

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Departamento de Ingeniería Mecánica

Area Metal Mecánica

T
669.1443
F632
2.3



OBTENCION DE HIERRO NODULAR EN HORNO DE CRISOL

TESIS:

Que para obtener el Título de Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

JACINTO AURELIO FLOR DIAZ

Guayaquil, Julio de 1.977



175

- i -
CORDATORIA DE DEVOLUCIÓN

DE HIERRO NODULAR EN HORNO DE CRISOL



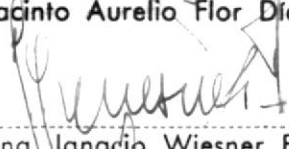
D-5002



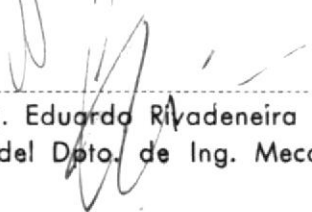
Firma del Autor


Jacinto Aurelio Flor Díaz

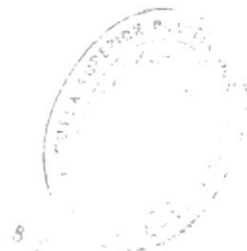
Certificado por:


Ing. Ignacio Wiesner F.

Aceptado por:


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

OBTENCION DE TIEMPO MODULAR EN HORAS DE CLASE



Firma del Autor

Jacinto Aurelio Flor Díaz

Certificado por:

Ing. Ignacio Wiesner F.

Aceptado por:

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



DECLARACION EXPRESA

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, corresponden exclusivamente a su autor, y el patrimonio intelectual de la misma corresponde a la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

(Reglamento de exámenes y títulos -
Profesionales de la Escuela Superior
Politécnica del Litoral).

DEDICATORIA

A mis padres:	Sin cuyo amor y sacrificios nunca
Alfredo e Isabel	hubiese alcanzado tan anhelada meta

A mi esposa	Que con amor supo fortalecer mi <u>es</u>
Marina:	píritu hasta lograr la culminación
	de mi carrera.

A mis hijos:	Que este trabajo les sirva de <u>estí</u>
Jacinto y José	mulo para que hagan uno mejor.

A mis hermanas:	Con inmenso cariño
Teresa y Carmen	

A todos mis	Con especial afecto.
Familiares.	

AGRADECIMIENTO

Es deseo del autor dejar constancia de su agradecimiento a todos sus profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica de la ESPOL por las enseñanzas recibidas, en particular a quienes conforman el area de Metalurgia Mecánica; a los Ingenieros Antonio Viteri y Marcelo Espinoza por haber prestado las debidas facilidades para el uso de los equipos de Laboratorio y del Taller Mecánico de la Espol, a los señores Luis y William Acuña, principales de la "Fundición Acuña" por la generosa colaboración que brindaron permitiendo efectuar las prácticas experimentales en sus instalaciones, a "Coteín" en la persona de su principal Ing. Freddy Cevallos B., por el uso del Taller Mecánico en la elaboración de probetas para ensayos.

Agradece también a los Ingenieros Harry B. Shephard y Alvaro Tinajero, Gerente General y de Operaciones respectivamente de la Empresa Eléctrica del Ecuador por el apoyo y estímulo brindados, factores que coadyuvaron a hacer factible la culminación del presente trabajo.

De manera muy especial presenta su profundo agradecimiento al Director de Tesis Ing. Ignacio Wiesner F. por su decidido apoyo, guía y dirección tanto en las pruebas experimentales como

.../...

en el análisis de los resultados obtenidos. El agradecimiento a todas estas personas y entidades es de tal magnitud - que no es posible pueda ser expresado en estas breves y sencillas líneas.

R E S U M E N

En el presente trabajo se hace un estudio experimental sobre la tecnología de producción de hierro nodular en horno de crisol con combustible líquido a partir de retornos de nodular procedente de cigueñales automotrices (Ct 3.55, Si 2.5, P 0.05, S 0.01, Mn 0.6), modificados con aleaciones de alto contenido de magnesio (EZ 33A) e inoculados con Ferrosilicio comercial al 75% o aleaciones comercialmente preparadas por Foseco (inoculín).

Se ha demostrado que las propiedades mecánicas del hierro ba se se pueden alterar sustancialmente por el proceso llevado a cabo, produciéndose una variación de resistencia a la trac ción del hierro gris de 41.59 Kg/mm.² al nodular de 65 Kg/mm² con un mejoramiento de la ductilidad que va desde 0.01% a 6%.

Además, se demostró también que la resistencia a la tracción y elongación del material se pueden controlar a través del - manejo de la composición de Silicio que es el único elemento con el cual se puede variar los porcentajes de ferrita y perlita en la matriz del hierro nodular.

I N D I C E

TITULO	i
DECLARACION EXPRESA	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN	v
CAPITULO I	
A.- Introducci3n	1
CAPITULO II	
IMPORTANCIA TECNOL6GICA DEL HIERRO NODULAR	
A.- Generalidades	4
B.- Proyecci3n del Hierro Nodular en aplicaciones industriales.	7
C.- Propiedades mecánicas y tecnológicas	8
CAPITULO III	
METALURGIA BASICA	
A.- Introducci3n	20
B.- Análisis de una aleaci3n Fe-C-Si	
1 b.- Generalidades	24
2 b.- Comportamiento de la aleaci3n en la solidificaci3n	31
3 b.- Factores que influyen en la formaci3n de grafito esferoidal	34

C.- Definición de los componentes estructurales de los hierros nodulares.	41
--	----

CAPITULO IV

OBTENCION DEL HIERRO BASE



A.- Introducción	63
B.- Selección del equipo de fusión ✓	65
C.- Selección y control de materiales de carga ✓	68
D.- Influencia de los elementos primarios, de aleación, residuales y de propósito especial. ✓	69
E.- Desulfuración del hierro base ✓	82

CAPITULO V

TRATAMIENTO MODIFICADOR DE ESTRUCTURAS DEL HIERRO BASE

A.- Introducción	84
B.- Aleaciones de tratamiento para cambio de estructura	86
C.- Técnicas del tratamiento modificador	89
D.- Tratamiento de inoculación	98

CAPITULO VI

TRABAJO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS OBTENIDOS

A.- Introducción	103
B.- Elaboración del hierro base	106
1.b. Materias primas usadas	107
2.b. Cálculo de cargas con ajustes a composición química	112
3.b. Control de composición química por medio de carbono equivalente y cuñas de temple.	119
C.- Proceso de modificación de estructura e inoculación	127
D.- Muestreo de hierro nodular para ensayos mecánicos y metalográficos.	129
E.- Control de Calidad	134
1.e. Ensayos metalográficos	135
1.e.1. Metalografía sin ataque	140
1.- Tamaño de nódulos de grafito	140
2.- Porcentaje de nodularización	141
3.- Tipo de grafito nodular	142
4.- Distribución de nódulos	142
2.e.2. Metalografía con ataque	147
2.e. Ensayos de dureza	148
3.e. Ensayos Mecánicos	151
4.e. Análisis químicos	158
F.- Discusión de los resultados	169

CAPITULO VII

Conclusiones y Recomendaciones

183.

Diagramas y Tablas

Bibliografía

BIBLIOTECA



CAPITULO I



CAPITULO I

INTRODUCCION

La manufactura de fundiciones de hierro gris, es una industria muy antigua y que se remonta sobre los 2.000 años. El hierro fundido o hierro gris que es un nombre convencional que se ha dado a las aleaciones de hierro-carbono y silicio, consiste de láminas de grafito en una matriz de acero. Este material es muy frágil y posee poca ductilidad, es normalmente suave y maquinable con relativas bajas resistencias a la tensión cuando no es aleado.

En los comienzos del siglo XIX se desarrolló la técnica para obtención de hierrostales que se logran producir a partir de una aleación de hierro con contenidos bajos de carbono y silicio, la misma que se somete a un tratamiento térmico de recocido para lograr la descomposición de la cementita en hierro y en carbono, lo cual produce el cambio de las propiedades originales de fragilidad en mayor resistencia y ductilidad. A este tipo de material se lo denominó hierro maleable.

El desarrollo de los primeros procesos de producción directa de hierro en el cual el grafito libre aparece en forma nodu

lar, fue introducido por H. Morrogh de la British Cast Iron Research Association en Julio de 1949, utilizando el Cerio como agente modificador o nodulizante. Debido a que tuvo - serios problemas de control y alto costo del producto el - proceso se efectuó pero no se lo desarrolló ni difundió.

En Mayo de 1950 la International Nickel Company, efectuó experiencias sobre la fundición de aleaciones de Fe-C-Si y utilizó magnesio como un estabilizador de carburos en el hierro gris; primero lo utilizó casi puro, pero por la violencia de la reacción, decidió usar magnesio en aleación generalmente con cobre o níquel. Cuando estas aleaciones de magnesio fueron añadidas al hierro gris, un material fundido de mayor resistencia y ductilidad fue obtenido. Este fenómeno los - llevó a efectuar una microexaminación del material habiéndose revelado la presencia del grafito en forma nodular o esferoidal. De esta forma se introdujo el proceso de elaboración de hierro dúctil tratado con aleaciones de magnesio hasta con seguir lo que hoy día es un material de fundición que consiste en una matriz de acero combinada con grafito en forma de nódulos o esferoides y que es un nuevo elemento de los que disponen los ingenieros diseñadores para sus requerimientos en - la producción de equipos ya sean automotrices, agrícolas, máquinas herramientas, de construcción, motores diesel, etc.,



En el medio nacional, nuestros fundidores se han interesado durante algún tiempo en tratar de obtener este tipo de material sin haber podido lograr resultados positivos. De allí nació el interés del autor del presente trabajo en introducirse en la técnica del proceso de elaboración de hierro nodular, pero a medida que se consultaba mayor información al respecto, la misma no indicaba específicamente la manera de trabajar con pequeñas producciones. Es aquí donde se define el objetivo de este trabajo.

El objetivo trazado está relacionado con la experimentación de una tecnología propia para la elaboración de hierro nodular en horno de crisol con combustible líquido a fin de que pueda ser aplicada en el medio de nuestros fundidores. Es por esto que se escogió una fundición artesanal de la ciudad de Guayaquil para lograr este cometido.



CAPITULO II



CAPITULO II

IMPORTANCIA TECNOLÓGICA DEL HIERRO NODULAR

A.- GENERALIDADES

1.1. La Malleable Founders Society de Estados Unidos, define al hierro nodular como: "Un miembro de la familia de los hierros fundidos en estado líquido, tratado con un material especial a fin de cambiar la forma del grafito laminar (estructura normal de solidificación) por un grafito esferulítico o nodular".

Esto quiere decir que este tipo de hierro se lo puede considerar como un miembro "noble" de la familia precitada, un poco aparte de sus congéneres formados por los hierros fundidos o grises.

En la comunidad nodular, sus miembros presentan características especiales que los identifican claramente, como ser: alta resistencia, alguna ductilidad y por supuesto su aspecto metalográfico que es de una estructura esferoidal.

La producción del hierro dúctil o nodular, es indudablemente un proceso muy joven, con una historia de solamente 25 años, lo que contrasta con la del hierro gris (el más anti

guo de todos) que se remonta a los 200 años o más; pese a su reciente uso como material de trabajo, su crecimiento ha sido vigoroso debido a su amplia y variada aplicación en el campo industrial.

Este material revolucionario, fue descubierto, independientemente; por la "BRITISH CAST IRON RESEARCH ASSOCIATION (BCIRA) en Julio de 1.946 por investigaciones realizadas por H. MORROUGH y por la INTERNATIONAL NICKEL COMPANY (INCO) en Marzo de 1.947.

El proceso de la BCIRA, consiste en la adición de Cerio al hierro fundido de constitución hipoeutéctica; este agregado remueve el azufre y con un 0.02% de Cerio residual, se provoca la modificación del grafito laminar (flake graphite) a grafito esferoidal (spheroidal graphite).

El proceso de la INCO, por otra parte, emplea Magnesio, en una forma similar a la anterior en hierros fundidos de naturaleza hipo e hipereutéctica.

Esta última práctica es la que se conoce ya universalmente como la "modificadora de la estructura típica laminar del hierro gris en hierro nodular".

El hierro dúctil que hoy se tiene en el mercado, es un

material de fundición que consta de una matriz de acero, poblada de grafito esferoidal (nódulos), por lo que se puede decir que combina las propiedades del acero y del hierro gris: (alta resistencia, tenacidad, ductilidad, aptitud de trabajo en caliente y endurecimiento) con bajo punto de fusión, buena fluidez y buena resistencia al desgaste.

Este material es muy versátil en su colado, es así que se pueden obtener piezas de pequeño espesor, tanto de 2mm. así como también piezas gruesas y de gran peso tanto como 50 toneladas.

La matriz de la microestructura puede controlarse tomando en consideración ciertos factores como ser: variaciones en la composición, razón de enfriamiento, y tratamiento térmico; de ésta forma se pueden producir materiales desde 60.000 lbs/pulg.² mínimos de resistencia a la tensión con elongación hasta 20% y de 150.000 lbs/pulg.² de resistencia a la tensión con elongaciones de 1 a 4%.

El mayor valor de elongación mencionado en primer lugar, se puede obtener con matrices completamente ferríticas y los valores de mayor resistencia y poca ductilidad se identifican en los nodulares con tratamientos térmicos de temple y nodulares aleados.

B.- PROYECCION DEL HIERRO NODULAR EN APLICACIONES INDUSTRIALES

La producción de hierro nodular para aplicaciones de las industrias automovilística, agrícola, de herramientas, de equipos de construcción, de rodillos de laminación, de motores diesel, de carcasas de motores eléctricos, de bombas, de válvulas, de rodillos, de orugas, etc., comenzó en la época de los años cincuenta y su crecimiento ha sido extremadamente rápido, debido a que ha encontrado un camino fácil de sustitución de los materiales tradicionales, como el hierro maleable y el acero fundido.

Las características y propiedades del hierro dúctil que hacen de él material de elección, son primordialmente: alta resistencia, alta absorción de vibraciones, buena cohesión y gran maquinabilidad.

Aunque existen muchos ejemplos en los cuales el hierro nodular reemplaza con éxito a materiales no-ferrosos, plásticos, etc. sus principales competidores son: el hierro gris, el hierro maleable y el acero fundido. Un análisis efectuado sobre la proyección de la demanda del hierro dúctil, se puede apreciar en la figura N° 1 en que se demuestra gráficamente los estudios hechos durante los últimos 25 años, de los volúmenes de producción de hierro maleable, acero fundido y de hierro dúctil en los Estados Unidos. La

curva de crecimiento de hierro nodular se incrementa de 1.7 millones a 2.2 millones de toneladas cortas al año y se puede observar la curva de predicción del volumen de producción futura que posee una pendiente considerable, ya que el hierro nodular continuará encontrando nuevas aplicaciones. Esto se confirma con los valores del cuadro N° 1 de la siguiente página.

Se ha hecho énfasis solamente en la producción de los Estados Unidos, pero no se debe dejar de mencionar otros productores en potencia como Japón, Alemania, Francia, Canadá, y la U.R.S.S. que se encuentran en períodos ascendentes, lo cual viene a contribuir al incremento de la producción mundial del hierro nodular.

C.- PROPIEDADES MECANICAS Y TECNOLOGICAS

1.c. Propiedades Mecánicas

El desarrollo de la tecnología del hierro nodular, ha puesto en muchos de los Ingenieros diseñadores, un material que combina las propiedades que otros también poseen, ya que tiene las características de colado del hierro gris, y la resistencia y ductilidad del acero.

Con respecto a sus propiedades mecánicas, las normas para los diferentes grados de hierro nodular se especifican

CUADRO Nº 1

CUADRO COMPARATIVO DE LAS EXPORTACIONES DE ESTADOS UNIDOS DE
ACERO FUNDIDO, HIERRO MALEABLE E HIERRO DUCTIL (TONELADAS
NETAS).

	<u>HIERRO DUCTIL</u>	<u>HIERRO MALEABLE</u>	<u>ACEROS FUNDIDOS</u>
1974	2,100,000	---	---
1973	2,248,000	1,030,000	1,843,000
1972	1,834,900	960,100	1,609,800
1971	1,712,900	882,800	1,587,100
1970	1,608,100	852,400	1,724,300
1969	1,285,600	1,157,000	1,899,000
1968	956,700	1,107,500	1,731,800
1967	866,800	1,039,900	1,857,400
1966	783,400	1,131,800	2,157,800
1965	585,000	1,136,400	1,961,300
1964	478,414	1,001,391	1,835,403
1963	373,359	932,951	1,503,762
1962	253,653	867,574	1,423,452
1961	175,472	723,498	1,216,580
1960	169,853	820,701	1,392,385
1959	167,316	916,362	1,412,885
1958	117,588	660,650	1,121,000
1957	95,000	862,976	1,766,191
1956	---	951,868	1,931,987
1955	---	1,104,775	1,530,694
1954	---	822,016	1,184,096
1953	---	970,506	1,834,197
1952	---	926,120	1,925,203
1951	---	1,085,241	2,050,054
1950	---	942,224	1,480,587

Fuente: Bureau of Census, U.S. Dept. of Commerce.

CUADRO COMPARATIVO DE PRODUCCION DE HIERRO NODULAR CON OTROS MATERIALES DE ALEACION

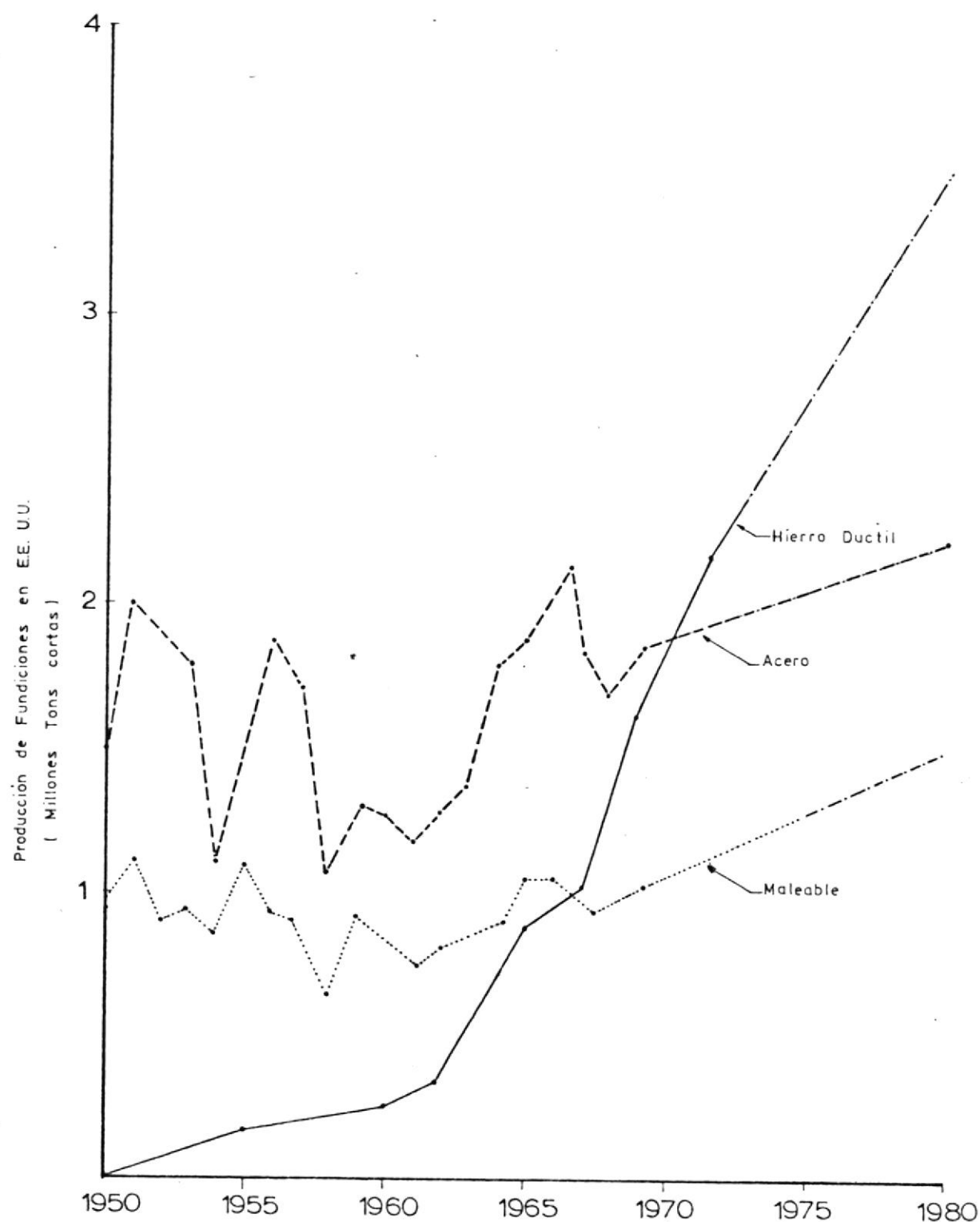


Figura 1.- Volúmenes de producción anual de acero, hierro maleable y hierro dúctil entre 1950 y 1976 con predicciones a 1980.

Fuente .- Ductile Iron "The State of the Art"
(Quebec Iron and Titanium Corp.)

con tres números; el primero, indica la resistencia máxima en el ensayo de tracción; el segundo, da a conocer la resistencia a la fluencia y; finalmente el tercero, indica el porcentaje de elongación. Las durezas comunes de éstos materiales, se los efectúa por medio del ensayo brinell.

El cuadro Nº 2, examina 5 grados comunes de hierro dúctil con relación a las propiedades mecánicas y microestructuras, éstas son normalizaciones americanas (A.S.T.M.)

El cuadro Nº 3 detalla las aplicaciones industriales de cada uno de los grados comunes de hierro dúctil enumerados anteriormente.

CUADRO Nº 2

GRADOS COMUNES DE HIERRO DUCTIL

TIPO *RT-RF-% EL	RESISTENCIA A TRACCION (psi)	RESISTENCIA A FLUENCIA. (psi)	ELONGACION %	DUREZA BRINELL	TRATAMIENTO TERMICO.	MICROESTRUCTURA TIPICA.
60-40-18	60.000	40.000	18	137-170	RECOCIDO	FERRITICO
65-45-12	65.000	45.000	12	149-229	-----	FERRITICO
80-55- 6	80.000	55.000.	6	179-255	-----	FERRITICO PERLITICO
100-70- 3	100.000	70.000	3	229-302	NORMALIZADO	PERLITICO
120-90- 2	120.000	90.000	2	250-350	TEMPLADO Y REVENIDO	MARTENSITA REVENIDA

* RT = Resistencia a la Tracción
 RF = Resistencia a la Fluencia
 % EL = Porcentaje de Elongación

Cuadro Nº 2.- Especificaciones de propiedades mecánicas y estructuras típicas de grados comunes de hierro dúctil.

CUADRO Nº 3

APLICACIONES, ESPECIFICACIONES Y PROPIEDADES DEL HIERRO DUCTIL

CARACTERISTICAS POR GRADO	APLICACIONES
<u>Grado 60-40-18 (Recocido)</u> Es generalmente tratado térmicamente aunque puede usarse sin él, Estructura ferrítica. Fácilmente reemplaza al maleable ferrítico y al acero de bajo C.	Válvulas, acoples, implementos agrícolas y partes de camiones y autos donde se requiere ductilidad y propiedades para impacto.
<u>Grado 65-45-12</u> Con o sin tratamiento de recocido. Estructura esencialmente ferrítica. Es tenáz y maquinable. - Reemplaza al acero o al maleable.	Cuerpo de válvulas y compresores, lingoteras, acoples de tuberías, cuerpos de bombas, partes automotrices y de implementos agrícolas.
<u>Grado 80-55-06</u> Sin tratamiento, estructura perlítica, con buena maquinabilidad y tenacidad. Puede producir superficies duras al contacto con enfriadas (chill), puede soldarse y soporta severos esfuerzos	Piñones, levas, cojinetes, pistones, cigueñales dados para fundición a presión, partes para diesel, aeronáutica, agricultura, maquinaria pesada, etc.

CONTINUACION DEL CUADRO N° 3

CARACTERISTICAS POR GRADO	APLICACIONES
<u>Grado 100-70-03</u>	
Usualmente normalizado y revenido, aunque con alenates se alcanzan las mismas propiedades - sin tratamiento. Estructura perlítica. Combinación de resistencia, tenacidad y resistencia al desgaste.	Piñones, cigueñales, levas dados, pistones, zapatas para camiones, maquinaria minera.
<u>Grado 120-90-02</u>	
Templado en aceite y recocido, aunque secciones mayores a 1.5". Se pueden normalizar y revenir. Se puede alear con Ni y Mo para lograr templabilidad en secciones gruesas.	Piñones, cigueñales, levas, dados, tambores embrague, rodillos, etc.

Es importante anotar que haciendo un análisis detallado de los cuadros presentados, se observa que, la microestructura presente en cada uno de los tipos de hierro dúctil, tiene radical influencia en el comportamiento mecánico de los materiales, con relación a la variación de durezas, resistencia a la tracción y elongación.

2.c PROPIEDADES TECNOLOGICAS.

1.- GENERALIDADES

En las normas correspondientes a hierro nodular de la A.S.M. (AMERICAN SOCIETY FOR METAL), tomo 1, se especifican en detalle cada una de las propiedades tecnológicas y de sus valoraciones comparadas con otros materiales, los cuales sirven como guía para apreciar las bondades de esta aleación y luego de ciertos análisis proceder a seleccionarlo como material adecuado para un determinado uso.

Se procederá a tratar sobre las más importantes propiedades tecnológicas del hierro dúctil y de cuadros comparativos de su comportamiento con respecto a materiales similares y a los cuales los ha desplazado por su versatilidad y por sus características excelentes.

MAQUINABILIDAD

La maquinabilidad del hierro dúctil, es superior a la de cualquier fundición gris de dureza equivalente y mejor que la de cualquier acero de similar nivel de resistencia, ya que su estructura celular siendo más homogénea que la del hierro gris, presenta una mejor distribución del grafito - que como bien se sabe es la característica de mejor maquinabilidad de los hierros fundidos comparada con la del acero, ya que el carbono en forma de grafito actúa como lubricante del corte y su forma esferoidal permite dar un mejor acabado superficial de las piezas maquinadas.

RESISTENCIA A LA CORROSION

La resistencia del hierro dúctil a un medio corrosivo ha sido demostrada ser equivalente a la de la fundición gris y - generalmente superior a la del acero.

RESISTENCIA AL DESGASTE

El grafito esferoidal que está contenido en el hierro dúctil, actúa como una reserva para almacenar lubricante en los períodos de arranque y para prevenir el engranamiento durante

períodos de falla real de la lubricación. Datos del comportamiento en servicio en camisas de cilindros, cigüeñales, rodillos de trabajo de metales, matrices y engranajes han demostrado que la resistencia al desgaste es igual al de las mejores calidades de hierro gris y superior a la del acero al carbono.

RESISTENCIA AL CHOQUE TERMICO

La fundición dúctil ferrítica puede ser calentada a temperaturas superiores de 1.300°F(705°C), y bruscamente enfriada en agua fría sin que se produzcan fisuras o rayaduras, lo cual no es factible de realizar con el hierro gris ya que se manifiestan fisuras por la severidad de enfriamiento.

RESISTENCIA AL IMPACTO

Los ingenieros diseñadores tienden a sobreestimar el valor de ductilidad cuando consideran que el material posee resistencia al impacto, (la que es definida como energía necesaria para producir una deformación permanente en una unidad de volumen de material Ft.Lb/pulg.³) esta resistencia al impacto es superior en el hierro dúctil que en el hierro

gris y el acero colado.

La figura N° 2 muestra un diagrama con valores correspondientes a deformaciones permanentes en orden ascendente en función del módulo de impacto para cuatro materiales: hierro gris, acero colado, hierro dúctil ferrítico e hierro dúctil perlítico.

Si se considera en la figura N° 2, un valor de 30 Lbs.ft/pulg.³ de energía aplicada, ésta causará aproximadamente 0,1% de deformación permanente en los cuatro materiales representados.

Pero si se incrementa la energía sobre 100 lbs.ft/pulg.³, solamente por la alta resistencia del hierro dúctil perlítico, su deformación se mantendrá en 0.2% y todas las demás se deformarán más allá de este límite.

COMPORTAMIENTO DEL HIERRO DUCTIL AL IMPACTO COMPARADO CON OTRAS ALEACIONES FERROSAS

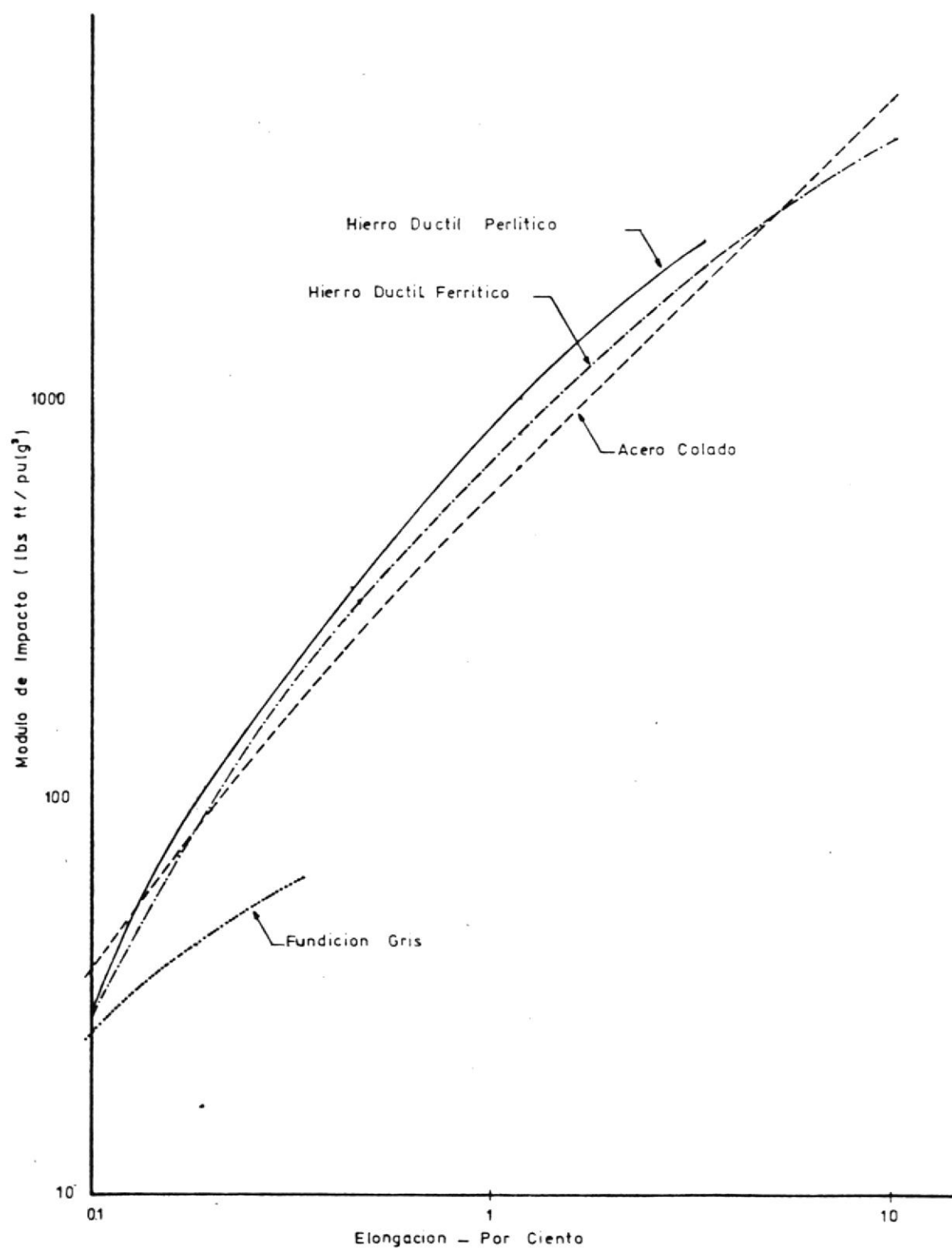


Figura 2.- Modulo de Impacto vs Elongación de cuatro aleaciones de fundición ferrosa.

CAPITULO III

CAPITULO III

METALURGIA BASICA

A.- INTRODUCCION

Existen cuatro tipos básicos de hierros fundidos, los cuales son diferenciados por su microestructura. No es un hecho práctico diseñar hierros fundidos por su análisis químico, porque los rangos en sus composiciones se superponen o traslapan, lo cual se puede apreciar observando el cuadro N° 4 y la Figura N° 3.

