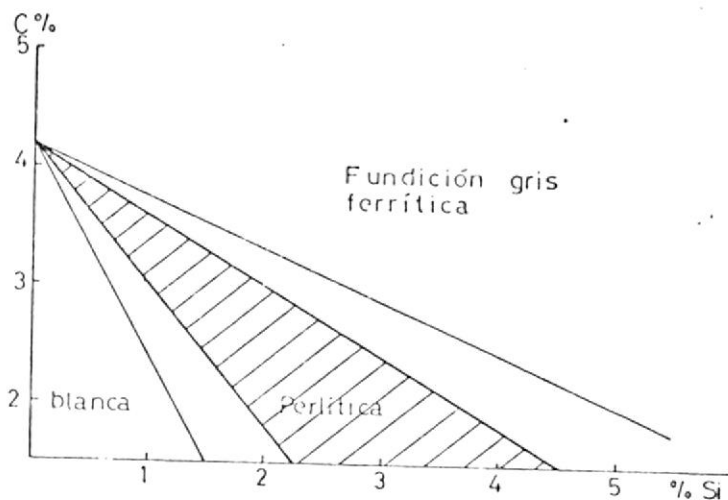


Figura 8

Antiguo diagrama de Mauer que señala los contenidos en carbono y silicio, correspondientes a distintos tipos de fundiciones en piezas de 30 mm. de espesor coladas en arena. (J. Apraiz)

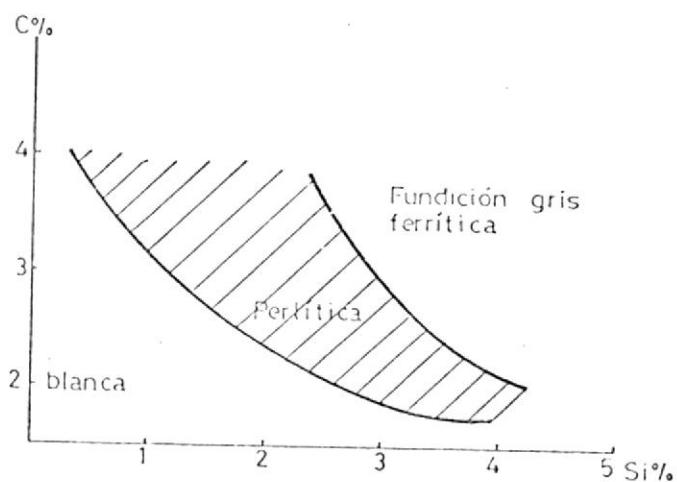


Figura 9

Diagrama de Norbury que señala los contenidos de Carbono y silicio correspondientes a distintos tipos de fundiciones en piezas de 25 mm. de espesor coladas en arena.

(J. Apraiz)

la fundición pase de gris a blanca.

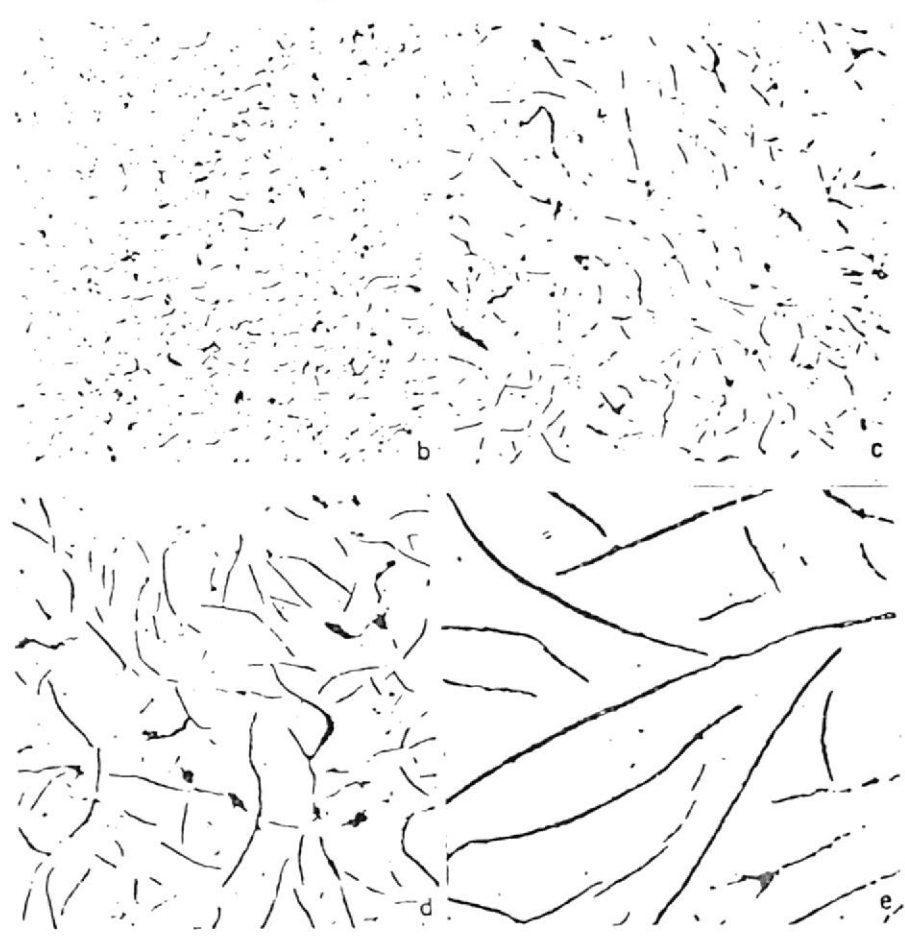
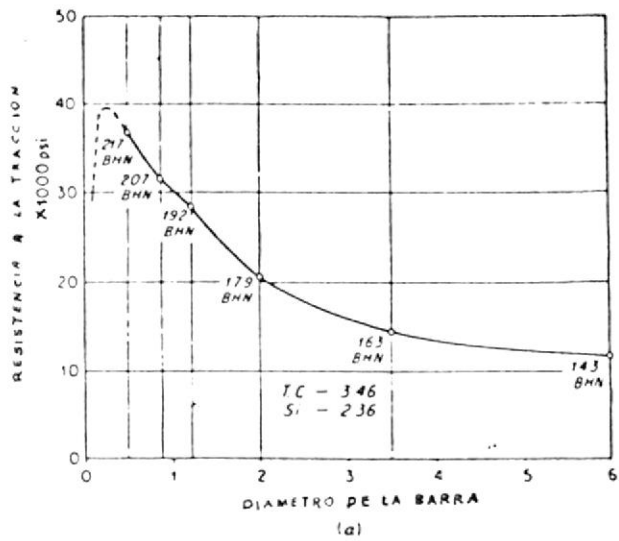
Pero como en la fabricación normal de fundiciones en cubilote, por estar en todos los casos la fundición en contacto con el coque, esas variaciones de carbono, son muy pequeñas (suelen oscilar entre 3 y 3.5%) en la práctica normal a esa influencia debida a la acción del carbono se le suele dar mucha menos importancia que a la del silicio, aunque en realidad la tenga también muy importante.

2.c.- INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

La velocidad de enfriamiento, que depende del espesor de las piezas y de la clase de molde empleado, es otro factor que también ejerce una influencia decisiva en la microestructura de las fundiciones. Los pequeños espesores se enfrían mucho más rápido que los grandes así como un molde metálico, enfría más rápidamente que un molde de arena.

Los enfriamientos rápidos, tienden a producir fundiciones blancas; los enfriamientos lentos favorecen la formación de grafito y, por lo tanto, la formación de fundiciones grises.

Esta influencia es tan marcada que con una misma composición, al variarse la velocidad de enfriamiento se obtienen diferentes calidades con distintas durezas, resistencias a la tracción y microestructuras, tal como se lo ilustra en la figura 10.



100 X

Sin ataque

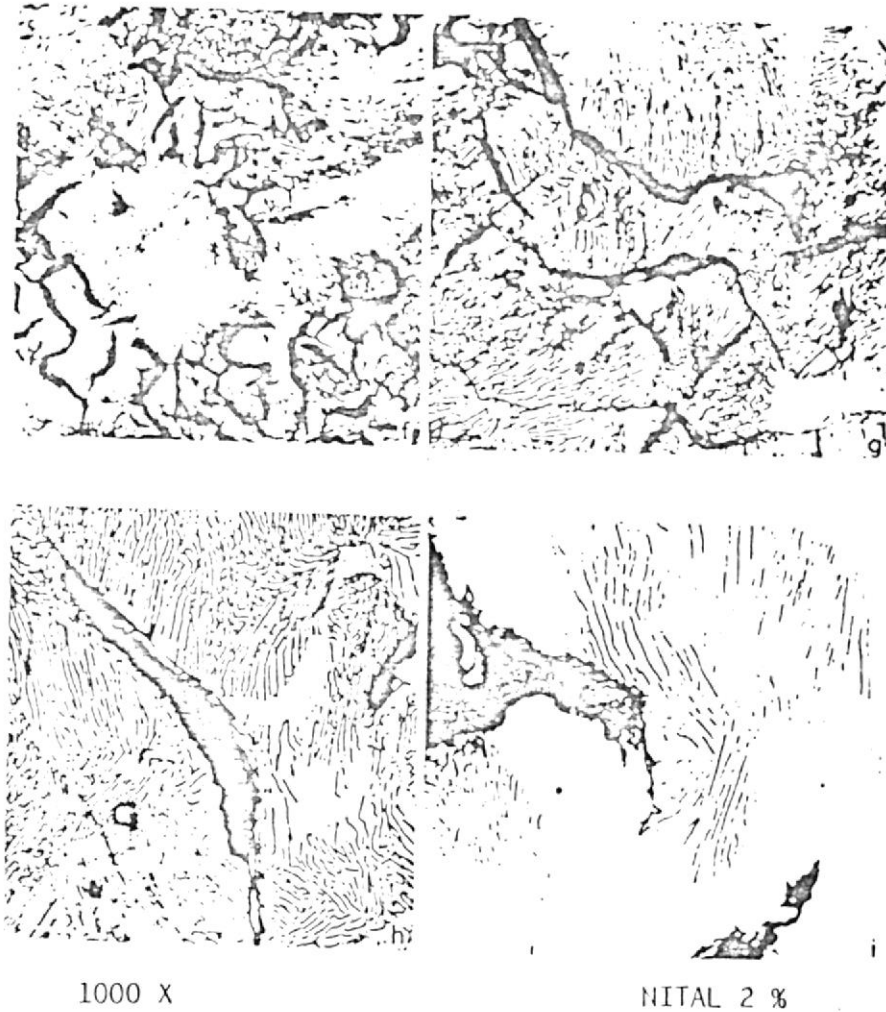


Figura Nº 10

- a) Efecto de la microestructura de la fundición gris sobre la dureza y resistencia a la tracción.
 - b) Grafito interdendrítico 6 E, 7 D en una barra de 1/2 "
 - c) Láminas de grafito 5 A. Barra de 1.2 " de diámetro
 - d) Láminas de grafito 4 A. Barra de 2 " de diámetro
 - e) Láminas de grafito 1 A. Barra de 6 " de diámetro
 - f) Perlita fina y grafito interdendrítico. Barra de 1/2 "
 - g) Perlita ligeramente más gruesa que en (f). Barra de 1.2 "
 - h) Perlita gruesa y ferrita abundante. Barra de 2 "
 - i) Perlita bastante gruesa y gran cantidad de ferrita barra de 6 "
- (Cortesía de American Foundrymen's Society)

Se puede observar que enfriamientos rápidos, provocan incrementos en la dureza y en la resistencia a la tracción, mientras no se obtengan estructuras blancas, atruchadas o con un alto contenido de láminas de grafito tipo D.

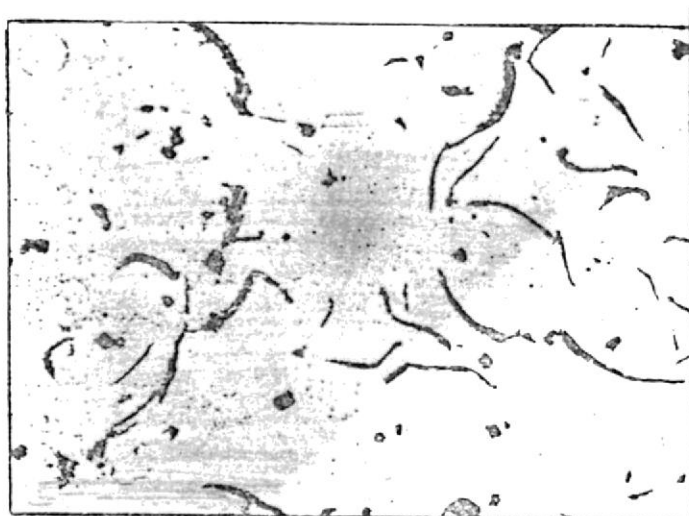
Enfriamientos cada vez más lentos producidos en piezas de secciones cada vez mayores, ocasionan un engrosamiento progresivo de las láminas de grafito y perlita hasta obtenerse finalmente una estructura ferrítica que es sumamente blanda.

3.c.- INFLUENCIA DEL AZUFRE, FOSFORO, MANGANESO, OXIGENO E HIDROGENO

Azufre.- El azufre se opone a la grafitización del carbono y favorece la formación de cementita. Su influencia en ausencia del manganeso es verdaderamente sensible.

El azufre tiene una fuerte afinidad con el manganeso, y al combinarse ambos elementos forman el sulfuro de manganeso (figura 11), que no tienen en cambio ninguna influencia en la formación del grafito o de la cementita.

Por lo tanto, inversamente a lo que antes hemos explicado, la primera adición de azufre, a una fundición de un contenido relativamente elevado de manganeso, tiende indirectamente a grafitizar la fundición. Esto es debido a que el azufre en cierto modo absorbe algo de manganeso, que es un elemento que favorece a la formación de cementita.



250 X

Sin ataque

Figura Nº 11

Inclusiones de sulfuro de manganeso (Zonas puntuales negras)
en una fundición (sin ataque Cortesia de L.F.Porter)

Lo mismo ocurre con las adiciones de manganeso a una fundición de elevado contenido en azufre, ya que al principio favorecen la grafitización en lugar de oponerse a ella.

En cambio, cuando el azufre existe en exceso en una fundición con poco manganeso, forma con el hierro el sulfuro de hierro que favorece la formación de cementita y tiende, por lo tanto, a blanquear la fundición. En las fundiciones, los contenidos en azufre suelen variar de 0.010 a 0.200%.

El azufre en ocasiones, cuando se encuentra en las fundiciones en cantidades importantes y forma $S\ Fe$, por no haber suficiente cantidad de manganeso, puede dar lugar al fenómeno de temple invertido.

Suele ocurrir que el azufre aparece segregado en las zonas centrales próximas a las mazarotas o rechupes en forma de sulfuro de hierro que tiende a blanquear en esos puntos a la fundición. Entonces ocurre que la zona central es más dura que la periferia, y por eso este fenómeno suele conocerse con el nombre de temple invertido.

Fósforo. - El fósforo se suele añadir a veces intencionalmente a la fundición con objeto de favorecer su colabilidad y se emplea cuando se quiere fabricar piezas de forma complicada o de carácter decorativo u ornamental.

El fósforo no ejerce influencia muy sensible sobre la grafitización

del carbono en las fundiciones, aunque puede decirse que, en general, se opone ligeramente a ella. La presencia del fósforo da lugar a un aumento de la fragilidad y aumenta la dureza.

La mejora de la colabilidad de las fundiciones por la presencia del fósforo, es debida a la formación de eutéctico esteadita de bajo punto de fusión que suele aparecer en los contornos de los granos, tal como se puede observar en la figura 12.

En las fundiciones grises se forma un eutéctico binario de 39% de ferrita con algo de fósforo en solución y 61% de fosfuro de hierro, mientras que en las fundiciones blancas se forma un eutéctico ternario de ferrita con algo de fósforo en solución, fosfuro de hierro y cementita.

Un contenido normal en fósforo en las fundiciones es, por ejemplo 0.15%, empleándose contenidos más elevados, de 0.50 a 1.50% cuando se desea alta colabilidad.

Con ayuda del microscopio es fácil descubrir la presencia del eutéctico esteadita que aparece siempre en las uniones de los granos, ya que por su bajo punto de fusión este eutéctico es el último de los constituyentes que se solidifica.

En las fundiciones grises la esteadita, como ya se ha explicado, es un eutéctico binario y en las fundiciones blancas es ternario. Los constituyentes de la esteadita se pueden distinguir calentando las



1000 X

Figura Nº 12

Eutético de steadita formado por agrupaciones de fosfuro de hierro sobre un fondo blanco de ferrita. Se observan también grandes cristales negros de perlita.

(Robert Heyer)

probetas pulidas de fundición y observándolas a continuación, ya que el carburo de hierro se colorea rojo, el fosfuro de hierro de púrpura y la ferrita queda blanca.

Hay fundiciones a las que para mejorar su resistencia al desgaste se les añade de 0.50 a 1.0 % de fósforo, para conseguir que se forme esteadita, que es de gran dureza, y mejora la aptitud al rozamiento del material.

Manganeso.- El manganeso se opone lo mismo que el azufre, como ya hemos indicado antes, a la grafitización del carbono y favorece en cambio, la formación de cementita. Tiende a blanquear las fundiciones y a aumentar su dureza dificultando la mecanización. Normalmente las fundiciones suelen contener de 0.4 a 1.5 % de manganeso.

El manganeso con el azufre forma inclusiones de sulfuro de manganeso, y como ya hemos señalado anteriormente, el principal papel del manganeso es neutralizar el azufre, evitando la formación del sulfuro de hierro. La siguiente regla nos determina la cantidad necesaria de manganeso para neutralizar una determinada cantidad de azufre.

$$\text{Mn \%} = 1.72 \text{ S \%} \div 0.30 \text{ para la fundición gris. (7)}$$

Oxígeno.- El oxígeno es un antigrafitizante enérgico que se encuentra presente en mayor o menor cantidad en todas las

fundiciones. Se presenta principalmente en formas de inclusiones no metálicas, muchas de ellas submicroscópicas, de óxido de hierro, de manganeso, de aluminio y de silicio.

El porcentaje de oxígeno que contienen las fundiciones suele variar de 0.002 a 0.020%. Con altos porcentajes de oxígeno la colabilidad del metal disminuye mucho, se producen rechupes importantes y la estructura puede sufrir sensibles modificaciones.

Hidrógeno.- El hidrógeno se presenta también casi siempre como impureza gaseosa en las fundiciones y da lugar a porosidades en las piezas, cuando el porcentaje es importante.

El hidrógeno suele provenir de la humedad de los moldes, del vapor de agua contenido en el aire soplado, de la humedad del coque, etc.

La solubilidad del hidrógeno en la fundición aumenta con el porcentaje de silicio. Por ello las fundiciones altas en silicio, suelen ser más porosas que las de bajo contenido en silicio.

Una de las ventajas de las fundiciones inoculadas es que al fabricarse en el horno con bajo porcentaje de silicio, y añadirse luego el ferrosilicio al canal de colada o a la cuchara, se consigue limitar mucho la absorción de hidrógeno y como consecuencia se reduce notablemente los riesgos de que aparezcan luego porosidades en las piezas.

4.c.- INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y DE LA MICROESTRUCTURA.

El estudio de las características mecánicas de las fundiciones es más difícil que el de los aceros.

La composición química de una fundición ordinaria no da como en los aceros el carbono normalizados una idea de su resistencia, ya que otros factores como el método de enfriamiento, la temperatura de fusión y de colada, el espesor de las piezas, la acción de inoculantes, el subenfriamiento, etc., tienen también una influencia muy importante en sus propiedades.

En la figura 13 se ha representado gráficamente la relación que hay entre las diferentes durezas y resistencias de las diferentes clases de fundición que se pueden obtener con una misma composición de 3% de carbono y 2% de silicio.

Se observa que con la misma composición se obtienen resistencias y durezas muy diferentes al variar la microestructura que depende principalmente de la velocidad de enfriamiento. Con esa composición, como ya hemos explicado antes, se pueden obtener fundiciones grises, atruchadas y blancas, con solo variar la velocidad de enfriamiento.

Se observa también que en todas esas fundiciones la dureza aumenta progresivamente desde la fundición ferrítica, que con 130 Brinell es la más blanda, hasta la fundición blanca, que con 300 a 350 Brinell, es la más dura, teniendo las fundiciones perlíticas, que se pueden considerar de una calidad intermedia, una dureza de 180 a

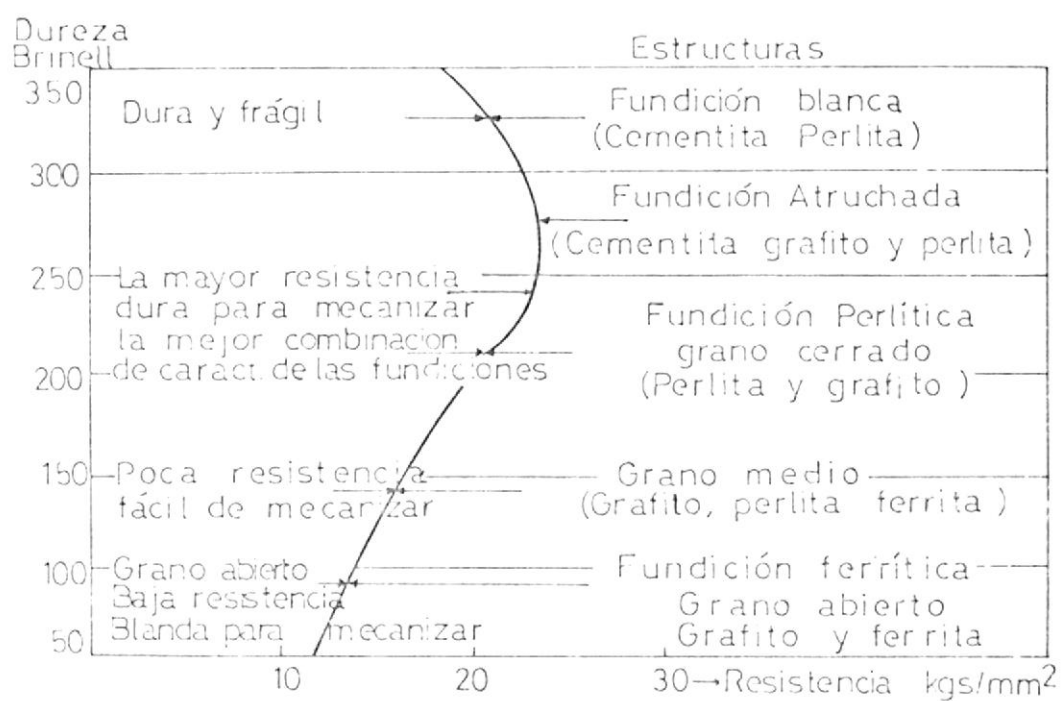


Figura Nº 13

Relación entre la dureza y la resistencia a la tracción de las fundiciones y su microestructura. (Metals Handbook, 1949)

220 Brinell.

También se puede apreciar que a partir de la fundición gris ferrítica la resistencia va aumentando progresivamente hasta la fundición perlítica, que es la de máxima resistencia y su gran dureza no va acompañada de una elevada resistencia como en los aceros. En las fundiciones, al aumentar mucho la dureza, hay una disminución de resistencia.

Al comparar por lo tanto, las durezas correspondientes a las fundiciones blancas, atruchadas y grises de una misma composición, tenemos que no hay proporcionalidad entre la dureza y la resistencia a la tracción, como ocurre en los aceros. Las fundiciones blancas de gran dureza, tienen menor resistencia a la tracción que las grises. La mejor combinación de características para un gran número de aplicaciones, se obtienen con las fundiciones perlíticas que, con durezas de 180 a 220 Brinell, tiene resistencias de 20 a 30 Kg/mm^2 y gran tenacidad.

