



D-14839



T
671.2
B456
C. 2a

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica

**DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS
DE LA FUNDICION GRIS POR EL METODO
DE ULTRASONIDOS**

TESIS DE GRADO

**Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO**

Presentado por:

Inés R. Benavides Brito



BIBLIOTECA

Guayaquil - Ecuador

1.994

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Omar Serrano Valarezo , Director de esta Tesis, por su permanente colaboración para la realización de este estudio; mi gratitud a mis profesores politécnicos en especial a los de la Facultad de Ingeniería Mecánica, ya que con ellos fue posible mi formación profesional.

Mi gratitud especial al Ing. Alfredo Sanchez por su valiosa ayuda en la elaboración de los gráficos.

DECLARACION EXPRESA

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

(Reglamentos de Exámenes y Titulos Profesionales de la ESPOL)

A handwritten signature in black ink, reading "Ines R. Benavides Brito", written in a cursive style. The signature is positioned above a solid horizontal line.

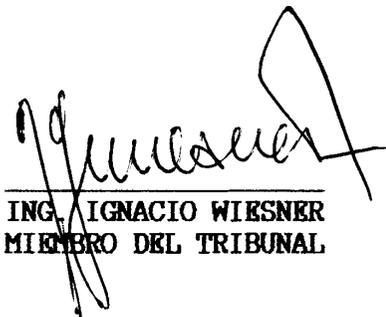
INES R. BENAVIDES BRITO



DR. ALFREDO BARRIGA
DECANO FIM



ING. OMAR SERRANO
DIRECTOR DE TESIS



ING. IGNACIO WIESNER
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. ROMERO ORTIZ
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

**A MIS PADRES
A MIS HERMANOS
A MI CREADOR**

RESUMEN

El presente trabajo establece un sistema para la determinación de las propiedades mecánicas de la fundición gris mediante el empleo del ensayo no destructivo por ultrasonidos, que permite relacionar las características ultrasónicas del elemento ensayado con su resistencia a la tracción, dureza a la penetración y propiedades elásticas: Módulo de Young y Poissón.

Se investigan muestras de fundición gris de diferentes espesores de distintas procedencias I y II, mediante ensayos metalográficos, ultrasónicos y mecánicos a fin de correlacionar la microestructura del grafito laminar presente con las características ultrasónicas y su correspondiente efecto sobre las propiedades mecánicas de la fundición gris.

La diferencia en composición química aunque no muy apreciable en las dos fundiciones, fue suficiente para producir cambios en la morfología del grafito laminar presente y en las características ultrasónicas. La fundición gris I con la mejor distribución del grafito presentó una menor atenuación y un mayor coeficiente y

velocidad de propagación del ultrasonido. resultando en la obtención de mejores características mecánicas evaluadas por la resistencia a la tracción. dureza Brinell y módulos de elasticidad y poissón.

I N D I C E G E N E R A L

Pág.

RESUMEN.....	
INDICE GENERAL.....	
INDICE DE FIGURA.....	
INDICE DE TABLAS.....	
INDICE DE ABREVIATURAS.....	
INTRODUCCION.....	
CAPITULO I.....	
ANTECEDENTES.....	
1.1 Objetivos.....	
1.2 Justificación del trabajo.....	
1.3 Control de las propiedades mecánicas de las fundiciones: Convencional y por Ultrasonidos.....	
CAPITULO II.....	
FUNDAMENTO TEORICO.....	
2.1 Estudio de la fundición gris.....	
2.1.1 Análisis de las propiedades.....	
2.1.2 Factores que afectan las propiedades..	
2.1.3 Características mecánicas y metalúrgicas.....	
2.2 Control por ultrasonidos.....	
2.2.1 Comportamiento del haz ultrasónico en la fundición gris.....	
2.2.2 Amortiguación de ondas longitudinales.	
2.2.3 Atenuación de la onda: influencia del	

N°

Pág.

	medio.....	
2.2.4	Características de propagación del sonido.....	
2.2.5	Velocidad del haz sonoro.....	
2.2.6	Correlación entre las propiedades metalúrgicas y ultrasónicas.....	
CAPITULO III.....		
TRABAJO EXPERIMENTAL.....		
3.1	Obtención de la muestra para análisis.....	
3.2	Equipo utilizado.....	
3.3	Ajuste y calibración del equipo.....	
3.3.1	Linealidad.....	
3.3.2	Calibración de atenuación y sensibilidad.....	
3.4	Determinación de las propiedades mecánicas..	
3.4.1	Ensayos preliminares.....	
3.4.1.1	Análisis químico.....	
3.4.1.2	Metalografía.....	
3.4.1.3	Dureza.....	
3.4.1.4	Resistencia a la tracción.....	
3.4.2	Ensayos por ultrasonidos.....	
3.4.2.1	Determinación del coeficiente de propagación y el coeficiente de atenuación.....	
3.4.2.2	Medición de la resistencia mecánica por efecto de amortigua-	

N°

Pág.

ción y por velocidad relativa..

3.4.2.3 Determinación de las constantes
elásticas: Módulo elástico (E)
y coeficiente de Poisson (μ)...

3.4.2.4 Relación de la dureza con el
coeficiente de propagación.....

3.4.2.5 Otras relaciones existentes....

CAPITULO IV.....

ANALISIS DE RESULTADOS.....