Las microestructuras típicas de los hierros se diferencian por la forma en que se halle presente el carbono en la matriz, ya sea en forma combinada de carburos, de grafito en láminas o en nódulos. De acuerdo con esta identificación se clasifican los hierros fundidos en Blanco, Maleable, Gris y Dúctil. La microestructura característica del Hierro Dúctil es variada y puede tener el grafito en forma de esferulitas (de Geometría bien definida), de esferoides (de forma aproximada a una esfera) y de nódulos (de forma indeterminada). En general, se denominará Hierro Nodular o Dúctil, al material que contenga en su estructura grafito en

CUADRO # 4

Elemento	HIERRO GRIS %	HIERRO BLANCO %	HIERRO MALEABLE %	HIERRO DUCTIL %
Carbono	2.5 - 4.0	1.8 - 3.6	2.00 - 2.60	3.0 - 4.0
Silicio	1.0 - 3.0	0.5 - 1.9	1.10 - 1.60	1.8 - 2.8
Manganeso	0.25- 1.0	0.25 - 0.80	0.20 - 1.00	0.10- 1.00
Azufre	0.02-0.25	0.06 - 0.20	0.04 - 0.18	0.03 max
Fósforo	0.05-1.0	0.06 - 0.18	0.18 max	0.10 max

Rangos de composición de los elementos
primarios para hierros Gris, Blanco, Ma
leable y Dúctil

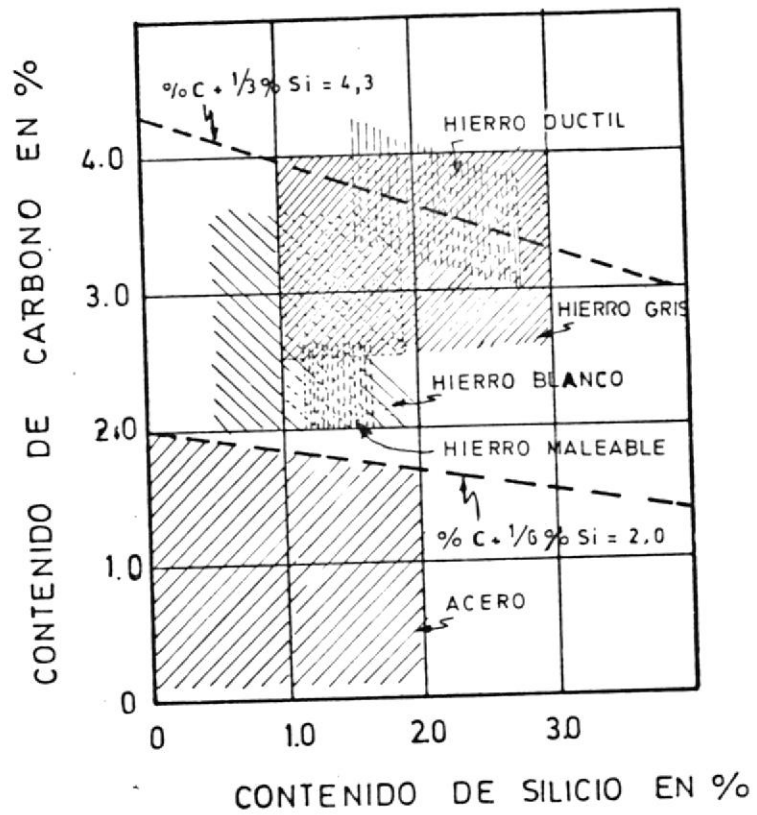


FIGURA N° 3

GRAFICO INDICADOR DE RANGOS DE
COMPOSICION DE LOS DIFERENTES TI-
POS DE FUNDICIONES

cualesquiera de los tres tipos mencionados.

Existen muchas hipótesis y teorías sobre la nucleación de grafito nodular en el Hierro fundido, B.Lux, científico de la International Nickel Company, resumió once teorías explicatorias de la modificación del grafito. Y la Miller - and Company de EE.UU. en su compendio IV sobre Hierro Dúctil, estableció la aceptación de cuatro que han sido desarrolladas en estos últimos años y que se las presenta a manera informativa:

- 1.- Nucleación del grafito debido a los inoculantes, que funcionan tal como en el hierro gris, o sea, consecuencia de una alta concentración de Silicio.
- 2.- Nucleación del grafito por adición de modificadores tales como Magnesio o Cerio en combinación con inoculantes (Post inoculación).
- 3.- Nucleación con burbujas de vapor de magnesio sin inoculantes.
- 4.- Nucleación provocada por partículas microscópicas de SiO_2 . Estas son reducidas a Si y burbujas de monóxido de carbono (CO_2) en el hierro. Los nódulos de grafito se forman en el interior de las burbujas.

Aunque los autores de cada una de las teorías existentes, exigen legitimidad de su explicación del proceso de nucleación, hay mucho desacuerdo entre ellos y es mejor pensar que la misma se - lleva a cabo por varias de las razones dadas.

Un examen crítico de los factores que influyen en la formación del grafito esferoidal en las aleaciones Fe-C-Si, requieren una comprensión de la nucleación y crecimiento del grafito en el seno del metal fundido.

Sería muy deseable conocer el motivo de la nucleación del grafito esferoidal, cuando se agreguen pequeñas cantidades de elementos como: magnesio, cerio, ictrium, calcio, potasio, sodio, etc. pero como ya se ha dicho, no hay explicación certera sobre este asunto.

Sin embargo, se conocen factores concernientes con la técnica - del trabajo, los que pueden ser usados como guía y comprensión que lleva a la formación del grafito esferoidal en los hierros nodulares.

B.- ANALISIS DE UNA ALEACION TERNARIA Fe-C-Si

1.b. GENERALIDADES

Los hierros fundidos se los conoce como aleaciones de Hierro y Carbono, en las cuales el Silicio promueve la formación de grafito.

Las relaciones entre las temperaturas y las fases en equilibrio son usualmente descritas por el conocido diagrama binario Fe-C, sin ninguna explicación de los cambios de fase introducidos por el tercer elemento Silicio. Hay muchos puntos que deben ser considerados en la estructura de un hierro fundido y que no pueden ser explicados satisfactoriamente por el usual diagrama Fe-C. Por estas razones y por el hecho de que actualmente se hace mucho énfasis en el uso de los datos de Carbono equivalente para control de colado del metal, los hierros fundidos son considerados como aleaciones ternarias consistentes de Fe-C-Si.

Los hierros fundidos comerciales como se estableció en el cuadro N° 4 y figura N° 3 pueden contener cantidades tan pequeñas de carbono como 2% y tan altas como 4%; los rangos de contenido de Silicio fluctúan entre 1.5 %

y 3%. Además del Carbono, el Silicio es el único de los - otros elementos de aleación que pueden ejercer una influencia dominante sobre el sistema en equilibrio; el efecto del Silicio sobre las propiedades mecánicas es similar como el que ejerce el Carbono pero no tan pronunciado. Esta actividad del Silicio se observa claramente en los diagramas - ternarios de fase que se ubican a continuación y que reflejan las variaciones sobre la fórmula del Carbono Equivalente (C.E.).

La composición eutéctica de la aleación Fe-C es 4.26% C, los valores menores de C, identifican a las aleaciones hipoeutécticas y las aleaciones mayores de 4.26% se consideran hipereutécticas. En estas circunstancias, cuando el Hierro contiene 0% de Silicio, la temperatura eutéctica es 2110°F (1143°C); las figuras N^o ~~5-6~~ representan los diagramas de equilibrio de un contenido de Silicio de 2% y 4%. Nótese que en general hay un incremento de las temperaturas de la línea de solidus con el consiguiente aumento de la temperatura eutéctica.

El efecto del tratamiento de magnesio, no cambia significativamente las características de solidificación de - los hierros fundidos, sino que altera la forma del grafito.

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO-CARBONO 0.0% SILICIO

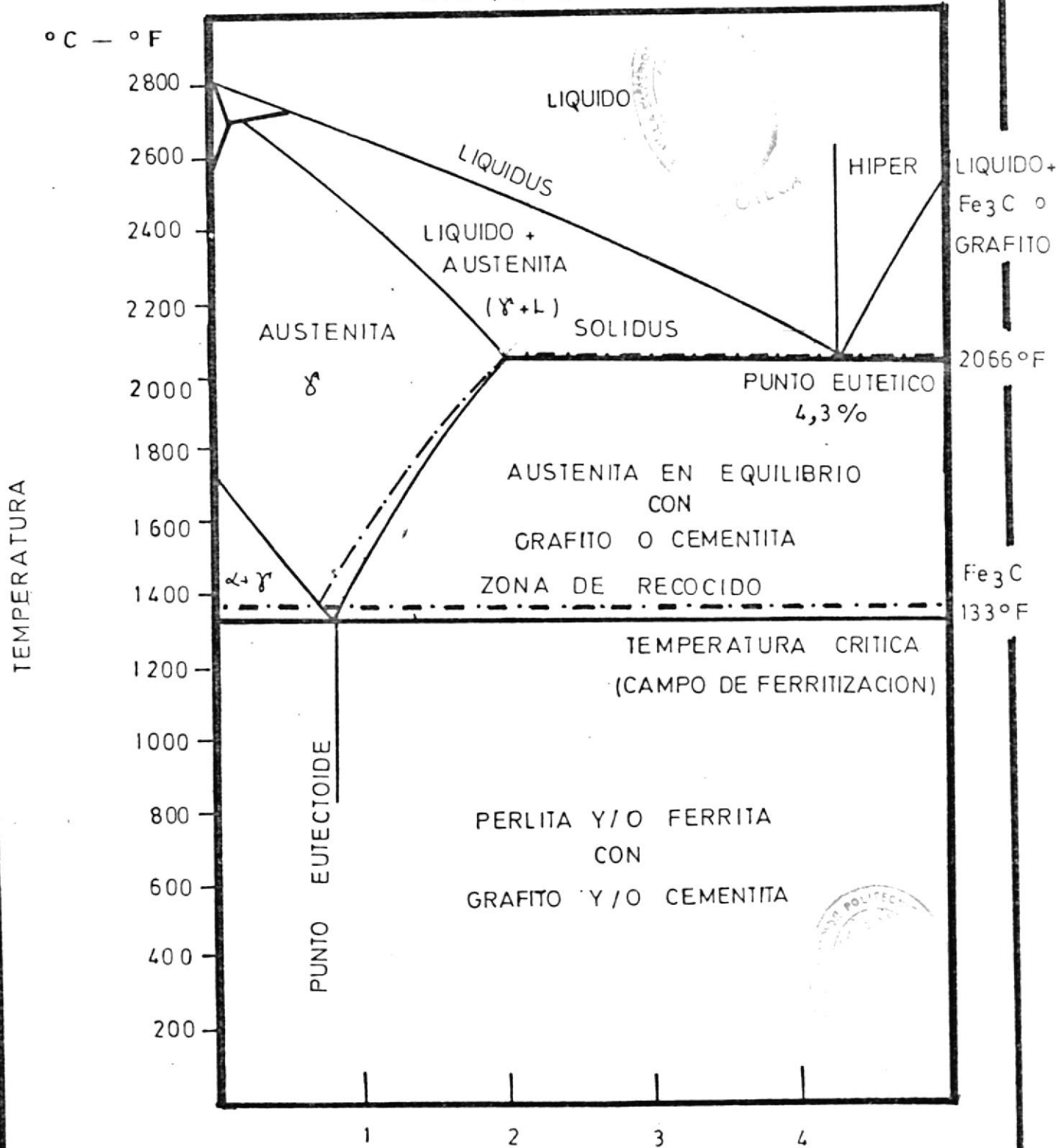


DIAGRAMA DE EQUILIBRIO

FIG Nº 4

DIAGRAMA HIERRO CARBONO **2.0% SILICIO**

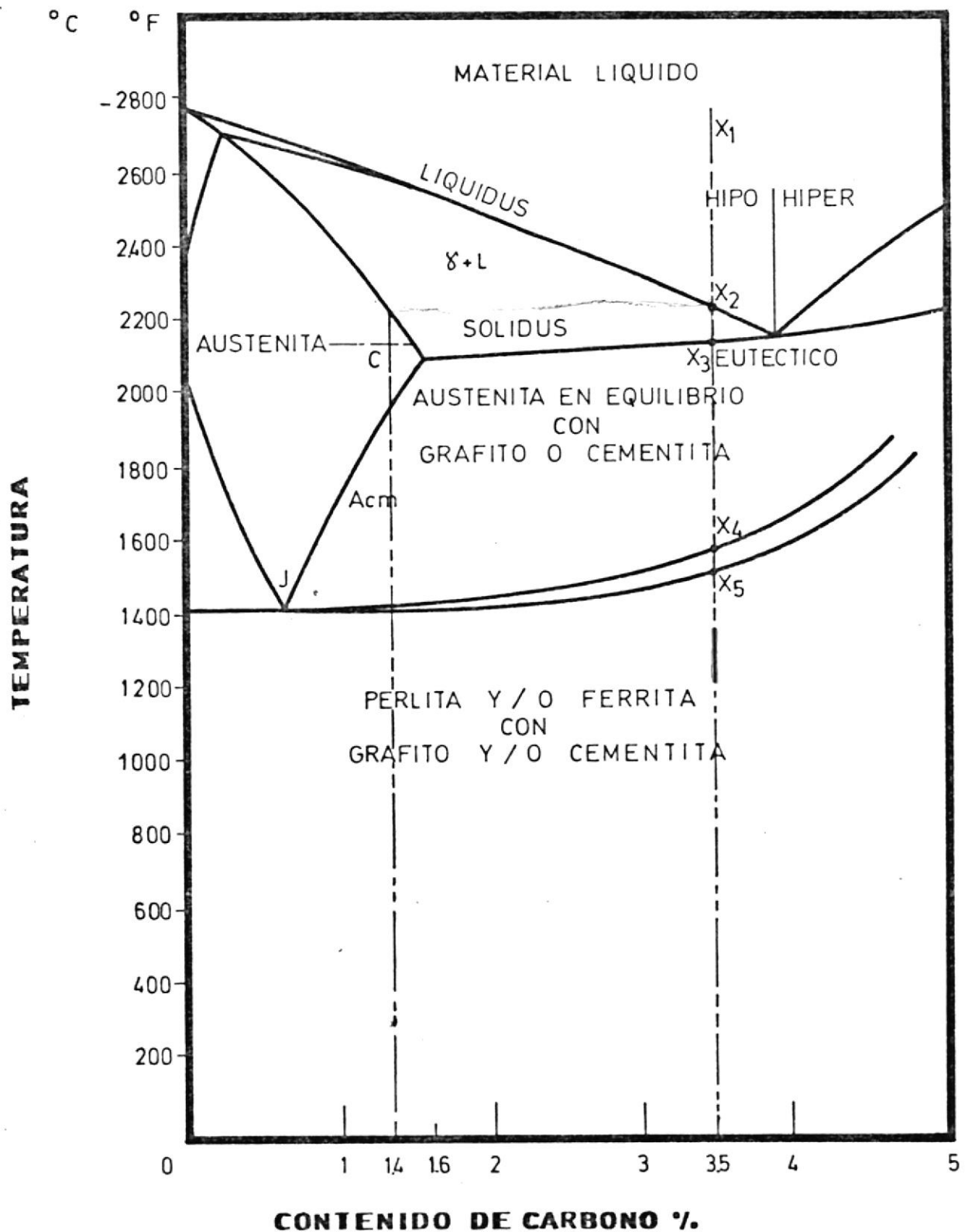


FIGURA Nº 5

DIAGRAMA HIERRO CARBONO

4.0 % SILICIO

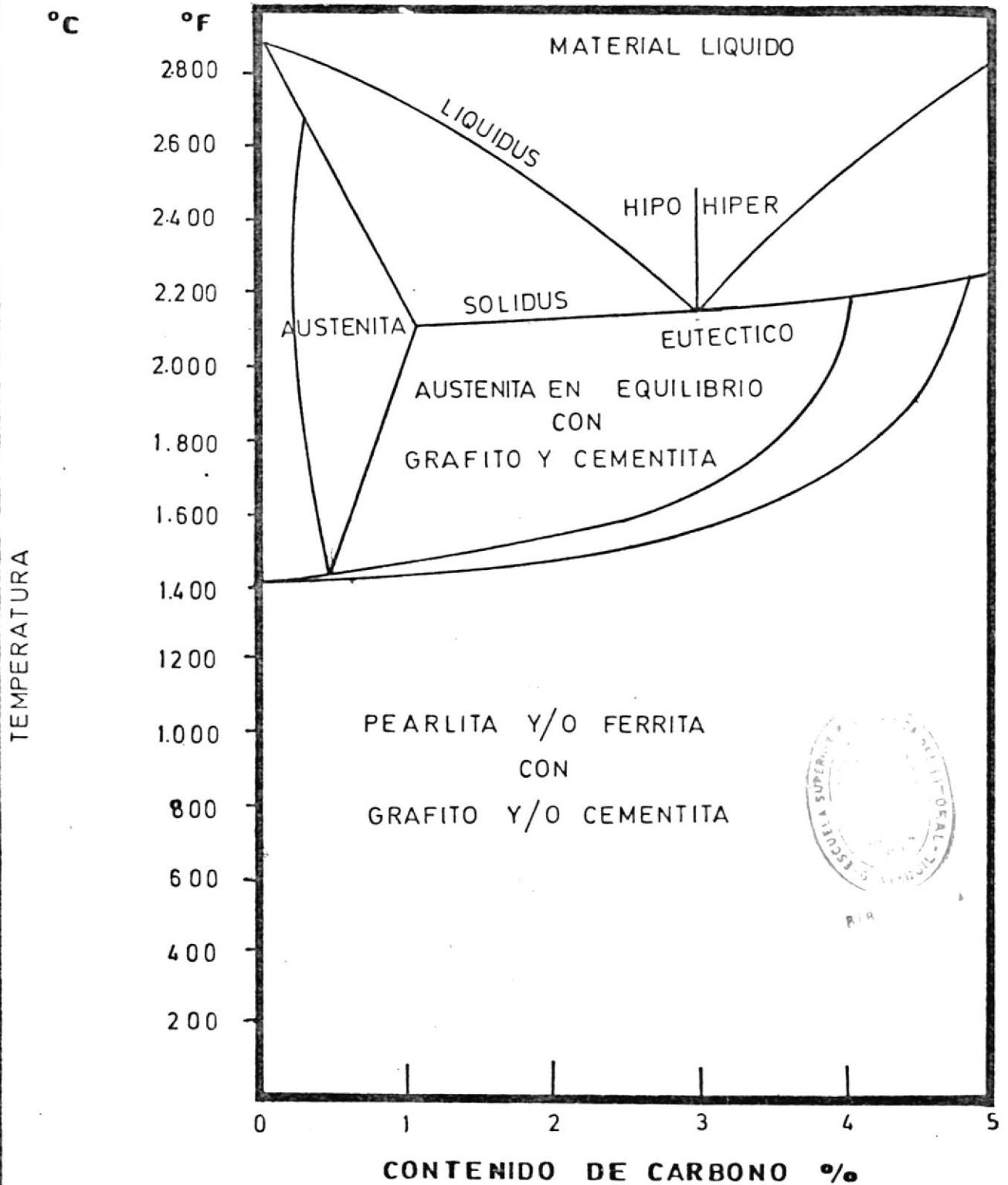


FIGURA Nº 6

Sin embargo, este tratamiento tiende a incrementar el sobreenfriamiento debajo de la temperatura de equilibrio de solidus. Esto es debido al extremado alto grado de nucleación presente en los hierros dúctiles por el efecto modificador del Magnesio y por la inoculación.

En el diagrama de equilibrio Fe-C, se muestra los cambios de fase de la aleación y sus relaciones entre las composiciones y temperaturas; se define la terminología usada - para interpretar estos diagramas, la misma que se enuncia a continuación:

<u>TERMINO</u>	<u>DEFINICION</u>
1.- Temperatura de Liquidus	La temperatura a la cual comienza la solidificación de la aleación.
2.- Temperatura de Solidus	La temperatura a la cual la solidificación de la aleación es completa.
3.- Eutéctico.	El punto de más baja temperatura de solidificación de la aleación. El Eutéctico en el hierro

dúctil se produce con 4.3% de carbono.

4.- Austenita

Es una solución sólida de carbono y Silicio en hierro y de estructura cristalográfica f.c.c. dureza media y buena resistencia, estable a altas temperaturas.

5.- Ferrita

Es una solución sólida de carbono en hierro α de estructura cristalina b.c.c., baja dureza y alta ductilidad.

6.- Cementita

Es un término usado para describir carburo de hierro (FeC_3). Es un compuesto intermetálico que contiene 6.67% de Carbono.

7.- Perlita

Este componente es producto de la descomposición de la Austenita (reacción eutectoide) durante el enfriamiento y está constituida por capas de cementita intercaladas con ferrita.

2.b. COMPORTAMIENTO DE LA ALEACION EN LA SOLIDIFICACION

Las transformaciones que tienen lugar en una aleación ternaria Hierro-Carbono-Silicio (Fe-C-Si), durante la solidificación y posteriormente durante el proceso de enfriamiento, son las que se indican en el diagrama de fases de la Figura # 5 de la página Nº 27, en la cual se tienen las modificaciones correspondientes por la influencia del 2% de Silicio existentes en la aleación.

Las mayoría de las aleaciones nodulares son eutécticas o hipoeutécticas, por lo que se analizarán las transformaciones que tienen lugar durante el enfriamiento, tomando como ejemplo una aleación con 3.5% de Carbono.

Esta aleación, en la temperatura correspondiente al punto X_1 , está constituida por una solución líquida homogénea - de Carbono y Silicio en hierro en estado líquido también, y permanece en ese estado hasta cuando la temperatura corta el punto X_2 de la línea de liquidus; en este momento comienza la solidificación y se precipitan cristales de Austenita de aproximadamente 1.4% de Carbono.

Al seguir descendiendo la temperatura, nuevos crista-

les de Austenita primaria, precipitan a partir del líquido con composiciones de Carbono cada vez más creciente hasta llegar a aceptar como máximo 1.6% de Carbono correspondientes a la temperatura eutéctica que en este caso que se trata de Hierro con alta aleación de Silicio no es constante, es decir, varía con el contenido de Carbono y para 3.5% de Carbono el eutéctico se presenta a 2.130°F (1.165°C).

A la Temperatura de formación del Eutéctico anteriormente mencionada, la aleación está formada por dendritas de Austenita con un contenido de Carbono de 1.6% y por una solución líquida de aproximadamente 4% de Carbono.

En este momento el líquido solidifica de acuerdo con la reacción Eutéctica obteniéndose una mezcla formada por cristales de Austenita y/o Grafito o Cementita. Es de desear la adición de un alto contenido de Silicio en la aleación, a fin de que siempre solidifique Grafito en vez de Cementita a consecuencia del alto poder grafitizante que manifiesta el Silicio.

La forma de solidificación del Grafito está determinada por la presencia o ausencia de Magnesio, ya que en el -

primer caso, el Carbono tiende a agruparse en forma de esferas y en el otro caso se presentaría en forma de láminas.

Al seguir decreciendo la temperatura entre X_3 , X_4 , y X_5 , la solubilidad del Carbono en la Austenita, decrece, es decir la Austenita rechaza Carbono tal como lo indica la línea C-J de los puntos a,c,m; éste Carbono pasa a formar parte de los nódulos ya formados en la solidificación, difun-diéndose a través de la masa sólida.

Entre los rangos de temperatura X_4 y X_5 correspondien-tes a la transformación eutectoide, la Austenita de aproxi-madamente 0.6% de Carbono se transforma en Perlita o Ferri-ta o una combinación de ambas de acuerdo a ciertos factores que influyen como velocidad de enfriamiento y elementos - aleantes.

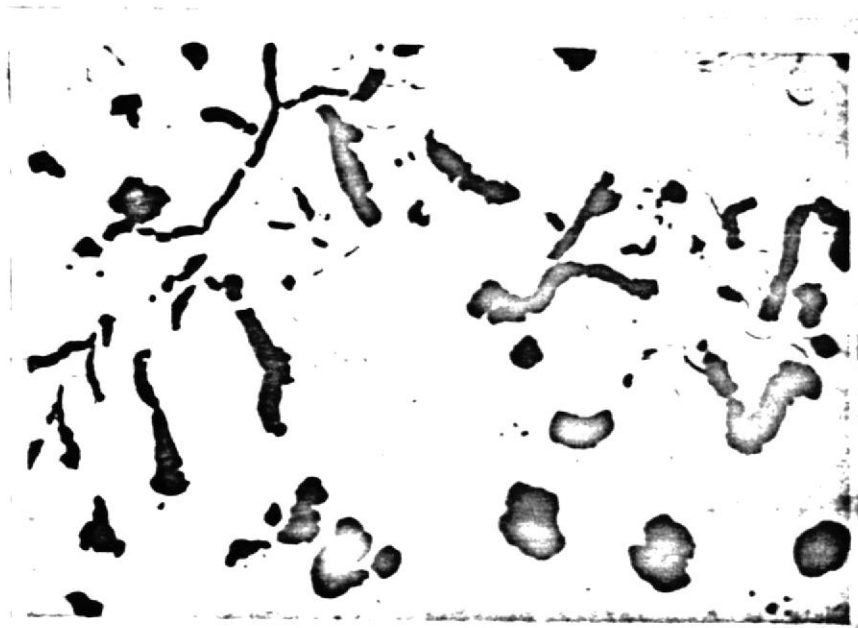
En niveles inferiores de la temperatura X_5 , la aleación no sufre ninguna alteración hasta llegar a la temperatura - ambiente. (Temperatura X_5 es 816°C - 1.500°F)

3.b FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMACION DE GRAFITO ESFEROIDAL

Diversos factores influyen de manera directa en la formación de los nódulos o esferoides, de modo que las partículas de grafito pueden asumir formas diversas de aquella - esferoidal. Así por ejemplo, se pueden presentar como nódulos ramificados, como pseudo laminares o en forma de "cangrejo" como se verá en las microfotografías N° 1 y 2.

Uno de tales factores está constituido por la presencia en la composición de la aleación, de trazas de algunos elementos como arsénico, titanio, plomo, bismuto, etc. En las aleaciones tratadas con Magnesio, la acción de estos elementos puede ser contrarrestada mediante la introducción en el metal fundido de mínimas cantidades de Cerio.

Otro factor que puede influir sobre la esferoidización - del grafito está constituido por una existencia de azufre elevada, siendo el Magnesio un desulfurante muy enérgico, eso explica que su acción inicial es combinarse con el azufre, razón por la cual su existencia en la aleación viene a reducirse aproximadamente a 0.03%. Por lo tanto, es solamente el Magnesio residual o sea el que no se ha combinado



NITAL 2%

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 1

Grafito pseudo laminar y nodular en matriz Ferrí
tica.



NITAL 2%

200 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 2

Grafito presente en forma de "Cangrejo" en matriz
Perlítica.

con el azufre, el que trabaja como estabilizador de carburos y provoca la esferoidización del grafito con la consiguiente inoculación posterior con Ferrosilicio.

El Magnesio siendo muy oxidable y teniendo un bajo punto de ebullición, a la temperatura de la aleación líquida está en estado gaseoso y tiende por lo tanto a evaporarse rápidamente. La pérdida de Magnesio por evaporación, desde el momento de la adición en el crisol hasta la solidificación de la colada está valorizada aproximadamente en - 0.01% por cada minuto por lo tanto la aleación tratada debe ser colada lo más rápido posible para evitar una excesiva reducción de la cantidad de Magnesio residual y por consiguiente, de la cantidad de nódulos presentes en la estructura.

La cantidad de Magnesio que se debe agregar para obtener los mejores resultados depende del tipo de carga empleado (materia prima), de la masividad de la fundición y de la cantidad de azufre que pueda haber en la misma tal como se expresó en párrafos anteriores.

La influencia de porcentaje de nódulos (porcentaje de gra

fito bajo forma esferoidal), es un factor decisivo e importante sobre las características mecánicas del material, ya que el valor de estas aumentan en razón directa con la cantidad de nódulos así por ejemplo en la microfotografía - N° 3 se muestra la estructura de una fundición con un porcentaje de nódulos del 25% y en la microfotografía N° 4 la estructura de una fundición con el 90% de nodularización. En el paso de una estructura a la otra se tiene un aumento de cerca del 46% de resistencia a la tracción y cerca del 72% en elongación, lo que confirma lo aseverado en líneas anteriores.



NITAL 2%

100 x

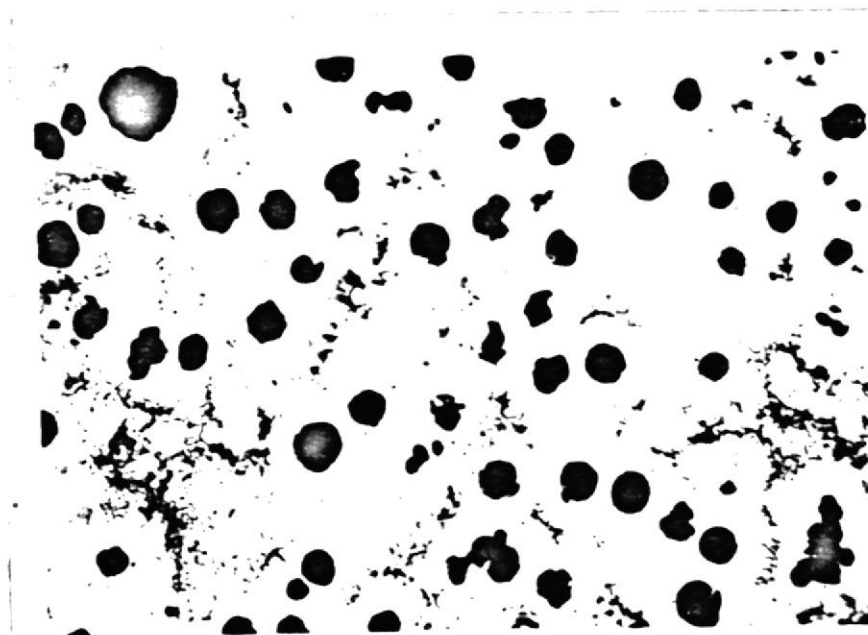
MICROFOTOGRAFIA Nº 3

Grafito parcialmente nodular (matriz
de ferrita y perlita).

$$\bar{\sigma}_T = 57 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\epsilon = 2.5\%$$

$$\% \text{ Nódulos} = 25\%$$



NITAL 2%

100x

MICROFOTOGRAFIA Nº 4

HIERRO NODULAR

MATRIZ PERLITICA

$\sigma_t = 83 \text{ Kg/cm}^2$

$\epsilon = 4.3\%$

% nódulos = 100%

C.- DEFINICION DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE LOS HIERROS
NODULARES

Después de haber tratado el proceso de solidificación de las aleaciones Fe-C y de las aleaciones Fe-C-Si, se considera necesario describir los componentes estructurales principales, poniendo en evidencia las características que permiten su individualización en el examen microscópico.

Mientras el análisis químico informa que la composición de la aleación comprende dos elementos principales: Fe y C, el análisis microscópico, pone al corriente que tales elementos pueden existir en la estructura de las aleaciones:

- a) En estado libre (Ferrita y grafito);
- b) Como compuestos químicos bien definidos (Fe_3C o Cementita);
- c) Como soluciones sólidas de composición variable (Austenita y Martensita);
- d) Como mezcla eutectoide (Perlita);
- e) Como mezcla eutéctica (Ledeburita)

Es en efecto típica la heterogeneidad de la estructura

de las aleaciones en general, cuyos elementos fundamentales (Grafito, Cementita, Ferrita y Perlita) tienen origen independientemente el uno del otro, sobre todo por efecto de 2 factores que determinan el estado final del C en la aleación: composición química y razón de enfriamiento; además de los tratamientos térmicos y en particular de aquellos de recocido pueden dar origen a componentes que dan a las aleaciones características bien definidas. Sobre estos últimos procesos no se verá en este trabajo, pero se considera necesario exponerlo brevemente.

Aquí a continuación se describen los diversos componentes estructurales de las aleaciones, donde se exponen también, datos sobre el mecanismo de su formación aunque este argumento ya se desarrolló y profundizó cuando se trató el proceso de solidificación para obtener estructuras determinadas.

Algunas microfotografías completan la descripción de - los componentes que constituyen la estructura de las aleaciones a fin de familiarizarse con las características de - las mismas en forma visual y objetiva. Dichos componentes son:

FERRITA

Normalmente se indica con el término "Ferrita" al hierro α que como es conocido, cristaliza en el sistema cúbico de cuerpos centrados. Tal denominación se mantiene también cuando están presentes otros elementos en aleación como Silicio y Magnesio que forman con el hierro α soluciones sólidas sin alterar el aspecto de los gránulos.

Este componente puede estar presente en la estructura de la aleación en cantidad variable. La velocidad de enfriamiento y el porcentaje de Silicio, son los factores que mayormente influyen sobre la cantidad de Ferrita. En la estructura de aleaciones enfriadas muy lentamente o con porcentajes de Silicio elevados, se pueden tener zonas de Ferrita más o menos extensas, tales ferritas a menudo se definen como "ferrita libre" para diferenciarla de la ferrita presente en la perlita, en las cuales ella se encuentra bajo la forma de laminillas alternadas con laminillas de Cementita.

Las estructuras completamente ferríticas normalmente se obtienen mediante tratamiento térmico de Recocido.

La ferrita es un componente relativamente estable de tal forma que los ácidos y reactivos la atacan débilmente, limitándose a poner en evidencia del contorno de los cristales. En el examen micrográfico, ella se presenta por lo tanto clara y constituida por cristales cuyos bordes tienen un encaminamiento irregular. El valor medio de sus propiedades de resistencia se muestra así:

Resistencia a la tracción:	28 Kg/mm. ²
Elongación:	40% (En 2")
Dureza:	Inferior a 0 Rockwell C.

La microfotografía Nº 5, nos muestra las características de la ferrita.

AUSTENITA

La Austenita está constituida por hierro γ , cuyo retículo cristalino es cúbico de caras centradas conteniendo Carbono en solución sólida. En otras palabras la Austenita es "una solución sólida de Carbono en hierro γ ."

Es estable sólo a temperatura superior a 723°C pero



NITAL 2%

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 5

Ferrita.

puede mantenérsela estable a temperatura ambiente con la adición de elementos que como el Níquel y el Manganeso bajan la temperatura crítica a la cual viene la transformación: $\gamma - \alpha$

La microfotografía N° 6 muestra las características de la Austenita. El aspecto micrográfico de esta estructura es similar al de la Ferrita. En las aleaciones sin embargo, la diferenciación entre los dos componentes es suficientemente fácil para la observación de la unión de los granos: por demás rectilíneos en la Austenita, por demás irregulares en la Ferrita como se evidenciará en la confrontación de las microfotografías N° 5 y 6.

En la aleación se puede diferenciar la una estructura de la otra, atacando la muestra con reactivos ácidos normales, de tal manera que la Austenita se ennegrece, en cambio en la Ferrita el ataque se limita en el borde de los granos.

La Austenita estable a alta temperatura, experimenta transformaciones durante el enfriamiento que dan origen a



NITAL 2%

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 6

Austenita

las estructuras de transición que a continuación se destacan en el orden de su formación: Perlita, Sorbita, Troostita, Bainita y Martensita.