Las fundiciones de mayor dureza son las que tienen los microconstituyentes de máxima dureza. Cuanto más cementita contienen son más duras y cuanto más ferrita y grafito son más blandas. Por eso, las fundiciones blancas que tienen mucha cementita son muy duras, las ferríticas y grises que contienen mucho grafito y ferrita son las más blandas y las perlíticas y atruchadas, que tienen cantidades variables de unos y otros constituyentes, tienen una dureza intermedia.

Estudiando, en cambio, sólo las fundiciones grises, si se encuentra una cierta correspondencia entre las durezas y las resistencias, como se puede observar en la figura 14. Para bajas resistencias la relación entre la dureza y la resistencia es de 13, aproximadamente, y para altas resistencias de 7 ó a veces menos.

Otra característica de especial mención, de las fundiciones, es la diferencia entre la resistencia a la tracción y a la compresión, en vez de ser iguales entre sí, como en los aceros. Para bajas durezas la resistencia a la compresión llega a ser unas 5 veces mayor que la resistencia a la tracción y para altas resistencias esa relación baja a 2.5 (figura 15).

Al considerar la resistencia de las fundiciones grises, conviene señalar que en ellas intervienen por una parte la resistencia de la matriz y por otra hay que tener en cuenta la influencia de las láminas de grafito.

Cuanto mayor sea la resistencia de la matriz, mayor será la resistencia de la fundición. Cuanto menor sea el número de láminas de grafito, y menor sea su tamaño, su forma sea redondeada y su distribución más uniforme, mayor será también la resistencia de la fundición. Por lo tanto, el problema de aumentar la resistencia de la fundición se debe estudiar teniendo en cuenta los dos factores: la matriz y las láminas de grafito.

La resistencia de la matriz suele variar de 50 a 98 Kg/mm² aproxima

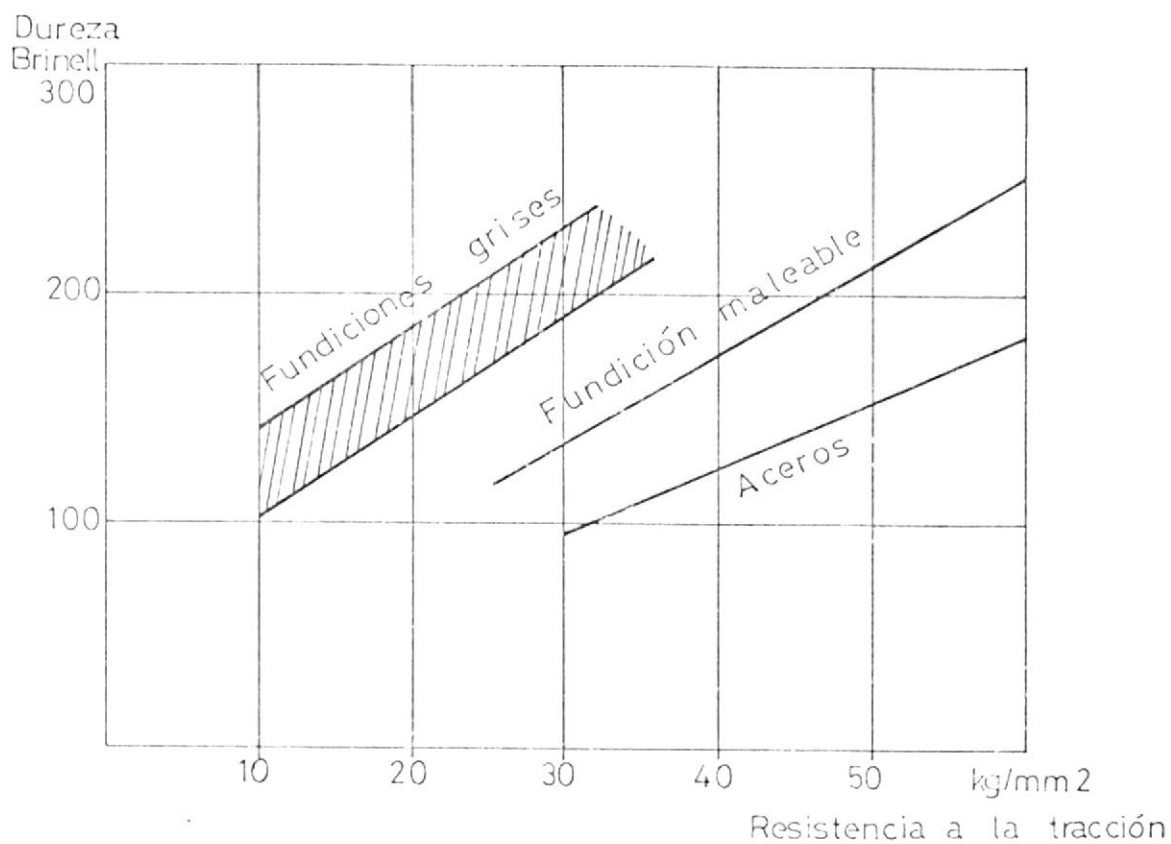


Figura Nº 14

Equivalencias aproximadas entre las durezas y las resistencias a la tracción de los aceros, fundiciones grises y maleables. La equivalencia entre la resistencia y la dureza de las fundiciones se da sólo a título de orientación.

(J. Apraiz)

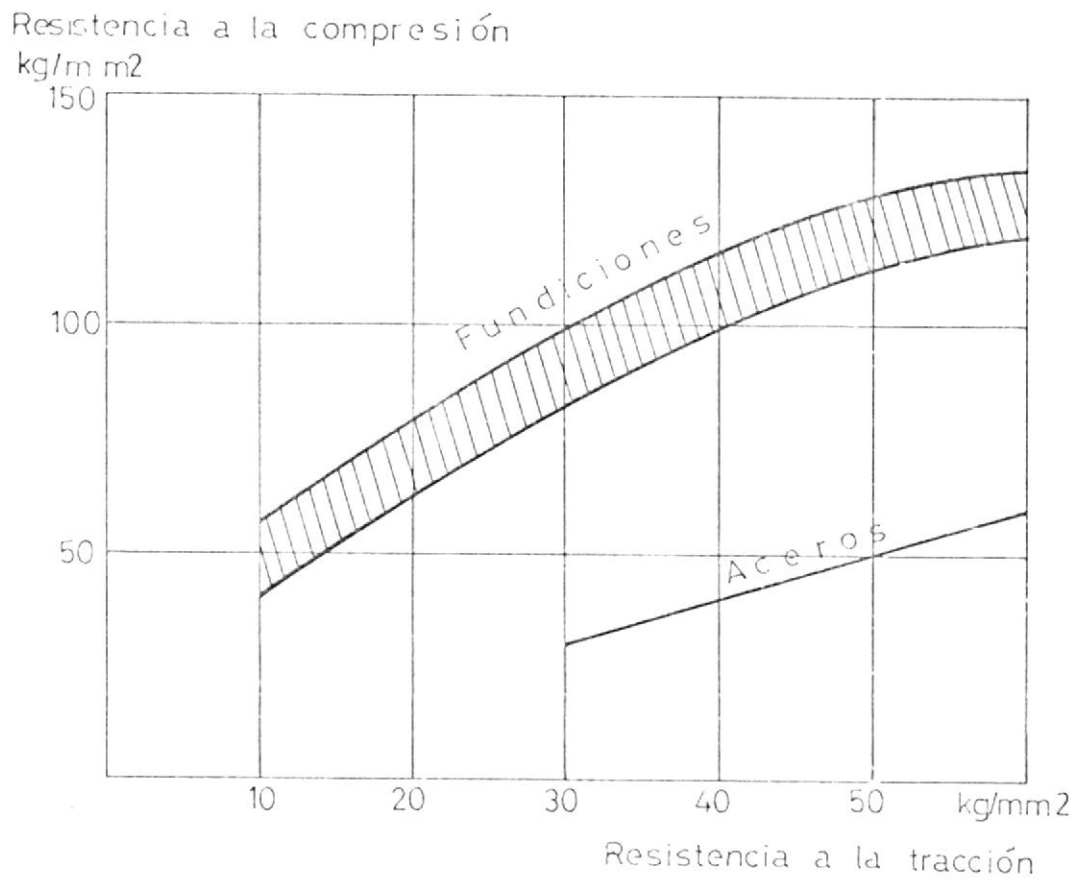


Figura Nº 15

Relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión en las fundiciones y en los aceros.
(J. Apraiz)

damente. El silicio eleva la resistencia de la ferrita y, por lo tanto, la de la matriz que suele estar constituida por ferrita y perlita de una fundición que contienen, por ejemplo, 2.5% de silicio y 0.8% de manganeso, puede considerarse que como valor medio tiene una resistencia aproximada de unos 50 Kg/mm^2 . En los aceros la ferrita que contienen muy poco silicio sólo tiene una resistencia aproximada de 30 Kg/mm^2 .

Cuando en las fundiciones grises, además de ferrita, hay perlita, la resistencia de la matriz es superior a 50 Kg/mm^2 , y cuando la matriz es totalmente perlítica, su resistencia llega a unos 98 Kg/mm^2 , aproximadamente.

La resistencia de la matriz de las fundiciones grises puede conocerse, con cierta aproximación, empleando la fórmula $(50 + 60 C)$, en la que C es el tanto por ciento de carbono combinado que varía de 0 a 0.8%, aproximadamente. Según esta fórmula, la máxima resistencia a la tracción de la matriz es 98 Kg/mm^2 . Aquí conviene señalar que la presencia de grafito hace que la resistencia de las fundiciones sea muy inferior a la que tiene su matriz.

La influencia del grafito en la resistencia a la tracción de las fundiciones es bastante complicada. Una fórmula, derivada de la que antes hemos citado, muy útil para conocer la resistencia de las fundiciones grises, es la siguiente: $R = \alpha (50 + 60 C)$, en la que R es la resistencia a la tracción, α es un coeficiente que de-

pende del grafito, que varía de 0.20 a 0.40 y sólo en ocasiones es peciales llega a 0.80 y C es el % de carbono combinado. Cuando las láminas de grafito son grandes y numerosas: $\alpha = 0.2$.

Si la fundición es ferrítica, se obtiene: $R = 0.20 (50 + 0) = 10$ Kg/mm². Cuando la fundición es perlítica y tiene grandes láminas de grafito: $R = 0.20 (50 + 48) = 19.6$ Kg/mm². En el caso de que las láminas de grafito sean pocas y pequeñas: $\alpha = 0.40$, con lo que se llega a resistencias de $R = 0.40 (50 + 0) = 20$ Kg/mm² para fundición ferrítica y $R = 0.40 (50 + 48) = 39.2$ Kg/mm² para fundición perlítica.

Hace unos años se comenzó a estudiar la mejora de la resistencia de las fundiciones grises. Al principio, se procuró mejorar la resistencia de la matriz, llegándose a obtener los mejores resultados con matrices perlíticas.

En los últimos años, en cambio, se ha estudiado la mejora de la resistencia de las fundiciones modificando el tamaño y la distribución del grafito. Se observa que en la resistencia a la tracción tiene todavía más importancia el grafito que la matriz. Recientemente, con grafito esferoidal, se ha llegado, en casos especiales, a resistencias ligeramente superiores a 80 Kg/mm², con un valor de $\alpha = 0.80$

Se ve que el coeficiente α que depende del grafito puede pasar de 0.20 a 0.80, es decir, multiplicarse por 4, mientras el valor de la resistencia de la matriz ($50 + 60 C$) sólo pasa de 50 a 98,

es decir, llega a multiplicarse por 2, aproximadamente; por lo tan to, parece que es más interesante actuar sobre el grafito que sobre la matriz.

Como resumen de lo explicado, que se refiere sólo a fundiciones grises, se comprende que para alcanzar en estas fundiciones la máxima resistencia a la tracción, hay que procurar:

- 1º.- Que la matriz sea de máxima resistencia, es decir, que la matriz sea perlítica;
- 2º.- Obtener el menor porcentaje de carbono grafitico posible, ya que cada partícula de grafito es causa de una disminución de resistencia; y,
- 3º.- Conseguir que las láminas de grafito sean pequeñas, lo más redondeadas posibles y estén bien distribuídas.

D.- TIPOS DE CONTROL EN LAS FUNDICIONES

1.d.- PRUEBAS METALURGICAS INMEDIATAS

Las pruebas mecánicas y los análisis químicos sirven para comprobar rigurosamente la producción cuando ésta está concluida.

El fundidor, a su vez, debe tener a su disposición algún medio, aun que sea como punto de orientación, pero rápido e inmediato que le guíe en su trabajo. Es decir, que el fundidor ha de poder conocer, en pocos minutos, si el metal contenido en el cubilote posee las características adecuadas para colar determinadas piezas.

A este objeto se realizan las pruebas metalúrgicas inmediatas: las más usadas son: Prueba de colabilidad, prueba del temple, prueba de sensibilidad al espesor y prueba de tendencia al rechufe.

1.d.1.- Prueba del temple

Es una prueba muy usada para el control de la tendencia a la grafitización del hierro gris en el momento de colar el material. Se puede efectuar con la probeta triangular o con la paralelepípedica.

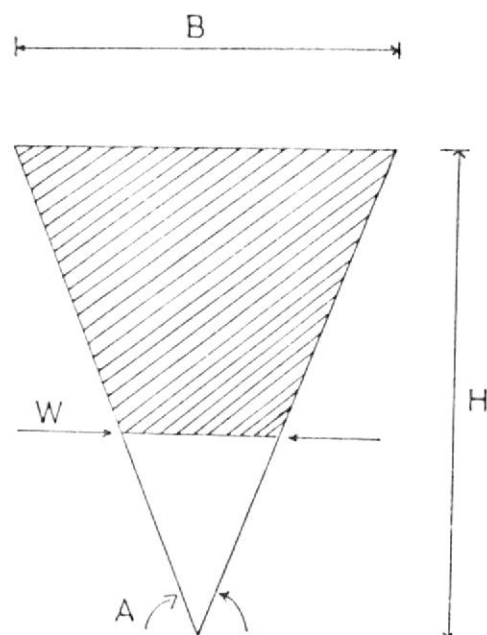
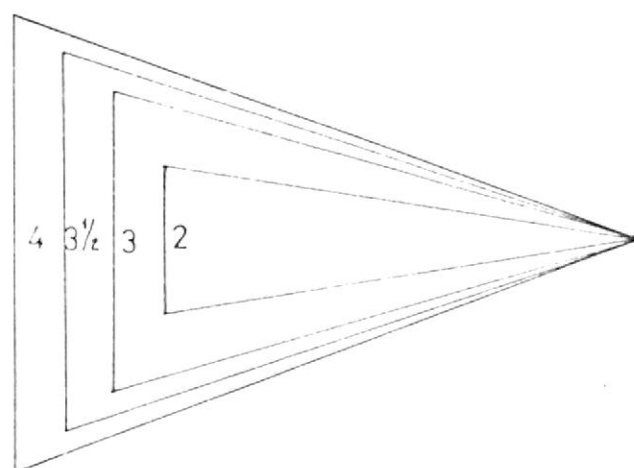
Consiste en un exámen muy simple llevado a cabo al tomar una muestra del canal de colado y vaciarlo en un molde de arena sintética. La probeta que se obtiene es cuneiforme y hay que medir sus espesores: la medida del espesor "w" establecida en el límite de la parte interior no templada caracteriza la actitud del hierro colado a adquirir el temple.

La probeta triangular puede ser de cuatro tamaños, dependiendo del espesor de las piezas a ser fundidas, (figura 16) y es la que se empleará para el desarrollo del presente trabajo.

1.d.2.- Prueba de colabilidad

El hierro gris, es el que presenta la mayor colabilidad (fluidez) de todas las aleaciones ferrosas.

La fluidez del hierro gris, se la puede expresar en términos de una espiral standard de fluidez, ilustrada en la figura 17. Mediante la longitud de la espiral obtenida, (que se determina fácilmente



DIMENSIONES DE LAS CUÑAS				
Cuña. Nº	B (m m)	H (m m)	A (grados)	Largo (mm)
W 2	10.2	31.8	18°	101.6
W 3	15.1	38.1	28°	101.6
W 3 1/2	25.4	44.4	32°	127
W 4	31.8	50.8	34.5°	152.4

Figura Nº 16

ESPECIFICACION BASADA EN LA NORMA ASTM A- 367 - 58

Prueba de temple con probetas triangulares.
 Las probetas son coladas en arena sintética.
 El temple, es medido como indica la figura
 de la esquina superior derecha.

multiplicando el número de señales por 2 pulgadas) se puede determinar la composición del hierro usando gráficos que relacionan la fluidez en función de la composición química del hierro.

El hierro presenta su más alto índice de fluidez para la composición eutéctica. Para propósito de la determinación de la colabilidad, se puede emplear el siguiente factor de composición (CF).

$$CF = \% C + 1/4 \% Si + 1/2 \% P \quad (7)$$

(CF = 4.50 para máxima fluidez)

La longitud de la espiral obtenida, está relacionada con la composición y la temperatura de vaciado por la fórmula.

$$\text{Fluidez, in.} = 14.9 \times CF + 0.05 t - 155 \quad t = ^\circ F \quad (7)$$

La máxima fluidez existe cuando la temperatura es alta y la composición del hierro colado es eutéctica. Sin embargo las composiciones hipereutécticas de los hierros grises sufren una gran pérdida de la fluidez debido a la precipitación de las láminas de grafito cuando el metal líquido se enfría.

Una fundición hipereutéctica, puede sufrir una pérdida en la fluidez del metal, tan grande, que ni siquiera pueda correr éste a través de la espiral.

Otros factores no considerados anteriormente, tales como el contenido de azufre por ejemplo, tienen cierta influencia en la colabi

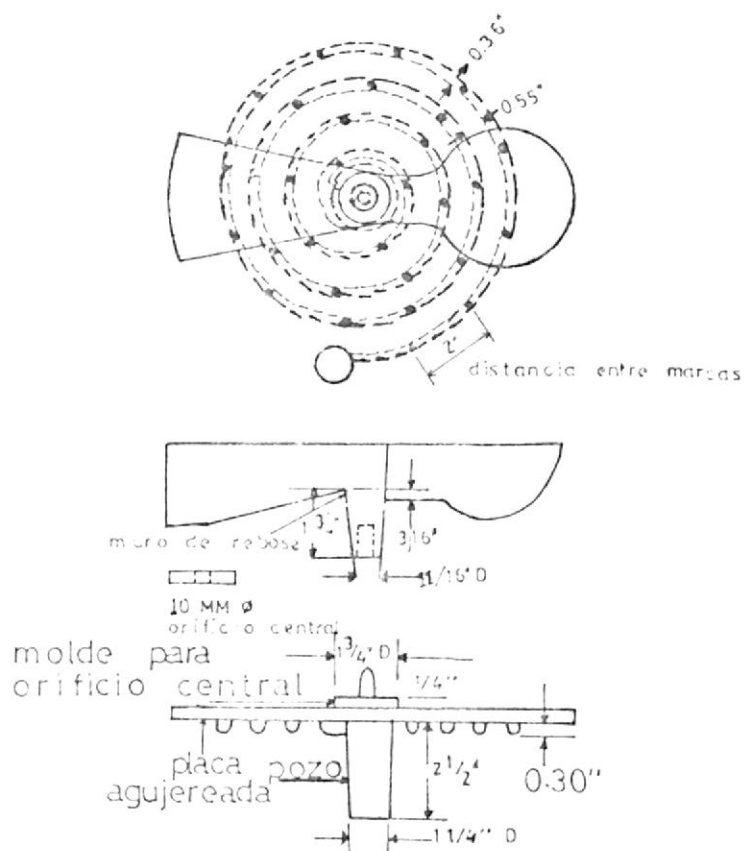


Figura Nº 17

Prueba de colabilidad de espiral, moldeada en verde.
Una modificación de prueba de colabilidad de Saeger
y Krynitsky. (de L. F. Porter y P. C. Rosenthal).

lidad.

Un método de incrementar la fluidez y que se desprende de la fórmula anterior, consiste en aumentar la temperatura de fusión. El hierro gris puede ser fundido entre los 2800 y 3100^o F (1537 a 1705^o C) y manipulado sin ningún problema en el colado hasta los 2300^o F (1300^o C)

Este amplio rango de temperatura de trabajo, permite al fundidor una fácil manipulación de la temperatura de colado (entre los 1300 y 1537^o C), dependiendo de los requerimientos de las piezas a ser moldeadas.

Para realizar esta prueba, hay que tomar en cuenta las siguientes precauciones:

- 1^o.- El filtro debe estar bien calibrado y todo el molde perfectamente en el acto de la colada.
- 2^o.- La caja de moldeo debe estar bien cerrada, para que no forme rebabas. Es conveniente a estos efectos que sea metálica y que esté mecanizada.
- 3^o.- Durante la colada, el molde debe estar en posición horizontal y el nivel del metal en el bebedero de colada debe mantenerse constante.
- 4^o.- El grado de humedad de la arena de moldeo y la entrada de aire no producen, dentro de ciertos límites, ningún efecto sobre el resultado.

1.d.3.- Prueba de la tendencia al rechupe

Hän sido propuestos numerosos tipos de probetas para este examen; en espera de una unificación se puede usar la probeta escalonada (figura 19) empleada para la prueba de sensibilidad al espesor, o bien, por ejemplo, la ilustrada en la figura 18, es decir, la probeta en forma de K, que es colada en arena en verde; después del enfriamiento se rompe la probeta y se examina la parte central, donde convergen los cuatro brazos y el canal de colada, que es el punto donde tienden a formarse eventualmente los rechupes.

1.d.4.- Sensibilidad al espesor

Cuando los espesores de las piezas coladas son muy diversos de punto a punto, sea porque no se ha tenido en cuenta la exigencia de la fundición, sea porque hay que respetar particulares necesidades de diseño o de cálculo, las piezas no se enfrían isotérmicamente: las zonas delgadas se enfrían más de prisa y resultan más claras, más compactas, más duras, más ricas en carbono combinado en relación con las zonas más espesas, más lentas éstas en enfriarse; de lo cual se derivan también tensiones internas, deformaciones y roturas.

No todos los hierros se comportan igualmente durante el enfriamiento siguiente a la colada, y la prueba de sensibilidad al espesor tiene por objeto precisamente el descubrir esta característica.