4.1 Composición Química.....

4.2 Características Metalúrgicas.....

4.3 Características Ultrasónicas.....

4.4 Características Mecánicas.....

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....

BIBLIOGRAFIA.....

INDICE DE FIGURAS

Nº		Pág.
1	Determinación de la resistencia en función del coeficiente de propagación y la dureza Brinell.....	
2	Influencia del tamaño y espesor del grafito en el comportamiento de la señal ultrasónica	
3	Diagrama estable hierro-grafito.....	
4	Microestructura de una fundición gris con matriz perlítica con pequeñas cantidades de grafito.....	
5	Influencia de la velocidad de enfriamiento (espesor muestra) sobre la dureza Brinell de las fundiciones.....	
6	Relación entre la dureza y la resistencia a la tracción de las fundiciones y su microestructura.....	
7	Comparación del ensayo a la tracción entre un acero dulce y una fundición gris.....	
8	Tamaño del grafito laminar según normas.....	
9	Distribución del grafito laminar según normas.....	
10	Respuestas ultrasónicas de un acero y fundiciones grises.....	
11	Amortiguamiento de vibraciones en función del tiempo.....	
12	Relación de la velocidad de propagación con	

N°	Pág.
	el grado de saturación y la velocidad de enfriamiento.....
13	Probetas utilizadas en el análisis experimental.....
14	Controles del equipo ultrasónico KRAUTKRAMER USK-6.....
15	Bloque de referencia del Instituto Internacional de la soldadura (IIW).....
16	Posición del transductor para la evaluación de la linealidad.....
17	Representación del oscilograma obtenido durante la evaluación de la linealidad. Se identifican las señales usadas para la evaluación.....
18	Representación de la linealidad horizontal. Curva Δt vs d_n para el equipo USK-6.....
19	Representación de la linealidad vertical curva deflexión vertical vs razón de respuesta para el equipo USK-6.....
20	Ubicación del transductor sobre el bloque VI usando ondas longitudinales.....
21	Oscilograma correspondiente.....
22	Estimación del poder de resolución.....
23	Oscilograma de la calibración de la resolución.....
24	Probeta de ensayo de tracción cilíndrica.....

N°	Pág.
25	Características estructurales y ultrasónicas del grafito en la fundición I, probeta (a), escalones 1, 2, 3, 4. Sin ataque 100x.....
26	Características microestructurales y ultrasónicas del grafito. fundición I, probeta (b), escalones 1, 2, 4. Sin ataque. 100x.....
27	Características microestructurales y ultrasónicas del grafito en la fundición I, probeta (c), escalones 1, 2, 3, 4. Sin ataque. 100x..
28	Características microestructurales y ultrasónicas del grafito en la fundición I, probeta (d), escalones 1, 2, 3. Sin ataque 100x.....
29	Características microestructurales y ultrasónicas del grafito en la fundición II, probeta (a), escalones 1, 2, 3, 4. sin ataque. 100x..
30	Características microestructurales y ultrasónicas del grafito en la fundición II, probeta (b), escalones 1, 2, 3, 4. Sin ataque. 100x..
31	Características microestructurales y ultrasónicas del grafito en la fundición II, probeta (c), escalones 1, 2, 3, 4. Sin ataque. 100x..
32	Características microestructurales y ultrasónicas del grafito en la fundición II, probeta (d), escalones 1, 2, 3. Sin ataque. 100x.....
33	Microestructura de las fundiciones I y II. Mostrando la matriz perlítica. Nital 2%.....

N°	
34	Variación de la velocidad longitudinal del ultrasonido con la velocidad de enfriamiento. Fundiciones I y II. Probeta (a) y (b).....
35	Variación de la velocidad longitudinal del ultrasonido con la velocidad de enfriamiento. Fundiciones I y II. Probeta (c) y (d).....
36	Variación del coeficiente de atenuación con la velocidad de enfriamiento. Fundiciones I y II. Probetas (a) y (b).....
37	Variación del coeficiente de atenuación con la velocidad de enfriamiento. Fundiciones I y II. Probetas (c) y (d).....
38	Variación de las resistencias a la tracción obtenida por ultrasonidos con la dureza Brinell. Fundiciones I y II.....
39	Variación de la resistencia a la tracción obtenida por ultrasonidos con el producto coeficiente de propagación/dureza Brinell. Fundiciones I y II.....
40	Variación de la resistencia a la tracción obtenida por ultrasonido con el coeficiente de atenuación. Fundiciones I y II.....
41	Variación de la resistencia a la tracción obtenida por ultrasonido con la velocidad de enfriamiento. Funciones I y II. Probetas (a) y (b).....



N°

Pág.

- 42 Variación de la resistencia a la tracción obtenida por ultrasonidos con la velocidad de enfriamiento. Fundiciones I y II. Probetas (c) y (d).....
- 43 Señales ultrasónicas obtenidas en las fundiciones I y II en un espesor de 11 mm.....

INDICE DE TABLAS

Nº		Pág.
I	Amortiguamiento específico de distintos materiales.....	
II	Velocidades de propagación acústica para metales y no metales.....	
III	Datos técnicos del equipo KRAUTKRAMER USK-6..	
IV	Datos para la evaluación de la linealidad horizontal.....	
V	Datos para la evaluación de la linealidad vertical.....	
VI	Resultado del Análisis químico.....	
VII	Características metalográficas de la fundición I y II.....	
VIII	Valores de la dureza Brinell (HB). Fundición I.....	
IX	Valores de la dureza Brinell (HB). Fundición II.....	
X	Valores del coeficiente de propagación, atenuación y resistencia a la tracción fundición I.....	
XI	Valores del coeficiente de propagación, atenuación y resistencia a la tracción fundición II.....	
XII	Valores de velocidades longitudinales y transversal, módulos de Young y Poisson, fundición I.....	