El valor medio de sus propiedades es:

Resistencia a la Tracción: 105 Kg/mm.²
Elongación : 10% (En 2")
Dureza : 40 Rockwell C (aproximadamente)

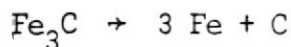
CEMENTITA.

La Cementita o Carburo de Hierro, es un componente muy duro y frágil (800 Brinell, - 80 Rockwell C), su resistencia a la tracción es muy baja pero posee una resistencia a la compresión muy alta. Esta estructura que se forma durante la solidificación se encuentra en la perlita bajo la forma de laminillas o de glóbulos.

El Azufre, el Bismuto, el Cobalto, el Magnesio, el Manganeso, el Cromo tienen tendencias a hacer estable la Cementita en la aleación. Se deduce que ella se combina parcial

mente sin perder su individualidad con los susodichos elementos formando unos carburos complejos de hierro, manganeso, cromo, etc. Estos carburos son en general mucho más duros que la Cementita.

Por el contrario, el Silicio, el Titanio, el Aluminio y el Niquel tienen tendencia a facilitar la descomposición de la Cementita. Parece que estas sustancias trabajan como catalizadores de la transformación de la Cementita en Fe y C según la reacción:



La Cementita cristaliza en el sistema tetragonal. Esto indica la forma cómo están dispuestos los átomos de Fe y C en la celdilla unitaria.

Debido a la multiplicidad de los procesos de transformación, se hace realmente difícil establecer el origen, pero desde el punto de vista metalográfico se pueden tener los siguientes tipos de Cementita:

Cementita Primaria

Es una característica de las aleaciones hipereutécti-

cas; se forma por separación directa del líquido desde el inicio de la solidificación hasta la temperatura eutéctica. Se presenta bajo la forma de manchas o de agujas blancas, (Microfotografía Nº 7).

Cementita Eutéctica

Precipita desde el metal líquido a la temperatura eutéctica. Con la Austenita forma el eutéctico "Ledeburita". En la observación metalográfica este componente aparece como una estructura estriada o de puntas, (microfotografía - Nº 8).

Las puntas y las estriás oscuras están constituidas por Perlita formada por transformación de la Austenita durante el enfriamiento desde la temperatura eutéctica hasta la temperatura ambiente. La Ledeburita se presenta bajo la forma de retículo generalmente con Cementita (microfotografía Nº 9).

Cementita Secundaria.

Se separa de la Austenita desde la temperatura eutéctica has

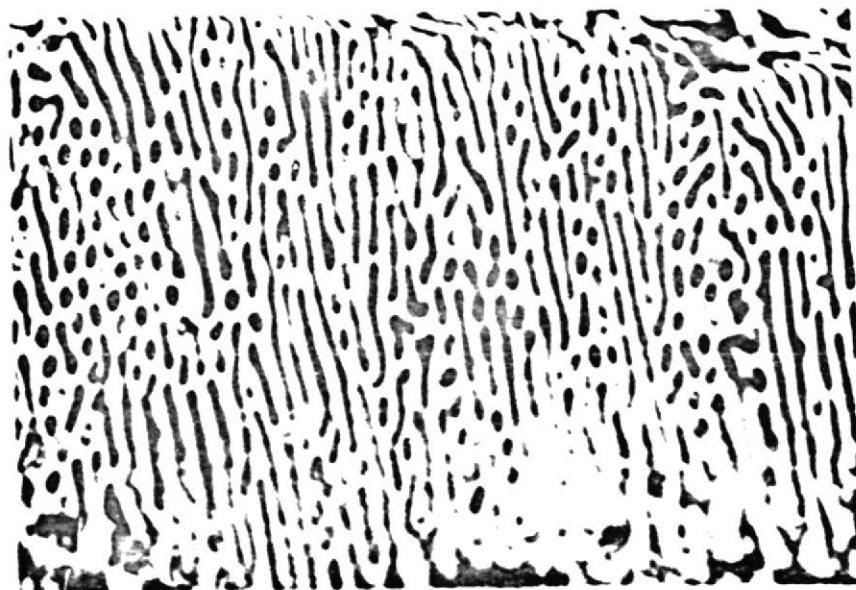


NITAL 2%

200 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 7

Cementita primaria (áreas blancas grandes) en una
aleacion hipereutética.



NITAL 2%

500 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 8

Ledeburita



NITAL 2%

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 9

Retículo de Ledeburita y de Cementita

ta la temperatura ambiente y precipita sobre la Cementita pre-existente..

Cementita Eutectoide

Es aquella que constituye la fase Cementita de la Perlita.

Cómo se distingue la Ferrita de la Cementita

Mientras en la estructura de los aceros, está presente sólo uno de los dos componentes, en las aleaciones pueden estar presentes simultáneamente la Cementita libre y la Ferrita libre. El ácido nítrico que es el reactivo más usado para el ataque de probetas metalográficas de la aleación, ataca débilmente a la Ferrita y no ataca a la Cementita. De allí que se consigue que el aspecto, después del ataque de los dos componentes sea prácticamente el mismo. Aún más es suficiente tener presente algunas de sus características peculiares para poder proceder a su identificación:

- 1.- La Cementita casi nunca está asociada con el grafito, mientras la Ferrita lo está siempre.

2.- El grafito no se forma nunca en la Cementita, mientras que si se forma en la Ferrita y también en la Perlita. (microfotografía N° 10).

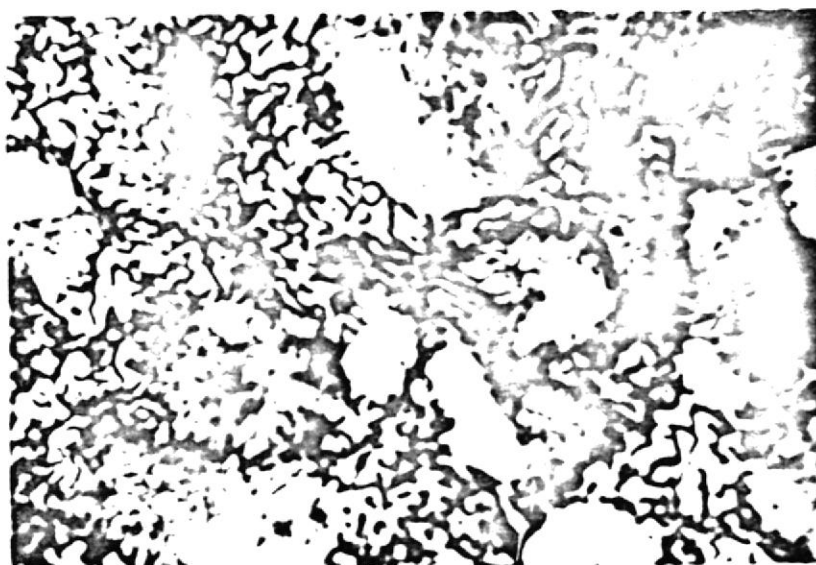
3.- La Ferrita no se separa nunca mediante un borde de la Perlita, mientras la Cementita lo hace siempre. Esta particularidad es claramente visible en la microfotografía N° 11.

4.- Si el ataque es suficientemente profundo, se ponen en evidencia los granos cristalinos de la Ferrita, mientras eso no sucede con la Cementita.

~~Talves~~ pueden surgir apreciaciones inciertas sobre la observación de los dos componentes; se hace aquí necesario recurrir a reactivos que permitan poder efectuar su identificación segura.

PERLITA

La Perlita es un componente formado por laminillas de Ferrita alternadas con laminillas de Cementita. En condiciones



NITAL 2%

200 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 10

Area blanca: Ferrita; Area gris: Perlita, las láminas de grafito (negras) son prácticamente todas metidas en la ferrita.



NITAL 2%

200 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 11

Los cristales de cementita (áreas blancas) son
contorneados por un borde neto.- Áreas oscuras:

Perlita.

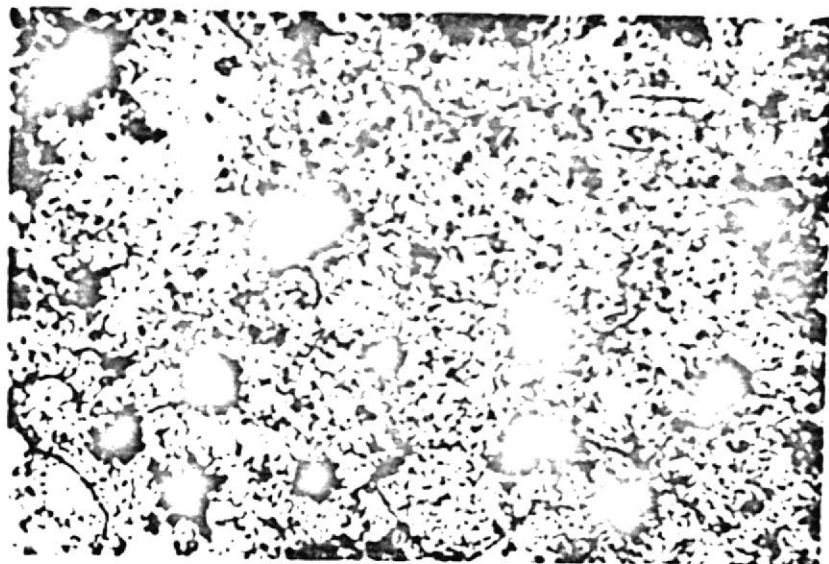
normales de enfriamiento de la fundición, tiene su origen por la disminuída solubilidad del carburo del hierro en la Austenita. En la observación al microscopio, la Perlita se la puede reconocer por su semejanza con las huellas digitales. Este es el componente que confiere a la aleación características mecánicas óptimas y de resistencia al desgaste. Cuando la Cementita de la Perlita, en vez de ser lámina está bajo forma de pequeñas masas globulares o de coalescencia, se obtiene la Perlita globular de la forma que se muestra en la microfotografía Nº 12.

EL GRAFITO

El Grafito, es carbono en estado libre que se separa directamente del metal líquido durante la solidificación de la fundición. También se lo encuentra en la descomposición de la Cementita inmediatamente después de un tratamiento térmico de recocido.

Las partículas de grafito pueden tener forma:

Laminar; Su sección observada al microscopio se presenta en forma de laminillas.



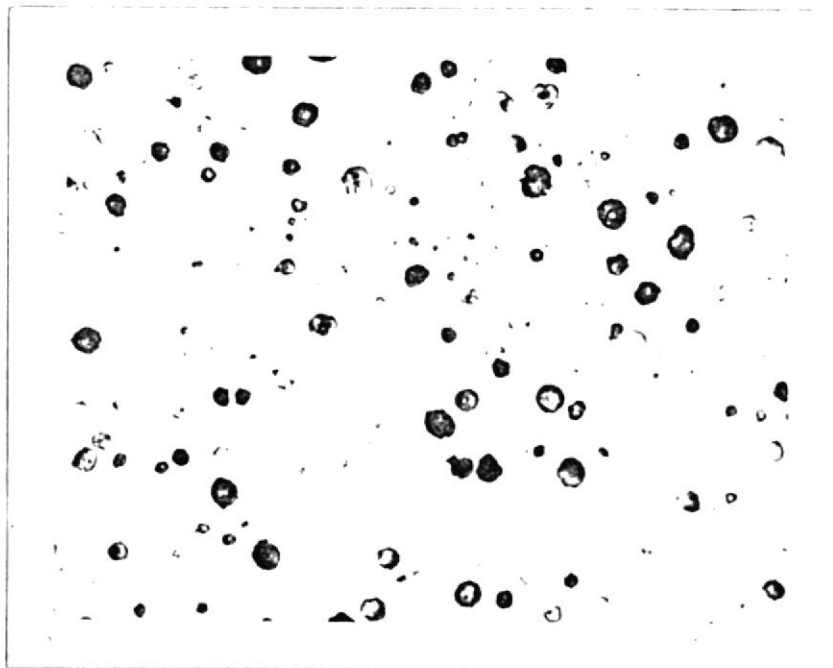
NITAL 2%

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 12

Perlita Globular

Nodular; Bajo la forma de acumulación de nódulos más o menos compacto. Todos los tipos de grafito independiente-mente de su origen cristalizan según el sistema hexagonal con los átomos de carbono dispuestos en estratos sucesivos de tal modo que el tercer estrato resulta simétrico - con respecto al primero.



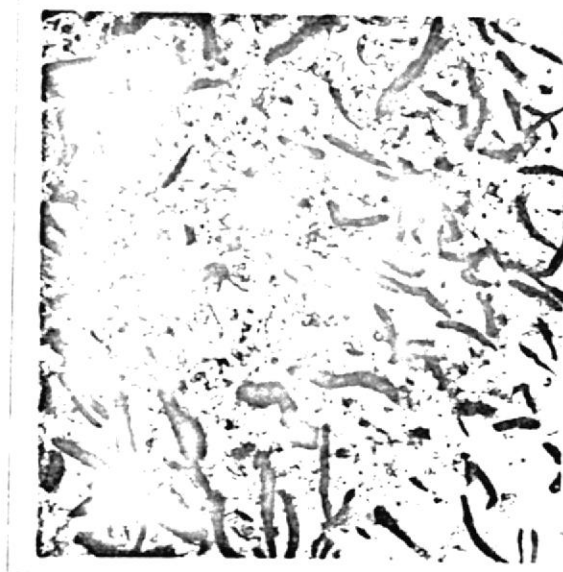
Sin ataque

100 x

MICROFOTOGRAFIA N° 14

Hierro Nodular

Zonas negras: Grafito Esferoidal.



Nital 2%

100 x

MICROFOTOGRAFIA 14 A

Hierro laminar

Zonas negras: Láminas de grafito.

CAPITULO IV

CAPITULO IV.

OBTENCION DEL HIERRO BASE

A.- INTRODUCCION

La Producción de Hierro Dúctil de alta calidad es lograda a partir de lo que se denomina Hierro Base que, es en esencia la simiente metálica de composición bien definida y dependiente de la naturaleza de carga introducida al horno. Una vez que se ha obtenido el hierro base es que se debe modificar su estructura para lograr estructura nodular (de lo contrario se obtendría hierro gris), con un elemento modificador como el Magnesio, el mismo que crea en el seno del metal fundido sustratos para la nucleación preferencial de grafito esferoidal.

La acción nodulizante es dependiente del tiempo (aunque no existe una regla general al respecto) y, debe aprovecharse su efecto antes de que ocurra una disminución o haya un cambio en la dirección de su influencia (RADING). El Hierro Base debe reunir ciertas condiciones y características; entre las principales tenemos:

- 1.- Bajo contenido de Azufre.- Es preferible tener 0.02% de azufre o menos a fin de minimizar los requerimientos de Magnesio, ya que como se sabe, el Magnesio es ávido de formar Sulfuro y al ocurrir esto, disminuiría la capacidad de modificación de estructura.
- 2.- Una cantidad relativamente baja de Silicio, entre 1.00% a 1.50% cuando se usa aleaciones de Magnesio Ferrosilicio como nodulizante.
- 3.- El rango de contenido de Carbono debe estar entre 3.60% a 4%.
- 4.- Una escoria limpia y libre de Fe, con un contenido lo más bajo posible de óxidos.

Si se compara el Hierro Base para elaborar Hierro dúctil con el de Hierro gris, en cuanto a control de composición, se sabe muy bien que el primero requiere mayor cuidado de los rangos en que los elementos entran a formar parte del material, preferentemente los porcentajes deben ser bajos para el Silicio, Fósforo y Manganeso y debe estar exento de Titanio, Plomo, y Antimonio y otros que son retardadores de la esferoidización.

B.- SELECCION DEL EQUIPO DE FUSION

En la actualidad, se conoce algunos tipos de equipos con los que se trabaja en la industria de la fundición de Hierro Nodular y entre ellos se pueden mencionar los siguientes:

- 1.- Hornos de inducción ✓
- 2.- Hornos de arco
- 3.- Horno de resistencia
- 4.- Hornos rotatorios
- 5.- Fusión en cubilotes ácidos ✓
- 6.- Fusión en cubilotes básicos
- 7.- Hornos de crisol. ✓

De los tipos de hornos mencionados anteriormente, los tres primeros son utilizados en escala industrial, es decir, - son de alta producción; los subsiguientes se pueden considerar de producciones medianas y pequeñas, ya que representan una inversión inicial reducida si se compara con los - primeros y de toda forma ellos pueden cumplir su función a cabalidad.

Pese a que el cubilote sería el tipo de horno más adecuado

para una mediana producción, en este trabajo se ha considerado la selección del horno de crisol como equipo para llevar a cabo la práctica experimental por varias razones entre las que se pueden mencionar las más importantes:

a.- De todas las demás el horno de crisol es el de menor capacidad por lo que se lo podría considerar a escala de laboratorio.

b.- Su bajo costo en relación con los demás equipos de fusión.

c.- Lo económico de su operación comparándolo con otros hornos que también trabajan con combustible.

d.- La fácil operación y el reducido personal que se necesita para llevar a cabo el proceso.

e.- Tal vez una de las razones más importantes de haber seleccionado este tipo de horno, es aquella de que siendo el horno de crisol el más utilizado en el medio de nuestros pequeños fundidores, este trabajo va en beneficio directo de ellos ya que las conclusiones a que se llegue les servi

rá para que vayan introduciendo ciertos avances tecnológi
cos tanto en el proceso mismo como en la obtención de un
material de calidad que tanta falta hacen en el país.

C.- SELECCION Y CONTROL DE MATERIALES DE CARGA

Las materias primas que se van a usar para fundir el hierro base, deben cumplir especificaciones de composición química conocida, así como también normas de limpieza. La chatarra de acero de bajo contenido de carbono y retornos de nodular, que generalmente son los materiales usados para el efecto, deben clasificarse y separarse con mucho cuidado de cualquier chatarra de hierro gris, ya que este último material mencionado puede incrementar el azufre en la carga con las consecuencias que ya se han descrito.

También se considera necesario hacer énfasis en la limpieza que debe tener el material, debe estar exento de grasas o impurezas ya que sobre todo las grasas, tienen contenidos de azufre y contaminan la carga. Es práctica recomendable sumergir las piezas grasosas en tetracloruro de carbono antes de ser consideradas como materia prima.

Una vez seleccionada convenientemente la materia prima, se procede a la operación de pesada en base a un cálculo previo que relacione a la composición de la carga con la del hierro base a obtener, la cual estará de acuerdo con la calidad del producto que se desee obtener..

D.- INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS PRIMARIOS, DE ALEACION, RESIDUALES Y DE PROPOSITO ESPECIAL.

Se procederá en primer lugar a tratar de los elementos primarios; estos son: Carbono, Silicio, Azufre, Fósforo y Manganeso.

1.d. Carbono

Si se toma como referencia el cuadro N° 4 , en él se identifica el porcentaje de carbono para los hierros nodulares (3% - 4%); los rangos usuales son más estrechos aún dependiendo del espesor y tamaño de la pieza a fundir. Así por ejemplo para una fundición con un espesor mayor de 3/8" (9.5 m.m.) el porcentaje de carbono total debe estar comprendido entre 3.60% y 3.80%. Esta cantidad de Carbono presente en la composición química, disminuye a medida que aumenta la sección tal como se muestra en la tabla N° 1 donde se recomiendan porcentajes de Carbono y Silicio de acuerdo a los espesores de las piezas a fundir y de acuerdo a la matriz deseada.

En la Figura N° 7 se presenta un estudio que determina una relación entre el Carbono Equivalente, dimensión de piezas de fundición y cantidad de nódulos presentes en las mismas. Generalmente en la fundición se habla de Carbono equivalente para establecer la clase de hierro que se va a fundir. Para

TABLA N° I

Recomendaciones Generales de Porcentaje de Carbono
y Silicio para Hierro Ductil de Acuerdo a la Matriz
Deseada

Espesor pulg.-mm		Matriz Deseada			
Minimo	Maximo	Perlítica		Ferrítica	
		Carbono .%	Silicio %	Carbono %	Silicio %
1/8 3.17	1/8 3.17	4.00	3.75	3.95	4.00
	1/4 6.35	3.70	3.75	3.65	4.00
	1/2 12.70	3.50	3.75	3.55	4.00
	1 25.40	3.20	3.75	3.15	4.00
	2 50.80	3.05	3.75	3.00	4.00
	3 76.20	3.00	3.75	2.95	4.00
	4 o mas	3.00	3.75	2.95	4.00
1/4 6.35	1/4 6.35	3.90	3.25	3.75	3.75
	1/2 12.70	3.70	3.25	3.55	3.75
	1 25.40	3.40	3.25	3.25	3.75
	2 50.80	3.25	3.25	3.10	3.75
	3 76.20	3.20	3.25	3.05	3.75
	4 o mas	3.20	3.25	3.05	3.75
1/2 12.70	1/2 12.70	3.85	2.75	3.70	3.25
	1 25.40	3.55	2.75	3.40	3.25
	2 50.80	3.40	2.75	3.25	3.25
	3 76.20	3.35	2.75	3.20	3.25
	4 o mas	3.35	2.75	3.20	3.25
1 25.40	1 25.40	3.60	2.50	3.50	3.00
	2 50.80	3.45	2.50	3.35	3.00
	3 76.20	3.40	2.50	3.30	3.00
	4 o mas	3.40	2.50	3.30	3.00
2 50.80	2 50.80	3.60	2.10	3.40	2.75
	3 76.20	3.55	2.10	3.35	2.75
	4 o mas	3.55	2.10	3.35	2.75
3 76.20	3 76.20	3.60	2.00	3.40	2.50
	4 o mas	3.60	2.00	3.40	2.50
4 101.60	4 o mas	3.60	2.00	3.40	2.50

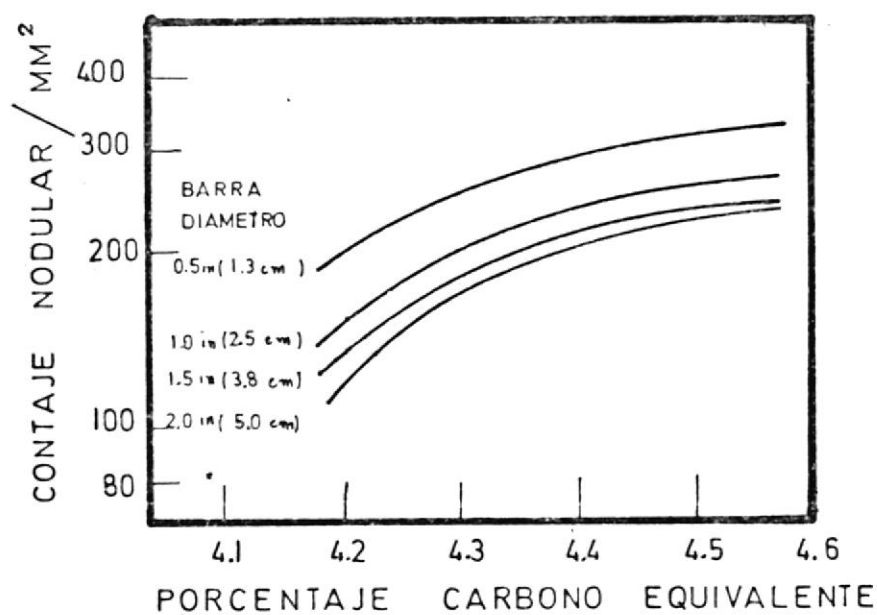


FIGURA N° 7

VARIACION DEL CONTAJE NODULAR
EN FUNCION DEL CONTENIDO DE
CARBONO EQUIVALENTE

el caso de dimensiones menores de 1/2" (12.7 m.m) se trabaja en el área del diagrama de equilibrio Fe-C-Si correspondiente a las hipereutéticas con C.E de 4.55% como máximo y para secciones de 1/2" a 1 1/2" (12.7 mm. a 38.1 mm.) se trabaja en la región eutética con C.E. de 4.3% y para secciones gruesas mayores de 2" (50.8 mm) la composición debe ubicarse en un C.E. de 4.3 como máximo.

Es muy importante mantener el porcentaje de Carbono correcto ya que si bien la cantidad de nódulos varía en relación directa por el contenido de Carbono, por otro lado un exceso del mismo, ocasiona el defecto de "flotación" de grafito en las partes superiores de la pieza, dando como resultado una gran segregación de Carbono.

Este fenómeno de flotación es prevalente en fundiciones dúctiles cuyo C.E. es mayor que 4.6% es decir en materiales dúctiles hipereutéticos.

El Carbono en forma de grafito esferoidal ocupa alrededor del 9% del volumen total de las piezas y ejerce una marcada influencia sobre las propiedades mecánicas.

2.d. SILICIO

En el mismo cuadro a que se hizo referencia en el caso del Carbono, se manifiestan los rangos de composición del Silicio como elemento integrante del hierro nodular; éstos se ubican entre 1.8% y 2.8% para grados comunes de este material.

El Silicio es desoxidante y altamente grafitizante, disocia los carburos primarios y suprime la formación de perlita, dando preferencia a la formación de grafito y ferrita (Ver tabla N° 2)

En el cuadro N° 4 se pudo apreciar la diferencia de contenidos de Silicio en hierros blanco, maleable y gris y esta observación tiene el siguiente contenido: donde se quiere estabilización de Carburos primarios se disminuye el porcentaje de Silicio y por el contrario se aumenta su contenido cuando se desea fuerte grafitización.

Usualmente se introduce el Silicio como ferroaleaciones; se incluye ferrosilicio en la carga y en la inoculación, y Magnesio -ferrosilicio en el tratamiento modificador. Estas adiciones dependen del proceso y de los materiales de carga utilizados.

El Silicio presente tiene interacción con el Carbono por medio del Carbono equivalente, tiene control sobre la proporción de grafito y carburos, sin embargo, no puede aumentarse deliberadamente con el propósito de eliminar carburos ya que pueden ocurrir efectos contrarios y por otro lado es preferible tener algo de Carburos en la etapa de formación del hierro base para controlar prácticamente el contenido de Silicio. Con la cantidad de Carburos que se presentan en la cuña de temple se puede saber el porcentaje de Silicio e indicará lo que se había de agregar al hierro base. Para este efecto existe una tabla indicadora del porcentaje de Silicio en función del espesor de la cuña de temple, la cual será mostrada cuando en la parte experimental se aborde sobre el Carbono equivalente.

El Silicio influye sobre las propiedades mecánicas del material; un incremento del mismo, aumenta la resistencia a la tensión, el punto de fluencia y la dureza, en cambio baja la elongación; también tiene efectos sobre la microestructura de la fundición, a ello se agrega la acción combinada con el Manganese los cuales influyen sobre los porcentajes de Perlita y Ferrita en la microestructura del hierro dúctil..

3.d. AZUFRE

Usualmente el contenido de Azufre se trata de mantenerlo lo más bajo posible, tanto como 0.005%, pero generalmente se trabaja en rangos comprendidos entre 0.009 y 0.02%.

La técnica a seguir en la desulfuración es determinativa para obtener un hierro base de buena calidad, ya que una proporción elevada del mismo implica usar una mayor cantidad - de aleación modificadora (Mg), lo cual representa un incremento del costo del proceso.

Quando un hierro base de alto azufre es tratado, un exceso de Magnesio es necesario para producir la conversión del grafito laminar a la estructura del grafito esferoidal. La razón de este hecho se basa en la inestabilidad del SMg en el hierro líquido; éste se oxida y forma MgO y $MgSiO_3$ los cuales no necesariamente pasan a la superficie de donde pueden ser removidos; quedando como inclusiones y la única forma de evitarlo es teniendo un elemento que forme un sulfuro estable, tal como los sulfuros de tierras raras. Por lo tanto al estar el Magnesio combinado en forma de sulfuro pierde las propiedades de promoción de grafito esferoidal.

62



4.d.- FOSFORO

El nivel máximo permisible del fósforo al cual es posible producir satisfactoriamente hierro dúctil es 0.05%. Aunque siempre se prefiere tener valores menores a 0.035% - cuando se requiere mejor ductilidad. Este elemento forma un fósforo de hierro de estructura muy frágil y quebradiza conocida como "esteadita". Este fósforo afecta las propiedades mecánicas como la ductilidad, la tenacidad y la resistencia al impacto, en cambio incrementa el esfuerzo de fluencia, esto se ve en el estudio del cuadro N° en el que la dureza y resistencia se incrementa proporcionalmente con el aumento del porcentaje de fósforo; en cambio la elongación disminuye cuando se trata de fundiciones sin tratamiento, el fósforo influye a la tendencia de formación de poros.

Se seguido se ubica el cuadro N° 5 en el que se manifiesta el efecto del incremento del fósforo en las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia, dureza y la disminución de la ductilidad.

5.d. MANGANESO

Los contenidos comunes de Manganeso en la fundición de hierro

CUADRO Nº 5

INFLUENCIA DEL FOSFORO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL HIERRO NODULAR

COMPOSICION	MATERIALES		
	ICP-1	ICP-2	ICP-3
Carbón total	3.60%	3.60%	3.60%
Silicio	2.22	2.29	2.32
Manganeso	.08	.09	.11
Fósforo	<u>.03</u>	<u>.06</u>	<u>.225</u>
Azufre	.01	.01	.01
Resistencia a la tracción	71,200	71,900	78,000
Resistencia a la fluencia	47,400	47,500	61,600
Elongación %	20,2	11,5	3.0
Dureza Brinell	159	167	229

CUADRO Nº 6

INFLUENCIA DEL MANGANESO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL HIERRO NODULAR

COMPOSICION	HM-32*	HM-33*	HM-34*	HM-35*	HM-36*
Carbono total	3.34%	3.34%	3.34%	3.34%	3.48%
Silicio	2.13	2.07	2.11	2.15	2.18
Manganeso	<u>.02</u>	<u>.12</u>	<u>.25</u>	<u>.44</u>	<u>.72</u>
Azufre	.012	.011	.010	.011	.010
Fósforo	.029	.029	.029	.029	.021
Carbono Equivalente	3.98	3.96	3.97	3.99	4.13
Propiedades Mecánicas					
Esfuerzo de tensión	62,700	65,200	72,600	74,500	84,900
Elongación %	18.0	15,0	13.0	5.0	2.0
Dureza Brinell	164	166	173	199	235
Microestructura	Nodular	Nodular	Nodular	Nodular	Nodular
% Ferrita	90	90	85	40	25
% Perlita	10	10	15	60	75

Fuente: H. Morrogh. A.D.S. Transaction, Vol. 60(1952) Pags. 439-452

dúctil con estructura ferrítica y perlítica son de 0.2 % como máximo y de 0.50-0.70 respectivamente.

En ausencia de Azufre, el Manganese funciona como aleación, estabilizando y refinando la perlita, por lo que al aumentar su contenido disminuye la ferrita en el material de fundición.

El efecto del Manganese se ve disminuído por la fuerte acción del Silicio en la promoción de perlita, de tal suerte que - interactúan en efectos contrapuestos.

6.d. ELEMENTOS DE ALEACION, RESIDUALES Y DE PROPOSITO ESPECIAL.

En la producción de hierro nodular, no solo se debe cuidar los rangos de composición de los elementos primarios, sino - que también se deben tener muy en cuenta otros elementos que pueden entrar en la composición ya sea intencionalmente con aleantes o sin advertir su presencia.

A estos elementos se los ha clasificado según la actividad que desarrollen dentro del proceso de formación del hierro no dular.

a.- Elementos de Aleación.- Entre éstos se ubican los si-

guientes : El Niquel, el Molibdeno y el cobre. No se hace comentario sobre ellos ya que no es el propósito de este trabajo considerar los hierros dúctiles aleados.

b.- Elementos residuales.- Son muchos los metales y metaloides que, a veces, se encuentran en la composición de hierros y que marcan situaciones unas veces perjudiciales y en otras beneficiosas. Entre ellos podemos anotar los siguientes: Te, Pb, Ti, Al, Sb, Bi y Zi. Sus efectos en la aleación se podrán observar en el cuadro N° 7 en que se resume la función de todos los elementos que pueden intervenir en la formación del hierro dúctil.

c.- Elementos de propósito especial.- Estos elementos, son realmente indeseables para el propósito trazado, ya que son bien identificados como formadores de Carburos, hecho por el cual se los separa de los demás y se tiene especial cuidado en disminuirlos de la composición de los hierros nodulares; son los que a continuación se mencionan: Cr, B, Sn, As, y V. En el cuadro N° se dan recomendaciones para contenidos de todos estos elementos y la influencia que poseen en la formación de estructuras y promoción de esferoides.

CUADRO N° 7

RESUMEN DE LA INFLUENCIA QUE EJERCEN ALGUNOS ELEMENTOS EN EL HIERRO DUCTIL

Elemento	Límite para Grado Ferrí- tico	Límite para Grado Perlí- tico	Función	Observaciones
Elementos Modificadores				
Mg	Cantidad suficiente para formar grafito esferoidal: .06% máximo.		Esferoidizante. (Nodulizante)	Un exceso podría promover carburos.
Ce	Suficiente con 0.03% máximo.		Promueve la formación de nódulos en combinación con el Mg.	Un exceso podría promover carburos.
Ca	Insoluble en hierro		Puede actuar como Inoculante.	Un exceso puede promover carburos.
Ba			Nodulizante-Inoculante	Incrementa la cantidad de nódulos.
Elementos Primarios				
C	3.0-4.0%	3.0-4.0%	Constituye la microestructura nodular.	Un exceso causa el fenómeno de "flotación"
Si	1.8-3.0%	1.8-2.75%	Grafitizante, ferritizante	"Borra" la perlita en la Fundición.
P	0.035% Máx.	.05% max.	Hace frágil la estructura	Estabilizador de la perlita.
S	0.015% máx.	.015% máx.	Con el Mg. forma sulfuros	Es esencial remover el azufre
Mn.	0.20% máx.	.70% máx.	Formador de perlitas	Un exceso podría promover carburos.
Elementos de aleación				
Ni	De acuerdo a especificaciones.		Promueve resistencia y dureza	Puede promover perlita.
Mo	0.03% máx.		Incrementa la dureza	Puede promover carburos.
Cu	0.03% máx.		incrementa resistencia y dureza	Estabilizador de perlita.