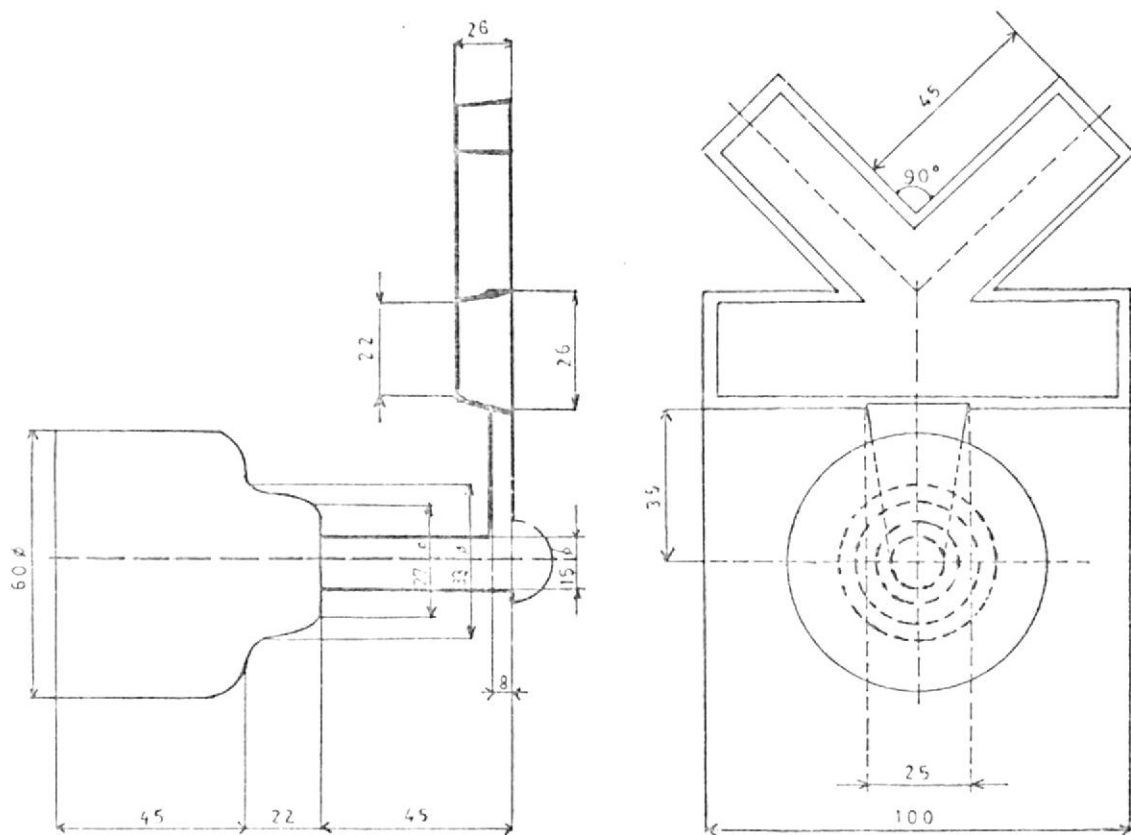


Figura Nº 18

Probeta en forma de K para la comprobación de la tendencia al rechupe. Se cuele en arena en verde. El examen de la estructura en el cruce de los brazos, después de la rotura de la probeta, da una idea de la tendencia al rechupe del hierro colado. (E. Capello)

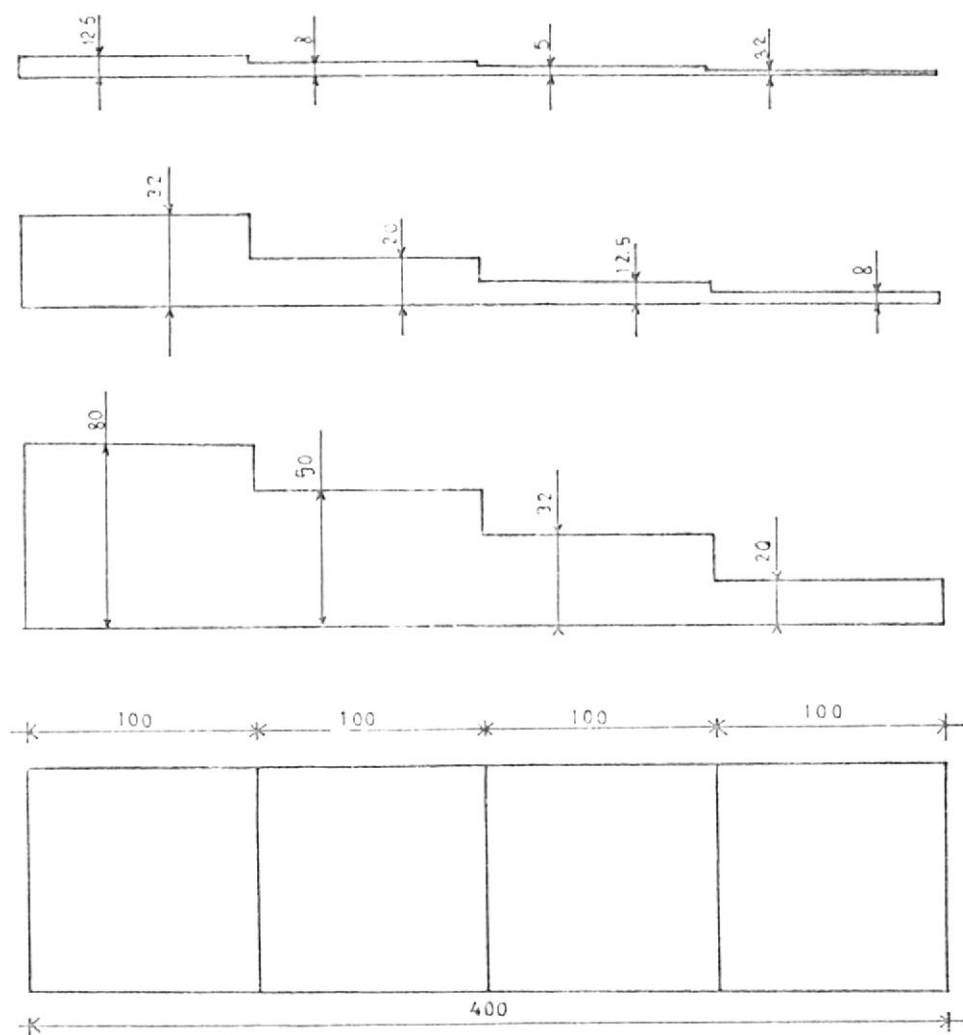


Figura Nº 19

Probeta de sensibilidad a los espesores. La longitud y la anchura de las probetas son constantes (400 y 100 mm.), pero se pueden obtener tres series de espesores, como indica la figura. (E. Cappello)

Se usan en general las probetas escalonadas de tres tipos: grande, media y pequeña, para comprender el campo de los espesores más comun_es de las piezas (figura 19).

Después de la colada, se rompe la probeta y se examina la fractura, o mejor se aplatana una de las secciones rotas y se sigue la prueba de Brinell en el centro de los escalones.

La probeta escalonada como se especificó anteriormente, puede ser vir también como prueba de tendencia al rechupe.

2.d.- CARBONO EQUIVALENTE

Un método moderno y confiable para la determinación de propiedades tecnológicas del hierro gris, es el que se conoce con el nombre de "carbono equivalente".

Como se mencionó anteriormente, el método se basa en la determinación mediante análisis químico, de los porcentajes presentes en la fundición de elementos tales como el silicio y el fósforo, que influyen sobre el porcentaje de carbono eutéctico y por tanto en las características finales del material.

Conocidos estos valores, así como el porcentaje de carbono, se los reemplaza en la fórmula:

$$C_e = C + 1/3 (\% Si + \% P) \quad (7)$$

donde: C = contenido de carbono

.Si = Contenido de silicio

P = Contenido de fósforo

Y finalmente con el valor así obtenido, mediante el empleo de grá
ficos apropiados se logran determinar las propiedades que tendría
la aleación en consideración.

Recientemente instituciones dedicadas a la investigación del com-
portamiento del hierro durante la solidificación, tales como la
British Cast Iron Research Association (BCIRA) han desarrollado
un método rápido de determinación del C_e en función de los cam-
bios de temperatura durante el enfriamiento de una muestra de hie
rro gris fundida. (apenas 3 minutos).

El BCIRA Carbon calculator, es un aparato que mediante la toma de
una muestra en el momento de colar, es capaz de registrar en un
papel graduado los cambios de temperatura que ocurren durante el
enfriamiento del metal, pudiéndose observar en el gráfico, dos a-
rrest (detenciones) que son los puntos en los cuales la solidifi-
cación ocurre a temperatura constante y que son los que en defini-
tiva nos van a determinar el carácter de la fundición.

El primer arrest es causado por la precipitación de la austenita.
La temperatura a la cual el arrest ocurre es llamada, temperatura
de líquidus y está directamente relacionada con la composición del
hierro.

El segundo arrest ocurre a una temperatura más baja en la curva de enfriamiento que la de líquidus y ésta es debida a la precipitación de grafito y austenita eutéctica. La temperatura de ésta transformación está también relacionada a la composición del metal.

La relación entre el C_e y la curva de enfriamiento se muestra en la figura 20, en la cual se puede apreciar (a) una parte de un diagrama de equilibrio de una fundición en términos del C_e y la curva de enfriamiento (b) de la aleación S que nos muestra la correlación que existe entre los arrest eutéctico y de líquidus y el C_e .

De acuerdo al contenido de C_e las fundiciones se clasifican en: Hipoeutécticas aquellas con $C_e < 4.3\%$, eutécticas con $C_e = 4.3\%$ e hipereutécticas con un $C_e > 4.3\%$.

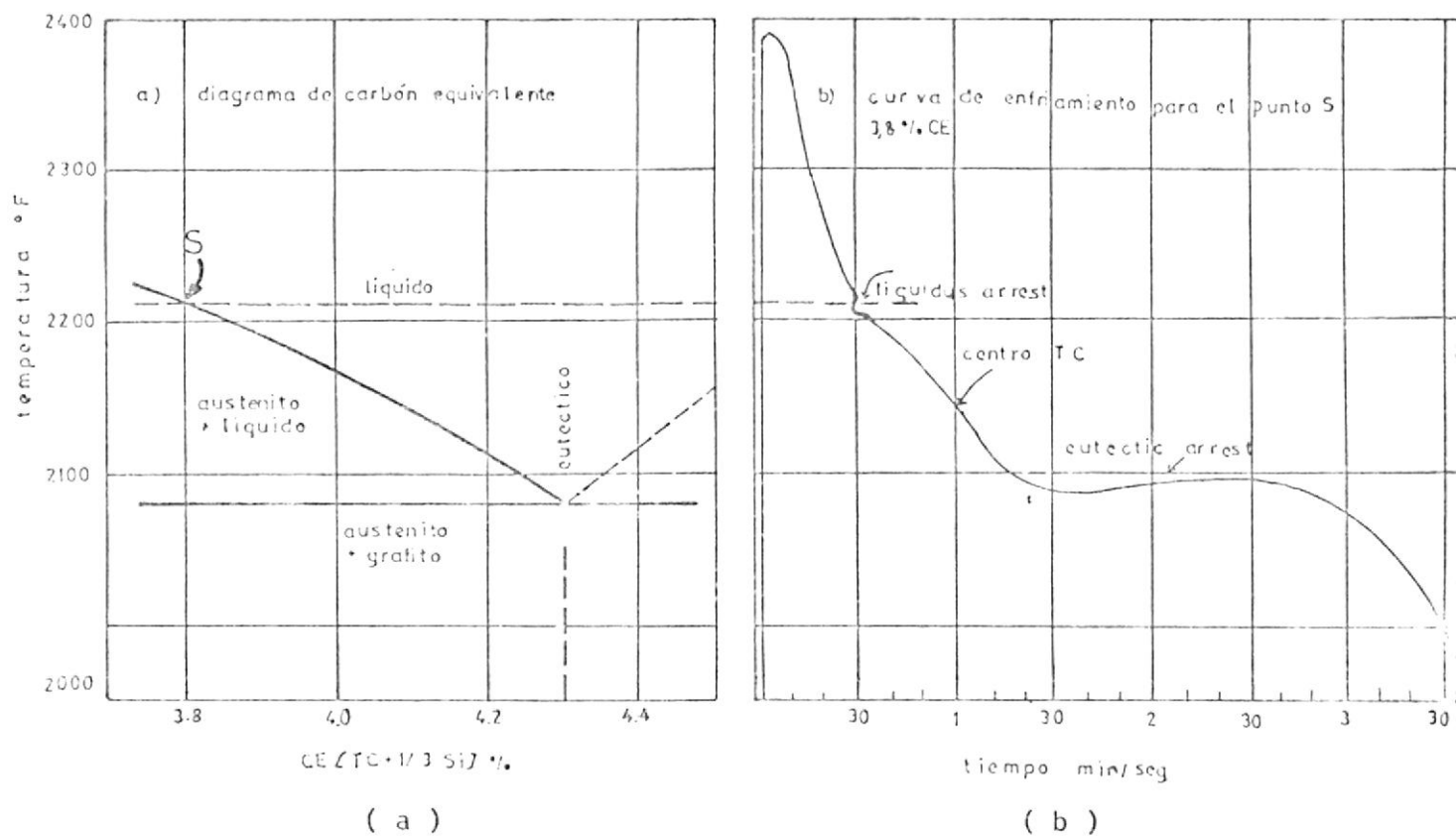


Figura Nº 20

Relación entre el diagrama de carbón equivalente (a) a la curva de enfriamiento (b) (D. E. KRAUSE)

CAPITULO IV

TRABAJO EXPERIMENTAL Y ENSAYOS A REALIZARSE

A.- INTRODUCCION

Este capítulo tratará sobre todos los pasos seguidos y experiencias obtenidas durante el período de investigación. Se ensayarán materiales como: Hierro gris proveniente de chatarra automotriz o retornos de fundición y acero, que combinados en cantidades adecuadas en función de un cálculo aproximado de carga, nos permita obtener una amplia gama de valores de C_e que puedan ser correlacionados con las propiedades mecánicas mediante gráficos.

En cuanto a los materiales implicados en el proceso de fusión debemos mencionar el conocimiento de la composición química de la chatarra de maquinaria automotriz, retornos de fundición, acero A-36, Fe-Si, Fe-Mn y caliza; y el desconocimiento de la composición química así como de sus propiedades mecánicas del carbón coque de uso común en nuestro medio y del cual por experiencias de trabajos en cubilote se estima con un contenido de carbono fijo no mayor a un 83%

El cubilote empleado, puede ser considerado de tipo experimental ya que su diámetro interior es de apenas 330 mm. pero tiene una construcción normalizada de acuerdo a normas americanas.

El control del material obtenido al colar, se lo hará en dos etapas: 1º Por proceso en planta, mediante las cuñas de temple normalizadas según la ASTM. y,

2º.- Por proceso en laboratorio mediante la realización de ensayos mecánicos, metalográficos y químicos, en las barras de 300 mm. de largo por 30 mm. de diámetro, tomadas como muestras.

E.- OBTENCION DEL HIERRO GRIS

La fase de fusión en la producción del hierro gris, puede ser llevada a cabo en varios tipos de hornos, sin embargo en la mayoría de los casos el horno empleado es el cubilote, por poseer ciertas ventajas que justifican su utilización. En la presente experiencia se usó un horno de cubilote de 330 mm. de diámetro interior, con revestimiento ácido y con un ventilador de 400 cfm.

Las cargas de prueba, fueron introducidas luego de que el horno había estado en operación por espacio de una hora aproximadamente.

Toda la bibliografía consultada indica la exigencia de un control preciso sobre todas las etapas del proceso, comenzando desde la selección de los materiales de carga hasta el control de calidad del producto final; debe hacerse hincapié de que el control de las etapas es en definitiva el único medio para asegurar que el producto posea las características que se buscan. Las experimentaciones realizadas han sido efectuadas conforme a indicaciones generales de manuales que tratan sobre hierro gris.

En primera instancia se manifiesta el control del proceso en las materias primas usadas en las cargas, variando los contenidos de los mismos de la siguiente manera.

0 a 30% Chatarra de acero (grado INEN A-36)

50 a 100% Chatarra de hierro gris (automotriz)

0 a 40% Retornos de fundición

Fe-Si y Fe-Mn Lo adecuado para obtener composiciones químicas diferentes en las muestras.

Los tipos de control que se imponen en un experimento para la elaboración de hierro gris de calidad son:

- 1.- Inspección y selección de materias primas;
- 2.- Pesada de las materias primas;
- 3.- Cargas del horno

1.E.- MATERIAS PRIMAS USADAS

En lo posible se ha tratado de usar materiales de fuentes conocidas y de una misma composición química; detalladas a continuación en la Tabla I.

El acero usado como materia prima, fue cedido por Acerías Nacionales del Ecuador (ANDEC), lugar en el cual se seleccionaron retazos pequeños de máximo 70 mm. de largo por 13 mm. de diámetro, a fin de que la fusión de los mismos sea rápida y factible en el horno de cubilote. En cuanto al hierro gris, se prefirió el automotriz,

TABLA I

MATERIAS PRIMAS USADAS EN LOS EXPERIMENTOS

MATERIAL	C %	SI %	Mn %	S %	P %
Gris automotriz SAE 121	3.10 - 3.50	1.90 - 2.30	0.60 - 0.90	0.125 MAX	0.12 - 0.20
	3.20 (*)	2.2 (*)	0.7 (*)	0.11 (*)	0.20 (*)
Acero Andec A-36	0.18 - 0.23	0.10 - 0.20	0.30 - 0.60	0.050 MX	0.040 MX
(SAE 1020)	2.5 (*)	0.20 (*)	0.5 (*)	0.05 (*)	0.04 (*)
Retornos de FE Gris	3.0 - 3.4	1.7 - 2.30	0.30 - 0.70	0.10 - 0.15	0.13 - 0.20
	3.1 (*)	1.7 (*)	0.50 (*)	0.11 (*)	0.2 (*)
FE - Si		75 % (*)			
Fe - Mn			50 % (*)		

A - 36 Denominación INEN

- (*) Valores promedios usados en los cálculos de carga

por su alto contenido de carbono y silicio; también se usó como materia prima retornos de hierro gris, del cual hubo que determinar mediante análisis químico su composición química y adoptar un valor promedio para el mismo, en los cálculos de carga.

El Fe-Si y Fe-Mn, de procedencia neozelandesa, fue agregado a la carga metálica como parte de la misma, en forma de briquetas de un tamaño inferior a los 30 mm.

El objetivo de incluir acero, hierro gris y Fe-Si en diferentes porcentajes, fue con el propósito de obtener variaciones apreciables en los contenidos de carbono y silicio o C_e y manejar la composición química de acuerdo a nuestras necesidades.

2.b.- CALCULO DE CARGA DEL CUBILOTE

2.b.1.- Pesada de las materias primas

La pesada de las cargas que ingresan al horno, debe ser precisa, sobre todo en cuanto a los materiales que entran en pequeños porcentajes, tal como ocurre con el ferrosilicio, que es el elemento que servirá para ajustar la composición química.

La balanza empleada para el pesaje del acero, los retornos de hierro gris y la chatarra automotriz tenía una precisión de 100 gramos, mientras que la empleada para el pesaje del ferrosilicio lo era de un gramo; se hace indispensable el establecer como norma, el pesaje de las materias primas por parte de los fundidores que

se dediquen a esta actividad, por cuanto sólo con un control de los porcentajes de cada uno de los elementos introducidos al cubilote, se podrá establecer a priori y de una manera muy aproximada las propiedades mecánicas que presentarán posteriormente las piezas fundidas.

2.b.2.- Cargas del horno de cubilote

Para el desarrollo del presente trabajo, se realizaron un total de 24 experiencias, con las proporciones que se indican a continuación.

Experiencia Nº 1

Hierro gris (automotriz) 100.0 %

Experiencia Nº 2

Hierro gris (automotriz) 100.0 %

Experiencia Nº 3

Hierro gris (automotriz) 99.5 %

Ferro silicio (briquetas) 0.5 %

Experiencia Nº 4

Hierro gris (automotriz) 99. %

Ferrosilicio (briquetas) 1 %

Experiencia Nº 5

Hierro gris 95 %

Acero Andec A-36	4.5 %
Ferrosilicio (briquetas)	0.5 %

Experiencia Nº 6

Hierro gris (automotriz)	92.89 %
Retornos de hierro gris	5.79 %
Ferrosilicio	0.83 %
Ferromanganeso	0.49 %

Experiencia Nº 7

Hierro gris (automotriz)	89.5 %
Acero Andec A-36	10.0 %
Ferrosilicio (briquetas)	0.5 %

Experiencia Nº 8

Hierro gris (automotriz)	80 %
Retornos de hierro gris	18.68 %
Acero	0.0 %
Ferrosilicio (briquetas)	0.83 %
Ferromanganeso (briquetas)	0.49 %

Experiencia Nº 9

Hierro gris (automotriz)	80.0 %
Retornos de hierro gris	5.53 %
Acero Andec A-36	13.16 %
Ferrosilicio (briquetas)	0.83 %

Ferromanganeso (briquetas) 0.48 %

Experiencia Nº 10

Hierro gris (automotriz) 80.0 %

Retornos de hierro gris 8.8 %

Acero Andec A-36 9.87 %

Ferrosilicio 0.83 %

Ferromanganeso (briquetas) 0.50 %

Experiencia Nº 11

Hierro gris (automotriz) 80.0 %

Retornos de hierro gris 20.0 %

Experiencia Nº 12

Hierro gris (automotriz) 78.0 %

Retornos de hierro gris 8.24 %

Acero Andec A-36 13.27 %

Ferrosilicio (briquetas) 0.49 %

Experiencias Nº 13 y 14

Hierro gris (automotriz) 70.0 %

Retornos de hierro gris 29.0 %

Ferrosilicio (briquetas) 1. %

Experiencia Nº 15

Hierro gris (automotriz) 69.64 %

Acero Andec 30.00 %

Ferrosilicio (briquetas) 0.36 %

Experiencia Nº 16

Hierro gris (automotriz) 69.39 %

Acero Andec A-36 29.89 %

Ferrosilicio (briquetas) 0.72 %

Experiencia Nº 17

Hierro gris (automotriz) 69.14 %

Retornos de hierro gris 0.0 %

Acero Andec A-36 29.79 %

Ferrosilicio (briquetas) 1.07 %

Experiencias Nº 18 y 19

Hierro gris (automotriz) 65. %

Retornos de hierro gris 33.5 %

Ferrosilicio (briquetas) 1.5 %

Experiencia Nº 20

Hierro gris (automotriz) 45.91 %

Retornos de hierro gris 23.0 %

Acero Andec A-36 29.68 %

Ferrosilicio (briquetas) 1.41 %

Experiencia Nº 21

Hierro gris (automotriz) 42.54 %

Retornos de hierro gris	42.54 %
Acero Andec A-36	14.2 %

Experiencia Nº 22

Hierro gris (automotriz)	35.71 %
Acero Andec A-36	30.0 %
Retornos de hierro gris	33.93 %
Ferrosilicio (briquetas)	0.36 %

Experiencia Nº 23

Hierro gris (automotriz)	35.34 %
Retornos de hierro gris	33.57 %
Acero Andec A-43	29.68 %
Ferrosilicio (briquetas)	1.41 %

Experiencia Nº 24

Hierro gris (automotriz)	20.0 %
Retornos de hierro gris	60.0 %
Acero Andec A-36	20.0 %

2.b.3.- Control analítico de la composición química de las cargas

Factor muy importante para poder realizar un cálculo analítico de la composición química en cada una de las coladas, lo constituye tal como se lo mencionó anteriormente, el tener o establecer como práctica usual un conocimiento más o menos, acerca de la composición química de cada uno de los elementos de ingreso al cubilote,

ya que sólo de éste modo los cálculos previos que se realicen podrán ser relacionados con la composición química final que podrían tener las piezas obtenidas.

Sobre los elementos que influyen en las características mecánicas de las fundiciones, ya se discutió concienzudamente en el Capítulo III acápite 3.b y son: Fósforo, manganeso, azufre, silicio y carbono, sobre los cuales se debe establecer un meticuloso control si se desea obtener piezas de calidad.

De allí la importancia del cálculo de cargas a fin de establecer los porcentajes fijos de cada elemento. Estos cálculos ya han sido efectuados en detalle en trabajos anteriores (10) y por consiguiente en el presente caso se incluirán únicamente los resultados del análisis previsto de c/u de las experiencias (Tabla IV).

C.- MUESTREO REALIZADO CON CONTENIDOS DIFERENTES DE CARBONO Y SILICIO, EN LAS COLADAS

Luego de haber realizado un estudio concienzudo acerca de la práctica necesaria para la obtención del hierro gris con una composición química especificada de antemano, se procederá a describir la manera como fueron obtenidas las muestras.

La realización de toma de muestras previas al desarrollo del programa de muestreo establecido, sirvió para que en base a estas experiencias, se proceda a corregir ciertos problemas que se estaban presentando y mejorar por tanto la técnica empleada hasta ese entonces.

Problemas tales como la obtención de barras para tracción que resultaban sumamente porosas, cuando eran moldeadas en verde fueron corregidas mediante la preparación de los moldes con arena silicia al 8% de silicato de sodio a 40° Baume y luego curados con CO₂ ; siguiendo este procedimiento se logró que la arena al tener mejor permeabilidad y menos humedad, las barras para tracción (300 mm. de largo por 30 mm. de diámetro), resulten en su mayoría sanas, lo cual era fundamental para la validez de los resultados.