N°

Pág.

XIII Valores de velocidades longitudinales y transversal, módulos de Young y Poisson. función II.....

INDICE DE ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
An	Amplitud
c	Carbono
Ce	Carbono equivalente
Ct	Velocidad longitudinal del ultrasonido
E	Módulo de Young
er	Espesor real
f	Frecuencia
Fe	Hierro
gr	gramo
H	Altura del eco
HB	Dureza Brinell
Is	Grado de saturación
IIW	Instituto Internacional de la Soldadura
K	Capacidad de amortiguamiento
Kg	Kilogramos
M	Masa
mm	Milímetros
MHz	Megahertz
Mg	Manganeso
P	Fósforo
R	Resistencia
S	Azufre
Si	Silicio
T	Período
t	Tiempo

μ	Coeficiente de Poissón
ν	Capacidad específica de amortiguamiento
w	Energía
λc	Coeficiente de propagación
α	Coeficiente de atenuación
ρ	Densidad
σ_B	Resistencia a la tracción
δ	Decremento logarítmico

I N T R O D U C C I O N

El ensayo por Ultrasonidos es una técnica moderna que por su extensión y fundamento científico ha aumentado su campo de acción, sensibilidad y confianza hasta hacer de ella una herramienta importante en la producción industrial y en el control de calidad.

El método de ultrasonido ha sido ampliamente utilizado por los ingenieros metalúrgicos a partir de la segunda guerra mundial para la detección de una gran cantidad de irregularidades o discontinuidades que se presentan en los materiales, así como en los procesos tecnológicos de manufactura. La detección oportuna de estas discontinuidades aumenta la confiabilidad de los objetos ensayados y produce beneficios económicos a los usuarios.

Los ultrasonidos ofrecen también la posibilidad de predecir las características mecánicas de un material tan complejo como es la fundición gris, lo que permite una utilización más adecuada y confiable de este material.

El principio se basa en que en la fundición gris los impulsos ultrasónicos de una cierta frecuencia y longitud de onda, están sometidos a una dispersión más o menos

importante en función del tamaño y cantidad del grafito laminar presente. La atenuación del haz ultrasónico después de atravesar una sección determinada puede representar una medida de la distribución y cantidad del grafito así como de las características mecánicas de la pieza ensayada.

De igual manera la distribución y cantidad del grafito laminar puede afectar seriamente las propiedades mecánicas de la fundición gris, por lo que el control y evaluación de las características metalúrgicas de estos materiales por el método de ultrasonidos permitirá establecer con un margen de incertidumbre razonable si el elemento ensayado cumple con los requerimientos o especificaciones mecánicas exigidos.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1 OBJETIVOS.-

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es el dar al fundidor asesoría en cuanto al control de las propiedades de la fundición gris por la técnica de Ultrasonidos. introduciendo de esta manera un método de determinación de la calidad en la producción de este material.

Uno de los problemas por los que atraviesa la industria de la fundición en nuestro país, es la baja calidad de las piezas fundidas de hierro gris en lo que se refiere al cumplimiento de los requerimientos o especificaciones de sus propiedades mecánicas, lo cual trae como consecuencia la pérdida de su competitividad y la elevación del costo final de los productos elaborados.

Muy comúnmente se presenta la situación de descuidar la calidad de un producto con tal de ahorrar los costos en su producción. Frente a esta situación no

se debe olvidar que la calidad es el factor que más influye en los costos, no sólo por la simple consideración del porcentaje de rechazo, sino por la incidencia que tiene la baja calidad en los gastos de acabado de las piezas fundidas.

1.2 JUSTIFICACION DEL TRABAJO.-

Las piezas moldeadas con fundición de hierro ocupan el primer lugar por las cantidades producidas, en relación con la de otros materiales, debido principalmente a que son mucho más baratas, y sobre todo a que las fundiciones son particularmente aptas para una gran variedad de piezas moldeadas para distintas finalidades.

Las fundiciones en nuestro medio presentan actualmente una serie de dificultades debido a que realizan una producción limitada de piezas, y una mala utilización de procedimientos y métodos.

Sin embargo, las condiciones actuales en que trabajan nuestros fundidores y el acelerado desarrollo industrial que experimenta el país, han determinado la necesidad de explorar con elevado

criterio tecnológico uno de los aspectos que conciernen con el uso de técnicas modernas, como es el caso de los Ultrasonidos, para elevar la productividad del proceso de fabricación de piezas fundidas.

De producirse el mejoramiento de las técnicas del control de la calidad, las actuales fundiciones estarán en capacidad de generar nuevas líneas de producción, basadas en la necesidad de restringir o eliminar las importaciones de ciertos productos fundidos de uso industrial y doméstico.

1.3 CONTROL DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LAS FUNDICIONES: CONVENCIONAL Y POR ULTRASONIDOS. CONVENCIONAL :

Las pruebas mecánicas (resistencia a la tracción y dureza) y el análisis químico sirven para comprobar rigurosamente la producción cuando está concluida.