Continuación del cuadro N° 7

Elementos residuales y de propósito especial				
Pb.	.002% máx.	.002% máx.	Es un formador de grafito <u>la</u> minar	Elemento negativo para hierro nodular.
Ti	.03% máx.	.07% máx.	Formador de grafito laminar.	Deteriora los nódulos
Al	.05% máx.	.05% máx.	Formador de grafito laminar	Produce pequeñas porosidades.
Bi	.002% máx.	.002% máx.	Formador de grafito laminar	Puede formar grafito laminar y además perlita.
Formadores de carburos y perlita				
Cr	.04% máx.	.10% máx.	Es un potente formador de C.Cr	Retarda el recocido.
B	.002% máx.	.002% máx.	Forma un carburo de Boro muy estable	El Carburo retarda el recocido.
Sn	.01% máx.	.05% máx.	Es un potente formador de <u>per</u> lita	No forma carburos.
As	.02% máx.	.05% máx.	Formador de perlita	Produce fragilidad.
V	.04% máx.	.05% máx.	Forma carburos estables	Retarda el recocido.
Elementos gaseosos				
O	.003% máx.	.003% máx.	Se combina con el magnesio	Reduce el poder nodulizante del Magnesio.
H	.0003% máx.	.0003% máx.	Es un formador de carburo muy potente	Da lugar a la formación de poros en la fundición.
N	.009% máx.	.009% máx.	Formador de perlita	Tiene solubilidad limitada.

E.- DESULFURACION DEL HIERRO BASE.

Es importante aclarar que la desulfuración del hierro base, o sea la reducción del azufre del material, es necesaria solamente para los hierros bases sacados de cubilotes ácidos, en los cuales los contenidos de azufre están comprendidos entre 0.08 y 0.12%, este paso del proceso no se lo aplica en este trabajo, puesto que de antemano se sabe del bajo contenido de azufre en los materiales de carga, pero se considera necesario dar un ligero bosquejo del mismo a fin de poderlo aplicar cuando las circunstancias lo determinen.

Existen varias técnicas y materiales como medios desulfurantes del metal base, pero en esencia, todos cumplen el mismo objetivo; algunos añaden el material desulfurante en las cucharas y se provee a la fundición de alguna forma de agitación; otro método consiste en inyectar el desulfurante con una corriente de aire o nitrógeno a través de un tubo refractario. El Sulfuro de calcio o de sodio que se forma, flota sobre la superficie del material fundido y es eliminado como escoria.

Los materiales que comúnmente se utilizan para este proceso de eliminación de azufre son: Carburo de Calcio y Carbonato de Sodio.

De la información técnica consultada, la mayoría de los autores coinciden que el método más efectivo y barato es el tapón poroso, está basado en la agitación del metal líquido - por inyección de nitrógeno a través de un tapón poroso refractario localizado en el fondo de la cuchara, el carburo de calcio de cierta granulometría más o menos fina que actúa como desulfurante, es agregado por la parte superior y conjuntamente por el efecto de agitación del gas a través del líquido, se acelera la reacción.

Aproximadamente un 75% del azufre inicial en el hierro base, puede ser removido con 2% de carburo de calcio. (Referencia 6)

Para lograr una mejor efectividad del proceso, la temperatura debe ser lo más alta posible (cercana a 1.550°C) para alcanzar casi el 99% de desulfuración y también para evitar pérdidas de temperatura del metal fundido.

CAPITULO V

CAPITULO V

TRATAMIENTO MODIFICADOR DE ESTRUCTURA DEL HIERRO BASE

A.- INTRODUCCION

El proceso de transformación del grafito laminar en esferoidal en estado líquido, tiene dos etapas muy bien definidas: la Modificación de estructura y la Inoculación; algunos dedicados a esta tecnología, identifican a estos pasos como inoculación y post-inoculación, es por este motivo que en el presente trabajo se le da el nombre de "modificador", al elemento que provoca el cambio de estructura laminar a esferoidal y se le da el nombre de "inoculante" al elemento o aleación que se agrega para proporcionar sustratos de nucleación en la masa del líquido, por lo que su función es - afinar la estructura del material.

Este capítulo concierne con los elementos o aleaciones de tratamiento y otros materiales usados en la formación - de grafito esferoidal en el Hierro fundido.

Una de las conclusiones a las que llegaron los investigadores de la BCIRA sobre estas aleaciones dice: "Los - únicos modificadores que se han encontrado satisfactorios

en la transformación de estructura de hierros fundidos con bajo contenido de Azufre, son los que contienen cantidades apreciables de Calcio, Cerio y Magnesio."

Una vez que la apropiada cantidad de Magnesio esté contenida en el Hierro líquido, éste hará solidificar al grafito en forma de esferas; por lo general éstas esferas serán irregulares en forma y tamaño, así como también existirá cantidades considerables de Carburos presentes en la estructura, es por éstas razones que se hace necesario inocular el material con Ferrosilicio o con aleaciones comerciales como por ejemplo inoculin producto de (FOSECO),i otros.

Los cambios Físico-Químicos que toman lugar en la técnica de Inoculación, tampoco han podido ser bien comprendidos y determinados, solo se conocen los resultados: Refinamiento de la microestructura, haciendo los nódulos más pequeños, bien formados y dando lugar a la formación de mayor cantidad de ellos, así como también provocando la ausencia total de Carburos. En un estudio efectuado por los Ingenieros Rodríguez y Rábago sobre las propiedades de los inoculantes existentes en México, ellos hicieron trabajos prácticos de fundición utilizando materias primas de igual composición química y valores de temperatura similares en las -

diversas experiencias, la prueba consistió en usar en cada fundida, un tipo diferente de elemento de inoculación, y la conclusión a la que llegaron fue que: con todos los inoculantes se lograron resultados satisfactorios y que de no existir en el mercado ningún inoculante comercial, el ferrosilicio presenta buenas cualidades y recomiendan su uso para la inoculación de los hierros fundidos.

B.- ALEACIONES DE TRATAMIENTO PARA CAMBIO DE ESTRUCTURA

Existen numerosos elementos capaces de lograr la modificación del grafito, entre ellos el Magnesio, el Cerio, el Calcio, tierras raras, pero de todos ellos, solamente el Magnesio ha sido aceptado industrialmente; este elemento se introduce en el hierro fundido con diferentes técnicas, existen diversas formas de aleación para su utilización, entre ellos podemos anotar: Magnesio-Ferrosilicio, Magnesio-Níquel, Magnesio Níquel Silicio, Magnesio-Bario-Ferrosilicio, y Magnesio-Silicio-tierras raras.

A las aleaciones anteriormente mencionadas se las conoce comercialmente con el nombre de "Noduloy" acompañado de un número que indica el porcentaje de Magnesio en la -

aleación. El cuadro N° 8 indica la composición química de estas aleaciones que se obtienen para la producción de hierro dúctil.

Se consideró necesario tratar sobre las aleaciones de materiales "modificadores" de estructuras que existen comercialmente, pero hay que hacer presente que en este trabajo se utilizó pequeños trozos de un aro de Magnesio de las ruedas de una avioneta en desuso y que consultando el METAL HANDBOOK, Tomo I página 1112, se trata de una aleación de alto contenido de magnesio que se utiliza en materiales de aviación (Permanent Mold Casting), cuya composición química es la siguiente:

MATERIAL	TIERRAS RARAS	Zn.	Mn.	Mg.
EZ 33A	3%	2.7%	0.2%	Balance

Esta decisión de seleccionar este material se tomó - debido a que en nuestro país no existe este tipo de aleaciones de Magnesio por razones obvias, ya que éste es el primer trabajo efectuado sobre hierro nodular y como pioneros, se tuvo éste inconveniente, el cual será superado cuando ésta tecnología sea difundida en el medio de nuestros fundidores.

CUADRO # 8

COMPOSICION DE LAS PRINCIPALES ALEACIONES DE MAGNESIO USADAS PARA PRODUCIR HIERRO DUCTIL

Tipo	Elementos - Porcentaje					
	Mg	Ni	Si	Ca	Ce	Al Fe
N.M.A. No. 1	14.0-16.0	80.0-85.0				Balance
N.M.S.A No.2	14.0-16.0	45.0-55.0	30.0			Balance
Noduloy 5	5.0-6.0		44.0-48.0	0.80-1.30		1.0 Max. Balance
Noduloy 5 LC	5.0-6.0		44.0-48.0	0.80-1.30	0.30-0.40	1.0 Max Balance
Noduloy 5C	5.0-6.0		44.0-48.0	0.80-1.30	0.50-0.75	1.0 Max Balance
Noduloy 6	6.0-7.0		44.0-48.0	0.80-1.30		1.0 Max Balance
Noduloy 6LC	6.0-7.0		44.0-48.0	0.80-1.30	0.30-0.40	1.0 Max Balance
Noduloy 6C	6.0-7.0		44.0-48.0	0.80-1.30	0.50-0.75	1.0 Max Balance
Noduloy 9	8.5-10.0		44.0-48.0	1.00-1.50		1.0 Max Balance
Noduloy 9LC	8.5-10.0		44.0-48.0	1.00-1.50	0.30-0.40	1.0 Max Balance
Noduloy 9C	8.5-10.0		44.0-48.0	1.00-1.50	0.50-0.75	1.0 Max Balance
Noduloy 18C	16.0-20.0		60.0-65.0		0.50-0.75	1.0 Max Balance
Noduloy 12	11.0-13.0		38.0-42.0			1.0 Max
Noduloy 7C	8.0-9.5	4.5-6.5	43.0-47.0		0.50-0.75	1.0 Max

C.- TECNICAS DEL TRATAMIENTO MODIFICADOR

En la actualidad, son algunos los métodos de tratamiento usa
dos para producir hierro nodular en fundiciones. Todas ellas
involucran la introducción de Magnesio en forma de ferroalea
ciones con pequeñas cantidades de Cerio. En la mayoría de -
los casos, el tipo de los materiales de tratamiento influye
notablemente en la eficiencia de las técnicas, la forma de -
fusión del Hierro Base es un factor preponderante en la se-
lección de un método de tratamiento.

Las técnicas más usadas hasta el momento, se mencionan a con
tinuación y se describen brevemente:

1.- Vertido directo del metal en olla de tratamiento, con -
aleaciones de magnesio de alto peso específico como los de
Níquel-Magnesio. Esta fue la primera técnica de producción
comercial de Hierro dúctil y generalmente usaba una aleación
de Magnesio con las características del tipo N.M.A. Nº 1 y 2
que muestra el cuadro **8** de la página **88**. La Fig. Nº **8**
da una ilustración objetiva del método acabado de mencionar

2.- Método de Emparedado (Sandwich); esta técnica de modifi
cación es probablemente una de las más usadas en la produc-
ción de hierros nodulares, inclusive tiene ciertas variacio

METODO DE VACIADO DIRECTO USANDO ALEACIONES PESADAS

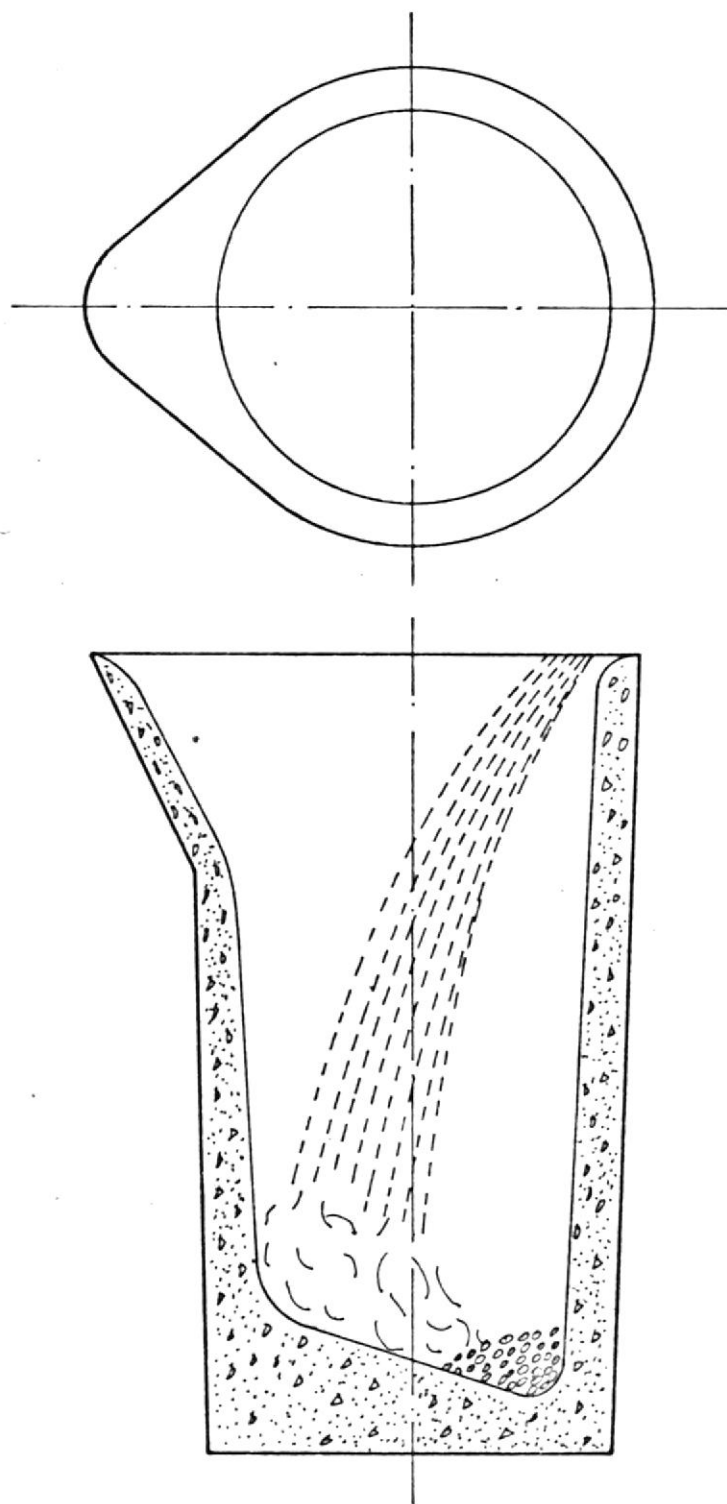
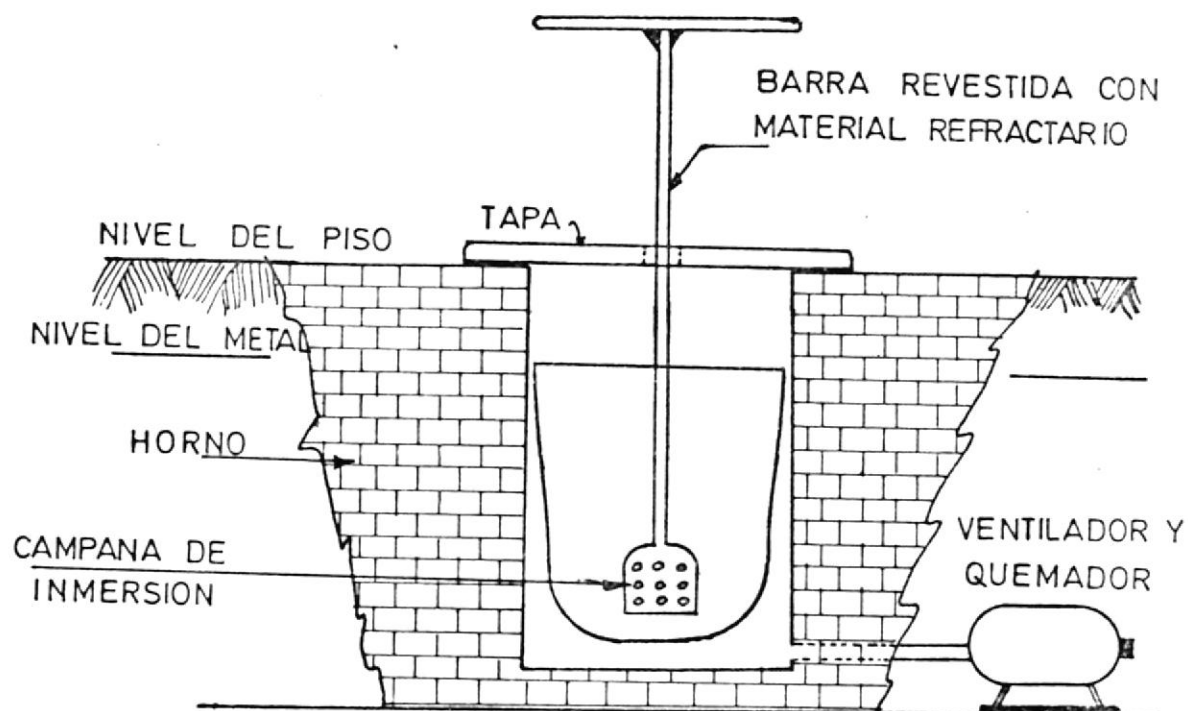


FIGURA Nº 8

nes en algunos casos, pero los principios básicos no cambian. Esta práctica consiste en la colocación de la aleación modificadora de magnesio en una depresión localizada en la parte inferior de la olla de tratamiento y cubierta con unas muy finas láminas de acero tal como se muestra - en una vista de corte seccional en la Figura N° 9 , en ella también se puede apreciar la zona donde incide el material en el momento del vaciado a fin de evitar una reacción violenta al entrar en contacto con el Magnesio; con este método se tiene la ventaja que como la reacción ocurre bajo la superficie del metal fundido, hay pocas posibilidades de tener grandes pérdidas por oxidación del Magnesio,

3.- Insuflado de materiales que contiene Magnesio por medio de una campana refractaria con agujeros en toda su periferia, los mismos que en el momento de sumergirla en el metal fundido, permiten la salida del Magnesio en forma radial y de abajo hacia arriba, produciéndose en esta forma una reacción total y uniforme. La Figura N° 10 ilustra - la técnica de tratamiento por éste método.

4.- Inyectado de Magnesio metálico a través de un tubo de grafito sumergido en la olla de tratamiento. La inyección



ILUSTRACION ESQUEMATICA DEL
PROCESO DE MODIFICACION DE
ESTRUCTURA CON CAMPANA DE
INMERSION

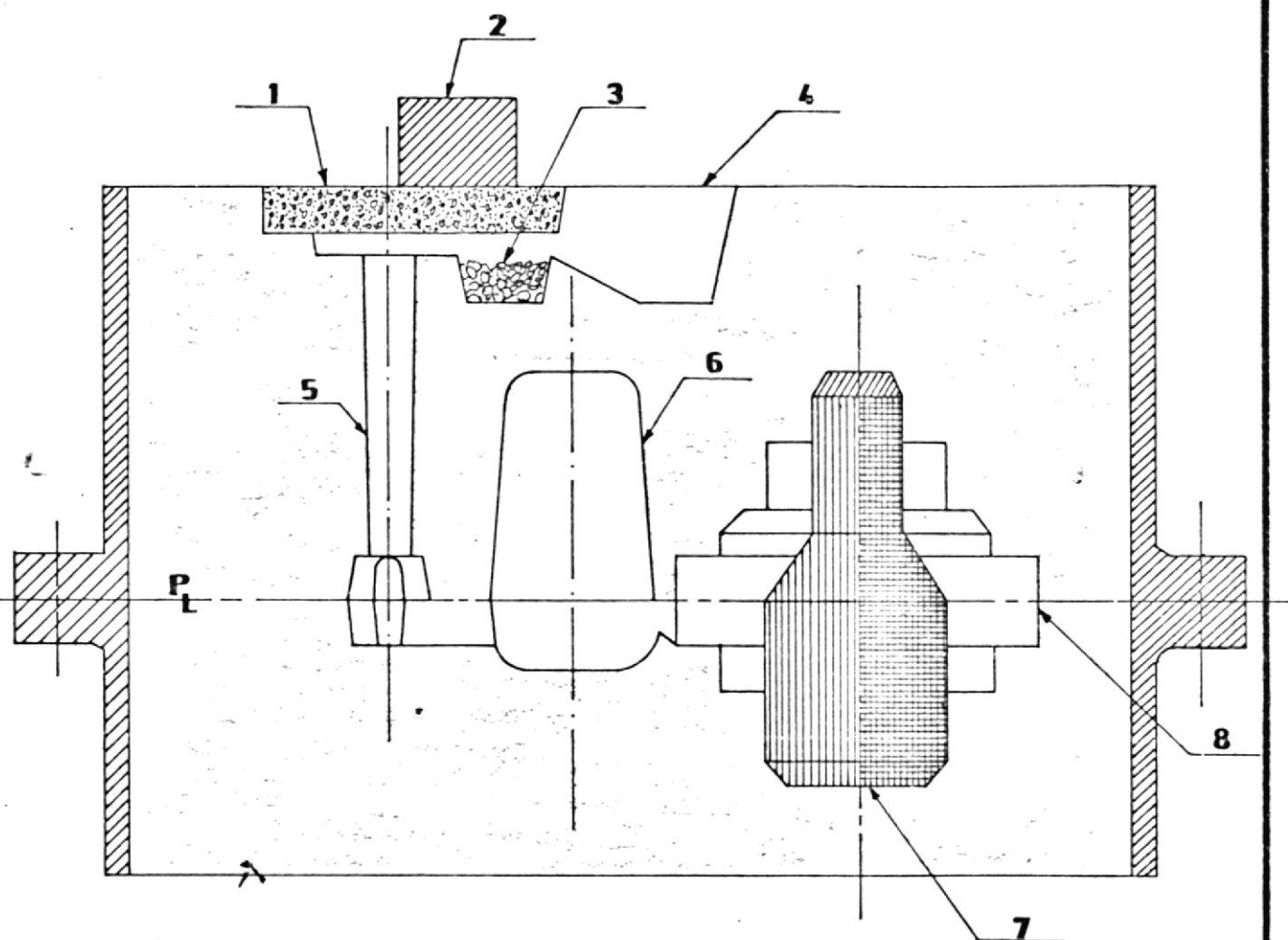
FIG. 10

del modificador es introducida a presión proveniente de una botella de Nitrógeno.

5.- Método de modificación en el molde: Este es uno de los más recientes adelantos en la técnica de tratamiento modificador de estructura, es un diseño que siendo simple es altamente eficiente. El agente modificador es colocado en el mismo molde de colado en una cámara de reacción especialmente diseñada, de tal manera que el tratamiento se efectúa en el momento de vaciado en el molde, esto es muy importante puesto que la reacción puede ser controlada en función de la velocidad de vaciado y de las dimensiones de la cámara de reacción, factores estos que influyen en los requerimientos del tipo de Hierro dúctil. Además por la forma de la taza de vaciado existe la ventaja de detener la escoria evitando con ello que exista contaminación. La figura Nº 11 muestra el método descrito.

6.- Usando el convertidor Fisher que es un gran recipiente que tiene una gran configuración y operación muy similar al convertidor Bessemer, en su parte inferior tiene una cámara de reacción donde se deposita el Magnesio. El proceso de esta técnica se ilustra en la Figura Nº 12. Este método es usado solamente en grandes fundiciones dado que su capa-

METODO DE MODIFICACION EN EL MOLDE



- 1.- COBERTURA .
- 2.- PASO PARA EVITAR QUE COBERTURA SE LEVANTE .
- 3.- CAMARA PARA LA ALEACION MODIFICADORA .
- 4.- TAZA DE VACIADO .
- 5.- BEBEDERO .
- 6.- ALIMENTADOR .
- 7.- CORAZON O MACHO .
- 8.- CAVIDAD DEL MOLDE .

FIGURA Nº 11

METODO SANDWICH EN OLLA DE TRATAMIENTO

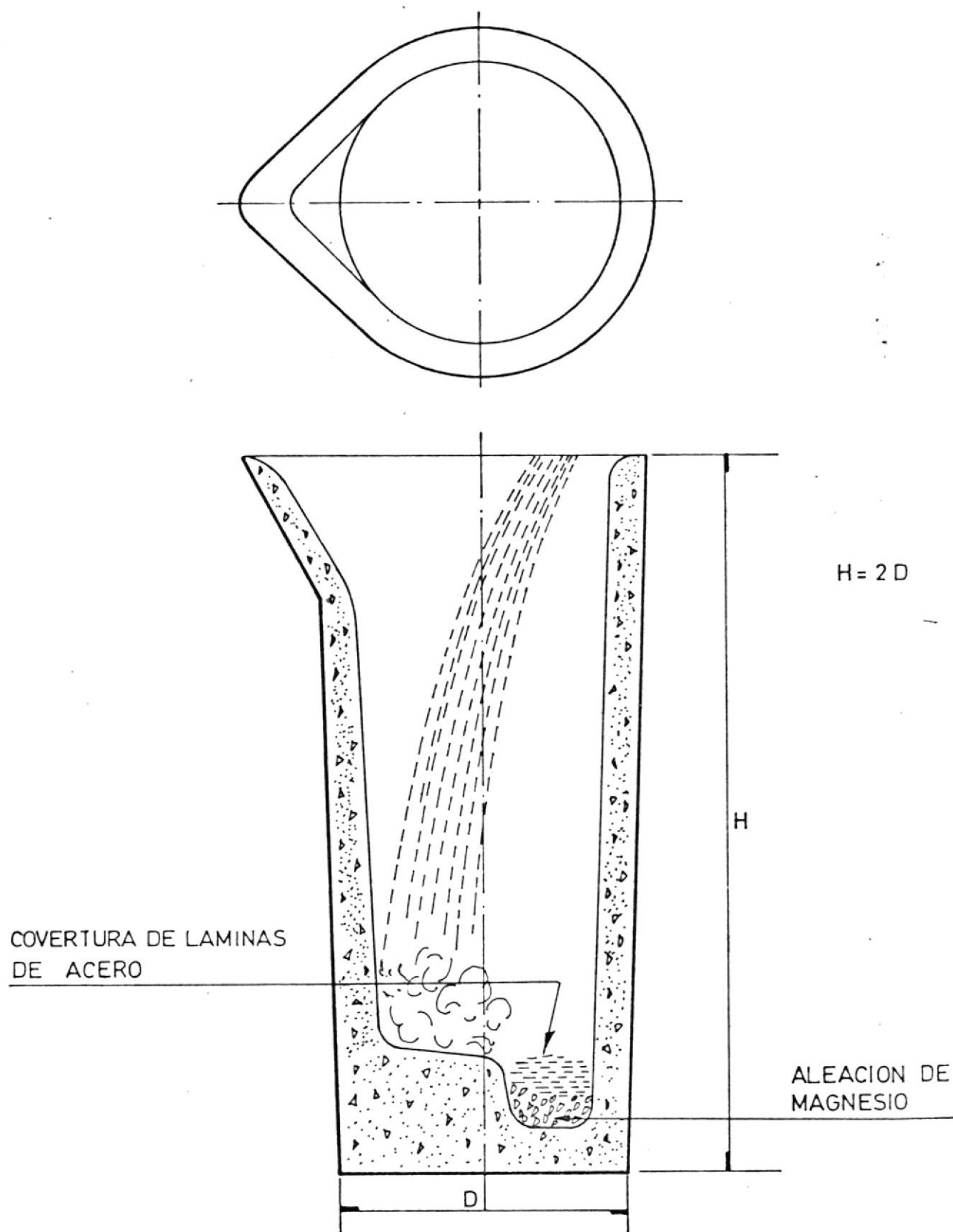


FIGURA Nº 9

- 30 -

CONVERTIDOR EN POSICION DE CARGA DE LA ALEACION MODIFICADORA

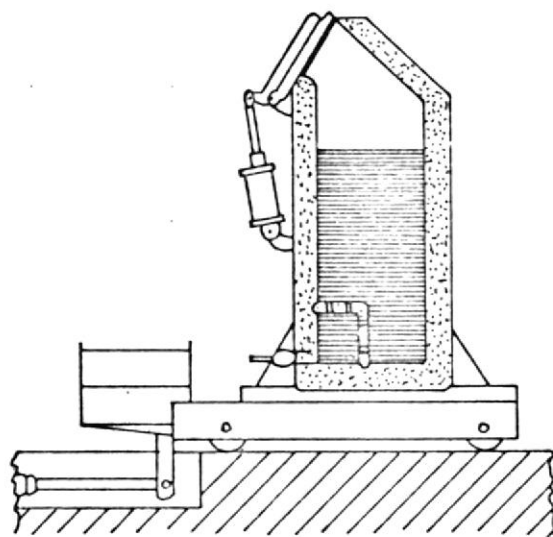
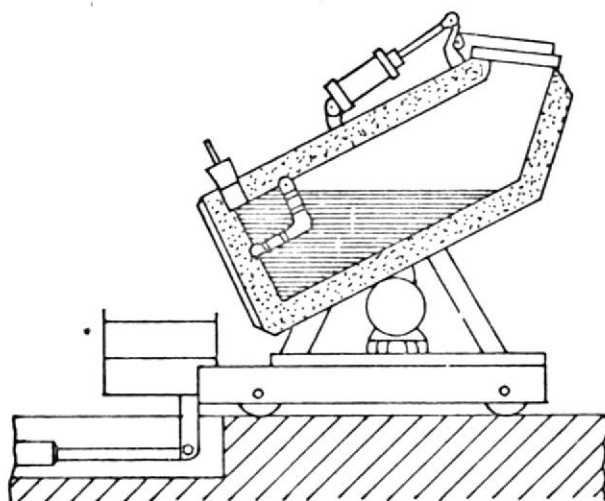
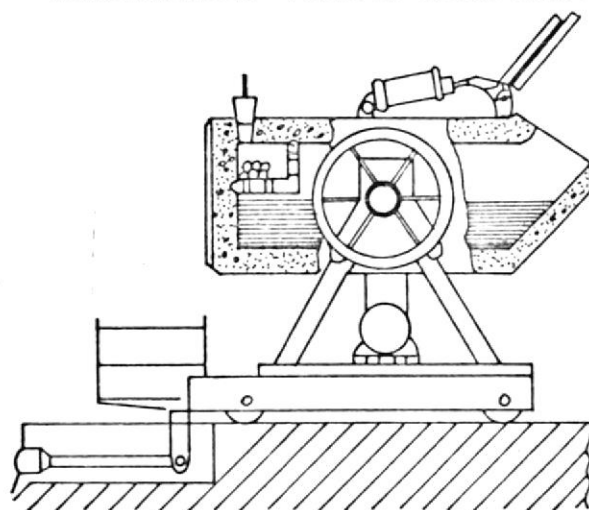


FIGURA Nº 12

cidad está por sobre los 4.000 Kg de producción de material.

De todos los métodos mencionados, los tres primeros son ampliamente usados para producciones medianas y pequeñas. En este trabajo se ha seleccionado el método de la campana de inmersión, el mismo que se explicará más en detalle en el capítulo concerniente a la parte experimental.

La técnica de tratamiento tiene muchas variantes, pero lo más importante es que el principio de la operación se mantiene inalterable y existen ciertas consideraciones que son generales para todos los métodos, así por ejemplo: el Magnesio debe estar recubierto por muy finas láminas de acero afin de minimizar la violencia de la reacción (Debido a la temperatura relativamente baja de vaporización del Magnesio, 1.105°C), ya que absorbe calor al fundirse; el tamaño de las partículas de la aleación de Magnesio es muy importante, se considera que un tamaño uniforme se encuentra en el rango de 1" por malla 8. Tamaños mayores al mencionado retardan la reacción, mientras que si son muy finas, las partículas reaccionan rápidamente haciendo demasiado corto el tiempo de proceso modificador,

Las temperaturas con las que se alcanza mayor eficiencia, están comprendidas entre 1.500 y 1.550°C. En este trabajo se tuvo el inconveniente de que la masa de material fundido es relativamente pequeña por lo que se presentaron pérdidas mayores de calor con la consiguiente disminución de temperatura, lo que no ocurriría en una fundición de mayor capacidad como por ejemplo del rango de 2 toneladas.

Esto se trató de obviar, subiendo la temperatura de Fusión sobre los 1.550°C pese a que pudo haber existido cierta pérdida de carbono, el mismo que a alta temperatura reacciona con el oxígeno formando CO₂.

D.- TRATAMIENTO DE INOCULACION

La inoculación es un paso sumamente importante en la producción de Hierro nodular. Tanto es así, que Hierros Bases tratados con Magnesio y sin inoculación son casi completamente de estructura blanca, y el grafito formado es compacto pero no de forma esferoidal.

Siendo esta parte del proceso una función fundamental en el logro del producto final, es menester seguir las indicaciones de su técnica con el mismo cuidado y precisión con

que se realiza el proceso de modificación de estructura o nodularización.

En el caso del Hierro Dúctil, la inoculación implica la - promoción o cristalización de esferas de grafito, la sup^{re}sión de la formación de Carburos y el incremento de celdas eutéticas.

Existen algunas teorías que tratan de explicar el fenómeno que ocurre durante la inoculación, pero una de las más acer^{ta}dadas es la de B. Lux, quien manifiesta que la formación - de nódulos en el Hierro Dúctil se debe a la sobresaturación de la Austenita con Carbono. La misma explica lo siguiente: El mecanismo de inoculación se efectúa por pequeñas partícu^{la}las de grafito que se precipitan en el metal por la adición de un fuerte grafitizador, tal como lo es el Ferrosilicio.

El Ferrosilicio en solución incrementa momentaneamente el contenido de Silicio del Metal provocando zonas de sobresa^{tu}turación con respecto al Carbono y partículas de Carbono - que están nucleando en los alrededores son rechazadas y - precipitadas. De acuerdo con esta teoría, se puede com^{pre}nder fácilmente que partículas muy pequeñas de Silicio no producirán suficiente concentración antes de ser disi^{pa}das. En otras palabras, hay un tamaño crítico para que

el Ferrosilicio tenga máxima efectividad. El tamaño óptimo de las partículas de inoculante según la experiencia obtenida por los especialistas es de $3/8''$ por malla 12. En el agregado de Ferrosilicio existen elementos y componentes que actúan como inoculantes y promueven la grafitización esferoidal, algunos de estos son: Calcio, Aluminio, Bario, Estroncio y Nitrato de Boro.