Otro problema que tuvo que ser superado, fue el de la manera como en un principio se estaban obteniendo las muestras de "cuña de temple", por cuanto el método empleado que consistía en llenar los moldes por un costado (por la sección triangular de la cuña), resultaba muy lento y dificultoso; lográndose resultados satisfactorios al emplear machos como el descrito en la figura 21, que al ser llenado por su parte superior facilitaba enormemente el trabajo. Estos moldes por cierto, fueron también preparados siguiendo la misma técnica usada en la confección de los moldes de probeta para tracción.

Superado el problema, se procedió a la toma de un juego de muestras por colada, para lo cual, de la olla de vaciado se tomó en un pequeño crisol cantidad suficiente de caldo como para poder llenar las muestras.

Una vez obtenidas, se procedió a realizar los siguientes ensayos:

- De las muestras de cuña de temple, se midió el espesor del temple en cada una de las cuñas.

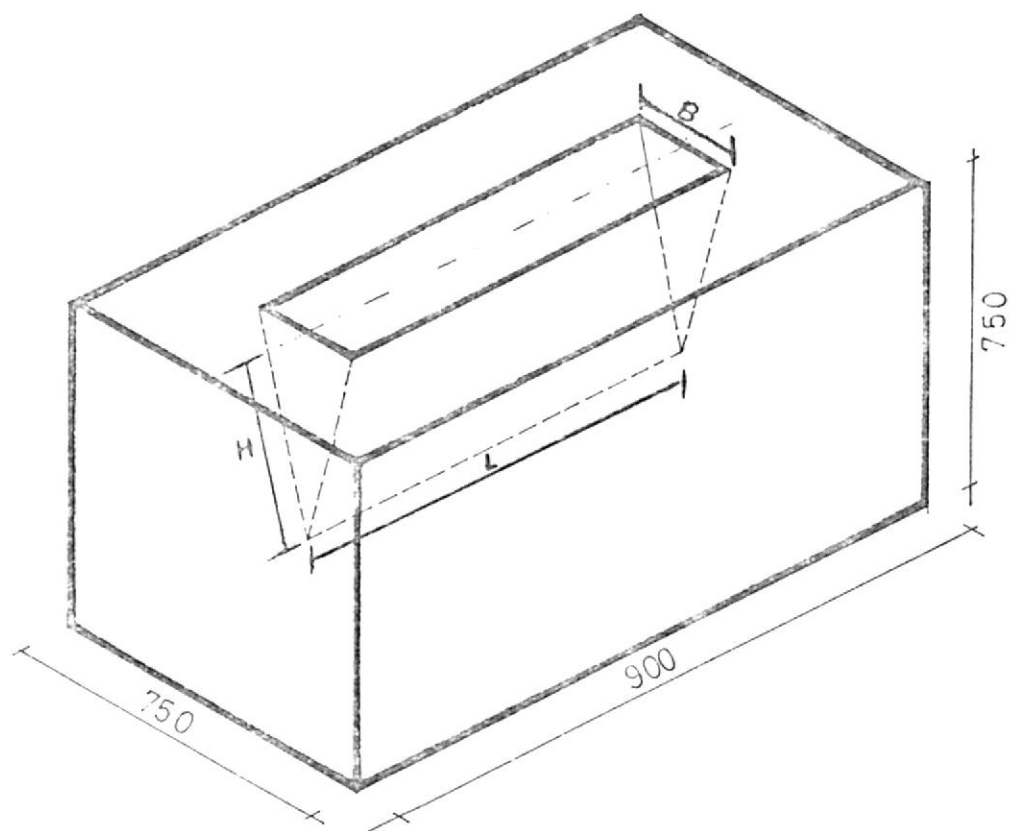


Figura Nº 21

Macho preparado para cuña de temple con arena silicia al 8% de silicato de sodio a 40^o Baume y curado con CO₂ (B, H, L según norma ASTM A-367-58)

- De las barras para tracción, se confeccionaron un par de probetas para tracción, siguiendo las normas que para el caso tiene la ASTM (Figura Nº 22); luego de sometidas al ensayo, se tomó un pedazo de muestra para el control metalográfico, químico y de dureza.

D.- CUÑA DE TEMPLE

1.d.- MEDIDA DEL ESPESOR DEL TEMPLE

Sobre la prueba de "Temple" se discutió ampliamente en el Capítulo III acápite 1.d.4 resumiéndose aquí, únicamente los resultados obtenidos del empleo de esta prueba de control metalúrgico y que se encuentran ordenados en la Tabla II.

2.d.- DETERMINACION DE CUÑA OPTIMA

Debido a la falta de conocimiento en cuanto a la profundidad del temple que se podría presentar en las cuñas, al variar considerablemente el contenido de acero (elemento blanqueante de la función) en las cargas y por cuanto el control del método por parte de los fundidores se lo realizará mediante la cuña de temple, hubo la necesidad de emplear el juego de cuñas de la ASTM, con el fin de poder establecer una cuña de temple que resulte la más conveniente, para los límites entre los cuales el método se cumple.

La Tabla II nos muestra los diferentes espesores de temple obtenidos para cada una de las experiencias. Se puede apreciar que para una misma experiencia existen cuatro diferentes valores de tem

TABLA II

Medida del espesor de temple en mm. en las Probetas ASTM A-367-58 para diferentes cuñas de temple.

Cuña Nº Experiencia	W ₂	W ₃	W _{3 1/2}	W ₄
1	3.5	3.5	3.0	2.5
2	2.0	2.0	1.5	1.0
3	2.0	2.0	2.0	1.5
4	1.5	1.5	1.0	0.0
5	1.5	1.0	0.7	(x)
6	3.0	2.0	1.0	0.0
7	2.5	2.5	2.0	1.5
8	2.5	2.0	1.5	1.5
9	6.0	4.0	2.5	1.0
10	2.5	2.0	1.0	0.0
11	6.0	5.0	4.5	4.0
12	4.0	3.0	2.5	2.5
13	2.5	1.5	1.0	1.0
14	2.0	1.0	1.0	0.0
15	(.)	11.0	9.0	8.0
16	3.5	3.0	2.5	2.5
17	9.0	8.5	8.0	7.5
18	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0
20	(.)	12.0	12.0	11.0
21	5.5	5.0	4.0	4.0
22	11.0	10.0	9.0	9.0
23	9.5	9.0	8.5	8.0
24	10.0	8.0	7.5	(x)

(.) Toda blanca

(x) No se tomó muestra

ple debido a la diferencia en tamaño de los moldes empleados, lo cual dió como resultado diferentes velocidades de enfriamiento y por tanto diferentes espesores de temple.

Si analizamos los valores obtenidos con las cuñas ASTM W 3 1/2 y W 4 se tiene que no existe mayor variación entre los resultados de una u otra experiencia, exceptuando aquellas que por su alto contenido de acero presentan un espesor de temple considerable. La falta de sensibilidad al temple que se observa en estas cuñas es crítico, ya que la observación que se hace es visual y un rango de variación demasiado estrecho no nos permitiría determinar en realidad sus propiedades mecánicas.

La cuña ASTM W 3, que por su tamaño es de fácil llenado y por la sensibilidad que presenta, es la más recomendable para los trabajos de fundición en nuestro medio, y de la cual se tomarán los resultados para los diferentes gráficos y relaciones a establecerse más adelante.

La cuña ASTM W 2, si bien resulta ser la más sensible, presenta la dificultad de que por su tamaño es de difícil llenado, y además para contenidos de acero mayor al 20% de la carga total tiende a blanquear íntegramente la cuña, haciéndose imposible la lectura del espesor del temple, por cuanto confundiría los resultados.

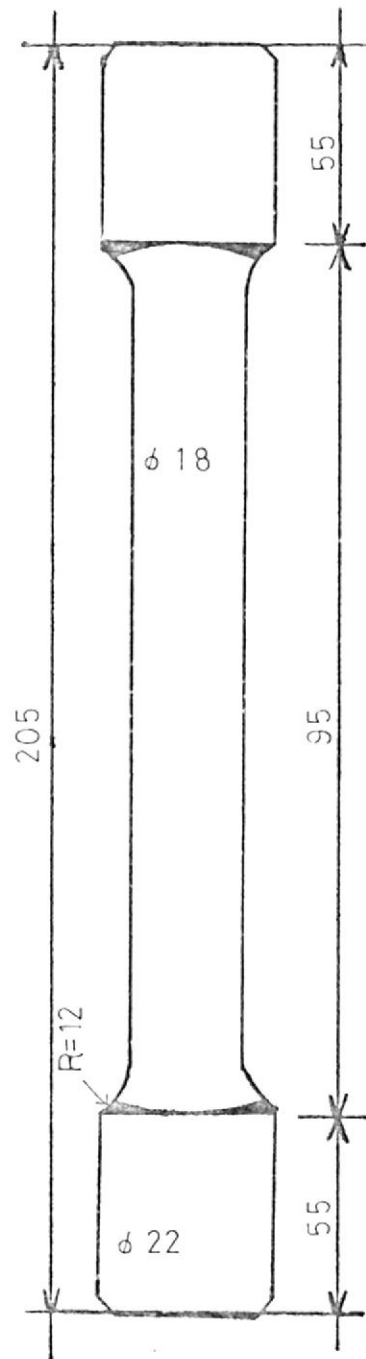
E.- BARRA ASTM

1.e.- ENSAYOS MECANICOS

Los ensayos mecánicos, se realizaron con el objeto de obtener los valores de la resistencia a la tracción de cada una las experiencias y poder relacionarlos luego con los valores que se obtengan en las otras pruebas detalladas más adelante.

De las barras fundidas (30 mm. de diámetro), y que son las normalizadas por la ASTM para el control de fundiciones de espesores medios (12 a 40 mm.), de mucho uso localmente, se maquinaron las probetas bajo estrictas normas y medidas especificadas en la Figura N° 22. Los ensayos mecánicos fueron efectuados en una máquina de pruebas de resistencia marca INSTRON modelo 1128.

La velocidad empleada en el ensayo fue de 10 mm/min. y la temperatura del mismo 28^oC. Los resultados se encuentran tabulados en la Tabla III, siendo estos valores de resistencia a la tracción, valores promedios de dos probetas por cada experiencia.

Figura N^o 22

BARRA ASTM

Para ensayos de tracción de fundiciones grises

(medidas en mm.)



Fotografía de la máquina INSTRON Modelo 1128 en la cual se realizaron los ensayos de tracción.

Figura Nº 23

TABLA III

Resultados de los ensayos de resistencia a la tracción

EXPERIENCIA Nº	RESISTENCIA PROMEDIO A LA TRACCION (Kg./mm ²)	OBSERVACIONES
1	23.639	Se tomaron dos muestras (ambas sanas)
2	18.414	" " " " "
3	25.123	Se tomaron dos muestras, pero una fue muy porosa y se la rechazó
4	16.531	Se tomó una sola muestra (sana)
5	19.537	Se tomaron dos muestras (ambas sanas)
6	21.38	" " " " "
7	21.362	" " " " "
8	17.84	" " " " "
9	23.54	Se tomaron dos muestras una se rechazó por ser muy porosa
10	18.94	Se tomaron dos muestras (ambas sanas)
11	26.714	Se tomaron dos muestras una se rechazó por ser muy porosa
12	21.00	Se tomó una sola muestra (sana)
13	20.515	Una de las probetas con poros pequeños pero se rompió por la parte sana
14	17.911	Una de las probetas con poros pequeños pero se rompió por la parte sana
15	25.463	Se tomaron dos muestras (ambas sanas)
16	27.521	Se tomaron dos muestras, pero una de ellas fue muy porosa y se la rechazó
17	29.103	Se tomaron dos muestras (ambas sanas)
18	17.483	" " " " "
19	16.331	" " " " "
20	30.742	Se tomó una sola muestra (pequeños poros exteriores)
21	24.374	Se tomaron dos muestras (ambas sanas)
22	25.521	" " " " "
23	29.241	Se tomó una sola muestra (sana)
24	26.510	Se tomaron dos muestras (ambas sanas)

2.e.- ANÁLISIS QUÍMICO A PARTIR DE VIRUTA

Luego de haber sido sometidas al ensayo de tracción las barras que para el efecto se prepararon, de los retazos se procedió a la obtención de viruta para la realización de los análisis químicos, sean estos por vía seca o húmeda. Se tuvieron presente ciertas consideraciones, a fin de normalizar las muestras.

- 1.- La viruta fue obtenida en el torno trabajando a bajas revoluciones, esto permitió que la muestra no se quemara.
- 2.- Fue obtenida siempre 3 mm. bajo la superficie, luego de un desbaste previo de la probeta, en la sección correspondiente a la zona de prueba del ensayo de tracción.
- 3.- Se la tamizó, a fin de obtener una muestra muy fina (partículas menores a 1/2 mm.) que sea fácil de disolver en el momento del ensayo por vía húmeda.
- 4.- Previo a los análisis se secaron las muestras durante 1 hora a 150 °C, con el objeto de eliminar la humedad y grasa que pudieran haber tenido como impurezas y que por consiguiente podrían haber alterado los resultados al alterar el peso real de las muestras.

2.e.1.- Determinación de los porcentajes de: Carbono, Silicio, Fósforo y Azufre.

Los porcentajes de los elementos tales como Silicio, fósforo, y manganeso, presentes en las muestras, fueron determinados median-

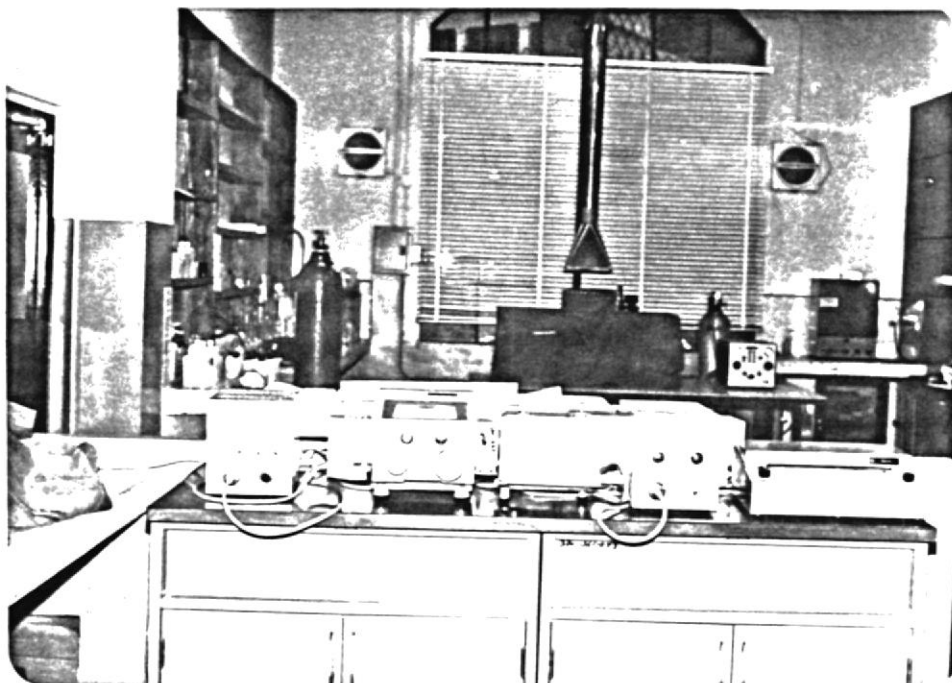


Figura Nº 24

Espectrofotómetro Modelo 139 UV-VIS Hitachi-Perkin-Elmer empleado para la determinación de los contenidos de Silicio, manganeso y fósforo, mediante ensayos por vía húmeda

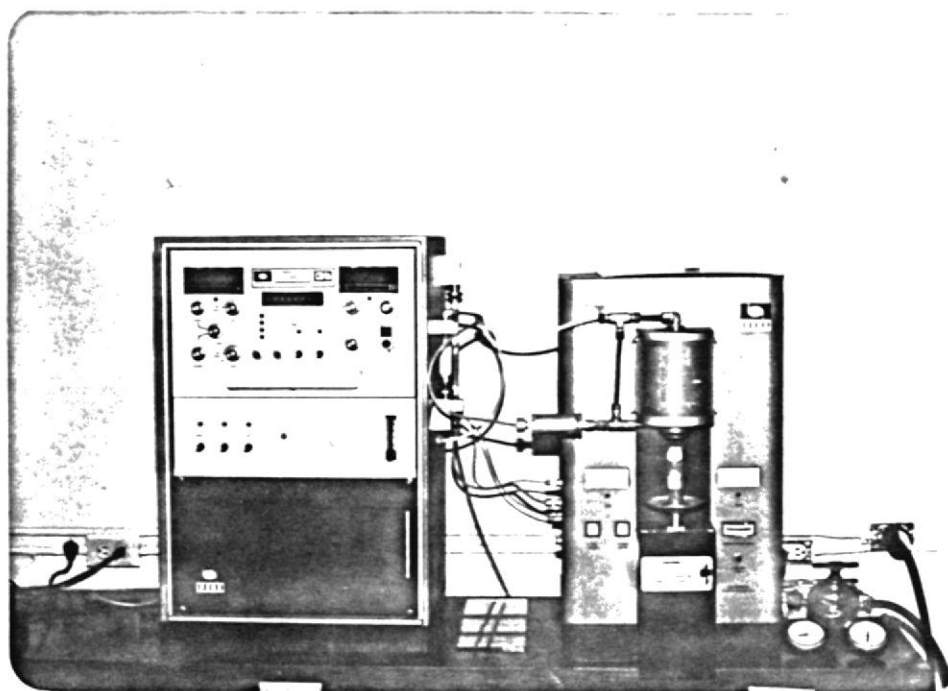


Figura Nº 25

Determinador de Carbono/Azufre LECO CS46

TARLA IV

Estudio comparativo de la composición química obtenida por análisis en laboratorio y mediante cálculo de carga en c/u de las experiencias

EXPERIENCIAS	MATERIALES DE CARGA				ANÁLISIS PREVISIO				ANÁLISIS QUÍMICO					
	CHATARRA %	RETOORNOS %	ACERO %	FE SI FE Mn %	C	SI	Mn	S	P	C	SI	Mn	S	P
1	100	-	-	-	3.20	1.98	0.595	0.165	0.20	3.065	2.17	-	0.160	0.22
2	100	-	-	-	3.23	1.98	0.34	0.03	0.065	3.35	2.43	0.09	0.042	0.092
3	99.5	-	-	0.5	3.20	2.31	0.590	0.162	0.19	3.17	2.43	-	0.187	0.19
4	99	-	-	1	3.168	2.635	0.587	0.164	0.195	3.41	2.558	-	0.185	0.205
5	95	-	4.5	0.5	3.15	2.223	0.583	0.156	0.191	3.235	2.46	-	0.165	0.225
6	92.69	5.79	-	0.63	3.15	2.48	0.799	0.15	0.19	3.04	2.67	0.67	0.118	0.181
7	69.5	-	10.0	0.5	3.117	2.13	0.584	0.164	0.183	3.12	2.25	-	0.165	0.207
8	60	18.68	-	0.83	3.138	2.43	0.762	0.162	0.195	3.099	2.81	0.82	0.145	0.196
9	50	5.53	13.16	0.83	3.06	2.27	0.787	0.150	0.175	2.93	2.69	0.55	0.153	0.160
10	60	8.8	9.67	0.83	3.09	2.293	0.778	0.134	0.181	3.10	2.49	1.02	0.140	0.157
11	80	20	-	-	3.12	1.613	0.457	0.157	0.199	3.169	1.024	0.37	0.137	0.187
12	78	8.24	13.27	0.49	3.09	2.07	0.56	0.155	0.177	2.95	2.31	0.49	0.135	0.19
13	70	29	-	1	3.139	2.502	0.539	0.164	0.198	3.224	2.712	-	0.178	0.185
14	70	29	-	1	3.139	2.502	0.534	0.164	0.198	3.378	2.74	-	0.175	0.192
15	69.64	-	30	0.36	3.014	1.549	0.513	0.107	0.150	2.851	1.59	0.18	0.070	0.186
16	69.39	-	29.89	0.72	3.04	1.989	0.741	0.107	0.150	3.109	2.045	0.47	0.055	0.165
17	69.14	-	29.79	1.07	2.953	1.972	0.509	0.135	0.149	2.57	1.653	-	0.136	0.157
18	65	33.5	-	1.5	3.119	2.8125	0.530	0.1605	0.197	3.264	3.013	-	0.155	0.185
19	65	33.5	-	1.5	3.119	2.8125	0.530	0.1605	0.197	3.357	2.99	-	0.199	0.215
20	45.91	23.	29.68	1.41	2.905	2.178	0.489	0.132	0.146	2.652	1.28	0.47	0.116	0.151
21	42.54	42.54	14.2	-	3.04	1.528	0.497	0.152	0.179	3.309	1.56	0.39	0.083	0.163
22	35.71	33.93	30	0.36	2.918	1.249	0.484	0.134	0.150	2.949	1.05	0.31	0.0891	0.250
23	35.34	33.57	29.68	1.41	2.687	1.919	0.471	0.132	0.148	2.612	1.70	0.32	0.090	0.162
24	20	60	20	-	2.95	1.311	0.561	0.15	0.161	2.874	1.239	-	0.1006	0.153

te ensayos por vía húmeda, para lo cual se procedió de acuerdo a normas establecidas y unificadas por el CENIM para hierros y aceros.

El espectrofotómetro empleado para el caso fue un Modelo 139 UV-VIS Spectrophotometer Hitachi Perkin Elmer (Figura Nº 24).

Por otro lado los contenidos de carbono y azufre, fueron determinados usando un determinador de carbono/azufre LECO CS46 (figura Nº 25).

El pesaje de las muestras se lo realizó en una balanza SARTORIUS ERKE tipo 24326002, que tenía una precisión de 0.1 mg. y una capacidad máx. de 200 gr.

Los resultados obtenidos en cada una de las experiencias se encuentran tabulados en la Tabla IV y pueden ser confrontados con los resultados del control analítico de la composición química de las cargas que se encuentran también tabulados en esta Tabla.

2.e.2.- El carbono equivalente como medio de determinación de las propiedades mecánicas de las fundiciones grises.

Como se mencionó en el Capítulo III 2.d, modernamente se acepta el valor $C + 1/3 (Si + P)$ que recibe el nombre de "carbono equivalente" como la combinación que mejor nos puede representar o dar una idea de la clase de fundición a que se hace referencia.

Pudiendo por este método establecer las propiedades tecnológicas del material y viceversa, que en definitiva interesan más, que al saber si la fundición es blanca, gris o atruchada.

De ahí, que este método esté reemplazando cada vez más a los métodos tradicionales tales como: temple colabilidad, etc. Además, presenta actualmente la ventaja de poder ser considerado como una prueba metalúrgica inmediata gracias al sistema desarrollado por la British Cast Iron Research Association (BCIRA) que nos permite determinar en el momento de colar este valor y por ende las propiedades mecánicas que presentará la colada, si interpolamos estos valores en gráficos existentes de Dureza vs C_e y Resistencia vs C_e .

Antiguamente había que determinar cada uno de los porcentajes de los elementos constitutivos de la fórmula por medio del análisis químico que tomaba mucho tiempo y dinero, lo que hacía al método bastante tedioso y poco practicado.

La Tabla V nos muestra los valores de los carbonos equivalentes de cada una de las experiencias, obtenidos mediante la aplicación de la fórmula tanto para los resultados del análisis previsto, como para los del análisis químico.