El fundidor, a su vez, debe tener a su disposición algún medio, rápido e inmediato que le permita controlar la calidad del producto. Es decir que el fundidor debe conocer en pocos minutos, si el metal

contenido en el cubilote posee las características adecuadas para colar determinadas piezas. Con este objetivo se realizan pruebas metalúrgicas inmediatas, como: Prueba de colabilidad, Prueba de temple, Prueba de sensibilidad al espesor, y Prueba de tendencia al rechupe.

Otro método moderno y confiable para la determinación de las propiedades tecnológicas del hierro gris consiste en la determinación del Carbono Equivalente y el Grado de Saturación. El método se basa en la obtención mediante análisis químico de los porcentajes de carbono, silicio y fósforo presentes en la fundición, los cuales influyen sobre el porcentaje de carbono eutéctico y por lo tanto sobre las características finales del material.

Determinado estos valores se los reemplaza en las siguientes fórmulas: (Ref. 1)

$$Ce = \%C + 1/3 (\% Si + \% P) \quad (1.1.)$$

$$Is = \frac{\% C}{4.3 - \frac{(\% Si + \% P)}{3}} \quad (1.2)$$

Donde:

Ce = Carbono equivalente

Is = Grado de saturación
C = Contenido de carbono
Si = Contenido de silicio
P = Contenido de fósforo

De acuerdo con estos métodos de control, se ha visto experimentalmente que conociendo para cada función el valor de alguno de esos índices y mediante el empleo de gráficos apropiados se puede determinar con bastante aproximación el posible comportamiento de las fundiciones en piezas de diferente espesor.

POR ULTRASONIDOS :

El fundamento teórico que ha llevado a la utilización del control por Ultrasonidos para la obtención de las características mecánicas de la fundición gris, está basado simplemente en que las velocidades de propagación de las ondas sonoras, tanto longitudinales como transversales en un medio son función del módulo de Young y coeficiente de Poisson, como índice de las características elásticas y de la densidad como índice de la composición y porcentaje del grafito libre.

El método consiste en la medición del coeficiente de propagación de las ondas en el material, para ello

se calibra el equipo de ultrasonidos sobre una probeta de acero midiendo a continuación el espesor ultrasónico de la zona objeto de ensayo, y mediante un tornillo micrométrico se determina el espesor real de la zona de inspección. El cociente entre el espesor real y el ultrasónico es en realidad la relación de velocidad en la pieza ensayada respecto al acero. (Ref. 2).

Obtenido el valor del coeficiente de propagación y conocidas las características metalúrgicas de dureza, resistencia a la tracción y estructura micrográfica, se establecen las correlaciones entre los parámetros del haz ultrasónico y los metalúrgicos. De acuerdo a la bibliografía consultada se puede decir que existe una relación más o menos directa entre el coeficiente de propagación con la resistencia a la tracción dependiendo de la cantidad, tamaño y distribución del grafito presente en la fundición.

Es de mucha utilidad el gráfico de la Figura 1. en el cual se puede obtener directamente el valor de la resistencia a la tracción conociendo los valores del coeficiente de propagación y dureza en la zona objeto del ensayo. (Ref. 2).