El mejor método de agregar el Ferrosilicio al metalbase tratado con Magnesio, es en el chorro de hierro líquido cuando se traspasa del crisol a la olla de tratamiento.

Se considera necesario incluir a continuación las variables que controlan el proceso de inoculación:

1 d. Tipo de Inoculante

La efectividad del inoculante es influenciada por los contenidos de Aluminio, Calcio, etc., por lo que se hace imprescindible pedir garantía de los proveedores sobre las composiciones de los materiales de tratamiento.

2 d. Cantidad de Inoculante

Dependiendo de la composición química, un peso calculado de

inoculante debe ser usado para tener buenos rendimientos, ya que cantidades fuera de lo establecido son perjudiciales.

3 d. Tamaño de Partículas

La Granulometría del inoculante es decisiva en las velocidades de dilución en el metal líquido, por lo que deben mantenerse tamaños adecuados tal como recomienda la Miller Company en su Compendio de Hierro Dúctil: 3/8" por malla 12

4 d. Temperatura Óptima para el tratamiento

Asociado con el tamaño de las partículas, debe estar la temperatura óptima del tratamiento, esta debe estar comprendida entre 1,500 a 1,550°C,

5 d. Tiempo entre la Inoculación y el vaciado

El tiempo es a no dudarlo la variable más significativa en todo el proceso de formación de Hierro Dúctil. Al terminar la adición de Ferrosilicio, el Hierro líquido queda en un estado que se puede llamar de sobreinoculación, en el cual, la tendencia a formar carburos es nula y en la solidifica-

ción se tiene estructuras muy finas. A medida que transcurre el tiempo, el efecto va disminuyendo en intensidad. Dentro de los dos primeros minutos la caída del efecto inoculante es muy creciente, pero después se hace más lenta y paulatina.

El periodo efectivo de reacción está comprendido entre los 10 y 20 minutos cuando utiliza ferrosilicio como inoculante.

CAPITULO VI

CAPITULO VI

TRABAJO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS OBTENIDOS

A.- INTRODUCCION

Este capítulo trata sobre todos los pasos seguidos y experiencias obtenidas durante el período de investigación tecnológica hasta llegar a una conclusión: obtener hierro nodular en horno de crisol. Es necesario hacer énfasis - que esta tarea no fue sencilla ni rápida, puesto que se logró un objetivo en condiciones bastante difíciles ya - que como se acotó en el capítulo 2 (selección del equipo de fusión), la técnica aconseja obtener hierro nodular en horno de cubilote, pero con el fin de que este trabajo sea útil para los pequeños fundidores del medio nuestro que - casi en su totalidad poseen hornos de crisol, se tomó la - decisión de emprender esta tarea y lograr vencer obstáculos y dificultades, pero al fin de llegar a cumplir el cometido.

Una de las causas por las que se considera inconveniente obtener hierro dúctil en este tipo de horno, es que según los entendidos en ésta técnica, para que el elemento (Magnesio) pueda trabajar eficientemente y se produzca una reacción normal, se necesita tener en el horno una car

ga mínima de 200 Kgs, lo que no ocurre con el horno de crisol.

Las experiencias efectuadas se realizaron en el taller artesanal denominado "Fundición Acuña", cuyo propietario - prestó su valiosa cooperación, permitiendo efectuar todos - los experimentos en sus instalaciones. Este Taller dispone del siguiente equipo de fusión, el mismo que fue utilizado a lo largo de todo este trabajo:

- 1.- Horno de crisol "tipo 100"
- 2.- Ventilador centrífugo accionado por motor eléctrico de 2,5 HP y 3.450 R.P.M. Diámetro del rotor 18"
- 3.- Combustible utilizado: Kerex
- 4.- Campana de grafito utilizada en el proceso de modificación de estructuras.
- 5.- Cuchara de tratamiento utilizada en el proceso de inoculación.

La especificación del horno "Tipo 100" indica que la capacidad del crisol es de 100 kilogramos.

El equipo de control de proceso que se utilizó fue:

- 1.- Potenciómetro "Capacitrol 471" con termocupla y bulbo tipo "K", (para la determinación de temperaturas en el

horno).

- 2.- Termómetro electrónico "OMEGA 671" con termocupla cromel-Alumel, para determinación de temperatura de los moldes del ítem 5.
- 3.- Un Pirómetro Óptico "LEATH AND NORTHRUP" tipo 4137, para la verificación de la temperatura de los materiales en el horno.
- 4.- Cronómetro OMEGA, para la determinación de la curva tiempo temperatura con el ítem 2.
- 5.- Moldes con termocupla integrada para vaciar muestra líquida a fin de determinar carbón equivalente.
- 6.- Cuñas de temple, para la determinación del porcentaje de Silicio en el material.
- 7.- Bloques "Y" para sacar muestras y proceder a efectuar ensayos mecánicos y metalográficos.

Luego de efectuado el proceso de fundición, se procedió al muestreo que menciona el ítem 7 para los diferentes ensayos químicos, mecánicos y metalográficos; los primeros fueron efectuados en los laboratorios de Fundiciones Na-

cionales "FUNASA" y los restantes en los Laboratorios de la ESPOL.

B.- ELABORACION DEL HIERRO BASE

En el presente trabajo se han efectuado cinco experimentaciones a fin de llegar a establecer la técnica más adecuada para la obtención de hierro base con el cual se pueda llegar a la elaboración del hierro dúctil.

Toda la Bibliografía consultada indica la exigencia en un control preciso y severo sobre todas las etapas del proceso comenzado 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 dúctil. En primera instancia, se manifiesta el control del proceso en las materias primas usadas. Los tipos de control que se imponen en un experimento para la elaboración de hierro base, han sido:

1.- Inspección y selección de materias primas.

2.- Pesada de las materias primas.

3.- Cargas del horno.

1.b. Inspección y Selección de materias primas usadas

En la inspección y selección de materias primas, se ha tratado de seguir las recomendaciones para el caso, de tal suerte que se ha trabajado con materiales que a priori se ha sabido de su bajo contenido de azufre y fósforo, tales como: retornos de hierro nodular (cigüeñales de automóviles), aceros al carbono (retazos de láminas de cilindros de gas de cocina), hierro gris (blocks de automóviles), cuyas composiciones químicas se detallan a continuación en el cuadro Nº 9 y que fueron obtenidas del "Metals Handbook, Volumen I (Pags. 354 y 379).

Es decir, en primera instancia, se ha tratado de usar materiales de fuentes conocidas y de una misma composición química, las mismas que previo a su ingreso al horno, fueron limpiadas de materias extrañas como grasas y aceites que pudieran contaminar la carga. en cuanto a los aceros, se ha escogido láminas de un espesor pequeño, a fin de que su fusión sea rápida y factible en un horno de crisol.

CUADRO Nº 9

COMPOSICION QUIMICA DE LOS MATERIALES USADOS EN LOS EXPERIMENTOS

MATERIAL	CT	SI	P	S	Mn.
1.- Gris Automotriz SAE 121	3.10 a 3.30	2.10 a 1.80	0.12	0.15	0.60 a 0.90
2.- Retornos de Nodular	3.55	2.5	0.05	0.01	0.60
3.- Acero al Carbono SAE 1018	0.14 a 0.21	---	0.040	0.05	0.60 a 0.90

El objeto de incluir acero e hierro, ha sido con el propósito de llegar a la utilización "dentro del proceso industrial", de materiales de fácil aprovisionamiento, ya que en el medio es difícil conseguir retornos de nodular de pequeñas dimensiones, característica particular que deben tener los materiales de carga para su ingreso en el crisol del horno.

2.- Pesada de Materia Prima.

Se sabe muy bien que la pesada de las cargas que ingresan al horno, debe ser precisa, sobre todo en cuanto a los materiales que entran en pequeño porcentaje, tal es el caso del Ferrosilicio que se utiliza para ajuste de composición química, el Magnesio que sirve para la modificación de la estructura del hierro gris base y del inoculante, porcentajes éstos que están comprendidos entre 0.2 y 0.5%. Para el pesaje de los mismos se utilizó una balanza electrónica con precisión hasta de centesimas de gramo; en cambio para los retornos de nodular, chatarra de gris y acero, se empleó una balanza con precisión hasta de cien gramos.

Esta práctica debe considerarse como norma para los fundidores que se pudieran dedicar a esta actividad; la razón de usar esta diferente clase de equipo, es obvia, puesto

que la exactitud con que se efectúa la carga de materiales de pequeña proporción es factor importante para lograr el objetivo.

Las materias primas usadas, después de su selección y previo a la pesada, se sometieron a un lavado con un desengrasante que para este caso fue Tetracloruro de Carbono. Se recomienda esta práctica cuando se note claramente que la chatarra tiene exceso de elementos indeseables anteriormente anotados.

3.- Cargas del Horno.

Las cargas que se utilizaron en las cinco experiencias del taller de fundición fueron de 75 kilogramos y con las proporciones que se indican a continuación:

Experiencia N° 1

Hierro gris (Block automotriz)..... 50%

Retornos de Nodular (cigüeñales)... 50%

Ferrosilicio al 75% 0.5% de la carga total
(Ajuste de composición química)

Experiencia Nº 2

Retornos de hierro nodular 90%

Acero de bajo carbono SAE 1018 10%

Ferrosilicio para ajuste de composición química 1.5% de la carga total.

Experiencia Nº 3

Retornos de Nodular 100%

Ferrosilicio para ajuste de composición química 0.5% de la carga total.

Experiencia Nº 4

Retornos de Nodular 100%

Ferrosilicio para ajuste de composición química 0.5% de la carga total.

Experiencia Nº 5

Retornos de nodular 100%

Ferrosilicio para ajuste de composición química 0.5% de la carga total.

2.b. CALCULO DE CARGAS CON AJUSTES A COMPOSICION QUIMICA

Los materiales que se usaron en cada una de las experiencias, fueron elementos de una composición química más o menos conocida, esto debe tenerse como práctica usual a fin de poder efectuar cálculos previos que relacionen la composición final del hierro nodular con la composición de las materias primas. Los elementos que necesitan un meticoloso control para la obtención del hierro base, son los siguientes:

Carbono

Silicio

Fósforo

Azufre

Manganeso

De allí la importancia del cálculo de cargas a fin de establecer porcentajes fijos de cada material. A continuación se procede a efectuar los cálculos para cada una de las experiencias:

Experiencia Nº 1

Como se indicó en líneas anteriores, se utilizaron los siguientes materiales de carga:

COMPOSICION QUIMICA

	CT %	SI %	P %	S %	Mn %
50% Hierro gris (Block automotriz)	3.2	1.95	0.12	0.15	0.75
50% Retornos Hierro Nodular(Cigue- ñales).	3.55	2.5	0.05	0.01	0.6

En base a los datos anteriormente expresados, lo que se trata de determinar es la composición promedio de la carga basada en los respectivos pesos. Los resultados dan una aproximación de los porcentajes de los elementos primarios que conforman el hierro base.

1.- Cálculo de Silicio para la carga de 75 Kg

Hierro gris	$37.5 \text{ Kg} \times 0.019 = 0.712$
Retornos de nodular	$37.5 \text{ Kg} \times 0.025 = 0.937$
	1.64 Kg Si.

O También:

$$\frac{1.64}{75} \times 100 = 2.19\% \text{ Silicio.}$$

Se asumió 5% de pérdidas:

$$2.19 \times .05 = 0.10; \text{ porcentaje neto } 2.19 - 0.10 = 2.09\% \text{ neto}$$

2.- Cálculo del porcentaje de carbono

Hierro gris:	$37.5 \text{ Kg} \times 0.032 = 1.2$
Retornos de nodular	$37.5 \text{ Kg} \times 0.035 = 1.31$

3.- Cálculo para el Manganese

Hierro gris: 37.5 Kg x 0.0075 = 0.281

Retornos de Nodular 37.5 Kg x 0.0060 = $\frac{0.225}{0.506}$ Kg de Mn

O también:

$$\frac{0.506}{75} \times 100 = 0.6\% \text{ de Manganese}$$

Se asumió 10% de pérdidas:

$$0.6 \times 0.10 = 0.06$$

$$0.6 + 0.06 = 0.66\% \text{ de Manganese neto.}$$

Entonces se espera obtener hierro base con la siguiente composición:

C	Si	Mn
3.35%	2.09%	0.66%

Si se observa el cuadro N° 4 de la página 21 se verificará que estos valores se encuentran dentro de los rangos de composición de hierro dúctil, por lo tanto se puede introducir al horno para su fusión. Si se desea un control más estricto

to se hace análisis químico a fin de ajustar la composición del material que se desee obtener. Los datos de laboratorio corrigen el método de cálculo y dan un valor más exacto en el ajuste de la composición. En líneas posteriores se dan los resultados del análisis químico de todas las experiencias efectuadas, en los que se incluyen los valores del porcentaje de azufre y fósforo a fin de neutralizarlo en el proceso de fusión.

Experiencia # 2

Se utilizaron los siguientes materiales:

	COMPOSICION QUIMICA				
	CT%	Si%	S%	P%	Mn %
90% Retornos de hierro nodular	3.55	2.5	0.01	0.05	0.6
10% acero de bajo carbono S.A.E. 1018: (láminas de cilindro de gas).	0.17	---	0.05	0.04	0.7

1.- Cálculo para el Carbono

Retorno Nodular:	67.5 Kg. x 0.035 = 2.396 Kg
S.A.E. 1018:	7.5 Kg x 0.0017 = $\frac{0.128 \text{ Kg}}{2.524 \text{ Kg de CT.}}$

O también:

$$\frac{2.524}{75} \times 100 = 3.364\% \text{ de Carbono}$$

2.- Cálculo para silicio

Retorno de nodular 67.5 Kg x 0.025 = 1.68 Kg

S.A.E. 1018 7.5 Kg x 0.00 = $\frac{0.00}{1.68}$ Kg

O también:

$$\frac{1.68}{75} \times 100 = 2.25\% \text{ de silicio}$$

Se considera 5% de pérdida:

$$2.25 \times 0.05 = 0.112$$

Entonces: 2.25 - 0.112 = 2.138% de Silicio neto

3.- Cálculo para el Manganeseo

Retorno de nodular 67.5 Kg x 0.006 = 0.405

S.A.E. 1018 7.5 Kg x 0.007 = $\frac{0.052}{0.457}$ Kg de Mn.

O también :

$$\frac{0.457}{75} \times 100 = 0.61 \% \text{ de Manganeseo}$$

Se considera 10% de pérdida:

$$0.61 \times 0.1 = 0.061$$

$$0.61 + 0.061 = 0.67\% \text{ de Manganeseo neto}$$

COMPOSICION APROXIMADA DEL HIERRO BASE:

C%	Si%	Mn%
3.364	2.138	0.67

Valores que se encuentran comprendidos entre los rangos de composición del hierro dúctil, por lo que se procedió a introducirlo al horno.

Experiencias 3, 4 y 5

Como se indicó en el acápite correspondiente a la selección de materias primas, en estas experiencias se utilizó retornos de hierro nodular en un 100%; se seleccionó cigueñales fuera de uso los mismos que se constituyeron en materia prima de primera calidad para el presente trabajo. Cabe anotar que este tipo de material es muy fácil de conseguir para producciones futuras ya que en las rectificadoras de cigueñales lo consideran material desechable, lo cual hace que se los adquiera sin costo alguno o a muy bajo precio, se utilizó el mismo método usado para las experiencias anteriores y las composiciones se mencionan en el cuadro si

guiente:

CUADRO N° 10

Experiencia	CALCULO DE COMPOSICION QUIMICA.				
	C%	Si%	Mn%	S%	P%
N°1	3.35	2.09	0.66	0.15	---
N°2	3.364	2.138	0.67	--	---
N°3	3.55	2.5	0.60	0.01	0.05
N°4	3.55	2.5	0.60	0.01	0.05
N°5	3.55	2.5	0.60	0.01	0.05

3.b.- CONTROL DE COMPOSICION QUIMICA POR MEDIO DE CARBONO EQUIVALENTE Y CUÑAS DE TEMPLE.

Los hierros fundidos son aleaciones complejas de Hierro, Carbono y una cantidad apreciable de Silicio; estas - aleaciones basadas sobre el sistema binario hierro, Carbo- no, son eutectoides y comercialmente son producidas en un amplio rango de composición entre las cuales pueden ser hipoeutéticos, eutéticos ó hipereutéticos.

En las fundiciones de hierro, el significado de Car-bono equivalente es una expresión que indica el efecto de Silicio sobre el contenido de Carbono eutético. Para el diagrama binario Hierro, Carbono la composición eutética es de 4.3% de Carbono, pero bajo la influencia de conteni- do de Silicio, el Carbono eutético varía según la ecuación.

$$\% C + 1/3\% Si = 4.3$$

Puesto que los contenidos de carbono y Silicio ejercen influencia sobre la composición eutética, ha sido conve- niente combinar sus valores en un factor denominado Carbono equivalente, así:

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

El valor de Carbono equivalente de un hierro fundido describe cuán cerca se está de la composición eutéctica. Cuando el carbón equivalente es 4.3%, la aleación es eutéctica, de otra manera si el carbón equivalente es 3.9% representa que la aleación es de bajo contenido de carbono y silicio que la de la composición eutéctica; en cambio un carbono equivalente de 4.6% representa una aleación con un contenido de carbono y silicio mucho mayor que la de la composición eutéctica. Los contenidos totales de Carbono y Silicio de una aleación relacionados por medio del carbono equivalente, no solo establecen el rango de temperatura de solidificación de la aleación sino también las características de la fundición y sus propiedades, por lo tanto debe notarse que sin embargo de tener iguales valores de carbono equivalente 2 aleaciones, con apreciables cantidades diferentes de carbono y silicio no tendrán propiedades similares; así, por ejemplo, el carbono es más efectivo para la prevención de contracciones en la solidificación, y el silicio en cambio es más efectivo en el mantenimiento de secciones delgadas sin partes duras.

Introducido ahora el concepto de Carbono Equivalente, se procederá a determinar los valores que entran en la ecuación para encontrar el mismo:

CAMPO DE COMPOSICIONES PARA FUNDICIONES DE HIERRO DUCTIL

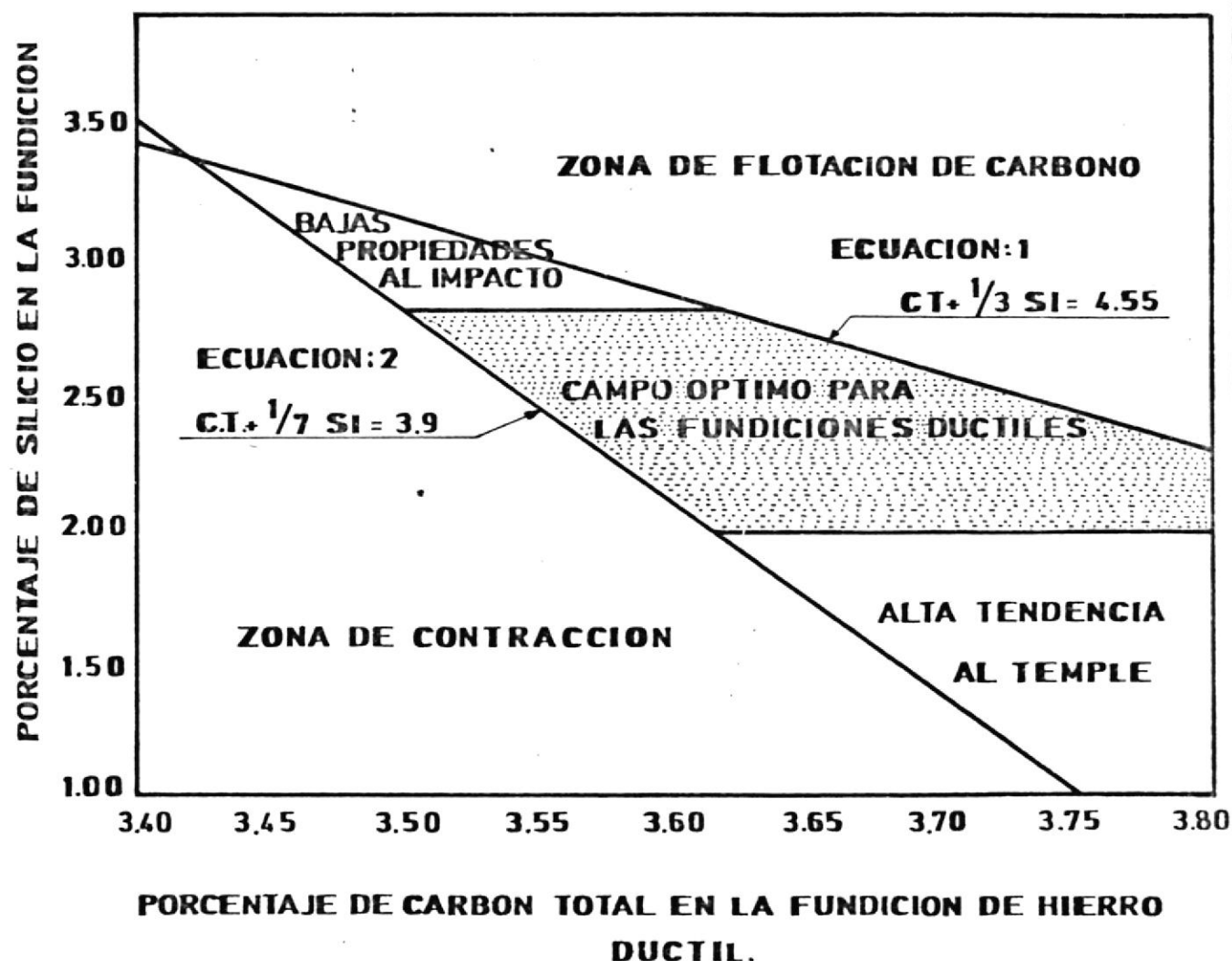


FIGURA Nº 13

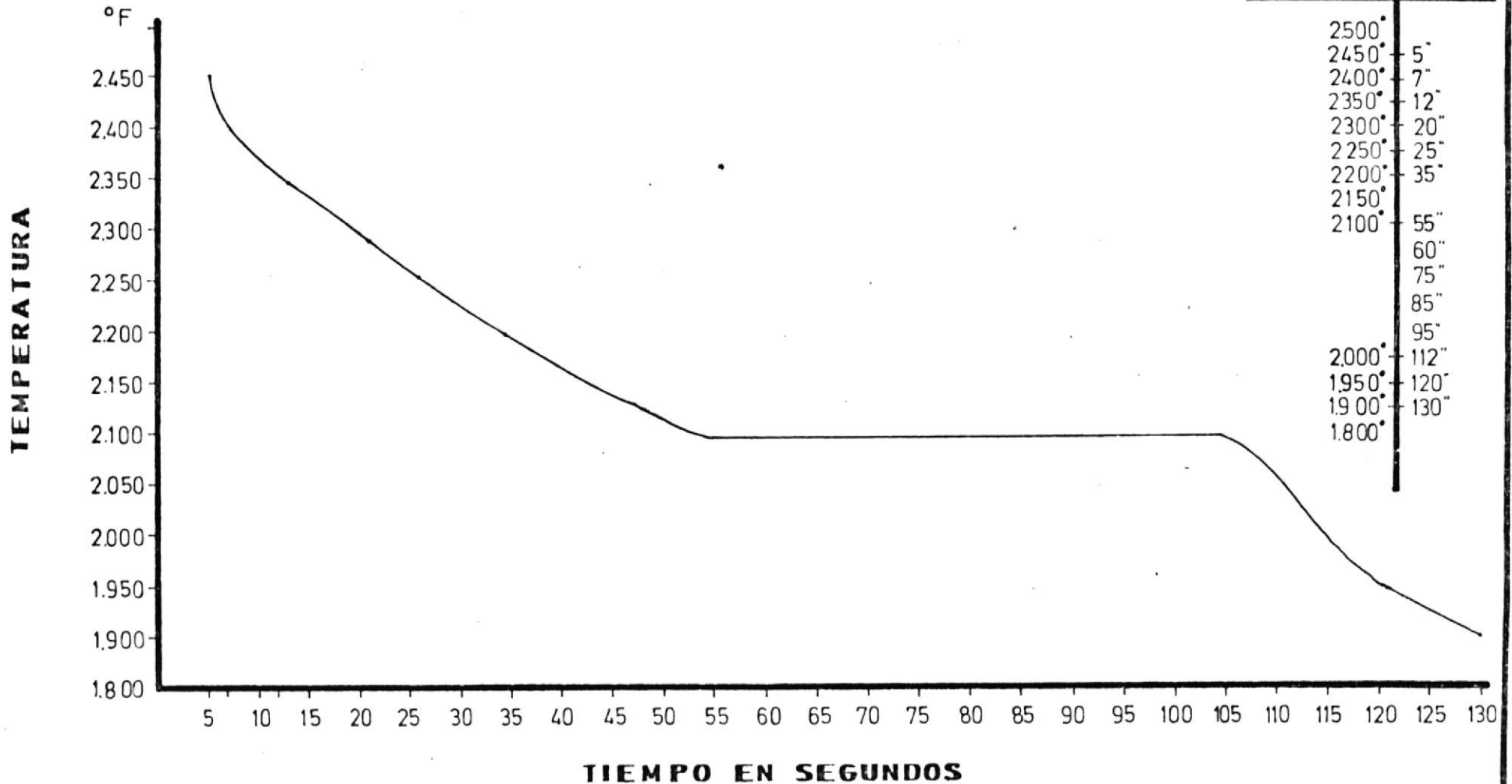
Para determinar el valor del porcentaje de Carbono total, se procede a tomar una muestra del material fundido - cuando se encuentra la temperatura de fusión (1450°C aproximadamente). Esta es vaciada a un molde de arena al mismo que se le ha instalado previamente un termocupla para poder determinar la variación de la temperatura durante el proceso de solidificación en función del tiempo. Se toman valores cada cinco segundos; con estos valores obtenidos, se efectúa un gráfico y se nota claramente que a una determinada temperatura, la pendiente de la curva es nula, es decir, la temperatura no varía con respecto al tiempo; a este fenómeno se lo denomina curva "de arresto" y es justamente donde se solidifica la aleación. Con el valor de la temperatura "de arresto" se acude al diagrama de equilibrio Fe-C y de determina el valor del porcentaje de carbono total contenido en la aleación.

Para encontrar el otro elemento de la ecuación, esto - es el porcentaje de Silicio, se acude a la cuña de temple, esta es una coquilla de hierro colado de forma triangular como se muestra en la figura **15** y que se basa en el principio de solidificación del material fuera del equilibrio; el hierro solidifica como hierro blanco en la zona de mayor enfriamiento y como hierro gris, en la zona de menor enfriamiento, dependiendo también este tipo de solidificación, de

CURVA DE SOLIDIFICACION

TIEMPO - TEMPERATURA

EXPERIMENTO Nº2



TEMPERATURA DE FUSION: 2.450 °F

TIEMPO DE FUSION: 2 HORAS 40 MINUTOS

FIGURA Nº 14

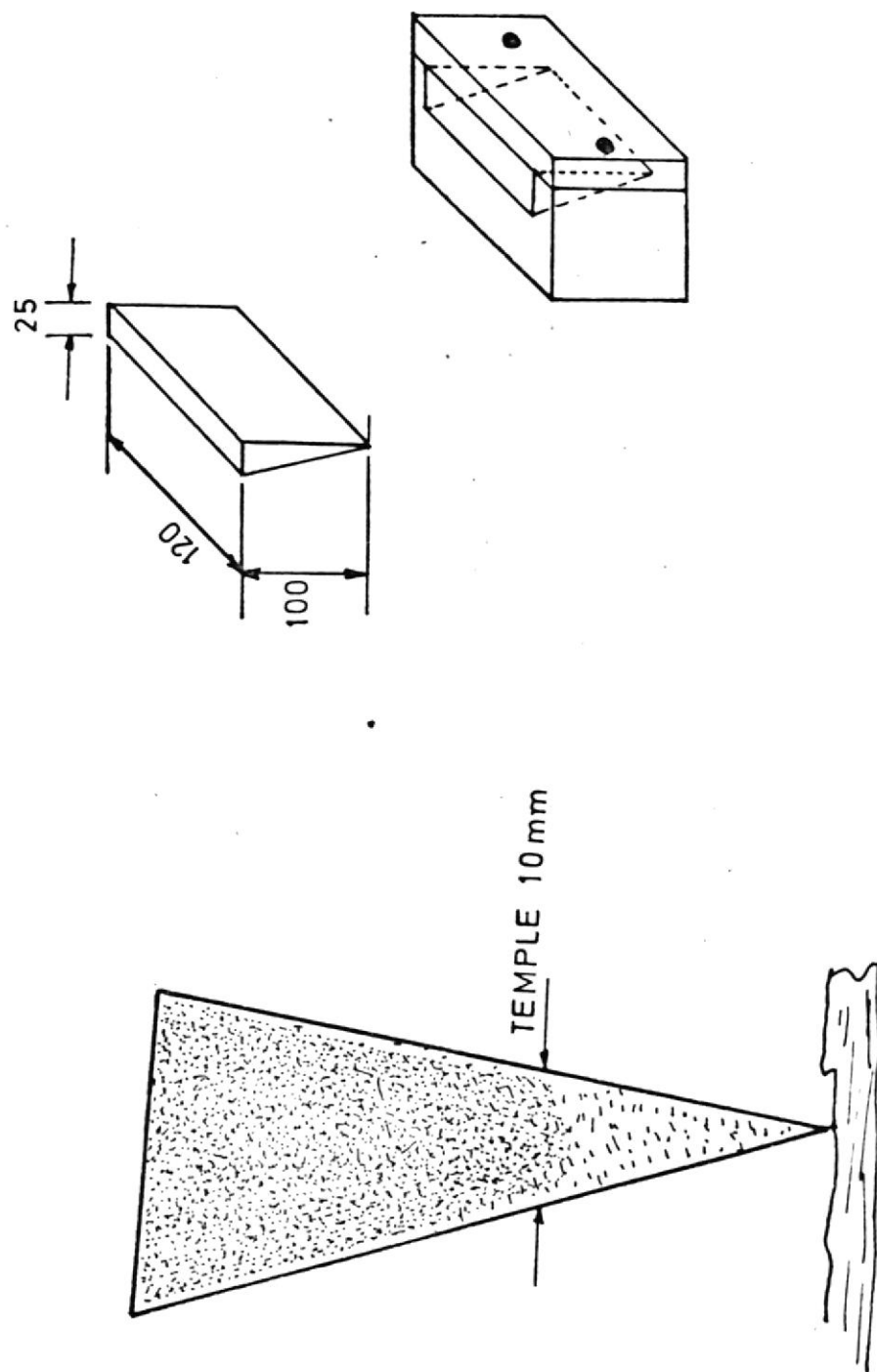
los contenidos de Carbono y Silicio presentes en la aleación tal como se ilustra en la tabla Nº **3** que proporciona contenidos de Silicio para diferentes espesores de temple.

Para la obtención experimental del porcentaje del Silicio se vació material fundido en la cuña de temple y luego de tres minutos se procedió a enfriarlo en agua y desmoldarlo; se pudo comprobar la línea de división de las dos estructuras en la cuña y se procedió a medir el espesor. Con este valor se consultó en la tabla obteniéndose de esta forma el porcentaje de Silicio.

Siguiendo esta misma práctica operacional, fue posible obtener los valores de C-E. de los tres experimentos.

TABLA Nº 2

	<u>CT</u>	<u>Si</u>
Experiencia 2	3.36	2.1
Experiencia 3	3.35	2.1
Experiencia 4	3.4	2.1



CUÑA DE TEMPLE DE MOLDE METALICO MOLDE PARA OBTENER LA CUÑA DE TEMPLE

FIGURA N° 15

TABLA Nº 3

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE SILICIO EN PORCENTAJE
DE ACUERDO AL ESPESOR DEL TEMPLE.

PROBETA (CUÑA) TRIANGULAR	
PROFUNDIDAD DE TEMPLE (S) m.m.	CONTENIDO DE SILICIO %
20	1.15
17.5	1.24
15	1.34
12.5	1.50
10	1.73
7.5	2.04
5.2	2.30

Fuente: Tecnología de la Fundición (Ing. Edoardo Capello)

Pag. 219.

C.- PROCESO DE MODIFICACION DE ESTRUCTURA E INOCULACION

El proceso de modificación es prácticamente "la llave para poder obtener hierro nodular, es decir la formación de grafito esferoidal en el hierro fundido producida por la adición de pequeñas cantidades de magnesio puro o en aleaciones con otros elementos que promueven la formación de los nódulos. El magnesio es el elemento más usado para producir hierro nodular; la cantidad de magnesio para producir los esferoides varía entre 0.02 y 0.05%, pero la adición se incrementa por la presencia del azufre en el hierro base. La temperatura de tratamiento como ya se sabe, está sobre los 1.500°C, el modificador debido a su bajo punto de vaporización, reacciona violentamente, por lo que se debe tener precaución en el momento del tratamiento.