Es de mencionar las pruebas experimentales que se empezaron a realizar con el determinador de C_e desarrollado por la BCIRA, pero que tuvieron que ser interrumpidas por circunstancias fuera de nuestro alcance, ya que el aparato tuvo que ser devuelto a la Poli

TABLA V

Estudio comparativo de los valores obtenidos del "CE" en las experiencias

EXPERIENCIA	ANALISIS PREVISTO (C_{ep})	ANALISIS QUIMICO REAL (C_e)	ΔC_e (%) = $\frac{C_e - C_{ep}}{C_e}$
1	3.927	3.862	- 0.0168
2	3.918	4.192	0.065
3	4.033	4.043	*
4	4.112	4.331	0.050
5	3.955	4.13	0.042
6	4.04	3.990	- 0.0125
7	3.888	3.939	0.0129
8	4.013	4.091	0.019
9	3.875	3.877	*
10	3.915	3.989	0.019
11	3.724	3.573	- 0.042
12	3.839	3.783	- 0.015
13	4.039	4.250	0.049
14	4.039	4.352	0.0719
15	3.58	3.446	- 0.038
16	3.753	3.846	0.024
17	3.66	3.170	x
18	4.122	4.350	0.052
19	4.122	4.425	0.068
20	3.680	3.129	x
21	3.609	3.883	0.070
22	3.384	3.382	*
23	3.476	3.233	- 0.075
24	3.440	3.338	- 0.030

* Error es despreciable

x Error mayor \pm 10 %

técnica de Quito justo en el momento en que se desarrollaban las pruebas.

3.e.- ENSAYOS DE DUREZA

Dentro del concepto técnico, se entiende por dureza, la resistencia que opone un cuerpo a la penetración de otro cuerpo más duro. El valor está dado por un número indicador que corresponde al procedimiento usado, es decir de acuerdo al durómetro utilizado para su determinación, pero en sí todos funcionan bajo el mismo concepto que se basa en aplicar una carga determinada para hacer Penetrar un indentador de metal o diamante prácticamente indeformable sobre el metal o aleación al cual se le va a tomar la dureza.

El número indicador que refleja la dureza, involucra ciertas propiedades tales como el límite de fluencia y la resistencia a la tracción.

En el presente trabajo se utilizó el ensayo Brinell que consiste en determinar la dureza del hierro, midiendo el diámetro de la huella dejada por el indentador que en este caso es una esfera de acero templado de 10 mm. de diámetro al aplicar una carga de 3000 Kg. durante 10 seg.

Se realizaron 3 indentaciones en cada muestra con el objeto de determinar un valor promedio de dureza de la probeta, y se tomaron de cada una de ellas dos medidas del diámetro a 90^0 la una de la

otra, por lo tanto el valor representado en la Tabla VI del diámetro de la huella, es un valor promedio de toda la superficie pulida.

Básicamente lo que se mide es un esfuerzo, es decir el valor numérico de la dureza Brinell tiene por dimensiones Kg/mm^2 que es el cociente de dividir la carga aplicada para el área del casquete de la huella producida, pero en la práctica, existen tablas en las que se leen directamente el valor de la dureza Brinell en función de la carga aplicada (en este caso 3000 Kg.) y del diámetro de la huella.

Para realizar un ensayo Brinell, se debe tomar en cuenta:(11)

- 1.- El espesor de la probeta debe ser 10 veces la profundidad de la impresión;
- 2.- El centro de la huella debe distar, por lo menos 2.5 veces el diámetro de la misma del borde más próximo de la superficie en sayada;
- 3.- La superficie a ensayarse debe estar pulida , por lo menos con lija 320.

Los diferentes ensayos dieron los siguientes resultados que constan en la Tabla VI.

TABLA VI

Resultados de los ensayos de dureza Brinnel

PROBETA N ^o	DIAMETRO PROMEDIO DE LA ($\bar{\varnothing}$) HUELLA (mm)	N ^o DE DUREZA BRINNELL (p = 3000 Kg.)
1	4.23	205
2	4.400	187
3	4.12	215
4	4.46	182
5	4.075	220
6	4.058	222
7	4.27	199
8	4.163	211
9	3.96	234
10	4.083	219
11	4.075	220
12	4.08	219
13	4.27	199
14	4.37	190
15	3.87	246
16	4.18	209
17	3.84	249.5
18	4.55	175
19	4.35	194
20	3.767	259
21	4.160	212
22	3.98	231
23	3.75	262
24	3.78	257.5

4.e.- ANALISIS METALOGRAFICO

Está generalmente admitido que, solo con el uso del microscopio la metalurgia moderna ha podido surgir al rango de ciencia verdadera y propia. Ella se rige ahora sobre leyes bien definidas, entre las cuales la más importante es aquella que expresa la correlación directa entre las características estructurales de constitución de un metal o una aleación y sus propiedades mecánicas.

El exámen microscópico permite determinar la naturaleza, morfología, dimensiones, cantidad y distribución de los componentes estructurales y provee al ingeniero los datos indispensables para la diagnosis y selección de un material que será utilizado posteriormente como un elemento mecánico.

Para poder realizar el control metalográfico, fue indispensable efectuar pasos preliminares para preparar las probetas que se analizaron en el microscopio; en este trabajo se ha seguido la práctica que esta técnica aconseja (11).

Un análisis completo de la microestructura del hierro, incluye dos tipos de exámenes metalográficos: Metalografía sin ataque y metalografía con ataque químico y son detallados a continuación.

4.e.1.- Metalografía sin ataque

El hierro gris presenta al microscopio y sin aplicación de ningún reactivo parte de su estructura. A este tipo de análisis se lo deu

nomina metalografía sin ataque y mediante él se determinó y clasificó la forma, distribución y tamaño del grafito, para lo cual se empleó la norma UNE 36117, (ASTM A 247-47) que tiene por objeto clasificar por su forma, distribución y tamaño el aspecto microscópico del grafito, para que sirva de referencia en la comparación y designación de los distintos tipos que se presentan en las estructuras micrográficas de la fundición.

Seguidamente se indicará en que consiste cada uno de los ensayos y luego se darán los resultados que se obtuvieron de cada una de las experiencias efectuadas (Tabla VIII).

4.e.1.1.- Determinación de la forma del grafito

La forma del grafito, es determinada, examinando la totalidad de la superficie de cada una de las probetas al microscopio a cien aumentos y comparando la microestructura vista, con aquellas que se encuentran en el patrón establecido por la UNE (norma española).

Para la designación de la forma se utilizará la numeración romana de la figura Nº 26, y es de desear obtener el tipo I (laminar) por cuanto es este el que normalmente se presenta en la fundición gris ordinaria.

4.e.1.2.- Determinación de la distribución del grafito

La distribución del grafito, es un análisis que se lo efectúa de igual manera que el anterior, es decir se llega a su determinación

observando al microscopio con una resolución de 100 aumentos; luego se procede a compararla con el patrón de la UNE respectivo y que aparece en la Figura Nº 27. Lo deseable para obtener un material de óptima calidad es que éste presente una distribución del tipo A.

Para la designación de la distribución se emplearán las letras mayúsculas al pie de cada gráfico de distribución de la Figura Nº 27.

4.e.1.3.- Determinación del tamaño del grafito

La determinación del tamaño que presenten las láminas de grafito, es muy importante ya que es un parámetro fundamental en la determinación del valor de las propiedades mecánicas de la fundición.

El tamaño de las láminas es determinado mediante observación al microscopio con 100 aumentos y luego comparando la microestructura, con el patrón de la UNE de las Figuras Nº 28, 29 y de la Tabla VII.

Para la designación del tamaño de las láminas de grafito se utilizarán los números arábigos bajo cada pie de figura.

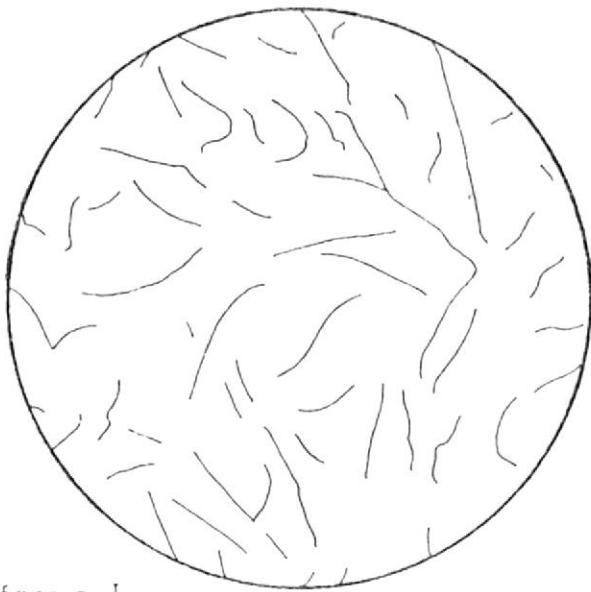
La designación general de una muestra observada al microscopio con 100 aumentos que presente partículas de grafito de la forma I, con la distribución A, y cuyo tamaño máximo sea de 12 a 25 mm. será:

GRAFITO I A 4 UNE 36117

Si el grafito se encuentra entre dos tamaños, se puede hacer refe-

rencia a los dos (por ejemplo $3/4$). También puede señalarse el tamaño predominante subrayando éste (por ejemplo $3/4$).

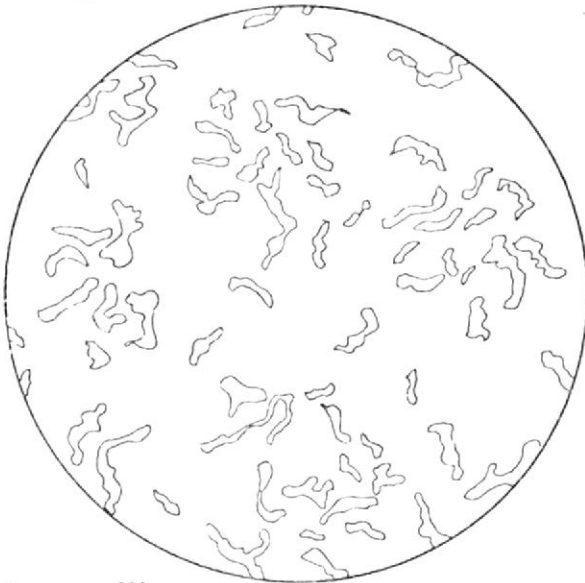
Una vez que se han detallado los métodos de los análisis metalográficos sin ataque, a continuación se incluyen algunas fotos (Figuras Nº 30 a 32) y los resultados obtenidos con cada una de las probetas correspondientes a las diferentes experiencias efectuadas. (Tabla VIII)



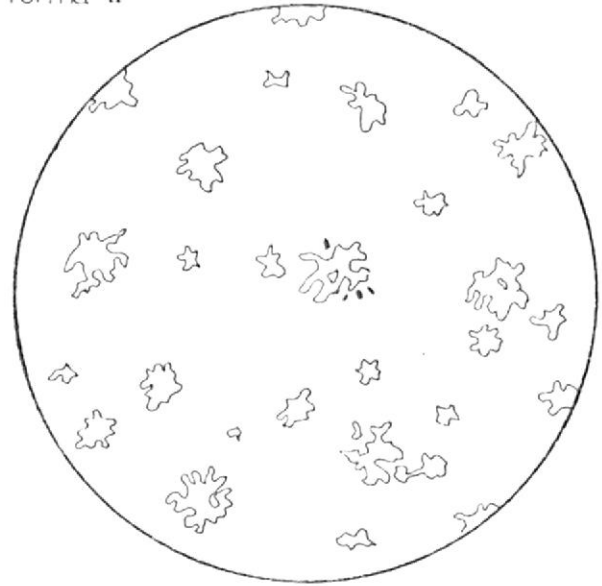
forma I



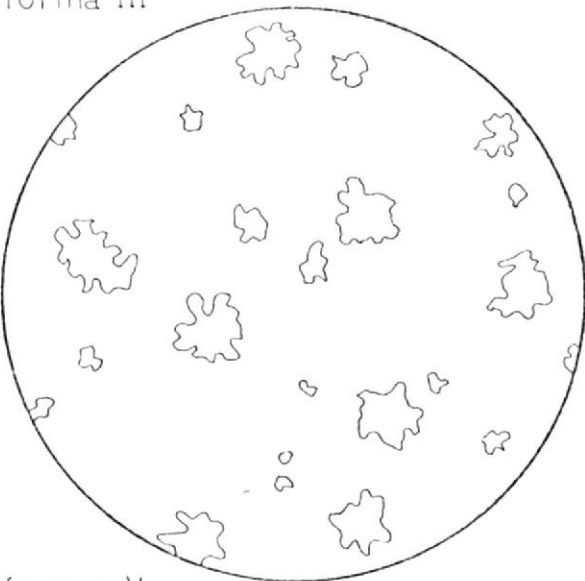
forma II



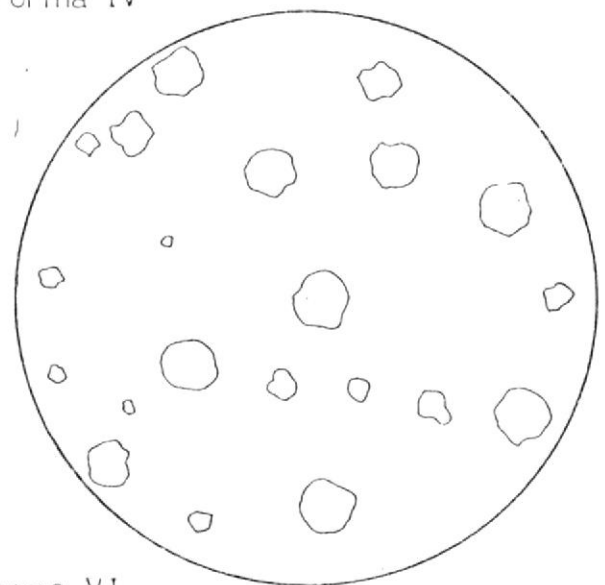
forma III



forma IV



forma V

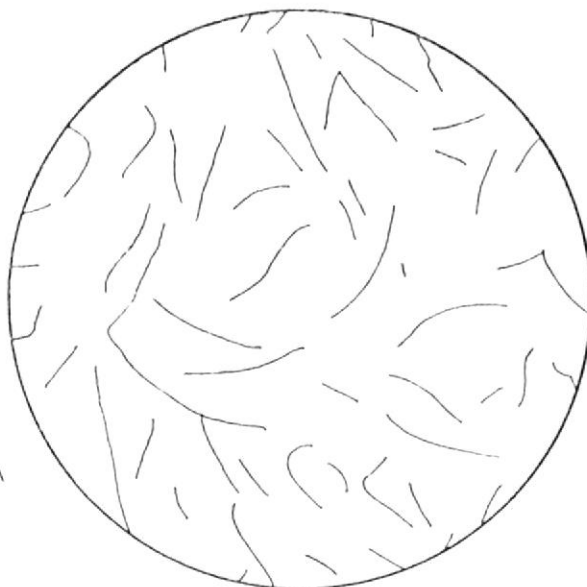


forma VI

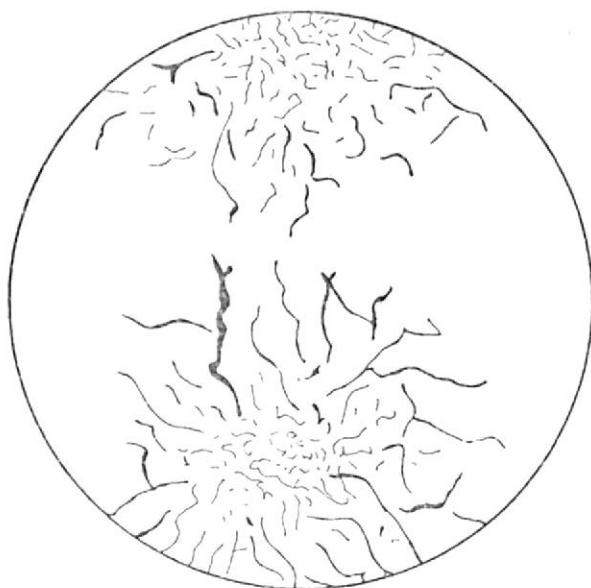
Figura Nº 26

Tipo de referencia para la forma del grafito

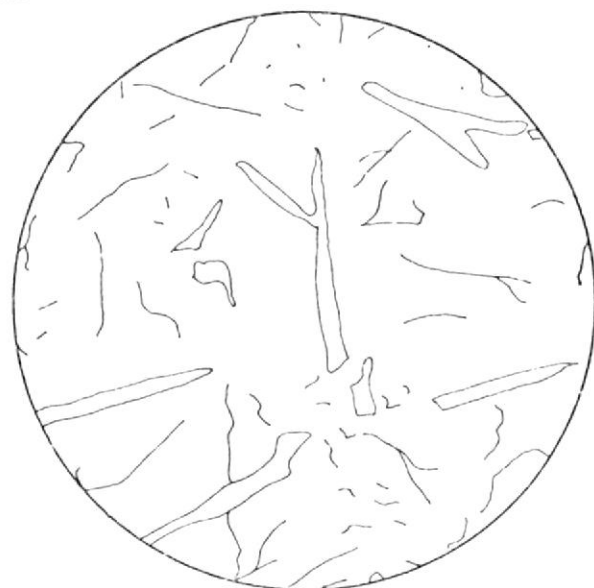
distribucion A



distribucion B



distribucion C



distribucion D



distribucion E

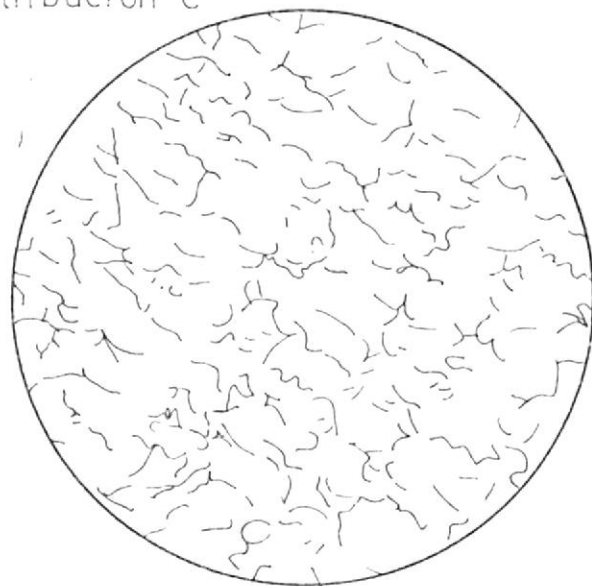
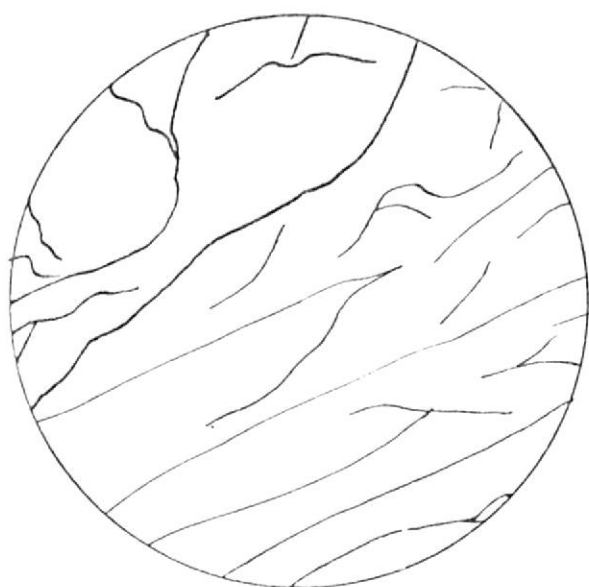
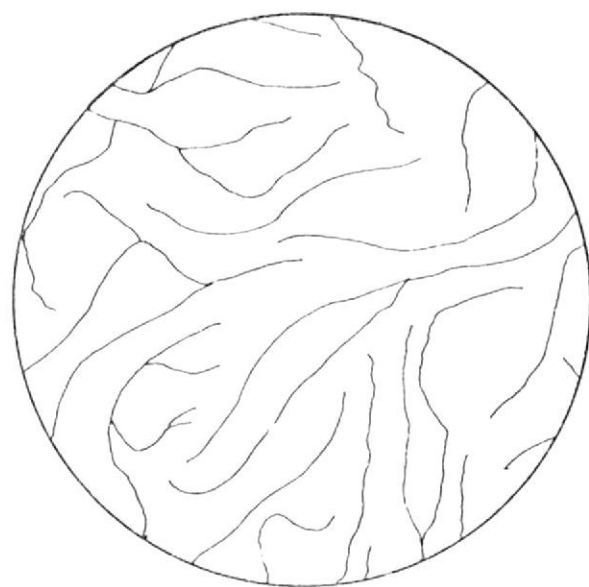


Figura Nº 27

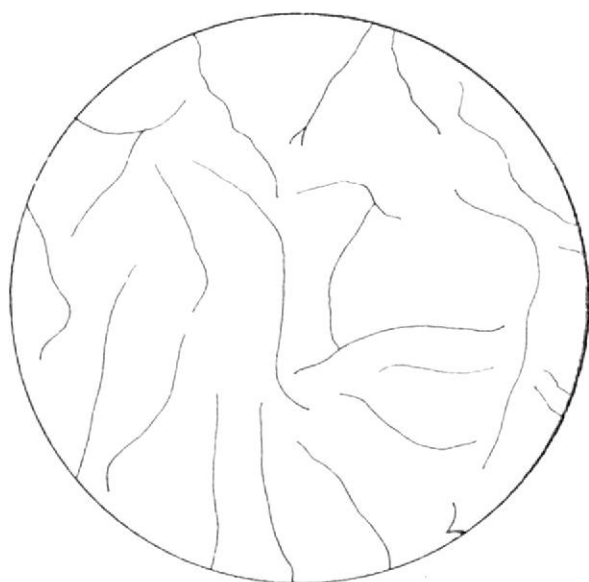
Tipo de referencia para la distribución del grafito



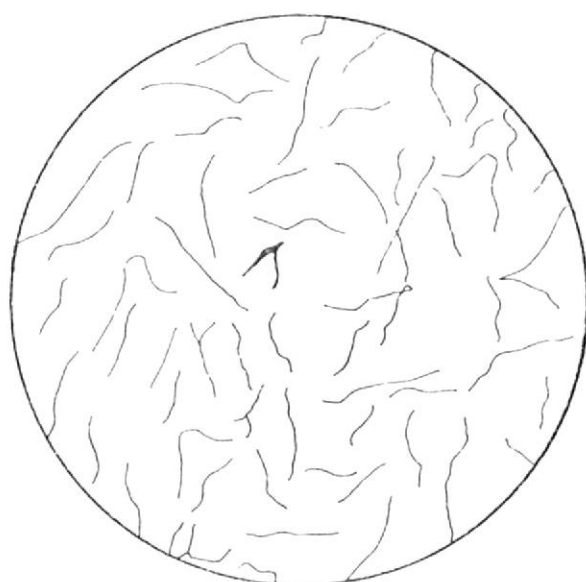
tamaño 1



tamaño 2



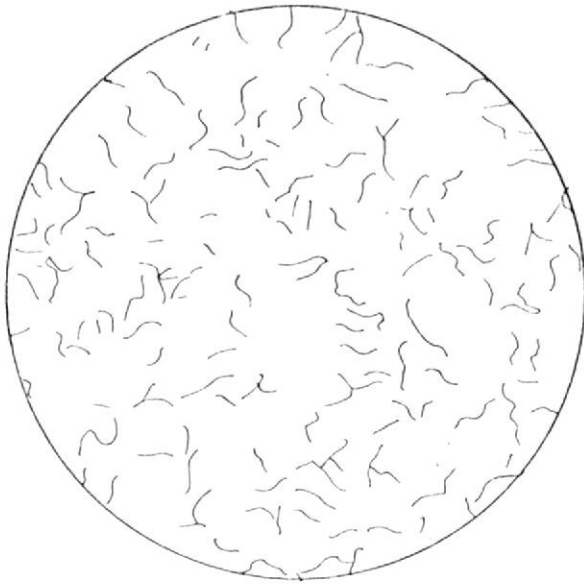
tamaño 3



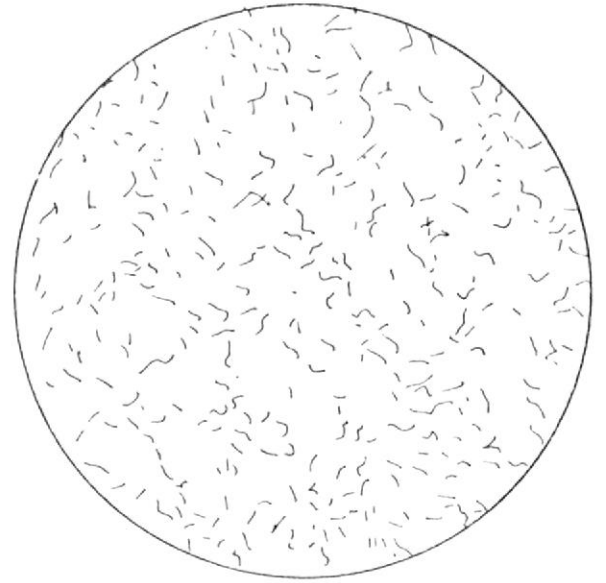
tamaño 4

Figura Nº 28

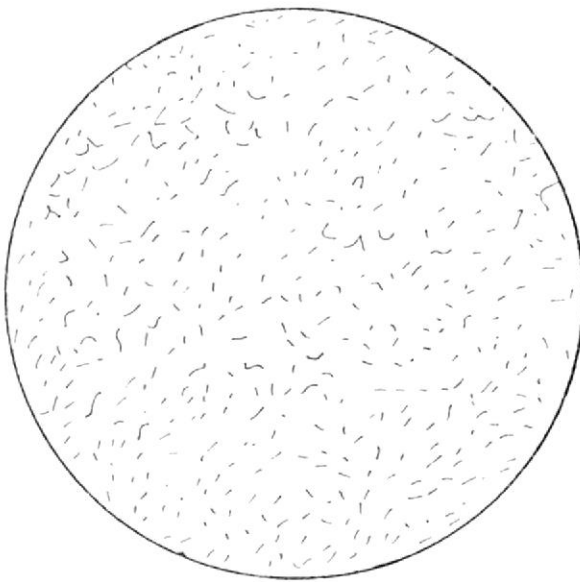
Tipo de referencia para el tamaño del grafito (100 aumentos)