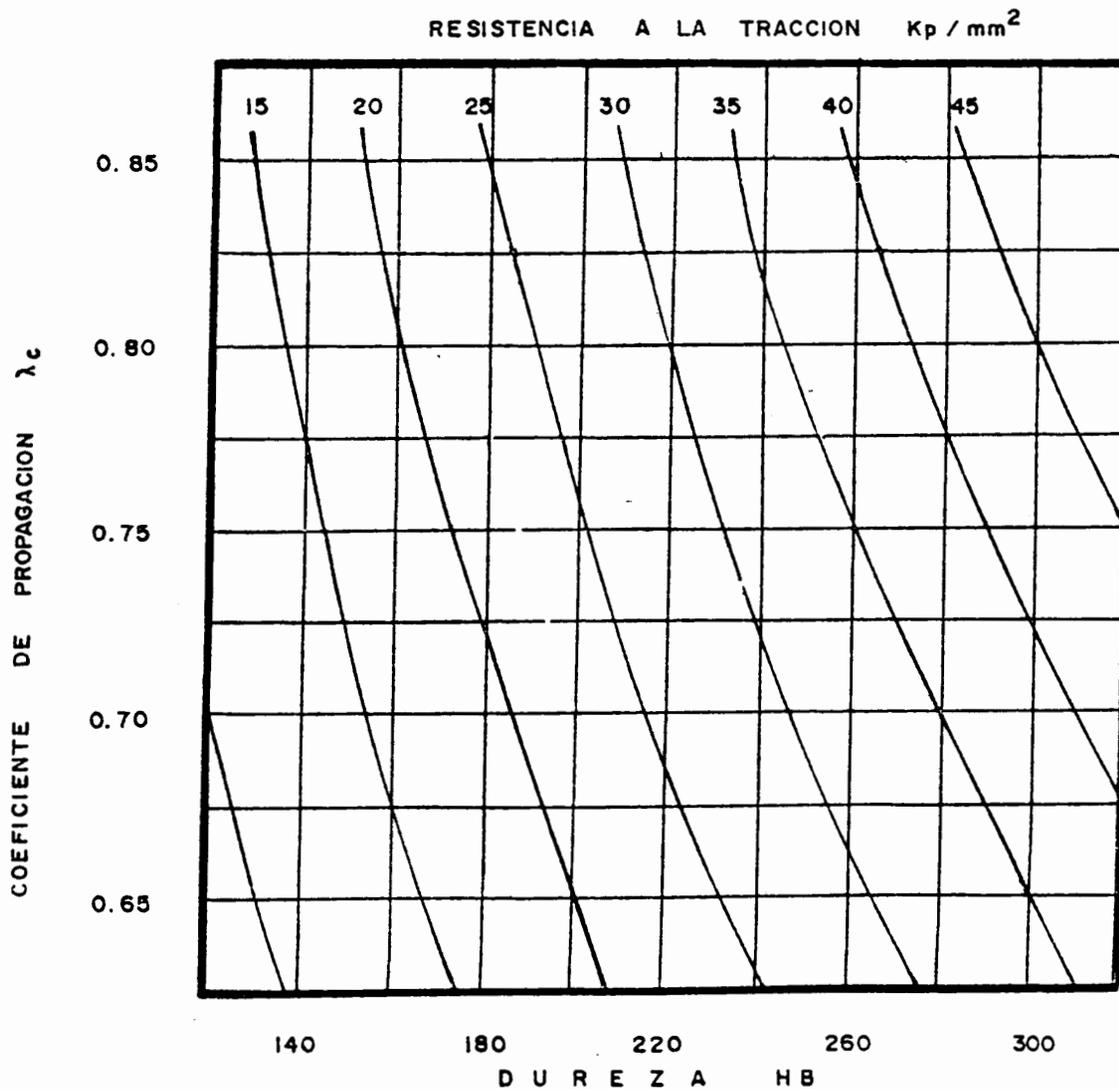
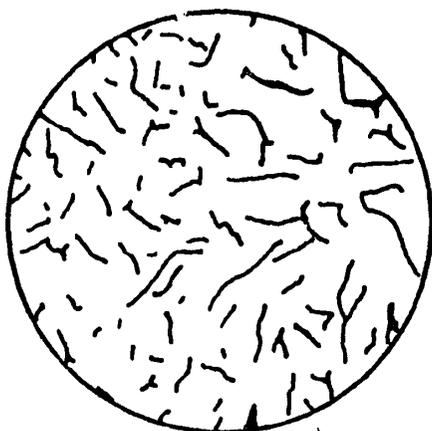


FIGURA N°1.- DETERMINACION DE LA RESISTENCIA EN FUNCION DEL COEFICIENTE DE PROPAGACION Y LA DUREZA BRINELL. (Ref. 2)

El método del ultrasonido también permite evaluar aproximadamente el valor de la resistencia mecánica de la fundición gris mediante simple inspección, ya que el tamaño, cantidad y distribución del grafito produce una atenuación del eco de fondo, pudiendo medirse tanto la altura como la cantidad de señales que sucesivamente se repiten en la pantalla del equipo ultrasónico, es decir en la medida comparativa que pierde o gana altura un eco de fondo puede apreciarse si una fundición es más o menos resistente que otra elegida como patrón.

La figura 2, muestra la microestructura de dos tipos de fundiciones gris que presentan dos tamaños de grafito, se observa también las señales ultrasónicas donde puede apreciarse la diferencia en la amortiguación o atenuación al palpar una fundición de 25 Kg/mm² de resistencia con otra de 18 Kg/mm² de resistencia, poniéndose de manifiesto la influencia del tamaño y cantidad del grafito sobre la resistencia a la tracción.



GRAFITO IA - TAMAÑO 4



GRAFITO IC - TAMAÑO 2

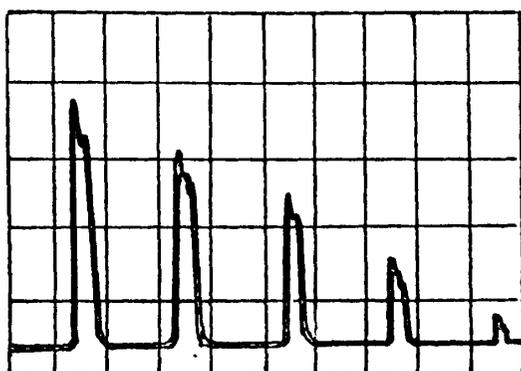
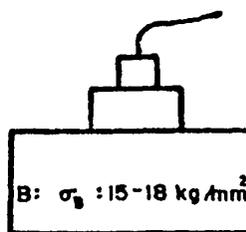
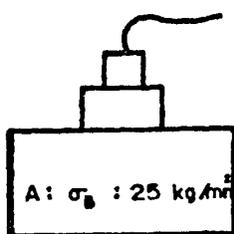


FIGURA N° 2.- INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y ESPESOR DEL GRAFITO EN EL COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL ULTRASONICA

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEORICO

2.1 ESTUDIO DE LA FUNDICION GRIS

2.1.1 Análisis de las propiedades.-

Las fundiciones grises son características porque en ellas la mayor parte o todo el carbono se encuentra libre, formando láminas de grafito. La tendencia natural a la formación de cementina en la solidificación de hierros colados, se controla efizcamente por observación de la composición de la aleación y las velocidades de enfriamiento. La mayoría de las fundiciones grises son aleaciones hipoeutécticas que contienen entre 2.5 y 4 por ciento de carbono.