Para efectuar la modificación del hierro base de cada una de las coladas, se utilizó pequeñas trozos de aro de Magnesio de chatarra de una vioneta; se escogió esta pieza luego de consultar la referencia 7 volumen I página 1112 a fin de buscar la composición de la aleación y se asumió que se trata del material de aviación (permanet mold costing)EZ33A, que es de alto contenido de magnesio cuya composición química es la siguiente:

Material	Tierras raras	Zn	Mn.	Zr	Mg.
EZ 33 A	3 %	2.7%	0.2%	0.5%	Balance

Las cantidades de Magnesio que fueron usadas en los tratamientos modificadores en cada una de las experiencias, fueron calculadas a partir de las fórmulas propuestas por la referencia 6 página 232, una de ellas es la siguiente:

$$\text{Eficiencia del tratamiento} = \frac{\% \text{ de Mg en el hierro}}{\% \text{ de Mg agregado} - \% \text{ S en Hierro Base}} \times 10$$

Dadas las condiciones del proceso de fusión en horno de crisol, el metal fundido absorbe oxígeno y azufre del medio ambiente. Esto determina que la eficiencia del tratamiento con aleaciones ricas en Mg sean bajos, porque al incrementarse el contenido de azufre en el metal, debe incrementarse en igual proporción la cantidad de magnesio y por otro lado con mayor cantidad de oxígeno presente, el magnesio se oxida y pierde sus propiedades modificadoras. Debe mencionarse que en este punto, que se trató de realizar análisis para la determinación del contenido de magnesio en el material de carga y en este material tratado a fin de encontrar el valor de la eficiencia del tratamiento modificador a través de la fórmula precitada, lo cual no fue posible por la falta de laboratorio químico que lo determine. Ha sido por esta causa que se siguieron las recomendaciones de la información bibliográfica en cuanto a la eficiencia que la experiencia ha recopilado para el proceso de modifi-

cación con campana de inmersión usando magnesio puro o aleaciones que contengan más de 90% de este elemento.

Esta información indica que usualmente se asumen eficiencias comprendidas entre el 20 y 30%. A partir del dato de la eficiencia del tratamiento, se puede calcular la cantidad de Mg. que se debe añadir para la modificación, usando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ adición de Mg} = \frac{\% \text{ Mg. deseado}}{\% \text{ eficiencia}} + \% \text{ S}$$

De acuerdo con esta fórmula se realizó los cálculos pertinentes para las cargas de 75 Kg. Se tuvo el valor de aleación EZ 33A necesario para efectuar el tratamiento.

$$\% \text{ adición Mg} = \frac{0.05}{0.25} + 0.02 = 0.22 \% \text{ Mg.}$$

$$\text{para la aleación EZ 33A: } \frac{0.22}{0.93} = 0.25\% \text{ Mg. aleado}$$

Peso de EZ 33A para

$$\text{la carga de 75 Kg (150 Lbs)} = \frac{0.25 \times 150}{100} = 0.37 \text{ Lbs.}$$

$$\text{entonces: } 0.37 \text{ lbs.} \times \frac{16 \text{ onzas}}{1 \text{ lb.}} = 6 \text{ onzas}$$

Que fué el valor usado para cada una de las cargas y con el que se obtuvo resultados satisfactorios.

En cuanto al inoculante, se utilizó ferrosilicio comercial al 75%.

La bibliografía consultada indica que la cantidad adecuada para poder realizar una buena inoculación debe ser igual al 0.25% del peso total de la carga. De lo anteriormente expuesto se concluye lo siguiente:

$$\text{adición de inoculante} = \frac{150 \text{ lbs.} \times 0.25}{100} = 0.375 \text{ lbs.}$$

de donde:

$$0.375 \text{ lbs} \times \frac{16 \text{ onzas}}{1 \text{ lb.}} = 6 \text{ onzas}$$

Que es la cantidad de inoculante que se utilizó para el tratamiento.

D.- MUESTREO DE HIERRO NODULAR PARA ENSAYOS MECANICOS Y METALOGRAFICOS.

La toma de muestras del material fundido se la efectúa por dos propósitos a saber:

- a) Para efectuar ensayos mecánicos de resistencia a la tracción y de dureza Brinell.
- b) Para efectuar ensayos metalográficos.

En cuanto a los ensayos mecánicos se ha efectuado las tomas de muestras de acuerdo a las normas establecidas por la A.S.T.M. las mismas que indican que deberán obtenerse las probetas para ensayos de resistencia a la tracción de la parte inferior de un bloque de solidificación "Y", el mismo que deberá ser colado cinco minutos después de haber modificado e inoculado el material; las medidas y forma del bloque se las indica en el diagrama de la figura N° 16 de la página siguiente. Según la norma se establece que en la parte recta del bloque "Y" es donde se tiene las mejores condiciones de solidificación del material; debe mencionarse que existen diferentes tipos de bloques cuyas medidas están de acuerdo con la dimensión de las piezas y espesor de las piezas a fundir-

DIMENSIONES Y CARACTERISTICAS DEL BLOQUE "Y" PARA SACAR PROBETAS (PARA PRUEBAS DE TENSION)

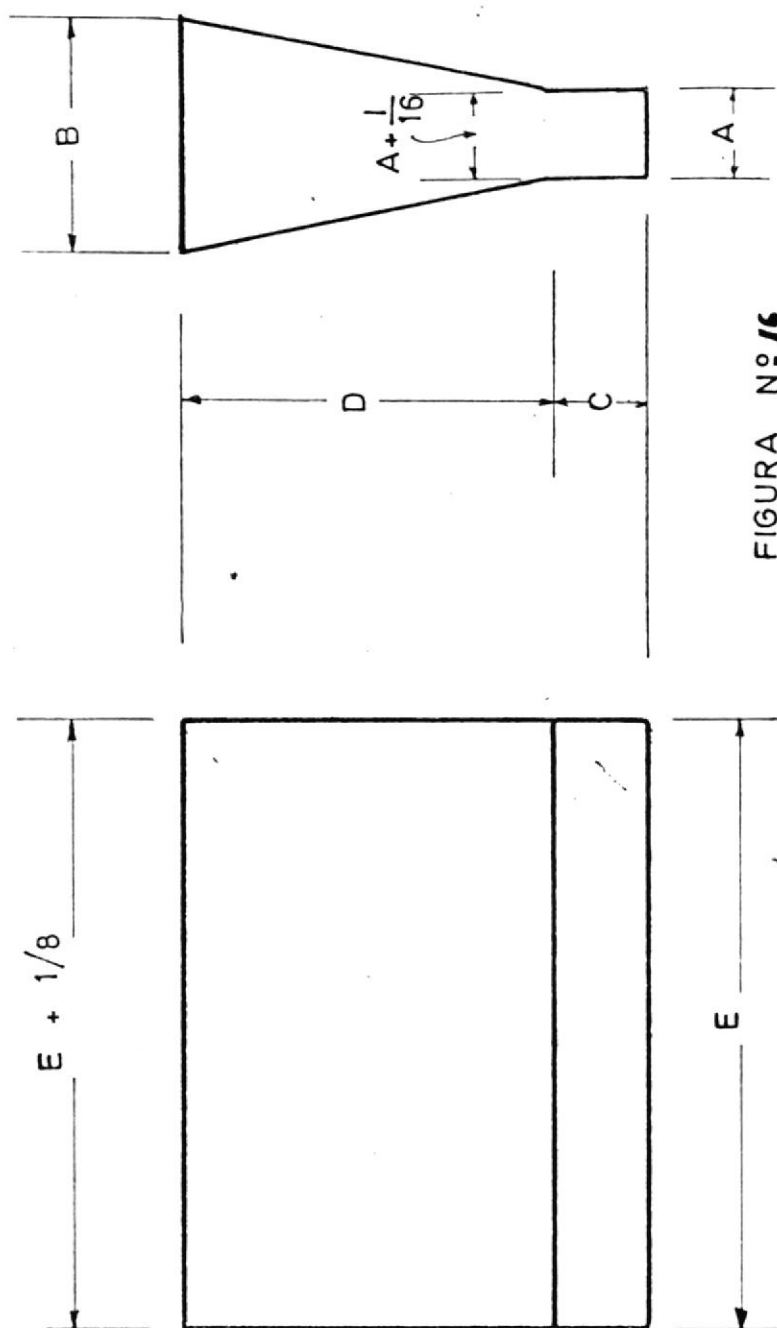


FIGURA N° 16

DIMENSIONES

A	$\frac{1}{2}$ "
B	$1 \frac{5}{8}$ "
C	$\frac{3}{4}$ "
D	$5 \frac{3}{8}$ "
E	6"

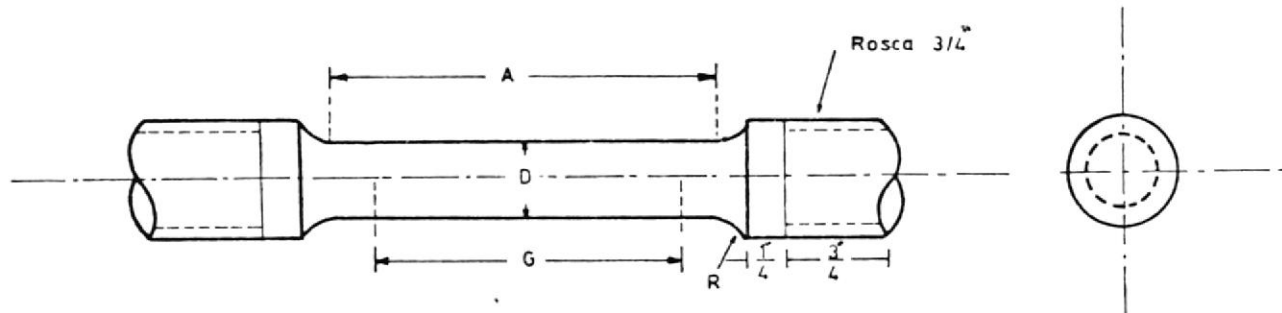
se; como en el presente trabajo las máximas medidas de espesor de las piezas fundidas en hierro nodular fue de 1" (25.4mm) entonces se tomó un bloque de espesor similar a las piezas, de tal manera que al sacar las probetas del mismo, las pruebas dieran valores similares a las propiedades de resistencia de las piezas fundidas. Las probetas tomadas de la parte inferior del bloque, se las maquinó hasta obtener medidas tales que sigan las normas A.S.T.M., cuyas características y dimensiones se presentan en la Fig. Nº 17 .

Las probetas para ensayos de dureza Brinell fueron obtenidas de los extremos de la barra provenientes del bloque "Y".

En el presente trabajo que como se sabe abarca cinco experiencias efectuadas, durante las primeras se colaron tres bloques "Y" a fin de sacar tres probetas para ensayos, pero esta práctica no resultó muy favorable porque el peso de cada bloque - es aproximadamente de 12 Kg y realmente quedaba poco material para el fundido de piezas; entonces a partir de la experiencia Nº 4 se procedió a fundir una placa de sección rectangular de 25 mm. de espesor por 50 mm. de ancho por 250 mm. de largo a fin de poder obtener de un solo bloque un mayor número de probetas y así poder efectuar una mayor cantidad de ensayos que den un valor más representativo de las propiedades mecánicas

Probeta para ensayos de traccion

Material: Hierro Nodular



Dimensiones	Probeta Estandar pulg (mm) 1/2 (13 mm)
G - Longitud de la zona de estudio	2.000 ± 0.005 (50.8 ± 0.13)
D - Diametro	0.500 ± 0.010 13 ± 0.25
R - Radio de filete	3/8 min (9.5, min)
A - Longitud de la sección reducida	2 1/4 min (5.7, min)

Designacion: A.S.T.M. A 536-72

Fuente: 1976 Annual Book of
A.S.T.M. Standarts

y metalográficas del material obtenido. De esta manera fue posible tener suficiente material para fundir piezas de aplicación práctica que pudieran introducirse en el mercado; se probó fundiendo herrajes usados como soportes de las líneas de distribución eléctricas (de alta tensión) cuya fotografía se muestra en la página N^o 188.

Las probetas fueron identificadas por dos números: el primero indica el número de la colada y el segundo, el correspondiente al bloque "Y" que se obtuvo. Para las prácticas N^o 4 y 5 la identificación tiene una ligera variante: el primer número indica la colada y el segundo número indica el orden en que se extrajo la barra de la placa comenzando por el extremo inferior.

En cuanto al muestreo de piezas de aplicación práctica, se tomaron al azar dos piezas de una colada de 100, las mismas que fueron sometidas a los ensayos de resistencia a la tracción.

Para efectuar los ensayos metalográficos, se obtuvieron muestras de la parte correspondiente a la zona de prueba de las probetas sometidas a ensayos de tracción.

E.- CONTROL DE CALIDAD

INTRODUCCION

Una vez obtenidas las probetas de acuerdo a las normas establecidas en el acápite anterior, se procedió a efectuar el control de calidad de las coladas; el objeto de esta operación consiste en determinar mediante ensayos de laboratorio las propiedades mecánicas y microestructuras metalográficas del material; una vez obtenidos los resultados correspondientes, se los analizó y comparó con patrones del Comité de Control de Calidad de la A.S.T.M. y A.S.M. respectivamente a fin de verificar si el material obtenido está encuadrado dentro de estas normas.

Las pruebas mecánicas que se llevaron a cabo, fueron: ensayos de tracción en donde se determinan los esfuerzos de resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia, elongación, y los ensayos de dureza para determinar el número de dureza Brinell.

En las pruebas metalográficas, se determinaron a microscopio: el tipo de grafito nodular, el porcentaje de nodularización, el tamaño de los nódulos, distribución de los nódulos y la ma

triz del hierro nodular; todos estos resultados serán detallados en los acápites que se desarrollan a continuación.

1.e.- Ensayos metalográficos

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 examen 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.

La composición química por si sola, no puede casi nunca constituir un elemento seguro de valoración de la calidad de un material metálico puesto que para elegirlo se necesita conocer su microestructura y propiedades tales que sean una guía para el seleccionador; por consiguiente, la metalografía no es sola

mente considerada como un instrumento de investigación, sino que se ha transformado en un elemento de control indispensable para las fundiciones en general. Esta afirmación se basa esencialmente sobre la muy notable complejidad del proceso de solidificación de las aleaciones y sobre las variadas formas de distribución de los constituyentes en las mismas.

A continuación se señalan algunos de los problemas que son resueltos a los fundidores mediante el examen de la estructura de las aleaciones:

1.- Mediante el examen micrográfico se establece el efecto de los diferentes elementos presentes en la composición química de la estructura de la aleación y por consiguiente de las características mecánicas y tecnológicas de las que se hablaron en el capítulo II (resistencia, dureza, maquinabilidad, etc.)

2.- El análisis micrográfico determina la "puesta a punto" de producciones de nuevos materiales como en el caso del presente trabajo.

3.- Determina las variaciones que se presentan en la estructura de los materiales producidos en serie, ya que es imposible conseguir estructuras homogéneas.

4) Determina las causas por las cuales dos aleaciones de composición aproximadamente igual presentan características físicas y mecánicas diversas.

5) Determina el porqué de ciertos defectos de la fundición - como porosidades, inclusión de gases, tierra, escorias, etc.

6) Mediante la microfotografía se consigue una documentación duradera de los materiales producidos que sirven como referencia para producciones futuras y hacen posible la confrontación y comparación de la calidad de un material con otro.

Se piensa con esto haber proveído un panorama más o menos amplio de las variedades de problemas que resuelve y de la utilidad efectiva del análisis metalográfico, convertido en los actuales momentos en una de las armas más poderosas con que se cuenta para vencer el sinnúmero de problemas que se presentan diariamente.

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 la cual se des

cribe a continuación detallando lo efectuado con una probeta dándose por descontado que el mismo tratamiento se efectuó con las demás.

a.- Corte de la probeta

Una vez que se efectuaron los ensayos mecánicos, se procedió a cortar una probeta de la parte correspondiente a la zona de prueba del ensayo de tracción; este corte se lo efectuó en máquina de disco abrasivo de carburo de silicio utilizando lubricante para no variar la microestructura por el calentamiento y para lubricar el corte mismo; luego se la montó sobre un bloque de resina plástica con el fin de que ofrezca facilidad en el pulido y al mismo tiempo que descansa sobre una superficie completamente plana.

b.- Pulido intermedio

Se lo efectuó para eliminar las capas más gruesas de material distorsionado que se pudieron originar durante la operación de corte; este pulido intermedio se lo efectuó en mesas que poseen lijas de grano Nº 240, 320, 400 y 600. Se tuvo especial cuidado en la presión ejercida de la probeta contra los abrasivos para evitar la destrucción de la estructura grafi-

tica del material o arranque de los nódulos de la estructura; además se siguió la práctica de girar la pieza en 90° cuando se pasó de una lija a otra a fin de ir eliminando - toda clase de rayaduras.

c.- Pulido final

Se lo efectuó para eliminar totalmente cualquier pequeña rayadura que persista del pulido anterior, este se lo realizó en disco rotatorio revestido de paño al que se le agregó como abrasivo óxido de aluminio (alúmina) con granulometría - de 0.3 micrones; la velocidad del disco (que es variable), fue controlada a 400 R.P.M. y se procedió a pulirlo, haciendo girar la probeta en sentido contrario a la rotación del disco para evitar defectos de pulido como el que se denomina "cola de cometa"; el pulido final terminó cuando desaparecieron las rayas provenientes de la lija 600; luego se procedió a un lavado de la probeta rápidamente con agua y llevada al secador de aire caliente, habiendo quedado lista para su análisis al microscopio.

Para analizar completamente la microestructura del hierro nodular se efectuaron 2 tipos de examen metalográfico: metalografía sin ataque y metalografía con ataque químico.

1.e.1 Metalografía sin ataque

El hierro nodular presenta al microscopio parte de su estructura, sin ataque químico, es decir se pueden observar las probetas sin aplicación de ningún reactivo. A este tipo de análisis se lo denomina metalografía sin ataque y mediante él se determinó : el tamaño de los nódulos, el porcentaje de nodularización, el tipo de grafito nodular y la distribución de los nódulos. 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.

1.- Tamaño de los Nódulos

La determinación del tamaño de nódulos es muy importante ya que confirma si hubo buena inoculación y el valor de las propiedades mecánicas.

El tamaño de los nódulos es determinado, observando cada una de las probetas al microscopio a cien aumentos al cual se le ha colocado la pantalla esmerilada para a través de ella analizar la estructura; una vez efectuada esta operación, se procede a hacer un recorrido de toda la probeta a fin de localizar el nódulo más grande; con un calibrador se determina

la medida del mismo y se acude a la tabla patrón establecida por la A.S.T.M. que determina el tamaño de los nódulos en base a la medida tomada en la pantalla. La tabla se la presenta a continuación:

TABLA Nº 4

DETERMINACION DEL TAMAÑO DE GRAFITO (NORMA A.S.T.M)

TAMAÑO	MAXIMA DIMENSION A 100 x (mm.)
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

2.- Porcentaje de Nodularización

Mediante este análisis se trata de comprobar si el material es totalmente nodular o presenta trazas de grafito laminar, es de esperarse obtener un porcentaje de nódulos superior a 90% para poder afirmar que el material es calidad nodular.

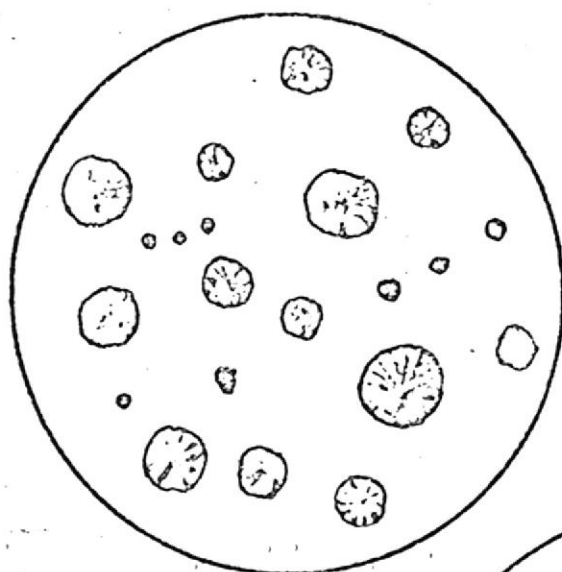
Si al observar al microscopio la probeta, no se muestra ningún ápice de estructura laminar, se dice que el material posee 100% de nodularización sin importar la forma o el tipo de los mismos.

3.- Tipo de grafito Nodular

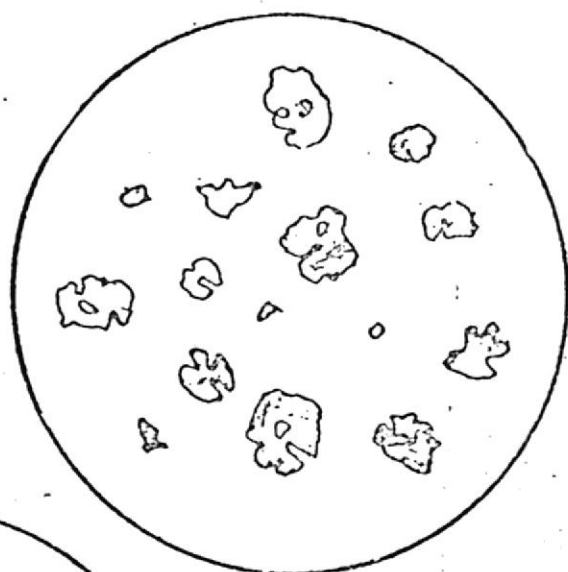
El tipo de grafito nodular está determinado por la forma en que él se encuentra presente en la microestructura. La A.S.T.M. ha determinado un patrón o estandard para especificar el tipo de los nódulos. El método consiste en efectuar la comparación de la microestructura de la probeta vista a 100 aumentos con aquellos que se encuentran en el patrón y que se muestran en la página siguiente; de aquí se deduce que los tipos de grafito nodular pueden ser I - II - III - IV - V y de acuerdo a este análisis se puede controlar en gran parte las propiedades mecánicas. Es de desear obtener los tipos I - II que posee buena resistencia, el tipo III es de media resistencia ya que la forma del grafito se presenta entre laminar y nodular y los tipos IV y V son hierros nodulares de baja resistencia.

4.-Distribución de Nódulos

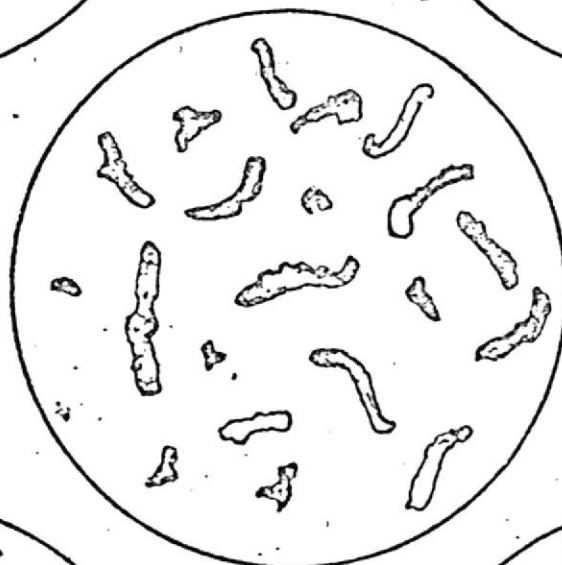
Como es de suponerse, una mejor distribución nodular implica de manera directa un material de buena calidad; la distribución de nódulos es un análisis que se lo efectúa de igual manera que el



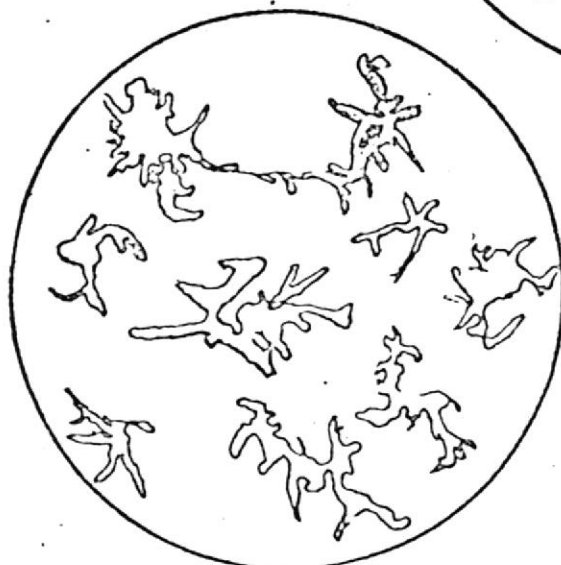
I



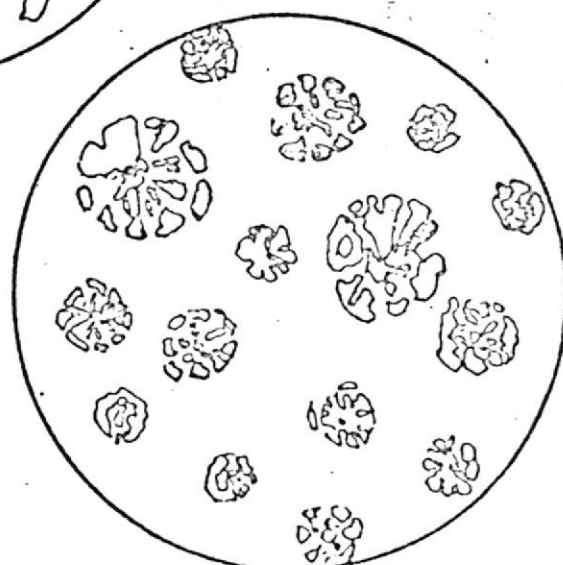
II



III



IV



V

DIAGRAMA PATRON DE LA A.S.T.M. PARA LA
DETERMINACION DEL TIPO DE GRAFITO NODU
LAR.

anterior, es decir se llega a su determinación observando la probeta al microscopio con una resolución de 100 aumentos; - luego se procede a compararla con el patrón de la A.S.T.M. respectivo y que aparece en la página siguiente. Lo deseable para obtener un material de óptima calidad es estar encuadrado entre los rangos 5 y 6, es decir una distribución nodular comprendida en valores de 150 a 300 nódulos por mm.²

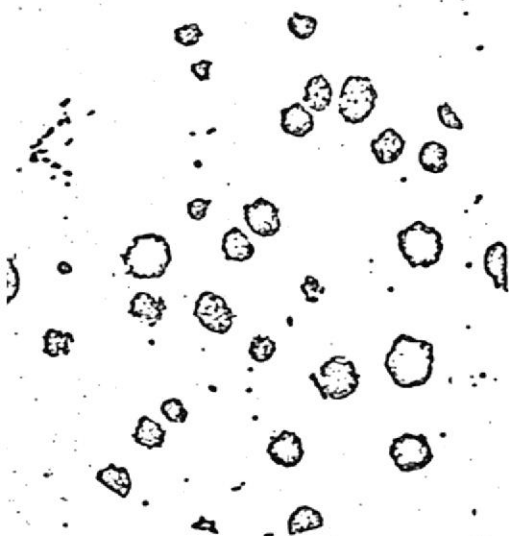
Una vez que se han detallado los métodos de los análisis metalográficos sin ataque, a continuación se detallan los resultados obtenidos con cada una de las probetas correspondientes a las diferentes experiencias efectuadas.



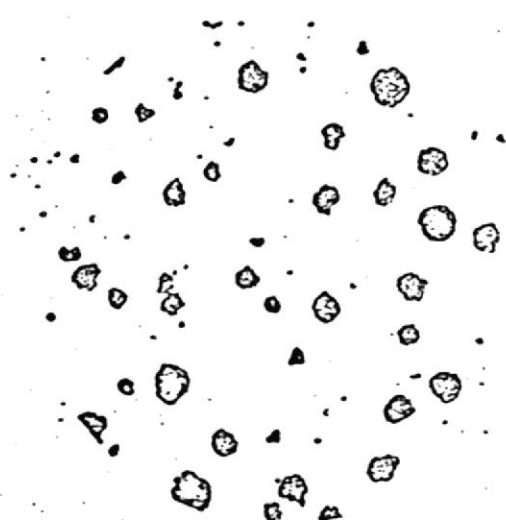
(1) 25 Nódulos Per mm^2



(2) 50 Nódulos Per mm^2



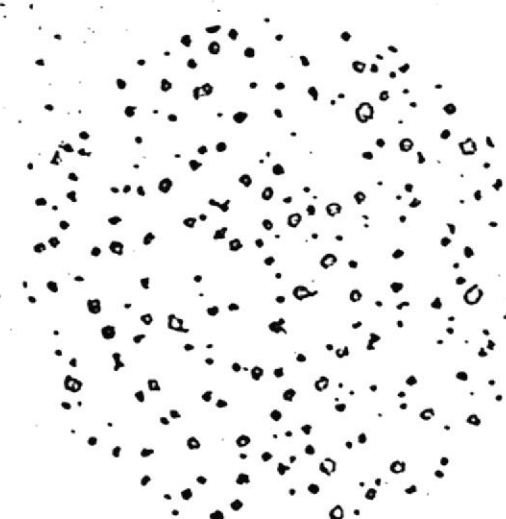
(3) 75 Nódulos Per mm^2



(4) 100 Nódulos Per mm^2



(5) 150 Nódulos Per mm^2



(6) 300 Nódulos Per mm^2

RESULTADOS DE LOS EXAMENES METALOGRAFICOS DE LAS PROBETAS

PROBETA Nº	Tipo de Grafito	Tamaño de Grafito	% de Nódularización	Distribuc. de Nódulos	Observaciones.
1 - 1	Laminar Tipo A	12-25 m.m.	0%	No nódulos	Grafito laminar (no es motivo de este trabajo.)
2 - 1	I - II	5	100%	4 - 5	-----
2 - 2	I	5	100%	4 - 5	Porosidad visible
2 - 3	I - II	6	100%	4 - 5	Macro Poros
3 - 1	I - II	5	100%	5 - 6	
3 - 2	I - II	5	100%	6	
4 - 1	I - II	5	100%	5 - 6	-----
4 - 2	I - III	5	100%	5	Estructura vermicular
4 - 3	I - II	6	100%	4 - 5	
5 - 1	I - II	5	100%	5	-----
5 - 2	I	5	100%	4	-----
5 - 3	I	5	100%	4 - 5	-----
5 - 4	I - IV*	5	100%	4 - 5	Micro Poros
5 - 5	I - II - IV	5	+de 90%	4	Micro poros
5 - 6	I - II	5	100%	4	Poros visibles.
5 - 7	I	5	100%	4 - 5	Completamente porosa
5 - 8	I - II	5	100%	5 - 6	-----

* Trazas.

1.e.2. Metalografía con ataque.-

Efectuando 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 nodular, se usó como reactivo de ataque, una solución de nital al 2% (100 cc de alcohol etílico y 2 cc.de ácido nítrico concentrado).

Al atacar las probetas se observó la presencia de la matriz, característica de cada una de ellas en las que predominó la matriz perlítica como se podrá observar en la microfotografía N° 17 de la colada 2 y en las microfotografías N° 19, - 21 y 23 de las coladas 3, 4 y 5 respectivamente donde aparece la matriz perlítica-ferrítica 95% - 5%. Probablemente estos resultados donde predomina la matriz perlítica se debe a que el porcentaje de silicio en la aleación resultó un poco bajo. Efectuando control de ciertas variables es posible obtener la matriz que se desee de acuerdo a los requerimientos del material; se se consulta la tabla N° 1 referente a las recomendaciones de los porcentajes de carbón y silicio, se verá que éstos pueden ser escogidos para obtener hierros nodulares perlíticos o ferríticos, los primeros como ya se ha podido ver poseen alta resistencia, alta dureza pero menos duc

tilidad que los segundos.

2.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 nodular 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 3.000 Kg durante tres segundos.

Básicamente lo que se mide es un esfuerzo, es decir el va-

lor numérico de la dureza Brinell tiene por dimensiones Kg/mm.^2 que es el cociente de dividir la carga aplicada para el area del casquete de la huella producida, - pero en la práctica, existen tablas como las que aparecen al final de este trabajo en las que se lee directamente el valor de la dureza Brinell en función de la carga aplicada (en este caso 3.000 Kg) y del diámetro de la huella.

Los diferentes ensayos efectuados sobre cada una de las probetas de las experiencias efectuadas se exponen en el cuadro que aparece en la página siguiente.

RESULTADOS DE LOS EXAMENES DE DUREZA BRINELL

PROBETA Nº	DIAMETRO DE LA HUELLA (mm.)	# DUREZA BRINELL (P= 3.000 Kg.).
1 - 1	3.72	266
2 - 1	3.70	269
2 - 2	3.70	269
2 - 3	3.80	267
3 - 1	4.18	209
3 - 2	4.16	209
4 - 1	3.76	260
4 - 2	3.75	260
4 - 3	3.80	255
5 - 1	4.10	217
5 - 2	3.95	230
5 - 3	3.99	229
5 - 4	4.00	229
5 - 5	4.00	229
5 - 6	4.00	230
5 - 7	3.97	230
5 - 8	3.95	230

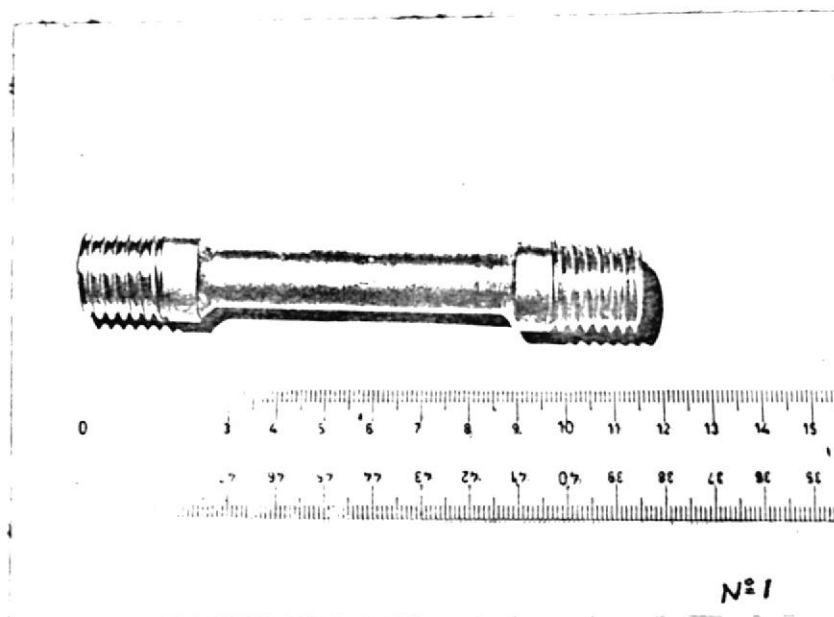
3.e. Ensayos Mecánicos

Los ensayos mecánicos se los realizó con el fin de obtener resultados de los esfuerzos de resistencia a la tracción, límite de fluencia y elongación de cada una de las probetas para relacionarlos y compararlos con las normas de los standards A.S.T.M. y verificar si están encuadrados dentro de los grados que ellas especifican.