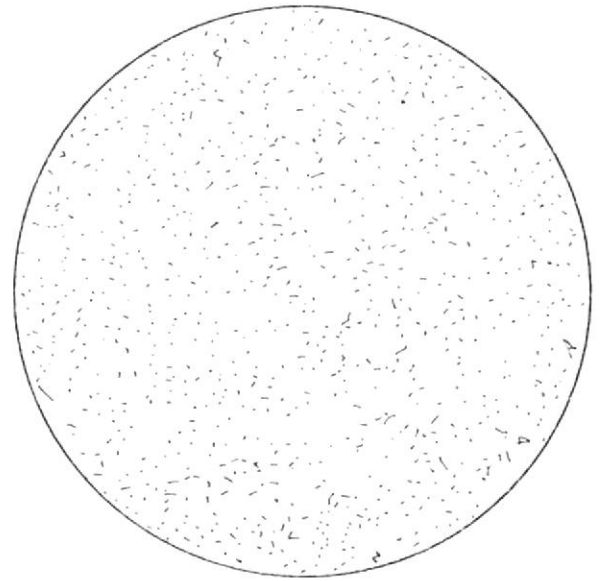
tamaño 5



tamaño 6



tamaño 7



tamaño 8

Figura № 29

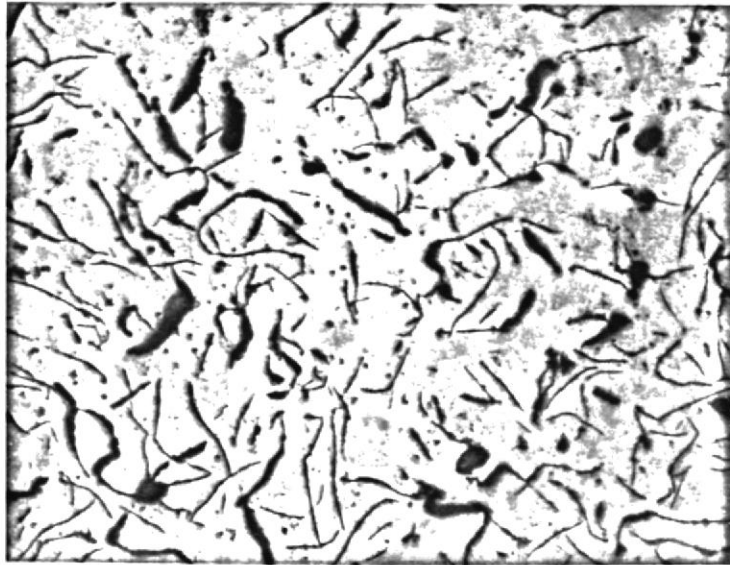
Tipo de referencia para el tamaño del grafito (100 aumentos)

TABLA VII

Tamaño del grafito

(Partículas de la forma I a VI)

NUMERO DE REFERENCIA	TAMAÑO DE LAS PARTICULAS A 100 X mm.			MEDIDAS VERDADERAS mm.		
1	>		100	>		1
2	50	a	100	0.5	a	1
3	25	a	50	0.25	a	0.5
4	12	a	25	0.12	a	0.25
5	6	a	12	0.06	a	0.12
6	3	a	6	0.03	a	0.06
7	1.5	a	3	0.015	a	0.03
8	<		1.5	<		0.015



100 X

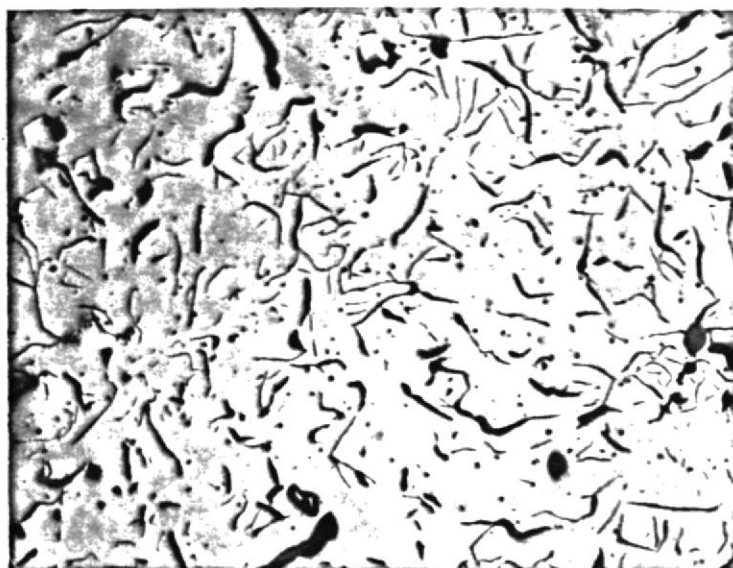
Sin ataque

Figura Nº 30

Probeta Nº 2

Hierro gris

Grafito I A 4 según norma UNE 36117



100 X

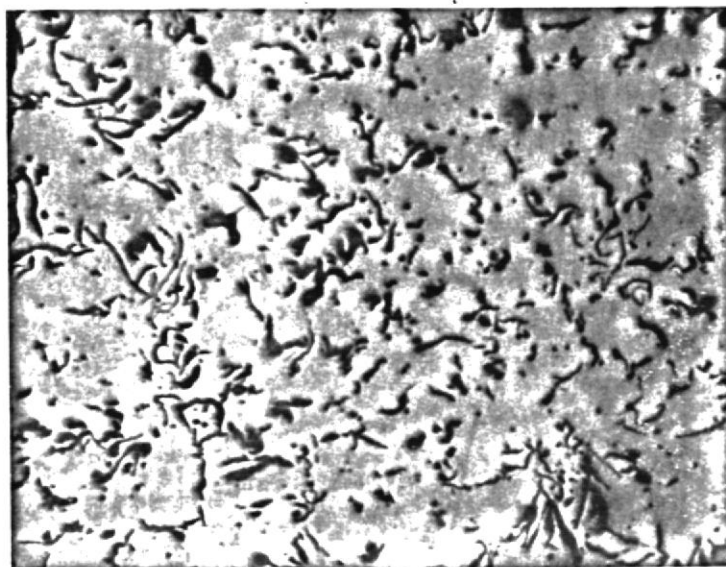
Sin ataque

Figura Nº 31

Probeta Nº 21

Hierro gris

Grafito I A 5/6 según norma UNE 36117.



100 X

Sin ataque

Figura Nº 32

Probeta Nº 20

Hierro gris

Grafito I A 6 según norma UNE 36117

TABLA VIII

Resultados de los exámenes metalográficos sin ataque

PROBETA Nº	CLASIFICACION UNE 36117 GRAFITO
1	I C $\frac{5}{6}$
2	I A 4
3	I A $\frac{4}{5}$
4	I A $\frac{3}{4}$
5	I A $\frac{5}{6}$
6	I A $\frac{5}{6}$
7	I B $\frac{5}{6}$
8	I A 4
9	I A $\frac{5}{6}$
10	I A/C 4
11	I C $\frac{4}{5}$
12	I A $\frac{4}{5}$
13	I A $\frac{4}{5}$
14	I A $\frac{3}{4}$
15	I A 5
16	I B $\frac{5}{6}$
17	I A $\frac{6}{6}$
18	I A $\frac{3}{4}$
19	I A 4
20	I A 6
21	I A $\frac{5}{6}$
22	I B $\frac{5}{5}$
23	I A $\frac{5}{6}$
24	I B $\frac{5}{6}$

4.e.2.- Metalografía con ataque

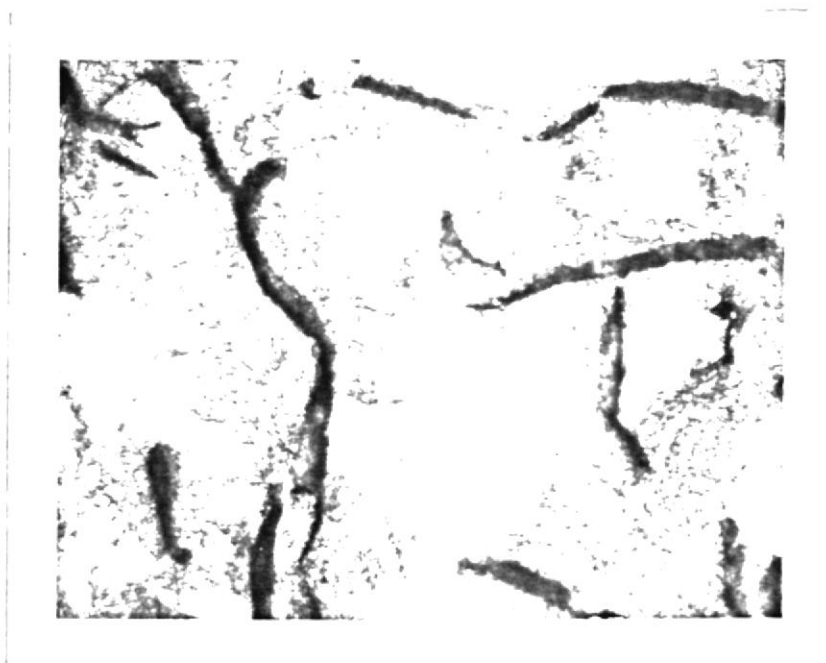
Mediante el ataque químico, se pone de manifiesto la morfología, la proporción y la coloración de cada uno de los constituyentes metalográficos de las probetas.

Para observar la matriz del hierro gris ordinario se usó como reactivo de ataque, una solución de Nital al 2% durante 4 seg. (100 cc. de alcohol metílico y 2 cc. de ácido nítrico concentrado).

Como ya se ha dicho, la matriz de las fundiciones grises, puede ser ferrítica o perlítica, lográndose la mejor combinación de características mecánicas con las fundiciones perlíticas.

La Tabla IX nos muestra los resultados obtenidos mediante la observación al microscopio con 400 aumentos, pudiéndose observar en esta tabla que la totalidad de las probetas presentaron una matriz perlítica, sinónimo de buena fundición. Con una resolución de 1000 aumentos, se pudo apreciar claramente la presencia en mayor o menor grado del eutéctico esteadita (agrupaciones de fósforo de hierro sobre un fondo blanco de ferrita) en casi todas las muestras, debido al alto porcentaje de fósforo presente en la fundición.

Las Figuras 33 a 35 nos muestran algunas microestructuras tomadas a 400 aumentos.



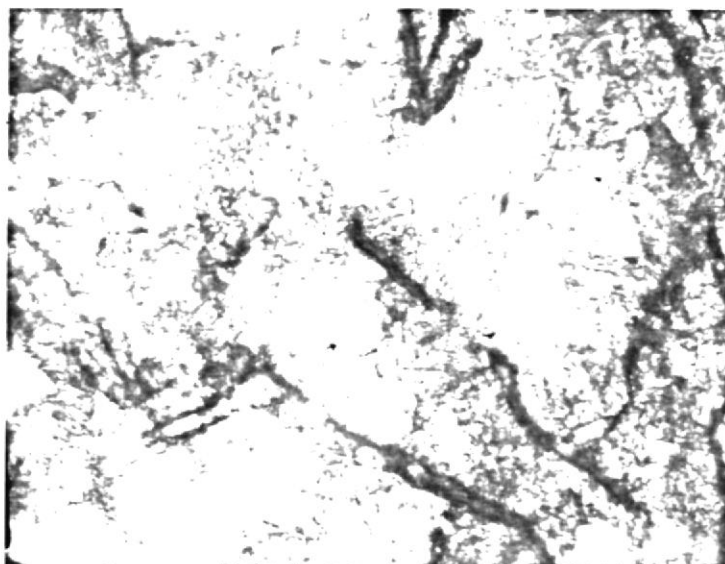
400 X

Nital al 2%

Figura Nº 33

Probeta Nº 2

Microestructura de una fundición gris perlítica
(áreas grises) (Láminas negras de grafito)



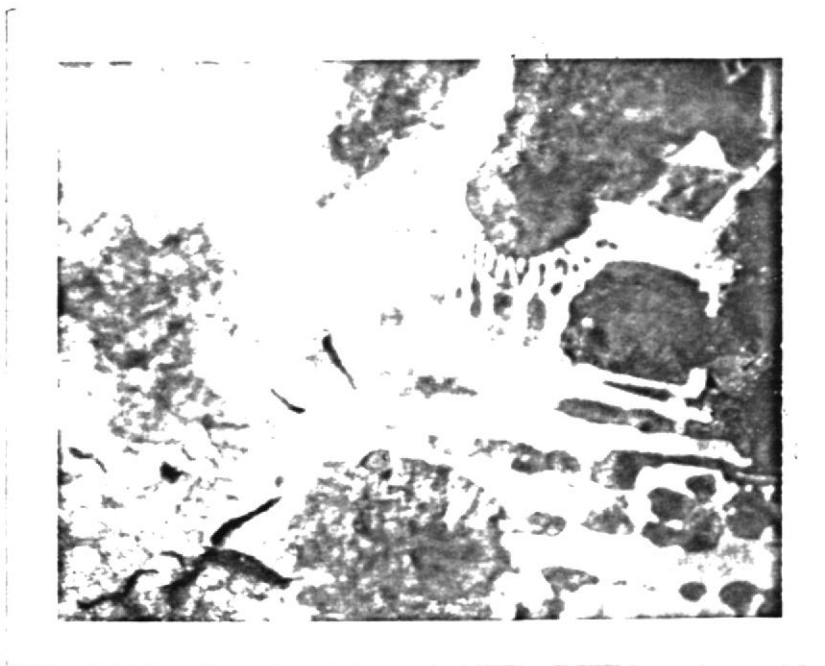
400 X

Nital al 2%

Figura Nº 34

Probeta Nº 21

Microestructura de una fundición perlítica
(áreas grises) (Láminas negras de grafito)



400 X

Nital al 2%

Figura N° 35

Probeta N° 24

Microestructura de una fundición 90% perlítica (zona negras) y 10% de cementita (áreas blancas).

TABLA IX

Resultados de los análisis metalográficos con ataque de Nital al 2%

PROBETA Nº	MATRIZ %	OBSERVACIONES
1	Perlítica 100 %	Grandes áreas de steadita
2	" 100 %	Pocas áreas de steadita
3	" 100 %	Áreas medias de steadita
4	" 100 %	Áreas medias de steadita
5	" 100 %	Grandes áreas de steadita
6	" 100 %	Pocas áreas de steadita
7	" 100 %	Grandes áreas de steadita
8	" 100 %	" " "
9	" 100 %	Pocas áreas de steadita
10	" 100 %	" " "
11	" 100 %	Pequeñas áreas de steadita
12	" 100 %	Grandes áreas de steadita
13	" 100 %	Áreas medias de steadita
14	" 100 %	Pocas áreas de steadita
15	" 100 %	Grandes áreas de steadita
16	" 100 %	Áreas medias de steadita
17	" 100 %	Pocas áreas de steadita
18	" 100 %	Áreas medias de steadita
19	" 100 %	" " "
20	" 100 %	" " "
21	" 100 %	" " "
22	" 100 %	Grandes áreas de steadita
23	" 100 %	Áreas medias de steadita
24	" 90 %	" " "
	Cementita 10 %	

F.- RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados y que se encuentran en las Tablas III a IX, admiten una gran confiabilidad por la precisión de los equipos empleados en cada caso.

La interpretación, discusión e interrelación de estos resultados, nos permitirán obtener gráficos y establecer funciones por medio de regresión lineal, en los casos que así lo permitan, y que analizados en detalle van a constituir los elementos de trabajo para el siguiente capítulo.

CAPITULO V

DISCUSION Y ANALISIS DE RESULTADOS

De todo lo que antecede puede decirse que, es posible llegar a un conocimiento cuantitativo de las verdaderas relaciones que se establecen entre la composición química de las fundiciones, sus puntos críticos en la solidificación, profundidad de temple y características mecánicas.

Para que esas relaciones sean científicamente fiables y técnicamente utilizables, habrá que determinar en base a las Tablas II a IX del Capítulo IV, los grados de relación y llegar, incluso, a establecer los gráficos y de ser posible fórmulas matemáticas, que expresen las funciones que gobiernan esas relaciones.

Los resultados son tan amplios e interesantes, que serán estudiados separada y detalladamente.

A.- COMPOSICION QUIMICA

Carbono equivalente previsto C_{ep} y Carbono equivalente real C_e .

La Tabla V muestra que entre los valores previstos para el C_e y aquellos obtenidos mediante análisis químicos, existe cierto grado de dispersión (menor a 10 %) que debe ser corregido antes de emplear estos valores (C_{ep}) en la determinación de propiedades del material.

De la graficación de estos resultados (Figura Nº 36) se observa que hay una correspondencia prácticamente lineal entre los pares de valores considerados. Por tanto aplicando regresión lineal, la ecuación de la recta de regresión es:

$$C_e = 1.414 C_{ep} - 1.526$$

Con una correlación igual a 0.93. Esta ecuación deberá utilizarse como factor de corrección en los talleres de fundición que por no poseer un laboratorio o determinador de C_e , estimen el valor del mismo mediante cálculo de carga. Sustituyendo el C_{ep} de la ecuación anterior por 3.818 o 3.58, los resultados obtenidos son 3.873 y 3.54 respectivamente para el C_e . Estos valores así obtenidos serán los que se interpolen en los gráficos correspondientes y sirvan para determinar las propiedades que para esos valores le correspondan al material.

Analizando en la Tabla IV los elementos constitutivos de la fórmula del C_e , se observa que es el silicio, el que presenta algunos valores que comparados entre sí (previsto vs real), tienen una diferencia mayor al 10 %, mientras que el C y P presentan para la mayoría de los valores una desviación menor a 10 %. Por tanto es el Si el elemento que más afecta el grado de dispersión.

La diferencia observada para el Si, es explicable en base al hecho de no haber utilizado siempre una carga igual de hierro gris, sino variada y a la cual se le estableció un promedio de composición química; por tanto se obtendrían mejores resultados siempre que la carga que se sumi-

nistre al horno sea igual (una sola calidad de material), siendo posible acercarse más a las condiciones de mantener una función lineal entre C_e real y previsto y evitando de este modo la utilización del factor de corrección, previo a la interpolación en los gráficos.

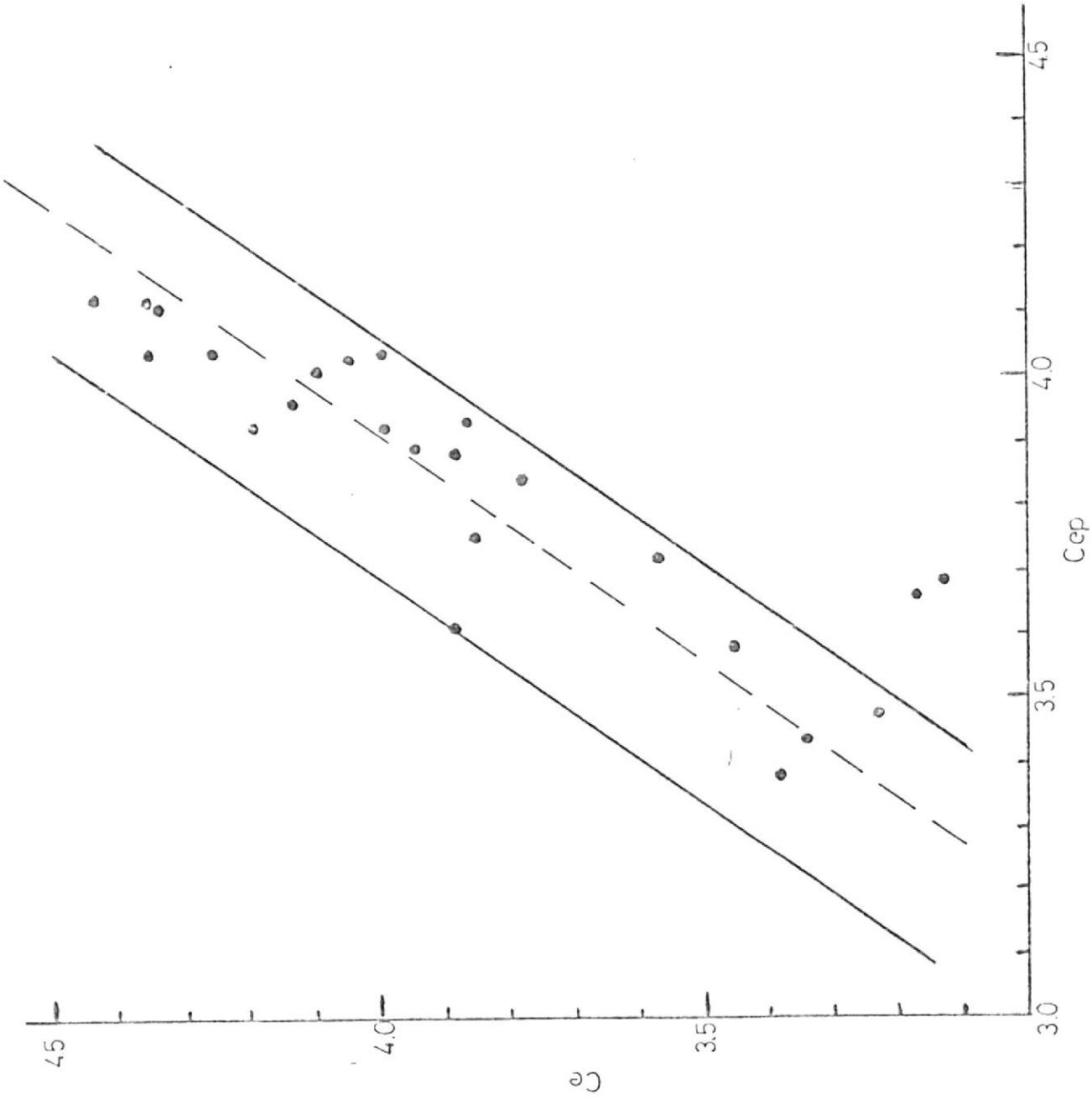


Figura Nº 36

Relación del Carbono equivalente previsto C_{ep} y el Carbono equivalente real C_e

B.- CARACTERÍSTICAS MECANICAS

Se han controlado como ya se cito en capítulos anteriores la dureza y resistencia a la tracción.