Al solidificar estas aleaciones, lo primero que se forma es austenita primaria, apareciendo por primera vez carbono combinado al verificarse eutéctica a 1.129°C . El proceso de grafitización se realiza con mayor facilidad si

el contenido de carbono es elevado y si las cantidades de los elementos grafitizantes presentes especialmente el silicio, es la adecuada.

Experimentalmente se ha comprobado que mediante un control conveniente de los factores citados se logra que la aleación obedezca al diagrama estable hierro-grafito (Figura 3) formándose en el enfriamiento a la temperatura eutéctica, 1.134°C , austenita y grafito. En cualquier caso la cementina que se forma grafitizará rápidamente. El grafito adopta la forma de numerosas láminas curvadas y generalmente alargadas, que son las que proporcionan a la fundición gris su característica fractura grisácea o negruzca. En el enfriamiento continuo, al disminuir la solubilidad del carbono en la austenita se produce una nueva precipitación del carbono el cual lo hace en forma de grafito o de cementita proeutectoide, que grafitiza rápidamente.

La resistencia a la tracción de las fundiciones grises es función, tanto del tamaño, cantidad y distribución del grafito, así como de la estructura de la matriz en la que se encuentra

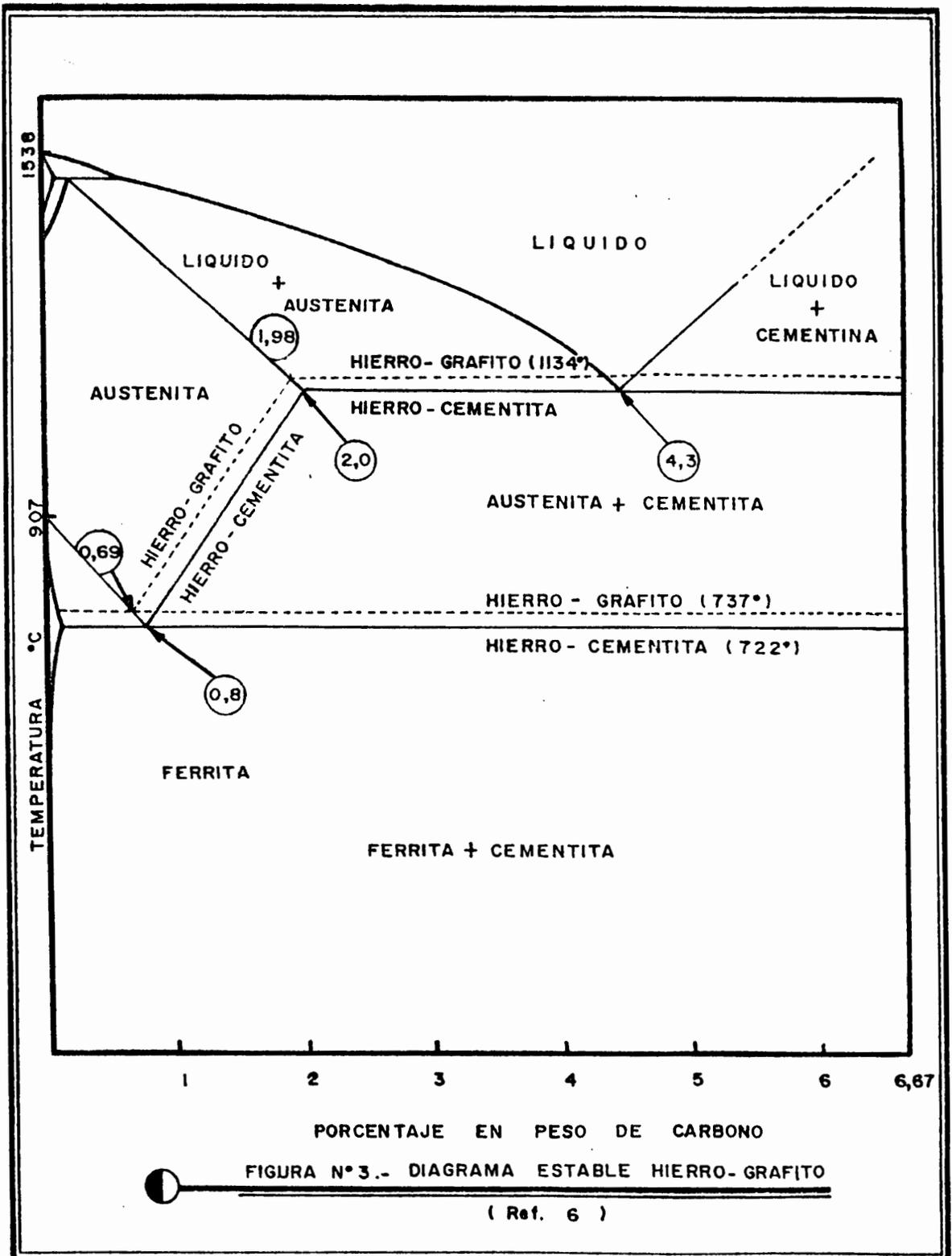


FIGURA N° 3.- DIAGRAMA ESTABLE HIERRO-GRAFITO

(Ref. 6)

embebido el grafito, dependiendo dicha estructura en gran parte de la condición de la cementina eutectoide. Si la composición y velocidad de enfriamiento son tales que la cementita eutectoide también se grafitiza, la matriz presentará entonces una estructura totalmente ferrítica. Por el contrario, si se impide la grafitización de la cementita eutectoide, la matriz puede variar de perlita pura a ferrita prácticamente pura también, pasando por una serie de mezclas de perlita y ferrita en distintas proporciones.