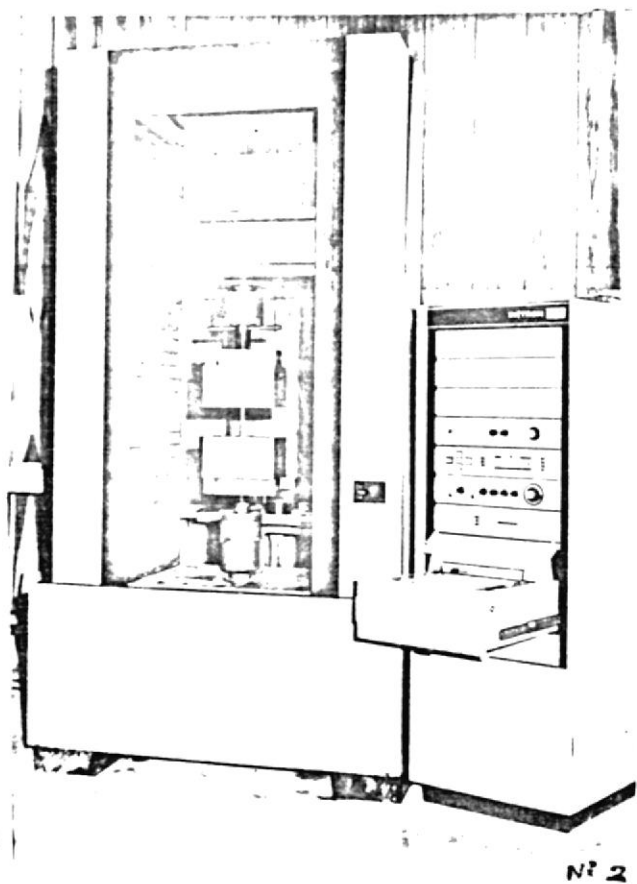
Los ensayos mecánicos fueron efectuados en la máquina de pruebas de resistencia marca "INSTRON" Mod. 1128; las probetas fueron maquinadas adecuadamente bajo estrictas normas A.S.T.M. (ref. 10 pág. 207), cuyo gráfico aparece en la página N° 132. En la identificación de las probetas, se siguió el mismo orden que para los demás ensayos.

El ensayo de tracción fue efectuado aplicando cargas axiales de tensión, hasta llegar al punto de ruptura, la velocidad del ensayo fue de 5 mm./minuto.

Tanto los resultados de las pruebas como las curvas de carga-deformación que fueron efectuadas por la misma máquina, se los presenta en las páginas siguientes.



Fotografía de una Probeta para ensayos
de tracción.



Fotografía de un ensayo de
tracción efectuado en la
máquina "Instron" mod.1128

ESPOL

Escuela Superior Politecnica del Litoral
Lab. Ensayo de Materiales

Ensayo de Tensión

Solicitud N°

Solicitado por:

Material : HIERRO NODULAR

Temp. de ensayo : 26°C

Velocidad de ensayo : 5 mm/minuto

Equipo usado : Máquina de Ensayos "INSTRON" Mod. 1128

Fecha : Julio 12/77

Observaciones:

Resultados de las pruebas de tensión efectuadas a las probetas de Hierro nodular de las diferentes experiencias.

(Tesis de Grado de Jacinto Flor Díaz).

PROBETA N°	SECCION DE LA MUESTRA	SECCION DE LA PROBETA	LONGITUD INICIAL	LONGITUD FINAL	LIMITE DE FLUENCIA	RESISTENCIA A LA TRACCION	MODULO DE ELASTICIDAD	ALARGAMIENTO	OBSERVACIONES
	mm ²	mm ²	mm	mm	kgf/mm ²	kgf/mm ²	kgf/cm ²	%	
1 - 1	113	113	50	50.05	----	41.59	----	0.01	(hierro gris)
2 - 1	113	113	50	51.00	46.25	51.28		2	
2 - 2	95	95	50	51.00	48.50	52.50		2	
2 - 3	95	95	50	51.5	47.00	51.00		3	
3 - 1	95	95	50	51	47.25			2	
3 - 2	95	95	50	51.5	48.00			3	
4 - 1	95	95	50	----	-----	-----		---	muy porosa
4 - 2	95	95	50	51.2	15.78	23.15		2.5	muy porosa
4 - 3	95	95	50	50.04	-----	44.21		0.082	muy porosa

ESPOLEscuela Superior Politecnica del Litoral
Lab. Ensayo de Materiales**Ensayo de Tensión**

Solicitud N°

Solicitado por:

Material : HIERRO NODULAR

Temp. de ensayo : 26°C

Velocidad de ensayo : 5 mm/minuto

Equipo usado : Máquina de Ensayos "INSTRON" Mod. 1128

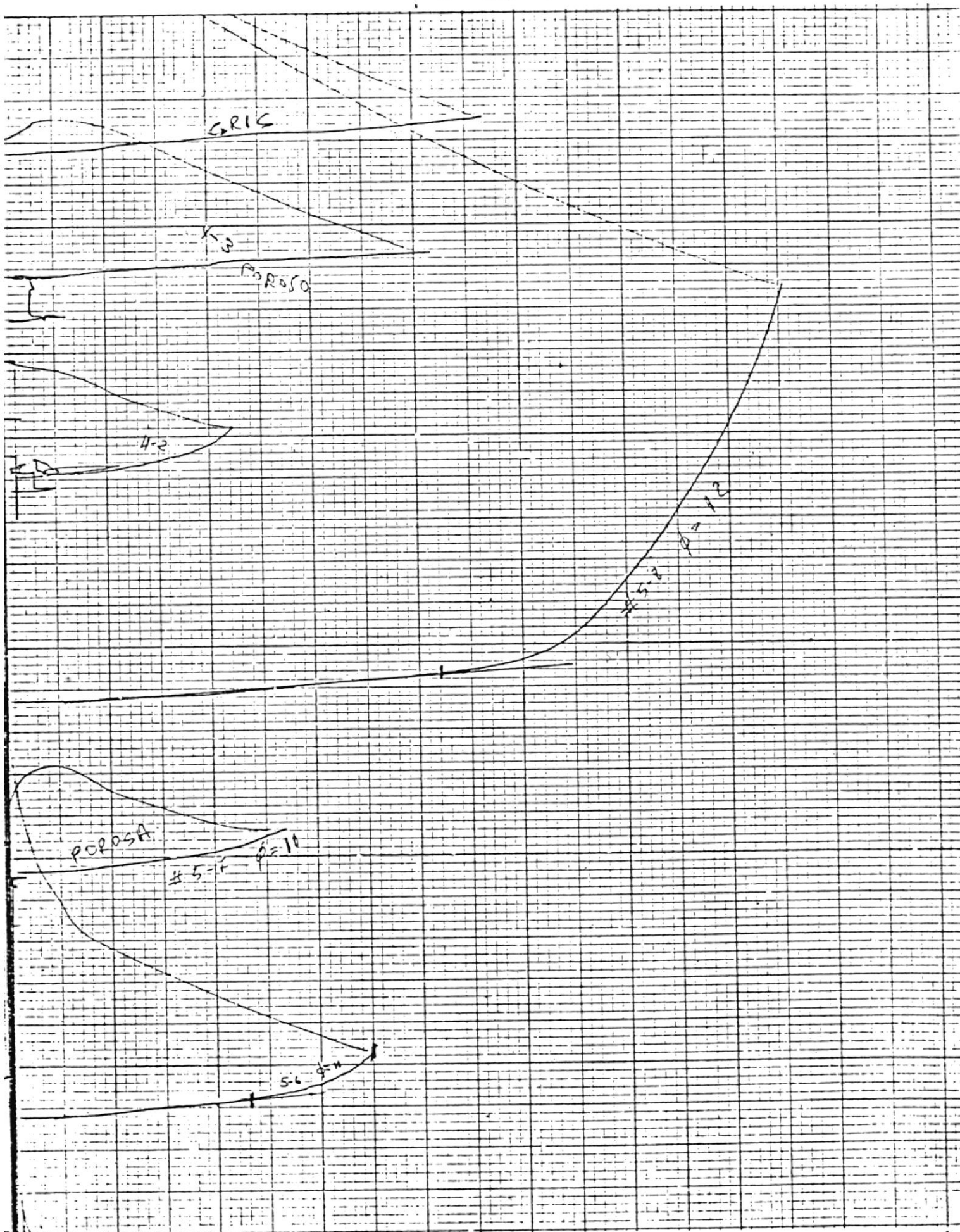
Fecha : Julio 12, 1977

Observaciones:

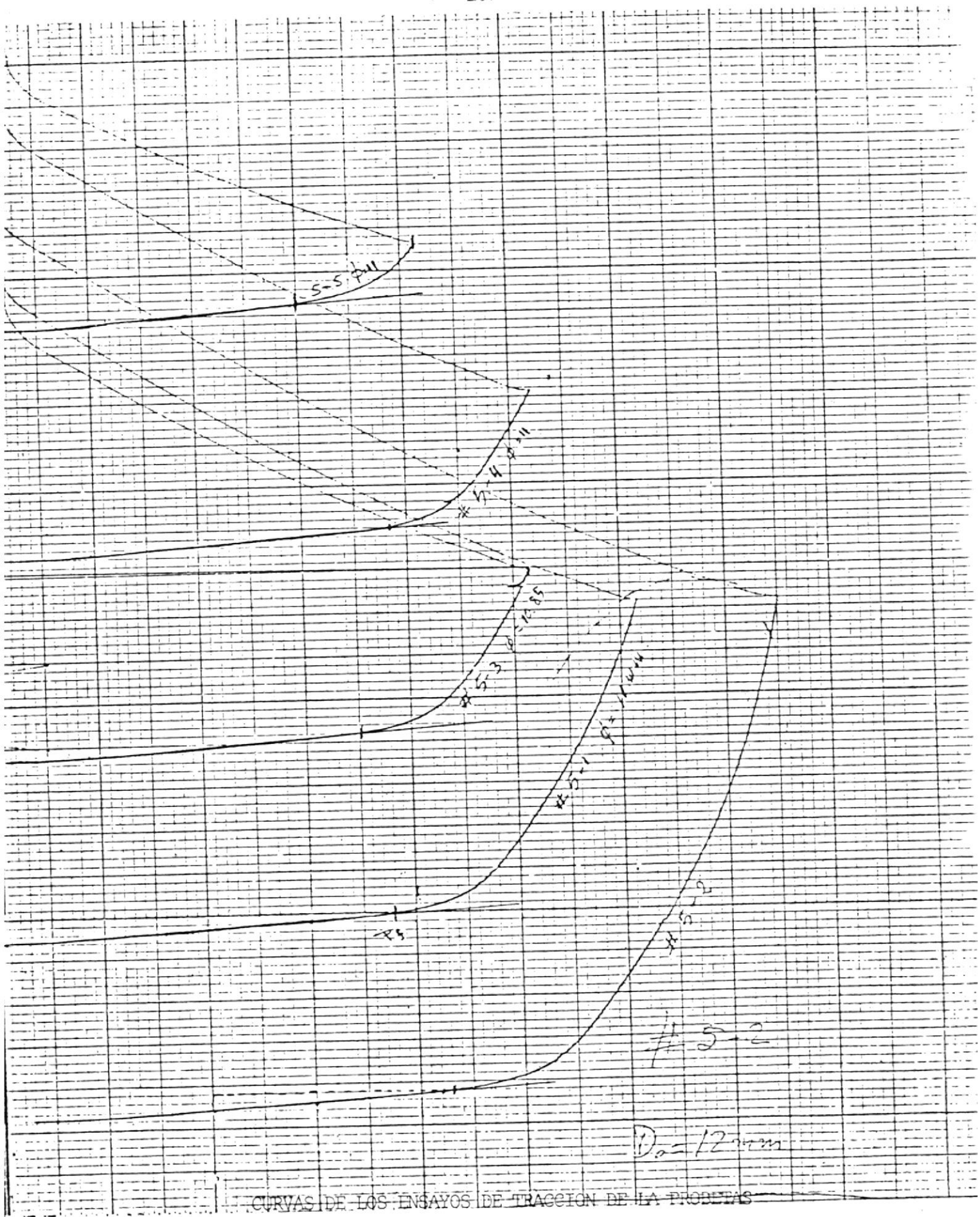
Resultados de las pruebas de tensión efectuadas a las probetas de Hierro nodular de las diferentes experiencias.

(Tesis de Grado: Jacinto Flor D.)

PROBETA N°	SECCION DE LA MUESTRA	SECCION DE LA PROBETA	LONGITUD INICIAL	LONGITUD FINAL	LIMITE DE FLUENCIA	RESISTENCIA A LA TRACCION	MODULO DE ELASTICIDAD	ALARGAMIENTO	OBSERVACIONES
	mm ²	mm ²	mm	mm	kgf/mm ²	kgf/mm ²	kgf/cm ²	%	
5 - 1	95	95	50	53	41	65	1.33x10 ⁶	6	
5 - 2	113	113	50	53	38	66.3		6	
5 - 3	92	92	50	52	38	55.9		4	
5 - 4	95	95	50	51.5	40.5	54.7		3	
5 - 5	95	95	50	51.5	31.5	45.2		3	
5 - 6	95	95	50	51	26.4	40		2	
5 - 7	95	95	50	50.15	20.	31.5		2	
5 - 8	113	113	50	53	37.2	66.37		6	



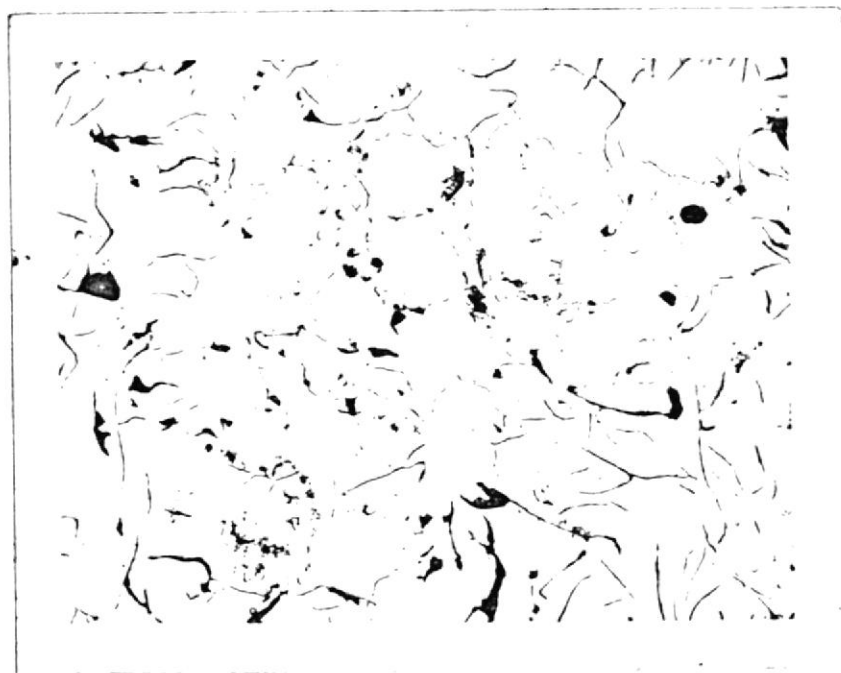
CURVAS DE LOS ENSAYOS DE TRACCION DE LAS PROBETAS OBTENIDAS
DE LAS DIFERENTES COLADAS



CURVAS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN DE LAS PROBEAS

OBTENIDAS DE LAS DIFERENTES COLADAS.

EQUIPO USADO: Máquina de Ensayos "INSTRON" Mod. 1128



Sin ataque

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 15

Colada 1

Probeta 1-1

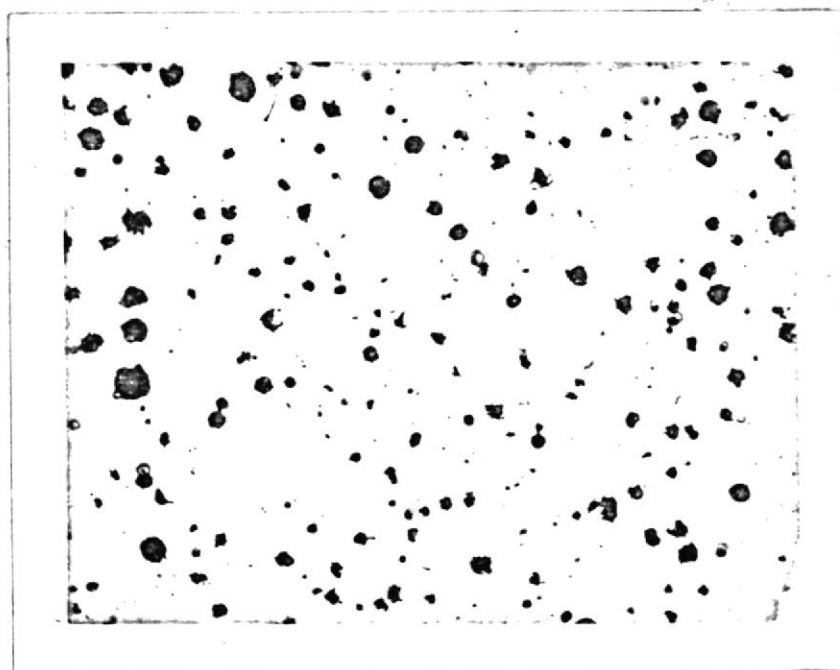
Hierro Gris

% Nodularización 0

Grafito tipo A

Tamaño del grafito laminar 4-5

Longitud max. 12 a 25 mm.



Sin ataque

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 16

Colada 2

Probeta 2-1

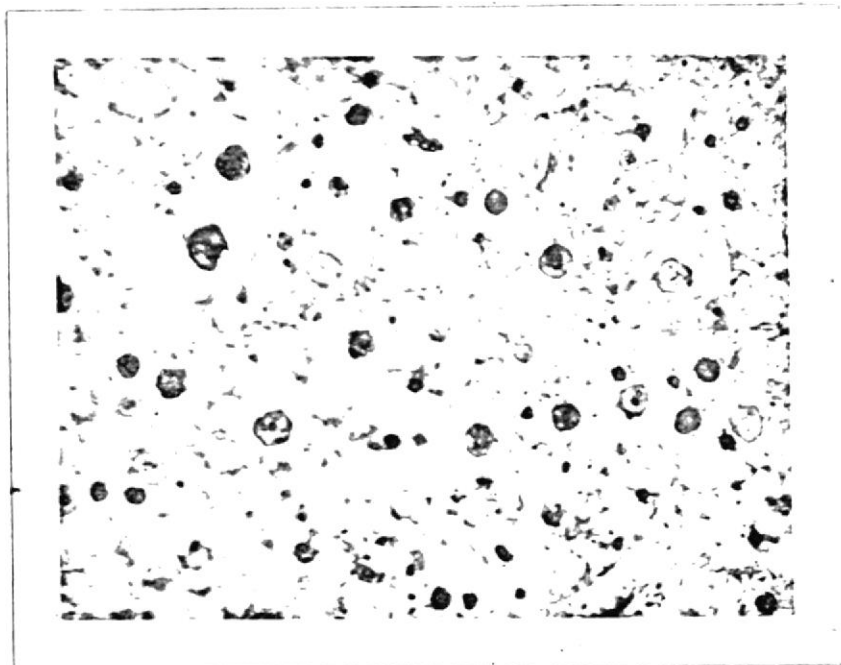
Hierro Nodular

Tipo de nódulos: I-II

% de Nódulos 100%

Distribución: 5-6 de Nódulos

Tamaño de Nódulos: 5



Nital 2%

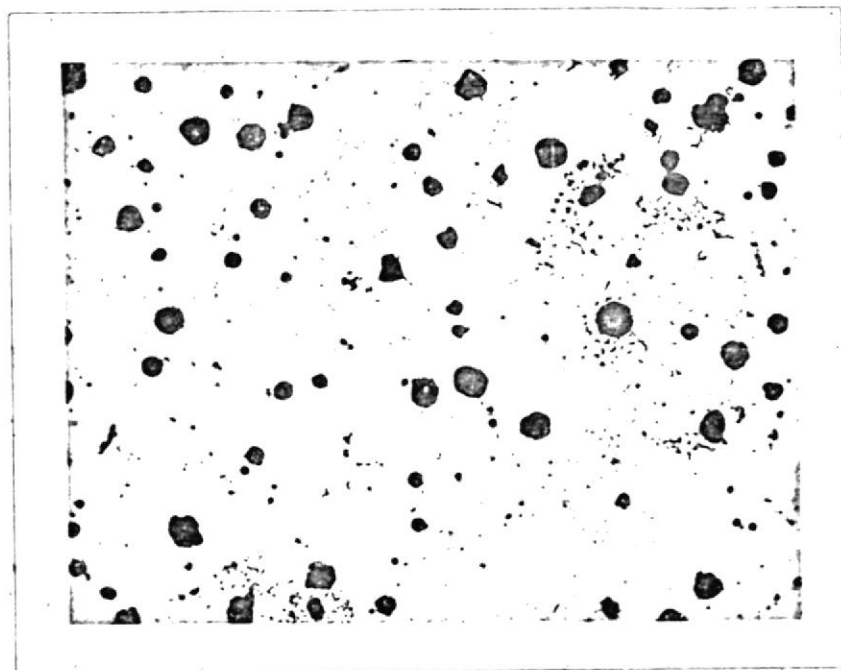
100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 17

Colada 2

Probeta 2-1

Hierro nodular con matriz
enteramente perlítica.



Sin ataque

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 18

Colada 3

Probeta 3-1

Hierro Nodular

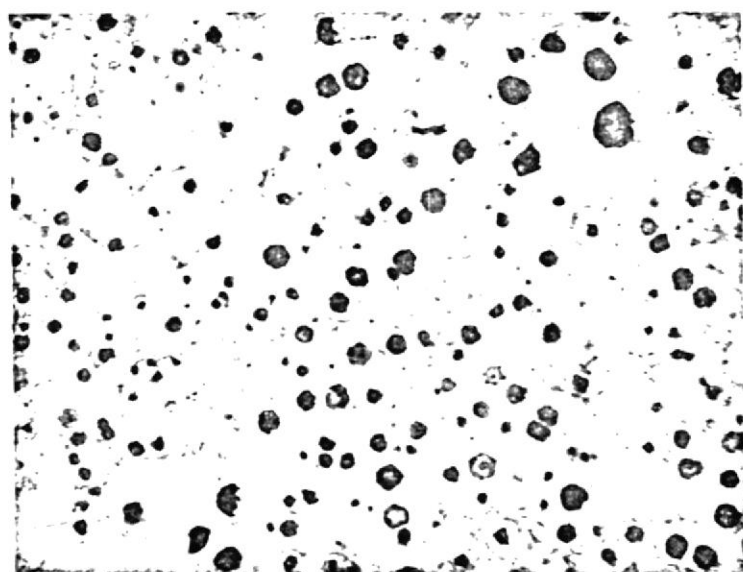
Tipo de Nódulos: I-II

% Nódulos: 100%

Distribución de Nódulos 5-6

Observaciones: Macro poros

Tamaño de Nódulos: 5



Nital 2%

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 19

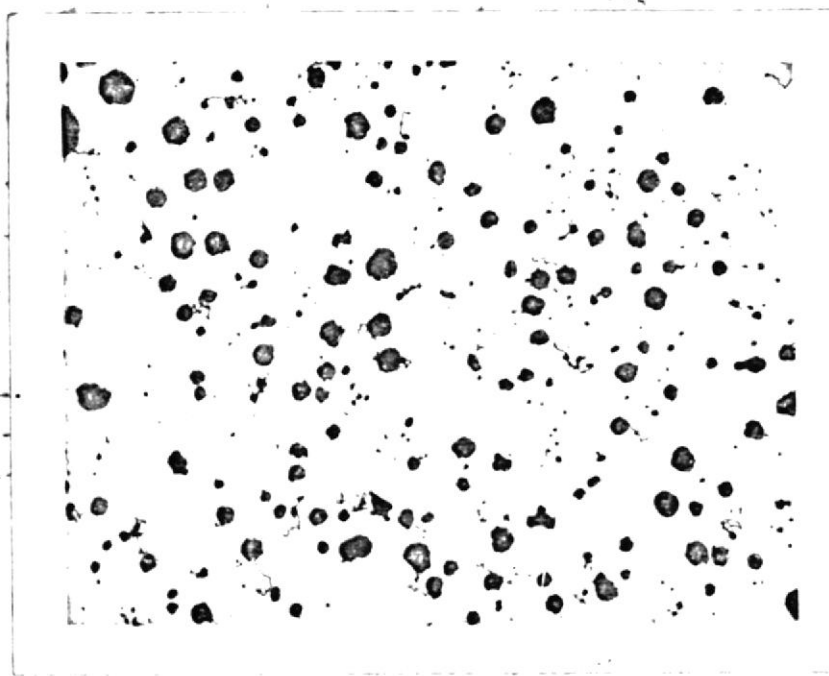
Colada 3

Probeta 3.- 1

Hierro Nodular

Matriz: Perlítica

Ferrítica 95-5 %



Sin ataque

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 20

Colada 4

Probeta 4-1

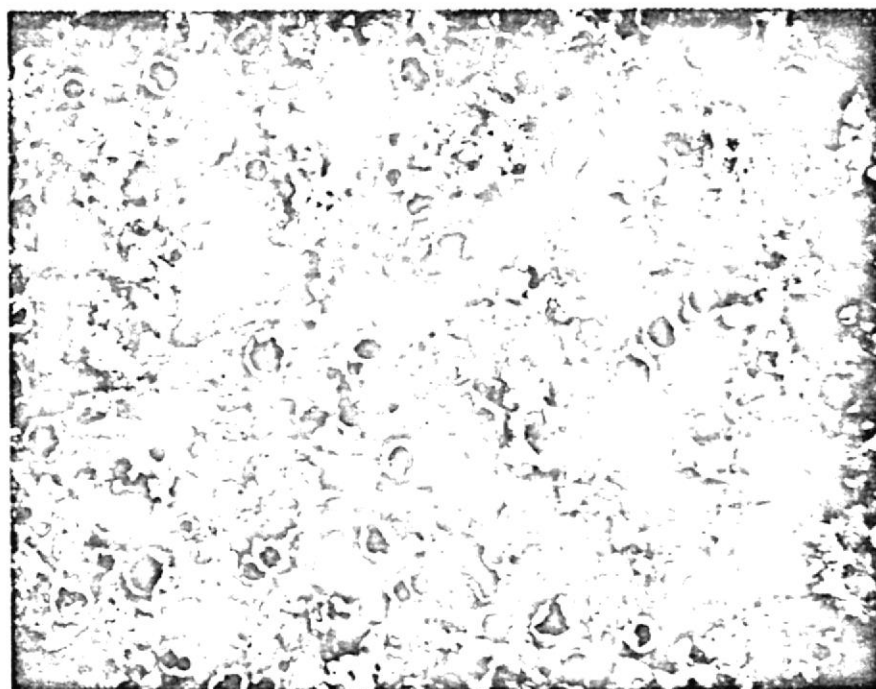
Hierro nodular

Tipo de Nódulos: I-II

% de Nódulos: 100%

Distribución de Nódulos: 5

Tamaño de Nódulos: 5



NITAL 2%

100 x

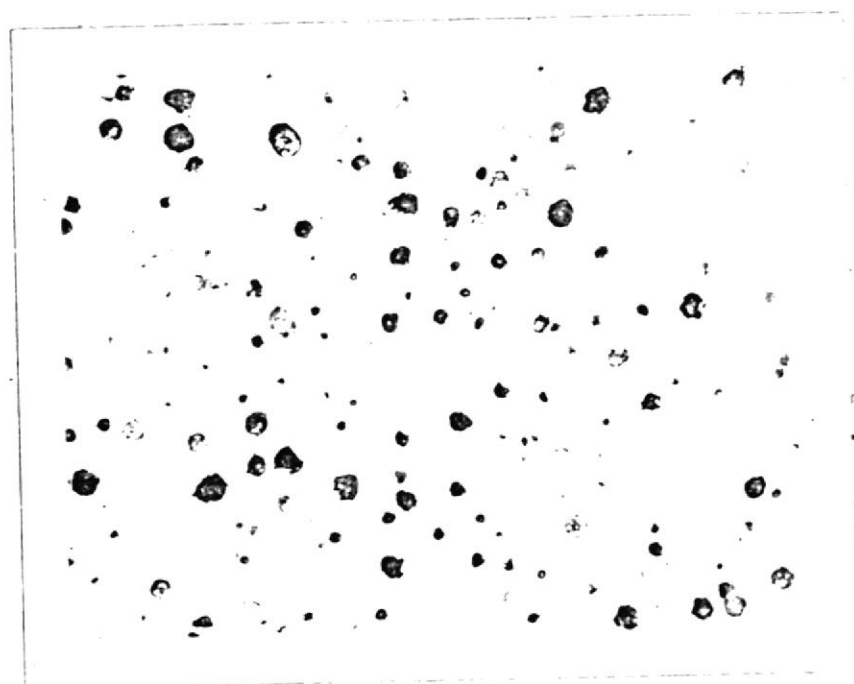
MICROFOTOGRAFIA Nº 21

Colada 4

Probeta 4 - 1

Hierro nodular

Matriz: Perlítica-ferrítica 95 - 5%



Sin ataque

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 22

Colada 5

Probeta: 5-8

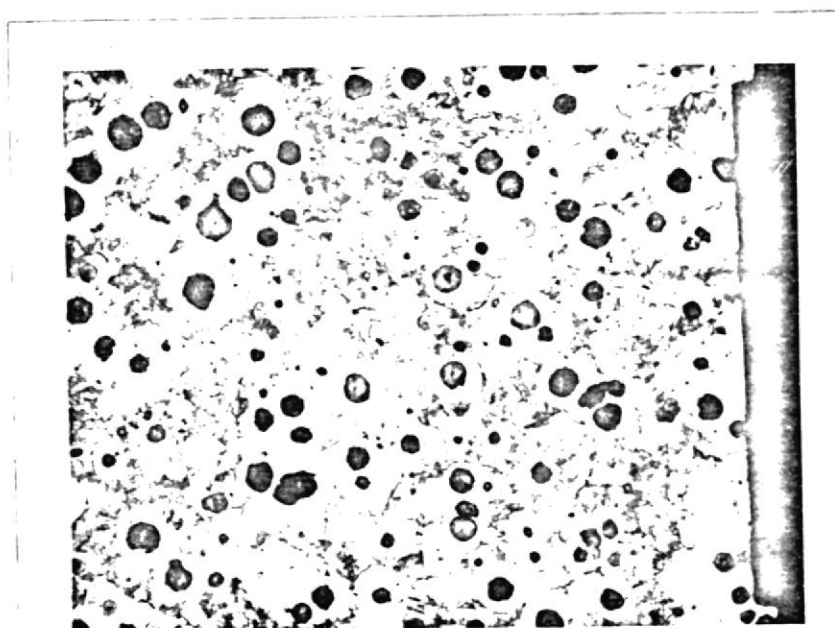
Hierro nodular

Tipo de Nódulos: I-II

% de nódulos: 100%

Distribución de Nódulos: 5-6

Tamaño de Nódulos: 5



Nital 2%

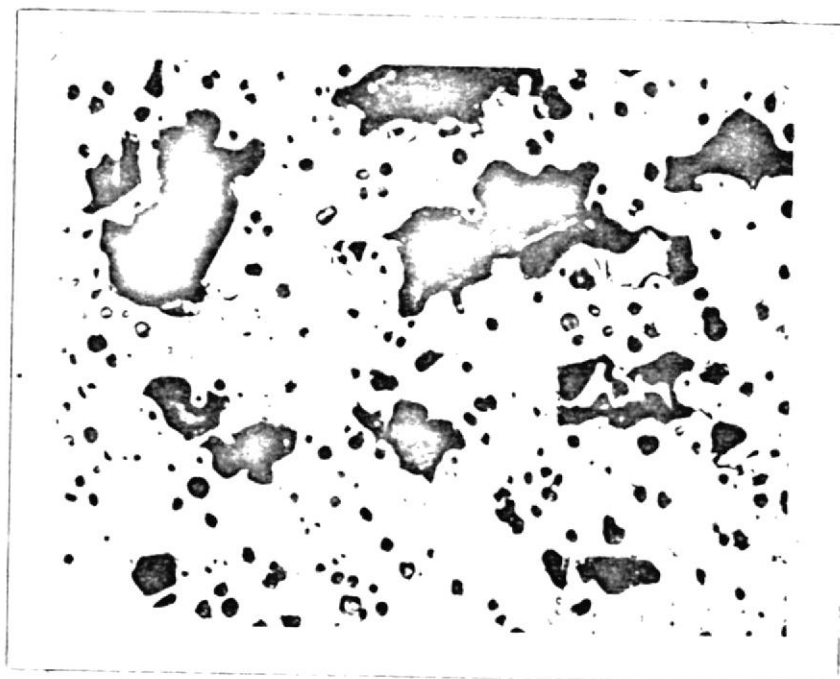
100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 23

Colada 5

Probeta 5-8

Matriz: Perlítica-Ferrita



Sin ataque

50 x

MICROFOTOGRAFIA N° 24

Colada 5

Probeta 5-6

Microestructura de la probeta 5-6
tomada en el centro de la probeta
del ensayo de tracción.

Observaciones: Macro poros



Nital 2%

1000 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 25

Colada 2

Probeta 2-1

Estructura enteramente perlítica
con zona de Ledeburita.