1.b.- COMPARACION ENTRE DUREZA Hb Y RESISTENCIA R

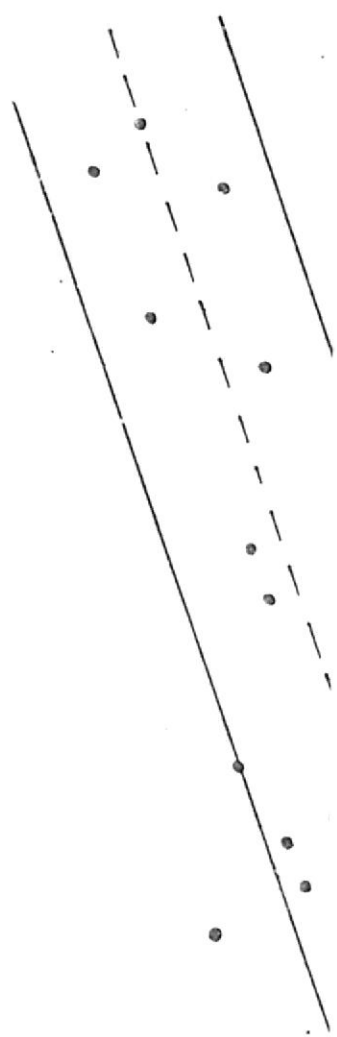
Las parejas de valores obtenidos al comparar ambas magnitudes para cada muestra de fundición se representan en la Figura Nº 37 que se encuentra a continuación, y en la cual se observa una proporcionalidad directa entre ambas magnitudes. La ecuación de la recta de regresión es la siguiente:

$$R = 0.146 Hb - 9.33$$

Con una correlación de 0.85. Esta ecuación es correcta como se puede comprobar sustituyendo la dureza Brinelli Hb por el valor 187 o 259; los resultados obtenidos son de 17.97 y 28.48 Kg/mm² respectivamente y no difieren en más de un 10% del verdadero valor obtenido en el ensayo (18.14 y 30.74).

Es de hacer notar que la función anterior trabaja siempre y cuando la microestructura esté constituida por una matriz perlítica, ya que otros constituyentes pueden hacer variar la función, como por ejemplo la cementita que aumenta la dureza del material bajando su resistencia.

TRACCLON
30
kg/mm²



2.b.- CARBONO EQUIVALENTE C_e Y RESISTENCIA A LA TRACCION R

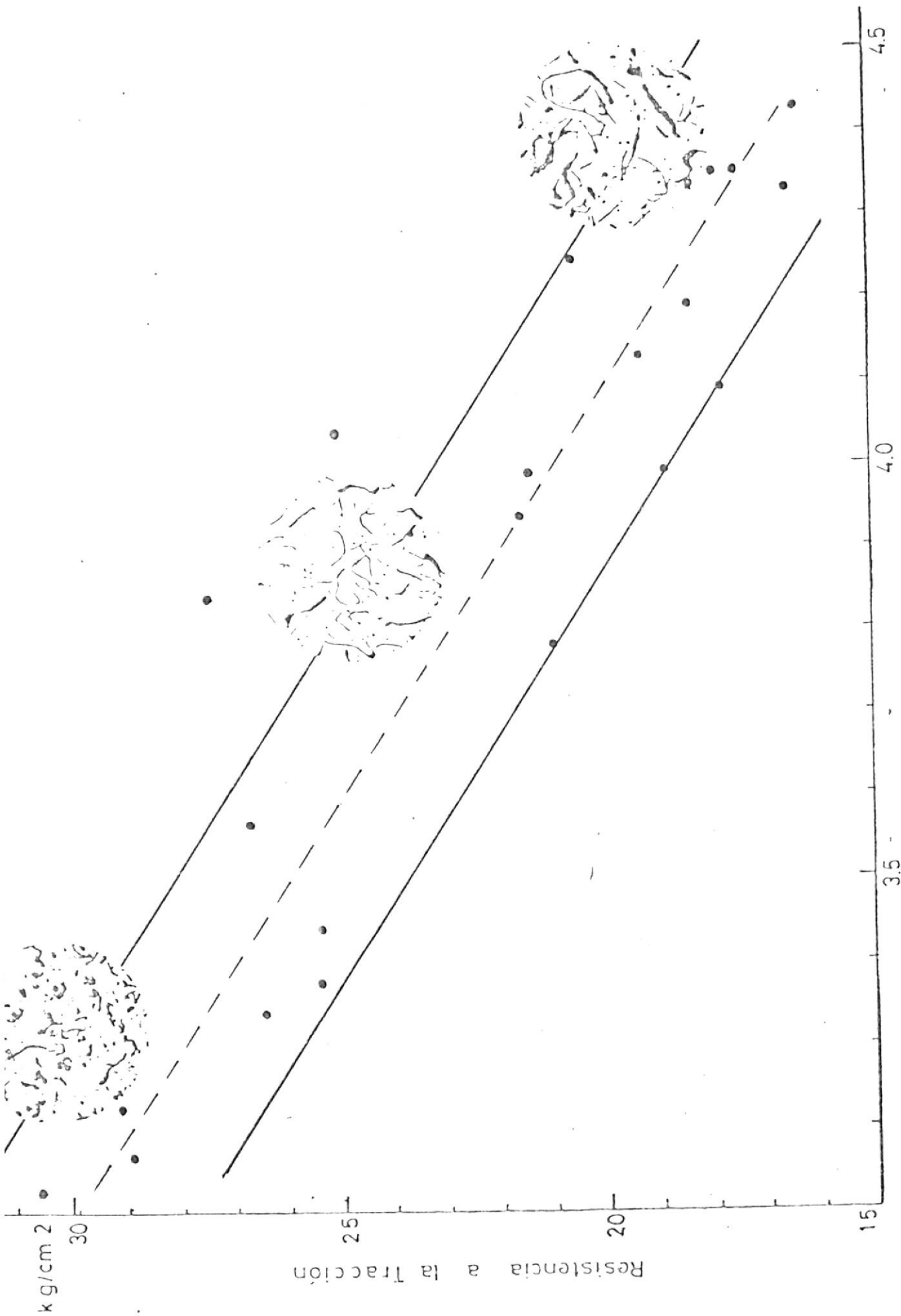
Hay una estrecha relación entre ambas magnitudes, como se puede observar en la Figura Nº 38, siendo la ecuación de la recta de regresión lineal la siguiente:

$$R = 61.084 - 10.05 C_e$$

Con un coeficiente de correlación de 0.95. La sustitución en la fórmula del C_e por 3.862 o 4.35 da para la resistencia a la tracción los respectivos valores de 22.27 y 17.37 Kg/mm², que son valores muy parecidos a los reales (23.63 y 17.48) obtenidos en laboratorio.

Comparada esta ecuación con la encontrada en la bibliografía (4), es similar a aquella, encontrándose entre ambas una pequeña diferencia al reemplazarse el C_e por un valor cualquiera. La recta de regresión se cruza con ella y tiene la pendiente algo menor.

Se puede usar indistintamente la presente ecuación o la encontrada en la bibliografía para los cálculos en que sea necesario.



$$CE = Ct + 1/3 (Si \cdot P)$$

Figura Nº 38

Influencia del C_e en la resistencia a la tracción de las fundiciones grises

3.b.- CARBONO EQUIVALENTE C_e Y DUREZA BRINELL Hb

En la Figura N° 39 y que se muestra a continuación, se representan las parejas de valores obtenidos al cotejar ambas magnitudes.

La ecuación de la recta de regresión que se deriva de ellos son:

$$Hb = 437.342 - 57.21 C_e$$

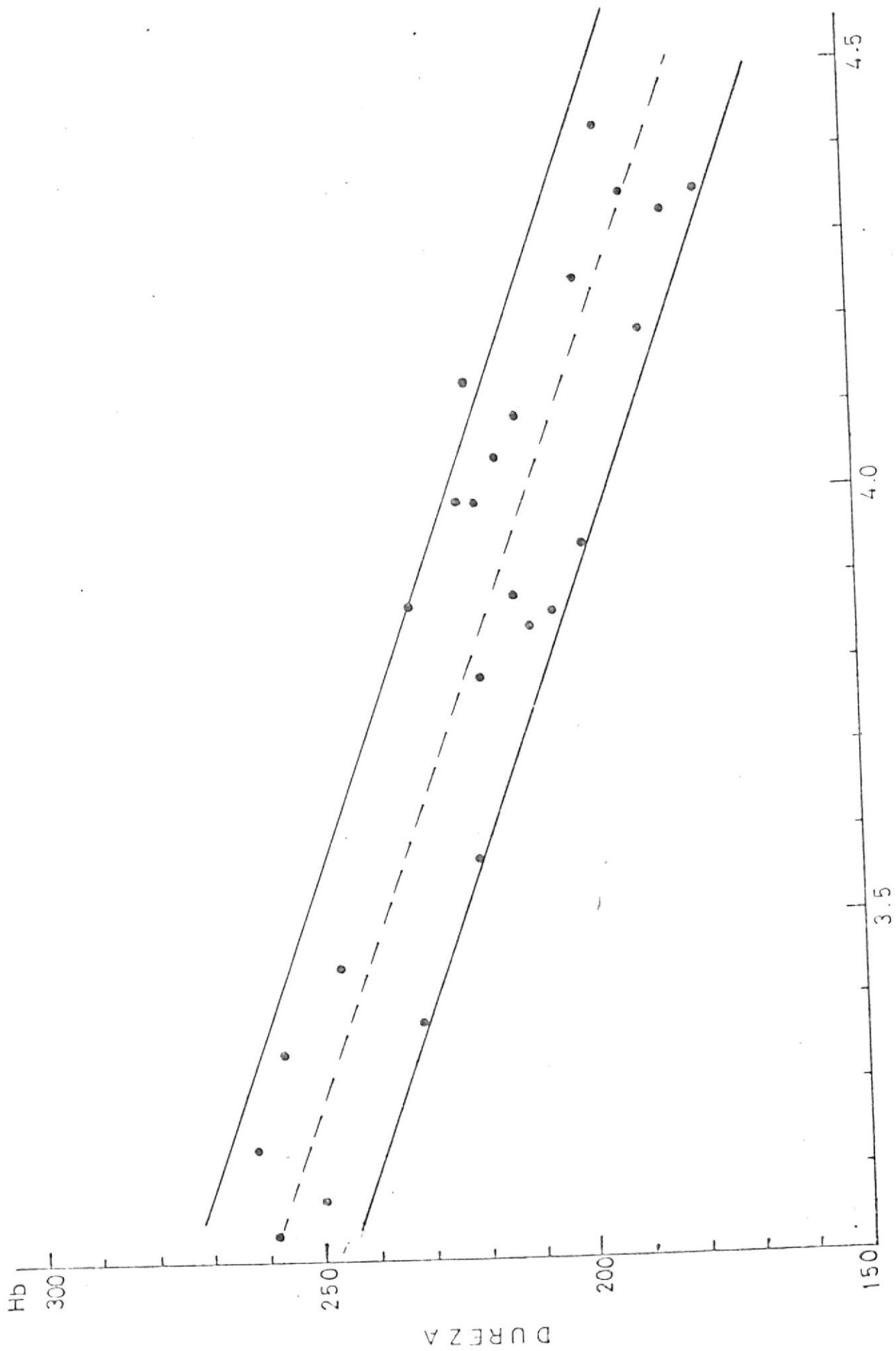
Con un coeficiente de correlación igual a 0.92. La sustitución de C_e por 3.862 y 4.35 resulta en unas durezas Brineil respectivamente iguales a 216.4 y 188.48; estos resultados se encuentran dentro de un campo lógico de operación, lo que indica la correlación de la ecuación deducida.

Al comparar la ecuación de la recta aquí obtenida, con la presenta da en la bibliografía (4), se observa que de la sustitución de C_e por valores, se obtienen durezas Brinell mayores que en aquella; lo cual se debe fundamentalmente a la presencia de elevados porcentajes de fósforo en la composición química, tal como se puede apreciar en la Tabla IV y que difieren en mucho de los porcentajes que para este elemento ha obtenido el investigador de ONUDI José Luis Enriquez en sus experimentos (% P < 0.06).

El alto contenido en fósforo de las muestras, dió como resultado que en la observación microscópica (Tabla IX), se aprecie en mayor o menor grado en todas ellas, la presencia del eutéctico esteadita, que como sabemos aumenta la dureza del material.

De la comparación de ambas rectas de correlación se aprecia una mayor pendiente en aquella que establece el Ing. Enriquez; existiendo una gran diferencia en los valores de dureza obtenidos al aplicar ambas fórmulas para valores de C_e mayor a 4.1.

Si bien la recta obtenida por el Ing. Enriquez, resulta de un gran número de experimentaciones, también es cierto que fue obtenida en condiciones de operación muy diferentes a las empleadas en nuestro medio, por los fundidores locales . Por tanto considero que pese a la diferencia relativamente grande entre el número de investigaciones realizadas por uno u otro trabajo; para nuestro medio es más representativo y aconsejable el uso de la ecuación aquí mostrada, por cuanto fue obtenida en las condiciones de operación del medio.



$$C E = C t + 1/3 (S i + P)$$

Figura N° 39
Influencia del C_e en la dureza de las fundiciones grises

C.- ESPESOR DE TEMPLE

Esta prueba ha sido usada durante mucho tiempo en nuestro medio, de una manera cualitativa, pero ahora trataremos de cuantificar en base a los espesores de temple y los gráficos correspondientes las propiedades del material.

1.c.- TEMPLE T Y RESISTENCIA A LA TRACCION R

La ecuación de la recta de regresión entre ambas magnitudes, que se representa en la Figura N° 40, resulta ser:

$$R = 1.281 T + 17.347$$

Con una correlación de 0.94. La sustitución de valores de profundidad de temple en la ecuación, da valores de resistencia que por su coherencia demuestran la bondad de la ecuación.

Vale mencionar que en toda la bibliografía consultada no existe un solo gráfico que relacione el Temple vs la Resistencia, limitándose los escritos a indicar la tendencia manifiesta de una mayor resistencia a un mayor espesor de temple, pero que no se atreven a afirmar de una manera absoluta que siempre se manifiesta esta tendencia, por la serie de resultados totalmente dispares que a veces se presentan, debido a una gran cantidad de factores que influyen en la actitud del Fe gris al temple.

De allí que el gráfico y la ecuación aquí obtenidos deban ser usa-

dos con ciertas precauciones y únicamente como método de comprobación del método del C_e , si es que se tiene alguna duda acerca de los valores de propiedades mecánicas así obtenidos.

Como ejemplo de lo manifestado anteriormente, se puede observar en la Figura N^o 40, cuatro puntos totalmente desubicados. Dos de ellos presentan una resistencia muy baja para el espesor de temple obtenido, mientras que los otros dos por su parte presentan una alta resistencia comparado con el espesor de temple resultante.

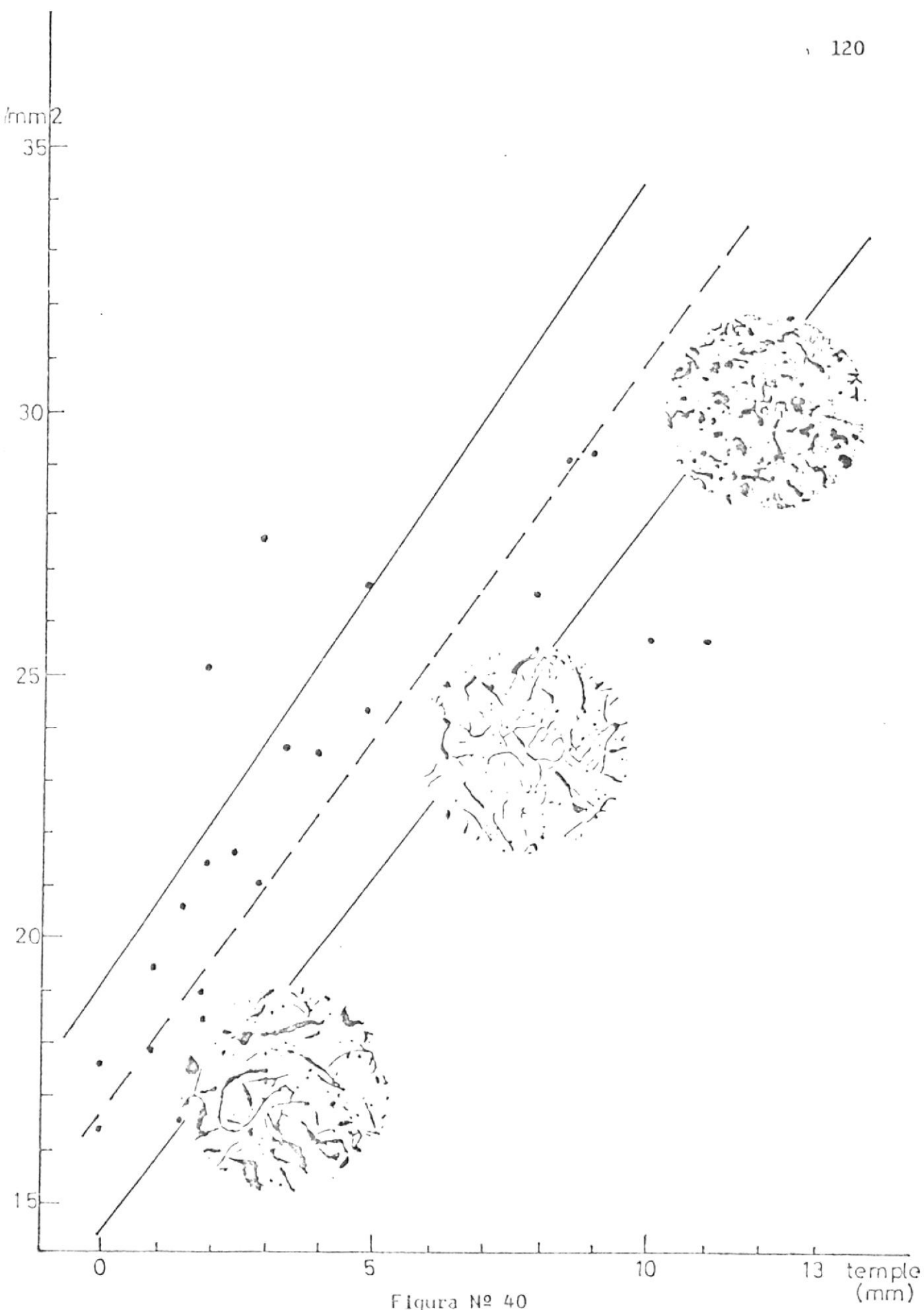


Figura Nº 40

Influencia del ancho de temple en la resistencia a la tracción de los nervios.

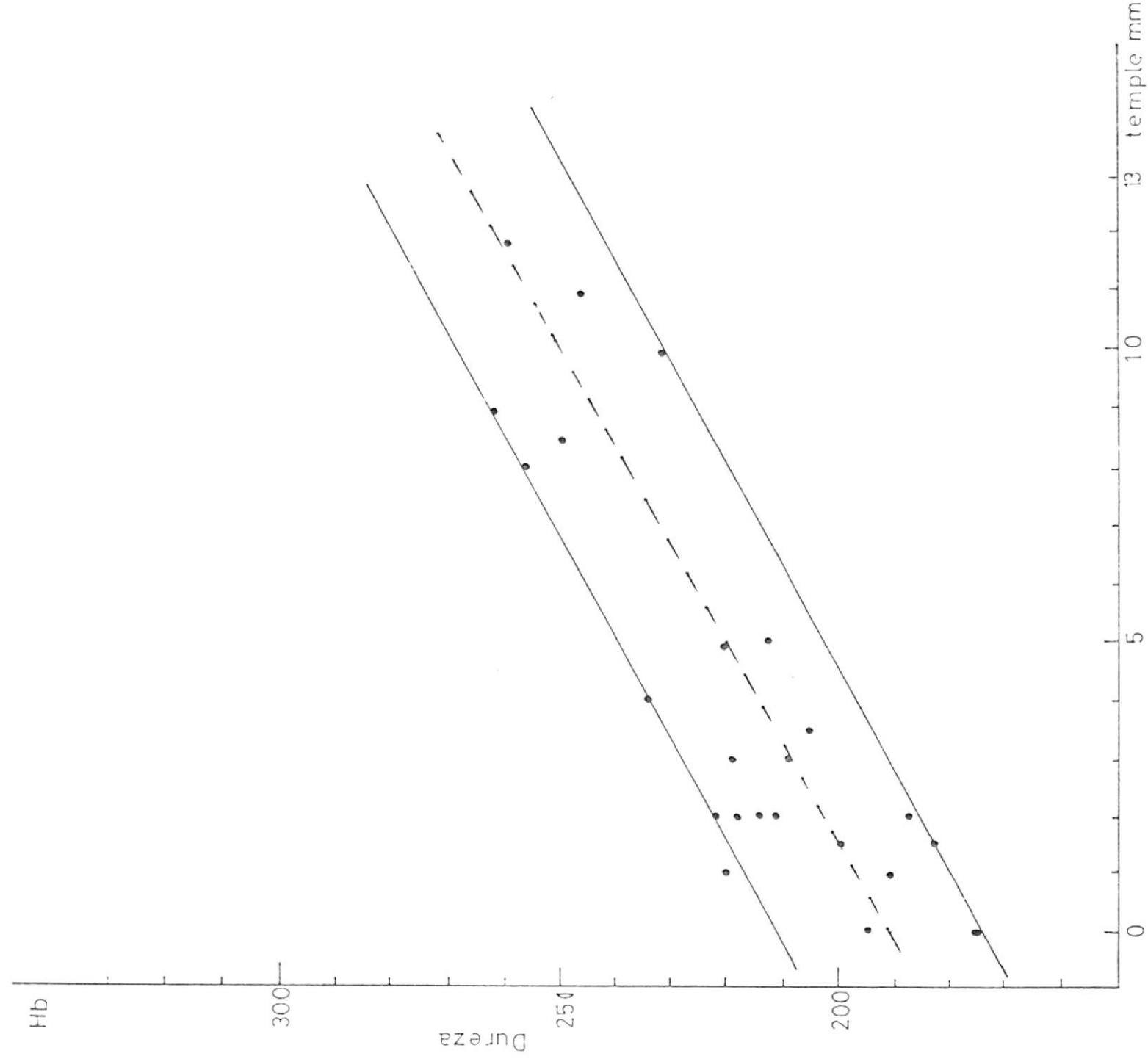
2.c.- TEMPLE T VS DUREZA Hb

La expresión matemática de los valores representados en la Figura Nº 41, es:

$$Hb = 5.988 T + 191.616$$

Con un valor de correlación igual a 0.86. Sustituyendo T por 1.5 y 5 da los valores respectivos de 200.6 y 221.6 para la dureza Brinell, valores que se encuentran dentro de un intervalo lógico.

Al igual que en el caso anterior no existe un gráfico en la bibliografía, que relacione el Temple vs la Dureza Brinell. De allí que este gráfico y la ecuación obtenida del mismo deban, ser usados con las precauciones del caso y sólo como comprobación de los valores obtenidos usando el método del C_e .



D.- CARACTERISTICAS METALOGRAFICAS

1.d.- METALOGRAFIA SIN ATAQUE

En la Tabla VIII, se puede observar que la gran mayoría de las muestras presentaron al microscopio la Forma I y con distribución A para el grafito, y que de acuerdo a la teoría es ésta forma y distribución la que siempre se debe obtener si se desea conseguir las mejores características mecánicas.