Las fundiciones grises constituidas por una mezcla de grafito y ferrita son las más blandas y las que menor resistencia mecánica presentan, la resistencia a la tracción y la dureza aumentan con la cantidad de carbono combinado que existe, alcanzando su máximo valor en la fundición gris perlítica. La figura 4, muestra la microestructura de una fundición gris cuya matriz es perlítica con pequeñas cantidades de ferrita.

Es de recalcar en este momento la gran influencia del silicio como componente de los hierros grises. El silicio es un elemento



FIGURA 4.- MICROESTRUCTURA DE UNA FUNDICION GRIS CON MATRIZ PERLITICA CON PEQUEÑAS CANTIDADES DE FERRITA. ATAQUE QUIMICO NITAL AL 2 %. (Ref. 6).

sumamente importante en la metalurgia de la fundición gris, aumenta la fluidez y retarda la solidificación de la aleación fundida. Desplaza hacia la izquierda la composición eutéctica, aproximadamente en un 0,30% de carbono por cada 1% de silicio. lo que disminuye la extensión del campo austenítico, baja el contenido de carbono de la composición eutectoide y la transformación se verifica en un intervalo más amplio.

El silicio es un elemento grafitizante, y si este efecto no se contrarresta por la presencia de elementos formadores de carburos, se favorece la solidificación de la aleación según el sistema hierro-grafito estable. Por lo tanto, si la aleación contiene silicio, durante la solidificación el carbono precipita en forma de láminas de grafito primario, las cuales una vez formadas no pueden alterarse por ningún procedimiento.

Estas láminas, poco resistentes, rompen totalmente la continuidad de la matriz, y el efecto de entalla a que dan lugar sus extremos es la causa de la poca resistencia a la tracción y baja ductilidad de la fundición

gris. Para que grafiticen la cementita eutectoide y la proeutectoide, aunque no la eutectica, y obtener una estructura final perlítica hay que controlar cuidadosamente el contenido de silicio y la velocidad de enfriamiento.

Seguidamente se señalan algunas propiedades de la fundición que la distinguen de otras aleaciones y que sirven para orientar a los técnicos sobre su empleo y para suministrar elementos de juicio sobre su calidad:

Resistencia al choque.- Las fundiciones grises resisten no muy bien los choques y son frágiles porque no sufren deformaciones plásticas, no obstante si los choques están contenidos en el límite de seguridad, las fundiciones grises tienen un óptimo comportamiento, por su propiedad característica de amortiguar la vibraciones. Por esta razón y por razones económicas, se ha llegado a sustituir las cigüeñales de acero tratado para compresores y para motores de combustión interna, por árboles colados con fundición modular obteniéndose un funcionamiento más regular, más suave y menos ruidoso.

Resistencia a la compresión.- La resistencia a la compresión en las fundiciones grises es tres veces mayor que la tracción, por eso es aconsejable someter las piezas de fundición a esfuerzos de compresión más bien que a los de tracción.

Capacidad de amortiguación.- Una propiedad importante de las fundiciones, debida precisamente a la presencia de láminas de grafito es su gran capacidad de amortiguación de la vibraciones, muy superior a la de los aceros. Esto es en general muy ventajoso cuando se emplea este material para la fabricación de bancadas de máquinas, motores, etc.

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

Resistencia al desgaste.- Es muy difícil señalar de una forma muy concreta el comportamiento o resistencia al desgaste, porque son muy complejos y numerosos los factores que para ello deben tenerse en cuenta. Lo más importantes son: la presión con que actúan las cargas, la velocidad de desplazamiento relativo de las piezas, el tipo de lubricante empleado, el grado de oxidación y de corrosión superficial y la diferencia de dureza que hay entre los materiales que rozan.

En los casos de rozamiento de metal con metal, la fundición gris da muy buenos resultados aún con mala lubricación debida a la presencia de grafito que actúa en cierto modo como lubricante, y también porque su estructura heterogénea es muy favorable. Su comportamiento es bueno al trabajar fundición con fundición o con otras aleaciones tan duras o más duras que ellas. Debido a esas circunstancias la fundición gris es muy utilizada para la fabricación de piezas de máquinas herramientas.

Para obtener los mejores resultados no conviene que el grafito sea muy fino. La forma del grafito también tiene mucha importancia, los

mejores resultados se obtienen con láminas distribuidas desordenadamente aisladas unas de otras.

Otras propiedades.- La fundición no es dúctil, no es maleable, se puede soldar al latón, en la soldadura oxiacetilénica y en la eléctrica de arco, el metal de aporte adquiere una elevada dureza y sólo con alguna dificultad puede ser trabajado.

La fundición puede recibir baños galvánicos (ser niquelada, por ejemplo), ser galvanizada en caliente, estañada y esmaltada al fuego (piezas de uso doméstico y para la industria química).

2.1.2 Factores que afectan las propiedades.-

a) Influencia de los varios componentes.-

Los constituyentes menores de la fundición, aunque en pequeño porcentaje respecto al constituyente principal que el hierro, tienen

una decisiva influencia sobre las características y propiedades del metal.

CARBONO

El carbono es sin duda, después del hierro el elemento más importante; se lo puede encontrar combinado con el hierro en forma de carburo (o cementina Fe_3C) ó en estado libre de grafito.