F.- DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se comentará sobre la bibliografía consultada donde se manifiestan las técnicas de obtención de hierro nodular para grandes producciones; sobre la selección de materiales de fusión y tratamiento de colada, sobre las características que presenta el material producido comparado con el hierro gris y con el acero; sobre las variables que influyen dentro del proceso.

En cuando a la información bibliográfica es menester explicar que en el presente trabajo no se busca referencias del porqué del fenómeno "no conocido bien todavía" de la modificación de la estructura normal de solidificación del hierro base - (gris) de láminas de grafito a esferas de grafito, en cambio se ha tratado de consultar la información tecnológica más avanzada relacionada con el proceso en sí. Existen limitaciones poderosas para esta determinación, en primer lugar la investigación del cambio de microestructuras en los hierros tratados con aleaciones de magnesio y cerio son motivos de actividad científica y el propósito de este trabajo ha sido llegar a adoptar en principio una técnica para las condiciones en las cuales tiene que desarrollar su actividad nuestro fundidor nacional. Los compendios de la INCO, de la QUEBEC IRON

y de la MILLER CO., dan indicaciones sobre la técnica en cuanto a grandes producciones, la misma que dice que para elaborar hierro nodular debe seguirse la siguiente secuencia de trabajo:

- 1º Fusión de materias primas seleccionadas de bajo contenido de azufre y fósforo para la obtención del hierro base como son aceros, metal o arrabio de alta calidad con contenidos de carbono y silicio elevados y azufre y fósforo bajos y retornos de nodular; el equipo para la fusión de estos materiales puede ser un horno de cubilote ácido o básico, un horno eléctrico de inducción de arco.
- 2º Control de hierro base, el mismo que se hace imprescindible para asegurar un tipo de hierro que sea susceptible de tratamiento modificador. Para este control se deben hacer uso de análisis químicos preliminares para ajustes de composición química previamente establecida, la cual se fija según el tipo o pieza a fundir y la microestructura que se desea conseguir. Estos resultados pueden llevar como conclusión que haya necesidad de efectuar desulfuraciones o desfosforaciones del hierro base lo cual implica un paso intermedio entre la obtención del hierro base y el tratamiento modificador.

3º Modificación; para este paso recomienda la información, hacerlo con aleaciones de magnesio comercialmente preparados según la técnica que se vaya a seguir, las cuales pueden ser de vertido directo, método sandwich, campana de inmersión, convertidor Fisher, insuflado de Magnesio metálico, o método del molde. Finalmente la inoculación, con aleaciones comercialmente preparadas en base a ferroaleaciones.

Como es fácil comprender, en nuestro medio es imposible todavía llegar a este tipo de proceso ya que significaría tener una infraestructura fabril de una gran inversión, es por ello que se decidió, o las limitaciones nos llevaron a realizar las experiencias en un horno de crisol de 150 Kg. de capacidad y equipos de Laboratorio de Metalurgia de la ESPOL y a partir de ello desarrollar la técnica que se manifiesta a lo largo de este trabajo.

En cuanto al cambio de propiedades mecánicas del hierro base, cuya estructura de solidificación se presenta en la microfotografía N° 15, se puede apreciar claramente que es un hierro gris de alta resistencia, es más se puede decir que corresponde a los máximos grados de resistencia de este material ya que ensayada una probeta, su resistencia a la tracción resultó 41.59 Kg/mm² (Ver gráfico de pruebas de tracción y tabla de -

valores de los mismos; la dureza Brinell fue de 266 lo cual indica una estructura de perlita fina con trazas de esteadita. Comparando los resultados de este ensayo con otros que se han efectuado en la Escuela Politécnica en hierros grises de fundidores nacionales, se nota una diferencia muy notoria en sus propiedades ya que las máximas resistencias alcanzadas han sido de 30 Kg/mm.^2 ; la variación en resistencia se debe a los métodos de fabricación de estos materiales, los unos han sido hechos en cubilote con materiales de carga sin previa selección de calidad, en cambio el hierro gris base que se obtuvo en la colada 1 fue producto de una selección adecuada de materiales de carga y fundidos en un crisol donde se pudieron tener mejores condiciones de control de material fundido. Si en los gráficos correspondientes a los ensayos de resistencia a la tracción se compara el valor de resistencia máxima del hierro gris con el del hierro nodular, se puede apreciar que hay diferencias en cuanto a comportamientos de los materiales en el ensayo, los hierros nodulares, manifiestan comportamiento aproximado a los aceros lo cual significa que poseen cierta ductilidad, presentan fluencia y su resistencia es mayor en una y media veces que la del hierro gris. Haciendo caso omiso de las curvas de nodular en los materiales con fallas de fundición este presenta una carga máxima de 7.500 Kg lo cual implica resistencias del orden de 65 Kg/mm^2 . De otra manera la curva de hierro gris manifiesta

0.01% de elongación y la del hierro nodular 6%.

Como se podrá observar en el gráfico, los valores de alargamiento del hierro nodular obtenido, no son muy altos, esto se debe al porcentaje de silicio utilizado que según las curvas de temple obtenidas andan alrededor de 2% de silicio, valores éstos con los que se alcanzan microestructuras perlíticas como se muestra en la microfotografía N° 17, lo cual es corroborado por la dureza brinell que siempre es más alta de 200. Lastimosamente los análisis químicos que se efectuaron sobre muestras de materiales de las coladas 1, 2, 3, 4 y 5 no indican claramente lo que se manifiesta puesto que los porcentajes indicados en el cuadro correspondiente a los análisis químicos corresponderían a valores característicos de hierros blancos lo cual no puede ser verdad por que la curva de temple nos demuestra lo contrario. Sin embargo, los valores de elongación pueden ser llevados a niveles más altos haciendo el material más dúctil por medio de un manejo adecuado de la composición química que en definitiva sería el manejo de las cantidades de silicio en la aleación. En la tabla N° 1 donde se dan recomendaciones generales de porcentajes de carbono y silicio para hierro dúctil, se puede identificar que realmente se trabajó con composición de estos elementos para producir matrices predominantemente perlíticas; tratar

de mejorar la ductilidad, implicaría tratar de elevar el porcentaje de silicio de 2 a valores cercanos a 3% con lo que se conseguiría matrices predominantemente ferríticas, disminución de la dureza Brinel y mejoramiento de la elongación.

No se menciona al carbono como elemento principal de manejo de la matriz ya que el porcentaje de éste, está supeditado al del carbono contenido en los materiales de carga que como se indica en la tabla 1 debería estar comprendido entre 3.30 y 3.50% para espesores de fundición de 1 a 4". La única forma viable de elevación de contenido de carbono en aleación sería por medio de la introducción de grafito en polvo con una lanza insufladora, lo cual no es factible por el momento

También debe mencionarse en esta discusión, lo que corresponde a la microestructura presentada por el grafito nodular el cual influye directamente sobre las propiedades mecánicas del material, sobre este respecto se puede comparar la microfotografía Nº 26 de material sin inoculación con los materiales inoculados: se aprecia que los tamaños de nódulos tienen una marcada diferencia, van desde el tamaño # 4 en el material sin inoculación a número 6 en los inoculados; lo mismo con la distribución en que varía de 3 a 5, esto indica que el comportamiento mecánico será mejor mientras haya una mejor distribución y un tamaño de nódulos más pequeños lo cual



NITAL 2%

100 x

MICROFOTOGRAFIA Nº 26

Colada 4

Muestras sin inoculación

Matriz: Perlítica-ferrítica

Tipo de grafito: I-II

% de nódulos: 100%

Tamaño 4

Distribución 3

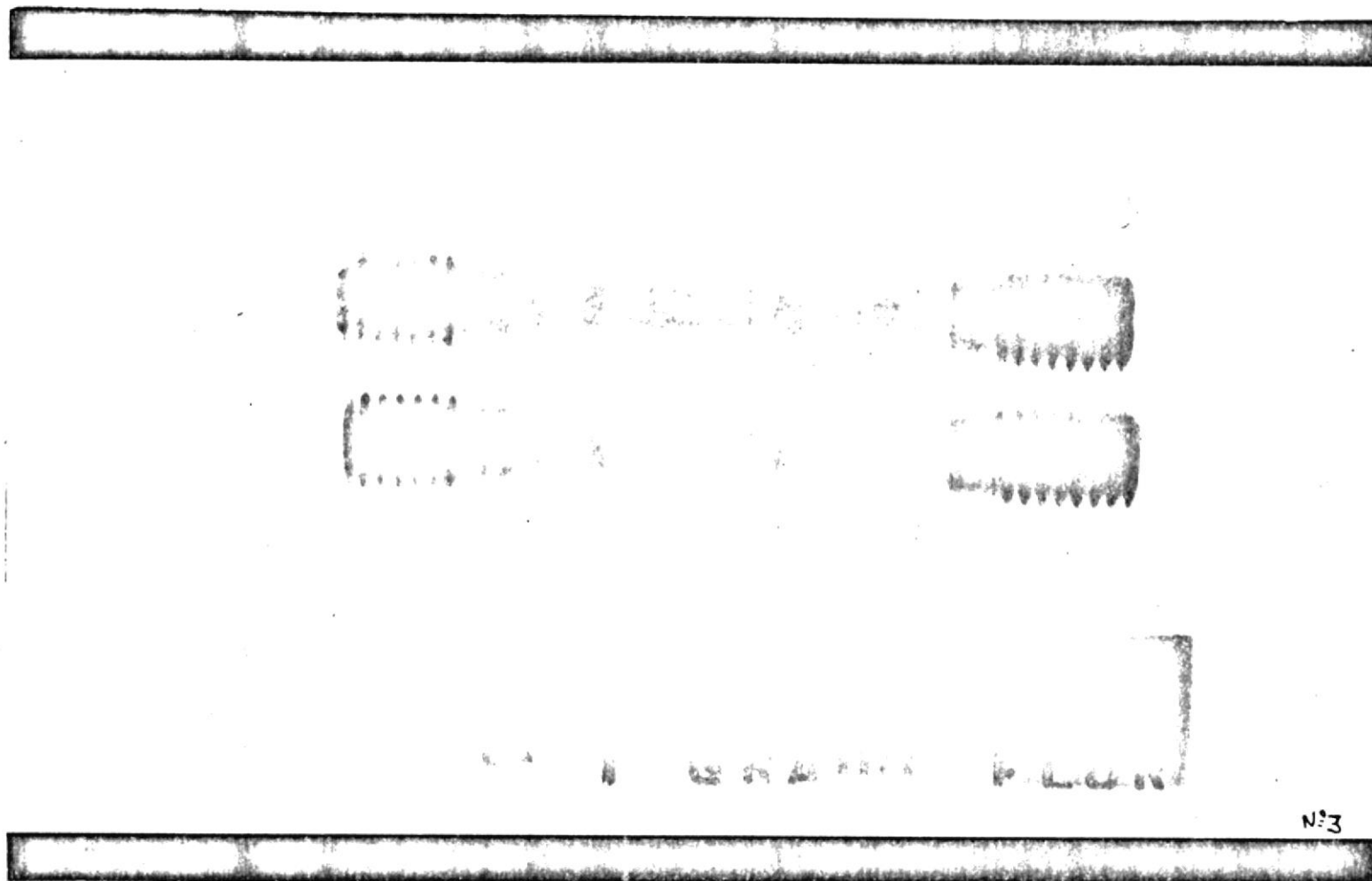
Observaciones: Exceso de tamaños de Nódulos.

fue motivo de estudio en las probetas de la colada N° 5 donde se vió que la probeta N° 5-8 tuvo mejor distribución y fue la que resultó más resistente.

Las probetas 5-6 y 5-7 presentaron las más baja resistencia ya que tuvieron una regular distribución de nódulos (4) además de porosidades visibles exteriormente e internas tal como lo indica la radiografía correspondiente y que aparece en la página siguiente. Queda demostrado de esta manera que las propiedades mecánicas del hierro nodular son superiores a las de hierro gris y muy cercanas a las del acero.

Las variables más relevantes dentro del proceso de obtención de hierro nodular son los que tienen que ver con la composición química, temperatura de fusión del hierro base, cantidades de elementos modificadores e inoculantes.

Se realizaron análisis químicos en equipo digital para determinar carbono y azufre, y análisis por vía húmeda para manganeso, silicio, fósforo, a fin de comprobar los cálculos hipotéticos o la supuesta composición encontrada a partir de las composiciones químicas de los materiales de carga: hierro gris automotriz SAE 121, acero de bajo carbono SAE 1018 y chatarra de hierro nodular las cuales se encuentran ubicadas en



Radiografía correspondiente a las probetas 5 -5; 5 - 6

Observaciones: Presencia de porosidades internas en las zonas de Ensayos.

el cuadro Nº 10 de la página Nº 118.

Haciendo un breve análisis del cuadro mencionado últimamente con el de análisis químicos finales para las coladas 1, 2, 4 y 5, se encuentra que los valores correspondientes a porcentajes de carbono y manganeso son muy próximos lo cual implica que los datos que se tomaron de los manuales ASM fueron más o menos correctos. Con respecto al azufre los valores calculados han sido siempre mayores para las coladas 4 y 5 - en cambio para la colada 1 el resultado fue inverso, este dato confirma el porqué el material tratado no modificó su estructura, el magnesio suministrado no fue suficiente ya que la cantidad calculada fue absorbida por el gran exceso de azufre procedente del hierro gris que erróneamente fue asumido como bajo. Es por ello que toda la información técnica elimina la inclusión de hierro gris como material de carga a menos que se efectúen desulfuraciones después de haber llegado a la temperatura de fusión del material.

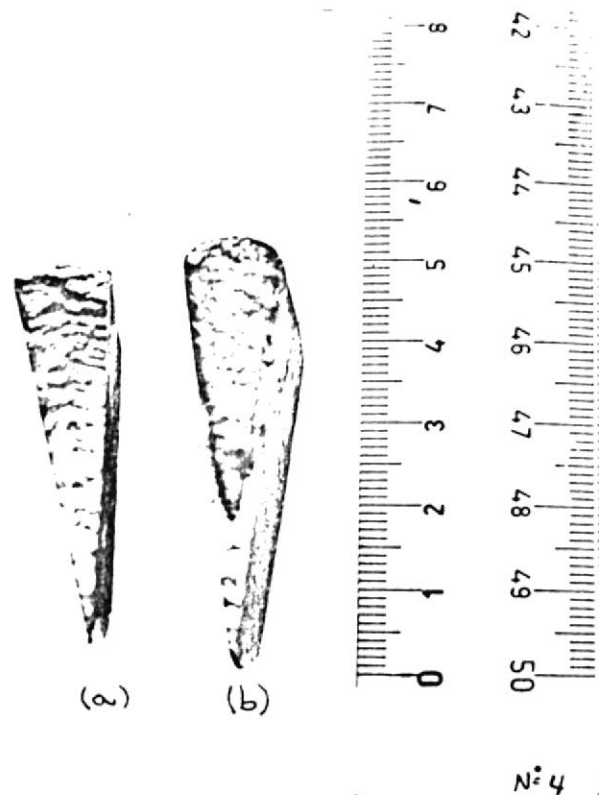
Con relación al silicio hay discrepancias en el valor de las composiciones finales; ya se ha mencionado de que si se le da crédito a los valores de la tabla de análisis químicos, existiría una incongruencia con el producto encontrado, es por esta razón que debe creerse más "en este caso particular" a

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANALISIS QUIMICO DE LAS MUESTRAS

<u>COLADA</u>	C	Si	S	P	Mn
# 1 (gris)c.e.	3.118	1.12	0.0363	---	0.552
# 2	2.908	0.93	0.01587	---	0.607
# 4	3.622	1.10	0.00643	0.04140	0.668
# 5	3.222	1.10	0.00643	----	0.685

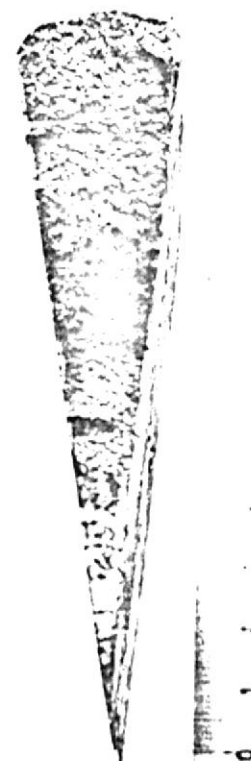
la práctica y a los datos proporcionados por las cuñas de temple sacadas de cada una de las coladas y que proporcionan valores precisos de contenido de silicio. Se exponen - con este motivo las fotografías N^o 4, 5 con los valores de porcentaje de silicio en función del espesor dados por la - tabla N^o 3 obtenida de la referencia N^o 11 (Tecnología de la Fundición).

Como lo asumido en cuanto a composiciones químicas de las - coladas ha sido comprobado que fueron muy cercanos de la realidad de los materiales de carga, los cálculos posteriores de ajuste de composición con ferrosilicio, de cantidades de aleación modificadora y cantidades de inoculantes también - fueron positivos y en consecuencia es por esto que se produjo la modificación de la estructura. Lamentablemente no se pudieron efectuar determinaciones de porcentajes de magnesio lo cual hubiera proporcionado datos interesantes sobre la - supción del "Recovery" que sería la cantidad de magnesio que sirve para modificar la estructura; de haberse obtenido este dato se habría podido calcular con más exactitud la cantidad de magnesio a añadir la misma que probablemente hubiera obviado ciertos inconvenientes, ya que de utilizar menos magnesio este ocuparía menos volumen dentro de la campana de inmersión y la reacción del magnesio podría haber sido menos violenta; en todo caso al haber tomado el dato de 25% de recovery ha



FOTOGRAFIA Nº 4

Cuñas de temple de colada 4. Se muestra el efecto de la adición de 0.75% de Fe-Si para ajuste de composición química antes del tratamiento modificador. La cuña a) es completamente blanca, en cambio en la b) se ha reducido la zona blanca hasta un espesor de 4 mm. que corresponde a 2.0% de silicio.



FOTOGRAFIA Nº 5

Cuña de temple de colada 3, para control de composición química, la misma que midió 4.5 mm. de zona blanca que indica el contenido de silicio igual a 2.0%.

manifestado resultados positivos.

Con respecto a la cantidad de inoculantes, todos los autores recomiendan usar entre 0.05% a 0.25% del peso del material tratado, de este dato se han usado recomendaciones sobre los valores más altos de adición, los mismos que también se ha comprobado han dado aceptables resultados utilizando tanto el producto comercialmente llamado "inoculín" de Foseco como ferrosilicio comercial al 75%. La efectividad del inoculante se comprobó en la colada 4 (ver fotografía N° 4 de la página N° 181) donde se aprecia claramente la reducción de la zona blanca "chill" después del agregado del inoculante.

En cuanto a las determinaciones de la curva de enfriamiento de cada una de las coladas, no fue posible obtenerlas en todas las experiencias por las limitaciones del equipo. Sin embargo, se logró obtener con exactitud la curva de la colada 2 la misma que se la mostró en el acápite correspondiente a la determinación de carbono equivalente.

CAPITULO VII

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La elaboración de hierro nodular en horno de crisol a partir de chatarra del mismo material o con mezclas de acero de bajo contenido de carbono, es un proceso tecnológico como ha quedado demostrado a través del presente trabajo, es factible llevarlo a cabo y de usarlo para elaboración de piezas de recambio de maquinarias industriales. Producto que puede ser obtenido en los hornos de crisol usados por los fundidores nacionales.

A lo largo del presente trabajo se ha efectuado un estudio experimental sobre la tecnología de producción de hierro nodular en horno de crisol con combustible líquido a partir de retornos de nodular procedente de cigueñales automotrices (Ct 3.55; Si 2.5; P 0.05; S 0.01; Mn 0.6) modificados con aleaciones de alto contenido de magnesio (EZ 33A) e inoculados con ferrosilicio comercial al 75% o aleaciones comercialmente preparados por Foseco (inoculín). Se determinó también que se puede añadir como materia prima acero de bajo contenido de carbono en proporción de un 10% del peso total de la carga. Después de realizar esta experiencia en una fundición de nuestra ciudad, se ha llegado a las siguientes

conclusiones:

- 1º Que las propiedades mecánicas del hierro base se pueden alterar sustancialmente por el proceso llevado a cabo, produciéndose una variación de resistencia a la tracción del hierro gris de 41.59 Kg/mm^2 al nodular de 65 Kg/mm^2 , con un mejoramiento de la ductilidad de 0.01 a 6%.
- 2º La resistencia a la tracción y la elongación del material, se pueden controlar a través del manejo de la composición de Si licio que es el único elemento con el cual se puede variar los porcentajes de ferrita y perlita en la matriz del hierro nodular.
- 3º Los materiales de carga que deban usarse en este proceso serán de bajos contenidos de azufre y fósforo, por lo cual la selección de los mismos debe ser muy prolija.
- 4º Las cantidades de material a procesar no deben ser inferiores a 75 Kg.
- 5º El material en estado líquido debe tener por lo menos 1.500°C de temperatura antes de comenzar los tratamientos de modificación e inoculación.

- 6º El material nodulizante debe ser una aleación de alto contenido de magnesio en una cantidad equivalente a 0.30% del peso del material tratado y en pedazos de un tamaño aproximado a 0.5 cm.³
- 7º El método de modificación de estructura para el proceso de fundido en crisol, la campana de inmersión resultó ser la más conveniente.
- 8º El inoculante debe ser ferrosilicio al 75% con una granulometría de malla 40 AFS y vertido en el chorro de material fundido en el momento de trasvase del crisol a la olla de vaciado. La cantidad de inoculante debe ser el 0.25% del peso del material tratado.

Las recomendaciones que se sugieren para el proceso, tendrán siempre que ver con el control de cada uno de los pasos descritos en el presente trabajo, los mismos que deben ser cuidadosamente planeados y seguidos sin desviación para poder cumplir con normas de calidad. Para este caso se exigen los procesos de control que se imponen en cualquier fundición de hierro nodular y son los siguientes:

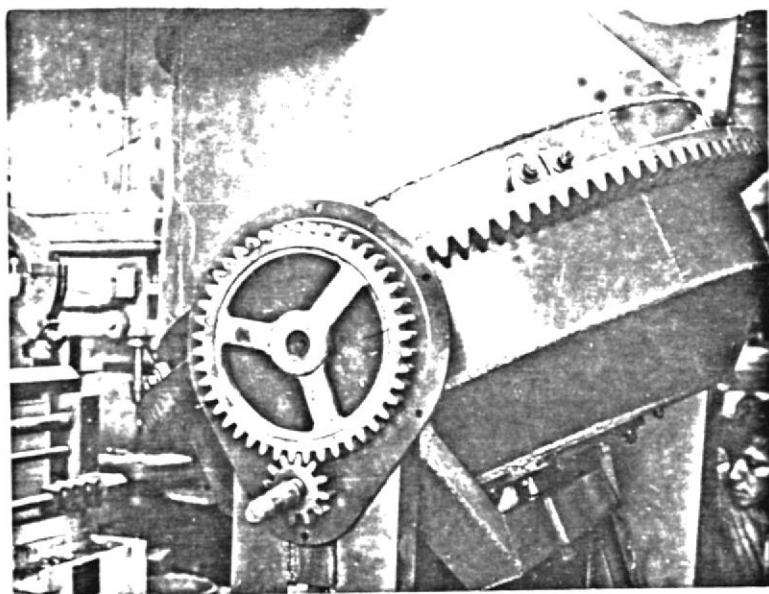
a) Inspección del material usado.

- b) Selección y dosificación de las cargas del horno.
- c) Control de temperaturas del hierro base
- d) Contenido de silicio controlado a partir de las cuñas de temple obtenidas del hierro base.
- e) Pesadas precisas de materiales de modificación e inoculación.
- f) Examen de microestructura de cada colada efectuado en microscopio de baja resolución.
- g) Ensayos mecánicos para determinar el grado ASTM del material a fin de entregar un hierro nodular certificado.

En cuanto a recomendaciones generales sobre piezas que se puedan fundir con este material y que se manifiestan como interesantes dentro del mercado nacional son un gran número de elementos mecánicos elaborados en acero, ya sea por medio de fundición o forjado; como ejemplos se muestran: las piezas elaboradas con hierro nodular de nuestras experiencias y que corresponden a un sistema de engranajes de una máquina mezcladora de concreto en donde se desea mejorar las características de diseño, para que el elemento que antes era hecho en hierro gris pueda ahora soportar más carga. Este elemento mecánico se ilustra en la fotografía Nº 6 de la página siguiente.

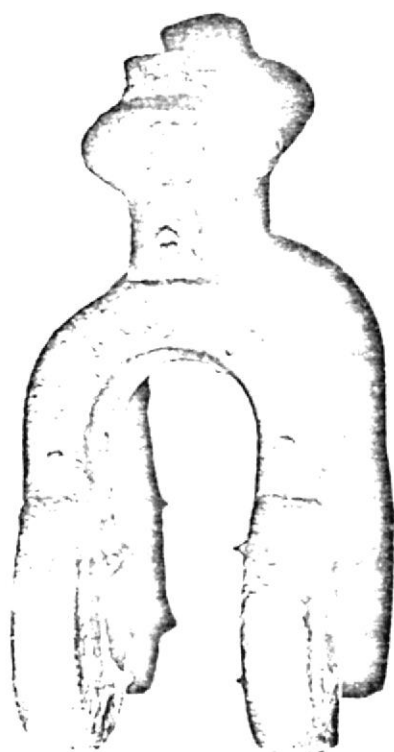
En la fotografía Nº 7 se muestra también otro producto de

esta experiencia, se trata de una horquilla de bola hecha en hierro nodular, pieza cuya importación tiene que hacerla INECEL para sus tendidos de líneas de alta tensión, éstas son - hechas en acero forjado pero pueden ser reemplazadas por piezas de hierro nodular de fabricación nacional cuya calidad y resistencia fueron comprobadas durante este trabajo, sustituyendo con ésto, un rubro de importación de considerable magnitud. En igual forma pueden producirse herramientas manuales, tornillos de banco, carcasas de caja de cambio, tambores de frenos, cuerpo del cilindro patrón para frenos, balancines de motores y otros que serán de gran demanda en la industria automovilística próxima a crearse en nuestro país.



FOTOGRAFIA Nº 6

Sistemas de engranajes y cremalleras para máqui -
nas concreteras de fabricación nacional (PRODECON)
hechas en hierro nodular producto de las pruebas -
experimentales.



Nº 7

"Horquilla de Bola" pieza utilizada
en las líneas de alta tensión. Fo-
tografía de una pieza fundida en -
hierro nodular.

TABLA VII

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

ROCKWELL									BRINELL					Vickers Dia. 136°	Real- tencia Kgs. mm²
Diametro 120°	BOLA DE 1/16						BOLA DE 1/8		BOLA DE 10			BOLA DE 5			
A 60	G 150	B 100	F 60	45 T 45	34 T 30	15 T 15	K 150	P 100	2000	Hueila	500	187,5	Hueila	10	
60	79	98		70	81	92,5			226	4,05	189	58	1,01	235	79
59,5	77,5	97		69	80,5	92			222	4,07	184	57	1,01	231	77
59	76	96		68	80	92			216	4,10	179	56	1,02	233	75
58	74	95		67	79,5	92			210	4,15	175	55	1,03	216	73
58	73	94,5		66,5	79	91,5			208	4,20	174	54	1,05	215	72
57,5	72,5	94		66	78,5	91			204	4,25	171	53	1,06	211	71
57	71	93		65,5	78	91			200	4,27	169	52	1,07	207	70
57	70	92,5		65	78	91			197	4,30	167	51	1,08	207	68
56,5	69	92		64,5	77,5	90,5	100		193	4,35	164	50	1,09	199	67
56	67,5	91		63,5	76,5	90	99,5		190	4,37	160	49	1,10	196	66
56	67	90,5		63	76	90	99,5		187	4,40	157	48	1,11	196	65
55,5	66	90		62,5	75,5	89,5	98,5		184	4,45	154	47	1,12	189	64
55	64	89		61,5	75	89	98		181	4,47	152	46	1,13	186	63
54,5	63	88,5		61	74,5	89	97,5		178	4,50	151	45	1,14	185	62
54	62	88		60,5	74	88,5	97		175	4,55	148	44	1,15	183	61
53,5	61	87		60,5	73,5	88,5	96,5		172	4,57	145	43	1,16	177	60
53	59	86		58,5	73	88	95		169	4,60	143	42	1,17	173	59
53	58	85,5		58	73	88	95		167	4,65	142	41	1,18	173	58
52,5	57	85		57,5	72	87,5	94,5		164	4,70	141	40	1,19	167	57
52	56	84		57	71,5	87	94		161	4,75	140	39	1,20	165	56
51	54	83		56	71	86,5	93		158	4,77	137	38	1,21	162	55
50,5	52	82		55	70	86,5	92		156	4,80	135	37	1,22	157	54
50	51	81		54	70	86	91		153	4,85	132	36	1,23	154	53
49,5	49	80		53	69,5	86	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		146	4,95	128	33	1,26	149	51
48,5	46	78		51	67,5	85	88,5		144	5,00	126	32	1,26	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	1,32	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	96	12	1,42	108	38
39,5	17	60	90,5	32	56	80	73	93	107	5,70	95	11	1,42	107	37
39	16	59	90	31	55,5	79,5	72	92,5	106	5,72	94	10	1,43	106	37

TABLA VIII

Equivalencias aproximadas entre el número de dureza, Rockwell, Brinell y Vickers
Grupo DUREZA BAJA ($< 37 \text{ kgs. mm}^2$)

ROCKWELL									BRINELL			Vickers Pirámide 136°
Diamante 120°	BOLA DE 1/16					BOLA DE 1/8			BOLA DE 10	BOLA DE 2,5		
A 60	B 100	P 60	45 T 45	30 T 20	15 T 15	K 150	E 100	H 60	500	62,5	Huerla	50
38,5	58	90	30,5	55	79,5	71,5	92		92	72	0,86	105
38	57	89,5	30	54,5	79	71	91		91	71	0,87	104
38	56	89	29	54	79	71	90,5		90	70	0,88	103
37,5	55	88	28	53	78,5	68,5	90		89	69	0,89	102
37	54	87,5	27	52,5	78,5	68	89,5		87	68	0,92	101
36	53	87	26	51,5	78	68	89		85	67	0,94	100
36,5	52	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	66	0,96	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	85
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	59,5	1,03	81
28	37	78	9	40	72	51,5	77	99	72	59	1,03	80
28	36	77,5	8	39,5	72	50,5	76,5	98,5	71	58,5	1,04	79
27,5	35	77	7	38,5	71,5	49,5	75	98,5	70	58	1,05	78
27	34	76,5	6	38	71,5	48,5	74	98	69	57,5	1,05	76
26,5	33	76	5	37,5	71	48	73,5	98	68,5	57	1,05	76
26	32	75	4	36,5	70,5	47	73	97,5	68	56,5	1,06	75
25,5	31	74	3	36	70	46	72,5	97,5	67	56	1,06	75
25	30	73,5	2	35,5	69,5	45	72	97	66,5	55,5	1,06	74
24,5	29	73	1	34,5	69	44,5	72	97	66	55	1,07	74
24,5	28	72,5		34	68,5	43,5	71,5	96,5	65,5	55	1,07	73
24	27	72		33	68,5	42,5	71	96,5	65	54,5	1,08	72
23,5	26	71		32,5	68	41,5	70	96	64	54	1,09	71
22,5	25	70,5		32	67,5	41	69	95,5	63,5	53,5	1,09	70
21	24	70		31	67,5	40	68,5	95,5	63	53	1,10	70
21,5	23	69,5		30,5	67	39	68	95	62,5	52,5	1,10	69
21	22	69		29,5	67	38	67,5	95	62	52	1,11	69
21	21	68,5		29	66,5	37,5	67	94,5	61,5	52	1,11	68
20,5	20	68		28,5	66,5	36,5	66,5	94	61	51,5	1,12	68
20	19	67		27,5	66	35,5	65,5	94	60,5	51,5	1,12	67
	18	66,5		27	65,5	35	65	93,5	60	51	1,12	66
	17	66		26	65,5	34	64,5	93	59,5	50,5	1,13	66
	16	65,5		25,5	65	33	64	93	59	50	1,13	66
	15	65		25	65	32	63,5	92,5	58,5	50	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	59,5	90	56	47	1,17	63
	7	60,5		19,5	62,5	25,5	59,5	89,5	55	47	1,17	63
	6	60		18,5	62	24,5	59	89	55	46,5	1,18	62
	5	59,5		18	62	23,5	59	89	55	46,5	1,18	62
	4	59		17	61,5	23,5	58,5	88,5	54	46	1,18	62
	3	58		16,5	61,5	23	58	88	54	45,5	1,19	61
	2	57,5		16	61	22	57,5	87,5	53	45	1,19	61
	1	57		15	61	22	57	87,5	52	44	1,20	61

BIBLIOGRAFIA

- 1.- KARSAY STEPHEN.- "Ductile Iron, the State of the Art" Quebec
iron and titanium Corp. Quebec, Canada 1974.
- 2.- QUEBEC IRON CORP.MANUAL.- Quebec iron and titanium Corp. Quebec
Canada 1975.
- 3.- ZANETTA LOPEZ .- Curso de Metalurgia (Fundición Dúctil) Escuela
Politécnica Nacional. Quito 1968.
- 4.- PODZASKY BRUNON ING.- "Fundición Nodular" Facultad de Ciencias
Exactas de la Universidad de Córdoba.
(Argentina) 1968.
- 5.- A. MOORE,-"Significance of Carbon Equivalent Formulae" July, 1971
- 6.- MILLER AND COMPANY.- "The Ductil iron Process" compendium IV 1972
- 7.- METALS HANDBOK, A.S.M.- Volúmenes I, III, V y VII. The American
Society Metals, Octava edición 1972.
- 8.- CAPELLO EDOARDO.- "Tecnología de la Fundición".
- 9.- AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY.- "Control of Ductile iron through
Microexamination"

10.- A.S.T.M. STANDARD.- "Annual Book of A.S.T.M. Standard
Part number IV 1973.