Respecto al tamaño de las láminas de grafito, podemos decir que es te variaba entre un tamaño 3/4 (muestra Nº 4) hasta un tamaño 6 (muestra Nº 20).

Las mejores propiedades (resistencia y dureza) se obtuvieron en aquellas muestras que contenían grafito de menor tamaño, tal como las muestras 16, 20, 23 y 24.

2.d.- METALOGRAFIA CON ATAQUE

La Tabla IX nos muestra que el tipo de matriz obtenida en 23 de 24 pruebas realizadas, corresponde a una fundición gris perlítica, que es la que presenta la mejor combinación de características para un gran número de aplicaciones.

Es dentro de este campo, que se encuentra una cierta correspondencia entre las durezas y las resistencias, de allí que todos los resultados anteriormente establecidos y los gráficos obtenidos, su

utilización de una manera correcta, esté basado en la seguridad de haber obtenido un material con una microestructura que presente una matriz perlítica.

La muestra N° 24, que en el análisis metalográfico presentó aprox. un 10% de cementita, es un caso típico de lo anteriormente mencionado, ya que se pierde la proporcionalidad directa que existe entre dureza y resistencia a la tracción por cuanto posee una elevada dureza que no es congruente con el valor obtenido para la resistencia, tal como se puede observar en las Tablas III y VI.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En los Capítulos anteriores se ha tratado en forma concisa, los antecedentes del problema, los métodos experimentales seguidos para su estudio, resultados obtenidos en los experimentos realizados y el tratamiento matemático efectuado a los susodichos resultados, siendo las conclusiones a las que podemos llegar las siguientes:

- 1º.- Que conocida la composición química de la fundición se pueden predecir las características mecánicas que presentarán las piezas elaboradas con ese material.

- 2º.- También se puede resolver el problema inverso. Elio supone que conocidas las características mecánicas que se desea tenga la pieza fundida, se pueda determinar los porcentajes de carga metálica y ferro-silicio que deban introducirse al cubilote: Es decir las propiedades mecánicas del hierro gris pueden ser manejadas a nuestra voluntad, mediante combinaciones adecuadas de hierro, acero y Fe-Si.

- 3º.- Que para alcanzar de las fundiciones grises la máxima resistencia a la tracción, hay que procurar que la matriz sea perlítica y que las láminas de grafito sean pequeñas y estén bien distribuidas.

- 4º.- Que la utilización correcta de los resultados de éste trabajo, estará basado en la certeza de haber obtenido un material que posea una matriz perlítica.
- 5º.- Que dado el amplio rango de composiciones estudiadas los resultados obtenidos son aplicables a la mayoría de las aleaciones hierro-carbono-silicio de uso comercial.
- 6º.- Que es preferible determinar las Propiedades del material mediante el uso de los gráficos y ecuaciones deducidas en función del C_e ; usando aquellas deducidas para la cuña de temple únicamente como comprobación en caso de duda de los resultados obtenidos, o cuando debido a que no se pudo controlar la carga, el único dato con que se cuente, sea un espesor de temple.
- 7º.- Que los espesores de fundición deberán estar comprendidos entre los 12 y 40 mm. existiendo un cierto aumento en las propiedades del material para espesores menores a 30 mm. y una disminución de las mismas para aquellos mayores a 30 mm.)
- 8º.- Que sólo el control de cada una de las etapas del proceso de fusión del hierro, nos garantizará la obtención de un material de calidad.
- 9º.- Se comprueba que las fundiciones, a diferencia de los aceros, no son materiales absolutamente fiables, en cuanto a la proporcionalidad entre la dureza y la resistencia, por lo que las conclusiones tendrán únicamente validez estadística.

RECOMENDACIONES

- 1^o.- Que empleen el método aquí desarrollado como una orientación para mejorar la calidad de las fundiciones grises.
- 2^o.- Es necesario el control de los materiales de carga y fundamental el conocimiento de la composición química de los mismos; por tanto se recomienda el uso de chatarra automotriz, acero A-36 y evitar el empleo de retornos de fundición, si se desea poder estimar mediante cálculo de carga, con cierta aproximación, propiedades del material para usos de ingeniería.
- 3^o.- Que se use la cuña ASTM W3, por ser la más indicada para los trabajos de fundición que se realizan en nuestro medio.
- 4^o.- No sobrepasar una carga de 30 % de acero, sinó se usa inoculación debido a la presencia de cementita libre para porcentajes mayores de éste elemento.

En caso de hacerlo consultar técnica de inoculación descrita en Tesis de Grado del Ing. Juan Zeballos.

T A B L A S E M P L E A D A S

TABLA VI

Equivalencias aproximadas entre el número de dureza, Rockwell, Brinell, Vickers y Shore
 Grupo DUREZA ALTA (de 50 a 263 kgs. mm²)

R O C K W E L L						Bola 1/16 D	B R I N E L L				Vickers Diamante 126° 50	Shore Esclero- scopos	RESIS- TENCIA Kgs. mm ²
Diamante de 120°							Bola de 10		Bola de 2,5				
C 150	D 100	A 60	45 N 45	30 N 10	15 N 15		3000	Huefía	187,5	Huefía			
68	76,9	85,6	75,4	84,4	93,2	780	2,20			940	100		
67,5	76,6	85,3	74,8	84	93	772	2,21			920	98		
67	76,1	85	74,2	83,6	92,9	774	2,22			900	97		
66,4	75,7	84,7	73,8	83,1	92,7	760	2,23			880	95		
65,9	75,3	84,4	73,1	82,7	92,5	752	2,24			860	94	263	
65,3	74,8	84,1	72,2	82,2	92,3	745	2,25			840	93	260	
64,7	74,3	83,8	71,8	81,7	92,1	733	2,27			820	92	242	
64	73,8	83,4	71	81,1	91,8	722	2,29			800	91	252	
63,3	73,3	83	70,2	80,4	91,5	710	2,30			780	89	248	
62,5	72,6	82,8	69,4	79,7	91,2	698	2,32			760	88	244	
61,8	72,1	82,2	68,6	79,1	91	684	2,35			740	87	239	
61	71,5	81,8	67,7	78,4	90,7	670	2,37			720	86	234	
60,1	70,8	81,3	66,7	77,8	90,3	658	2,40			700	85	229	
59,7	70,5	81,1	66,2	77,2	90,1	647	2,42			690	84	226	
59,2	70,1	80,8	65,7	76,8	89,8	638	2,44			680	83	223	
58,8	69,8	80,5	65,3	76,4	89,7	630	2,45			670	82	220	
58,3	69,4	80,3	64,7	75,9	89,5	620	2,46			660	81	217	
57,8	69	80	64,1	75,5	89,2	611	2,48			650	79	213	
57,3	68,7	79,8	63,5	75,1	89	601	2,50			640	78	210	
56,8	68,3	79,5	63	74,8	88,7	591	2,52			630	77	208	
56,3	67,9	79,2	62,4	74,2	88,5	582	2,54			610	76	203	
55,7	67,5	78,9	61,7	73,6	88,2	573	2,55			600	75	200	
55,2	67	78,6	61,2	73,2	88	564	2,57			590	75	197	
54,7	66,7	78,4	60,5	72,7	87,8	554	2,60			580	74	193	
54,1	66,2	78	59,9	72,1	87,5	545	2,62			570	73	189	
53,6	65,8	77,8	59,3	71,7	87,2	536	2,65			560	73	187	
53	65,4	77,4	58,6	71,2	86,9	526	2,67			550	72	183	
52,3	64,8	77	57,6	70,6	86,5	517	2,70			540	71	180	
51,7	64,4	76,7	57	70	86,3	507	2,72			530	70	177	
51,1	63,9	76,4	56,2	69,6	86	497	2,75			520	69	174	
50,6	63,5	76,1	55,6	69	85,7	488	2,77			510	68	170	
49,8	62,9	75,7	54,7	68,3	85,4	479	2,80			500	67	167	
49,1	62,2	75,3	53,9	67,7	85	471	2,82			490	66	164	
48,4	61,6	74,9	53,1	67,1	84,7	460	2,85			480	65	161	
47,7	61,3	74,5	52,2	66,4	84,3	452	2,87			470	64	158	
46,9	60,7	74,1	51,3	65,7	83,9	442	2,90			460	63	154	
46,1	60,1	73,8	50,4	64,9	83,6	433	2,92			450	61	151	
45,3	59,4	73,3	49,4	64,3	83,2	425	2,95			440	59	148	
44,5	58,8	72,8	48,4	63,5	82,8	415	3,00			430	57	146	
43,6	58,2	72,3	47,4	62,7	8,3	405	3,05			420	56	141	
42,7	57,5	71,8	46,4	61,9	81,8	397	3,08	80	0,77	410	55	138	
41,8	56,8	71,4	45,3	61,1	81,4	388	3,09	79	0,78	400	55	135	
40,8	56	70,8	44,1	60,2	80,8	379	3,15	78,5	0,79	390	54	132	
39,8	55,2	70,3	42,9	59,3	80,3	369	3,17	78	0,80	380	53	129	
38,8	54,4	69,8	41,7	58,4	79,8	360	3,20	77	0,81	370	52	126	
37,7	53,8	69,2	40,4	57,4	79,2	350	3,25	76	0,82	360	51	122	
36,6	52,8	68,7	39,1	56,4	78,6	341	3,30	75	0,83	350	49	119	
35,5	51,9	68,1	37,8	55,4	78	331	3,35	74	0,84	340	48	115	
34,4	51,1	67,6	36,5	54,4	77,4	322	3,40	73	0,85	330	47	112	
33,3	50,2	67	35,2	53,6	76,8	313	3,45	72	0,86	320	46	109	
32,2	49,4	66,4	33,9	52,3	76,2	303	3,50	71,5	0,87	310	45	106	
31	48,4	65,6	32,5	51,3	75,6	294	3,55	71	0,88	300	44	102	
29,8	47,5	65,2	31,1	50,2	74,9	284	3,60	70	0,89	295	43	99	
29,2	47,1	64,8	30,4	49,7	74,6	280	3,65	69	0,90	290	42	98	
28,5	46,6	64,5	29,5	49	74,2	275	3,70	68	0,91	285	40	96	
27,8	46	64,2	28,7	48,4	73,8	270	3,70	67	0,92	280	39	94	
27,1	45,3	63,8	27,9	47,8	73,4	265	3,75	66	0,93	275	38	92	
26,4	44,9	63,5	27,1	47,2	73	261	3,75	65	0,94	270	37	91	
25,6	44,3	63,1	26,2	46,4	72,6	256	3,80	64,5	0,95	265	36	89	
24,8	43,7	62,7	25,2	45,7	72,1	252	3,80	64	0,96	260	36	88	
24	43,1	62,4	24,3	45	71,6	247	3,85	63	0,97	255	35	86	
23,1	42,2	62	23,2	44,2	71,1	243	3,90	62	0,98	250	35	85	
22,2	41,7	61,6	22,2	43,4	70,6	238	3,95	61	0,99	245	34	83	
21,3	41,1	61,2	21,1	42,5	70,1	233	3,95	60	1,00	240	33	81	
20,3	40,3	60,7	19,9	41,7	69,6	228	4,00	59	1,01	235	32	80	

TABLA VII

Equivalencias aproximadas entre el número de dureza, Rockwell, Brinell y Vickers
Grupo DUREZA MEDIA (de 37 a 79 kg. mm²)

Dureza 132°	ROCKWELL						BRINELL					Vickers Dureza 130°	Reala- tional Kgs. mm ²		
	BOLA DE 1/16						BOLA DE 1/8		BOLA DE 1/4		BOLA DE 1/2				
	A 60	G 100	B 100	P 60	45 T 45	30 T 30	15 T 15	K 150	B 100	2000	Usella			500	137,5
80	79	98		70	81	92,5			228	4,05	189	58	1,01	235	79
69,5	77,5	97		69	80,5	92			222	4,07	184	57	1,01	231	77
69	76	96		68	80	92			218	4,10	179	56	1,02	233	75
68	74	95		67	79,5	92			210	4,15	175	55	1,03	215	73
68	73	94,5		66,5	79	91,5			208	4,20	174	54	1,05	215	72
67,5	72,5	94		66	78,5	91			204	4,26	171	53	1,06	211	71
67	71	93		65,5	78	91			200	4,27	169	52	1,07	207	70
67	70	92,5		65	78	91			197	4,30	167	51	1,08	207	68
66,5	69	92		64,5	77,5	90,5	100		193	4,35	164	50	1,09	199	67
66	67,5	91		63,5	76,5	90	99,5		190	4,37	160	49	1,10	195	65
66	67	90,5		63	76	90	99,5		187	4,40	157	48	1,11	195	65
65,5	66	90		62,5	75,5	89,5	98,5		184	4,45	154	47	1,12	189	64
66	64	89		61,6	75	89	98		181	4,47	152	46	1,13	185	63
64,5	63	88,5		61	74,5	89	97,5		178	4,50	151	45	1,14	185	62
64	62	88		60,5	74	88,5	97		176	4,55	148	44	1,15	183	61
63,5	61	87		59,5	73,5	88,5	96,5		172	4,57	145	43	1,16	177	60
63	59	86		58,5	73	88	95		169	4,60	143	42	1,17	173	59
63	58	85,5		58	73	88	95		167	4,65	142	41	1,18	173	58
62,5	57	85		57,5	72	87,5	94,5		164	4,70	141	40	1,19	167	57
62	56	84		57	71,5	87	94		161	4,75	140	39	1,20	165	56
61	54	83		56	71	86,5	93		158	4,77	137	38	1,21	162	55
60,5	52	83		55	70	86,5	92		156	4,80	135	37	1,22	157	54
60	51	81		54	70	86	91		153	4,85	132	36	1,23	154	53
49,5	49	80		53	69,5	85	90,5		151	4,87	130	35	1,24	152	52
49	48	79,5		52,5	69	85,5	89,5		148	4,90	129	34	1,25	149	51
49	47	79		52	68	85,5	88,5		145	4,95	126	33	1,26	149	51
48,5	46	78		51	67,5	85	88,5		144	5,00	125	32	1,25	145	50
48	44	77		50	67	85	88		142	5,02	124	31	1,27	143	49
47	42	76		49	66	84,5	87		140	5,05	122	30	1,28	139	49
46,5	41	75	99,5	48,5	65,5	84,5	86		138	5,10	120	29	1,29	137	48
46	39	74	99	47,5	65	84	85		136	5,12	118	28	1,30	135	47
46	38	73,5	98,5	46,5	65	84	85		134	5,15	117	27	1,31	135	47
45,5	37	73	98	46	64,5	83,5	84,5		132	5,20	116	26	1,32	132	46
45	36	72	98	45,5	64	83,5	83,5		130	5,22	114	25	1,33	129	45
44,5	34	71	97,5	44	63,5	83	82,5	100	128	5,25	112	24	1,33	127	44
44	33	70,5	97	43,5	62,5	83	81,5	99,5	126	5,30	110	23	1,34	125	44
44	32	70	96	42,5	62	82,5	81,5	99	125	5,35	110	22	1,34	125	43
43,5	31	69	95,5	41,5	61,5	82	81	98,5	123	5,37	109	21	1,35	123	43
43	29	68	95	40,5	61	82	80	98	121	5,40	107	20	1,36	120	42
42,5	28	67	94,5	40	60,5	81,5	79	97,5	120	5,42	106	19	1,37	118	42
42	27	66,5	94	39,5	60	81,5	78	97	118	5,45	104	18	1,38	116	41
42	26	66	94	38,5	59,5	81	78	96	117	5,50	102	17	1,39	116	40
41,5	25	65	93,5	37,5	58,5	81	77,5	95,5	115	5,55	101	16	1,39	112	40
41,5	23	64	93	36,5	58	80,5	76,5	95	113	5,57	100	15	1,40	112	39
41	22	63	92	35,5	57	80,5	76	95	112	5,60	99	14	1,40	111	39
40,5	20	62	91,5	34,5	56,5	80	75	94,5	110	5,62	98	13	1,41	110	38
40	19	61	91	33,5	56	80	74	93,5	109	5,65	98	12	1,42	108	38
39,5	17	60	90,5	32	56	80	73	93	107	5,70	96	11	1,42	107	37
39	16	59	90	31	55,5	79,5	72	92,5	106	5,72	94	10	1,43	105	37

métodos, lo encontrarán acertado, como facilidad a su labor, mas es de esperar que los que gozan de ensayarlo por cualquier sistema, comprendan el objetivo y justifiquen su aprobación.

Se forman las tablas con base de tres escalas de dureza, o sea: primer grupo (dureza alta) de 80 a 263 kg/mm². Segundo grupo (dureza media) de 36 a 79 kg/mm². Tercer grupo (dureza baja) menos de 36 kg/mm².

El primer grupo es para el ensayo de aceros con tratamientos de bonificación, nitruración, cementación, temple, revenido, etc., y aleaciones especiales y fundiciones ferríticas y perlíticas, centrifugadas y endurecidas.

El segundo grupo cubre las durezas de metales férricos y no férricos con y sin tratamiento.

El tercero ya es sólo para ensayos de metales no férricos y muy ligeros.

TABLA VIII

Equivalencias aproximadas entre el número de dureza, Rockwell, Brinell y Vickers
 Grupo DUREZA BAJA (< 37 kgs. mm²)

Dureza 120°	ROCKWELL						BRINELL			Vickers Pirámido 136°		
	BOLA DE 1/16			BOLA DE 1/8			BOLA DE 10	BOLA DE 2,5				
	A 60	B 100	F 60	45 T 45	30 T 20	15 T 15	K 100	R 100	H 60		100	62,5
38,5	68	90	30,5	55	79,5	71,5	92		92	72	0,86	106
38	57	89,5	30	54,5	79	71	91		91	71	0,87	104
38	60	89	29	54	79	71	90,5		90	70	0,88	103
37,5	65	88	28	53	78,5	68,5	90		89	69	0,89	102
37	64	87,5	27	52,5	78,5	68	89,5		87	68	0,92	101
36	63	87	26	51,5	78	66	89		85	67	0,94	100
35,5	62	86,5	25	51	77,5	65	88		84	66,5	0,95	99
35	51	86	24	50,5	77,5	64,5	87		83	66,5	0,95	97
34,5	50	85,5	23	49,5	77	62,5	86		82	65	0,98	95
34	49	85	22	49	76,5	61,5	85		81	65	0,97	93
33,5	48	84,5	20,5	48,5	76,5	61	84,5		80	64	0,98	92
32,5	47	84	19,5	47,5	76	59	84		79	63,5	0,98	91
32	46	83	18,5	46	75,5	58	83,5		78	63	0,99	90
31,5	45	82,5	17,5	45,5	75	57,5	82,5		78	62,5	0,99	89
31	44	82	16,5	45	74,5	56,5	82		77	62	1,00	89
31	43	81,5	15,5	44	74	55	81		77	62	1,00	87
30,5	42	81	14,5	43,5	74	54,5	80		76	61,5	1,01	86
30,5	41	80,5	13,5	43	73,5	54,5	79,5		75	61	1,01	84
30	40	79,5	12,5	42	73	54	79		74	60	1,02	83
29,5	39	79	11	41,5	72,5	53	78,5	100	73	60	1,02	82
28,5	38	78,5	10	40,5	72,5	51,5	78	99,5	72,5	60,5	1,03	81
28	37	78	9	40	72	51,5	77	99	72	60	1,03	80
28	36	77,5	8	39,5	72	50,5	76,5	98,5	71	68,5	1,04	79
27,5	36	77	7	38,5	71,5	49,5	76	98,5	70	68	1,06	78
27	34	76,5	6	38	71,5	48,5	74	98	69	67,5	1,06	76
26,5	33	76	5	37,5	71	48	73,5	98	68,5	67	1,06	76
26	32	75	4	36,5	70,5	47	73	97,5	68	66,5	1,06	75
25,5	31	74	3	36	70	46	72,5	97,5	67	66	1,06	75
25	30	73,5	2	35,5	69,5	45	72	97	66,5	65,5	1,06	74
24,5	29	73	1	34,5	69	44,5	72	97	66	65	1,07	74
24,5	28	72,5		34	68,5	43,5	71,5	96,5	65,5	65	1,07	73
24	27	72		33	68,5	42,5	71	96,5	65	64,5	1,08	72
23,5	26	71		32,5	68	41,5	70	96	64	64	1,09	71
22,5	25	70,5		32	67,5	41	69	95,5	63,5	63,5	1,09	70
21	24	70		31	67,5	40	68,5	95,5	63	63	1,10	70
21,5	23	69,5		30,5	67	39	68	95	62,5	62,5	1,10	69
21	22	69		29,5	67	38	67,5	95	62	62	1,11	69
21	21	68,5		29	66,5	37,5	67	94,5	61,5	62	1,11	68
20,5	20	68		28,5	66,5	36,5	66,5	94	61	61,5	1,12	68
20	19	67		27,5	66	35,5	65,5	94	60,5	61,5	1,12	67
	18	66,5		27	65,5	35	65	93,5	60	61	1,12	66
	17	66		26	65,5	34	64,5	93	60,5	60,5	1,13	66
	16	65,5		25,5	65	33	64	93	59	60	1,13	66
	15	65		25	65	32	63,5	92,5	58,5	60	1,13	65
	14	64,5		24	64,5	31,5	62,5	92	58	49,5	1,14	65
	13	64		23,5	64	30,5	62	91,5	58	49	1,14	65
	12	63,5		23	63,5	29,5	61,5	91,5	57	49	1,14	64
	11	63		22	63,5	29	61	91	57	48,5	1,15	64
	10	62		21,5	63	28	60,5	90,5	57	48	1,15	64
	9	61,5		20,5	63	27	60,5	90	56	47,5	1,16	63
	8	61		20	62,5	26	60,5	90	56	47	1,17	63
	7	60,5		19,5	62,5	25,5	60,5	89,5	55	47	1,17	63
	6	60		18,5	62	24,5	60	89	55	46,5	1,18	62
	5	60,5		18	62	23,5	60	89	55	46,5	1,18	62
	4	59		17	61,5	23,5	60,5	88,5	54	46	1,18	62
	3	58		16,5	61,5	23	60	88	54	45,5	1,19	61
	2	57,5		16	61	22	60,5	87,5	53	45	1,19	61
	1	57		15	61	22	60	87,5	53	44	1,20	61

BIBLIOGRAFIA

1. APRAIZ JOSE, Fundiciones, editorial Dossat, Madrid, 1977, 116 p.
2. AVNER S., Introducción a la metalurgia física, Mc. Graw-Hill, México, 1975.
3. CAPELLO E., Tecnología de la fundición, editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1974.
4. ENRIQUEZ JOSE LUIS, El análisis térmico de la fundición y las propiedades de la misma, CENIM, Madrid, 1978.
5. FORTINO D., La metallografía della ghisa, La fonderia italiana, Roma, número 10, 1971, 29 p.
6. FLOR JACINTO, Obtención de hierro nodular en horno de crisol, ESPOL, Guayaquil, 1977.
7. HEINE-LOPER-ROSENTHAL, Principles of metal casting, Mc. Graw-Hill, A. F. S. 1967, 70 p.
8. JIMENEZ SECO, Métodos de análisis químicos unificados para hierros, aceros y ferroaleaciones, CENIM, Madrid, 43 p.
- 9.- NORMA UNE 36117, Clasificación del grafito en las fundiciones, Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo, Madrid, 7 p.
10. SOLE FRANCISCO, Dureza de los metales, Instituto del hierro y del acero, año XIII, número 69, Julio 1960, 9 p.

11. VITERI-CEVALLOS-SERRANO, Guía de Laboratorio de materiales de ingeniería, ESPOL, Guayaquil, 1977
12. ZEBALLOS JUAN, Estudio de los cambios estructurales en hierros grises por medio de inoculación, ESPOL, Guayaquil, 1981.