El carbono combinado como componente del carburo, determina en gran parte las propiedades, resistencia y dureza, de las piezas fundidas.

Cuando el hierro contiene un porcentaje más elevado de carbono, una parte del mismo se cristaliza en el momento de la solidificación, ó inmediatamente después de ella, en forma de grafito. Este último interpuesto en el hierro disminuye su consistencia, obteniéndose una estructura disgregada y esponjosa y disminuyéndose por lo tanto la resistencia, dureza y densidad de la fundición, aumentando por otro lado la posibilidad de su maquinado. Por el contrario, cuando se trata de piezas

cuya cantidad de grafito es excesivamente pequeña. las mismas resultan duras y frágiles. no consiguiendo trabajarlas con las herramientas ordinarias.

SILICIO:

El silicio es el elemento que tiene efecto más favorable sobre la formación del carbono grafitico. Normalmente acelera la disociación del carburo de hierro, esto es, de la cementita, durante la solidificación y el enfriamiento del metal fundido. Por eso el silicio contenido en una fundición debe ser calculado teniendo en cuenta el carbono total, la velocidad de enfriamiento y el espesor de las piezas. Generalmente debe ser bajo cuando se quieren obtener fundiciones duras y con fuerte resistencia a la tracción: más alto en el caso de que se quiere mecanizar fácilmente.

MANGANESO:

Una acción contraria a la del silicio es ejercida por el manganeso. Este elemento

favorece la formación del carburo de hierro, y a su vez, se combina fácilmente sea con el carbono o con el azufre. A menos que no se quiera obtener fundiciones con dureza particular el contenido de manganeso varía del 0.4 al 1%.

FOSFORO:

Es un elemento perjudicial para la calidad del hierro, resultando frágil al sobrepasar la proporción del 1%. Como propiedad ventajosa del fósforo hay que mencionar su influencia sobre la fluidez del hierro. El fósforo con una proporción de hasta 0.5% no tiene influencia sobre la precipitación del grafito, en cambio una proporción más elevada la favorece.

AZUFRE:

Es también un elemento perjudicial para la calidad del hierro, dificulta su fusión y aumenta considerablemente su dureza, fragilidad y contracción, provocando esta última circunstancia el desarrollo de tensiones

internas (sopladuras, rechupes, roturas, etc). Su acción es en parte contrarrestada por la presencia del manganeso, más en todo caso su contenido debe ser el mínimo posible, no debiendo exceder en ningún caso del 0.17% tratándose de piezas pesadas y 0.08% en piezas medianas.

b) Influencia de la velocidad de enfriamiento.

La velocidad de enfriamiento, depende del espesor de las piezas y de la clase de molde empleado, es otro factor que también ejerce una influencia decisiva en la calidad y microestructura de las fundiciones (Ref. 1).

Los enfriamientos rápidos tienden a producir fundiciones blancas, los enfriamientos lentos favorecen la formación de grafito y por lo tanto, la formación de fundiciones grises. Esta influencia es tan marcada que con una misma composición al verificarse la velocidad de enfriamiento se obtiene diferentes calidades con distintas durezas y microestructuras.

Como se dijo la velocidad de enfriamiento suele variar principalmente con el espesor de las piezas. y se modifica con la naturaleza de los moldes. Los pequeños espesores se enfrían mucho más rápidamente que los grandes. Un molde metálico, enfría más rápidamente que un molde de arena. En los moldes metálicos, el enfriamiento de la fundición será más o menos rápido según sea el espesor del molde. En algunos casos para alcanzar las mejores velocidades de enfriamiento, los moldes metálicos son refrigerados con agua.

Un ejemplo de la influencia que la velocidad de enfriamiento ejerce en la microestructura de las fundiciones, se puede observar en los resultados obtenidos con una pieza en la que hay zonas de diferentes espesor (Figura # 5). Sus escalones son de 3, 6, 12 y 24 mm. La Composición es la siguiente: C = 3.25%, Si = 1.75%.

Utilizando un molde de arena se obtuvo en los escalones de 3 y 6 milímetros de espesor fundición blanca con una dureza de 365 Brinell. y en los escalones de 12 y 24 milímetros de espesor se obtuvo fundición gris con dureza de

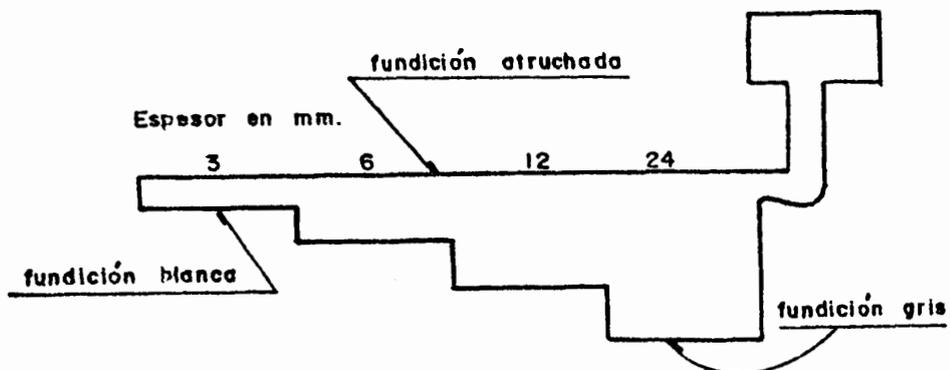
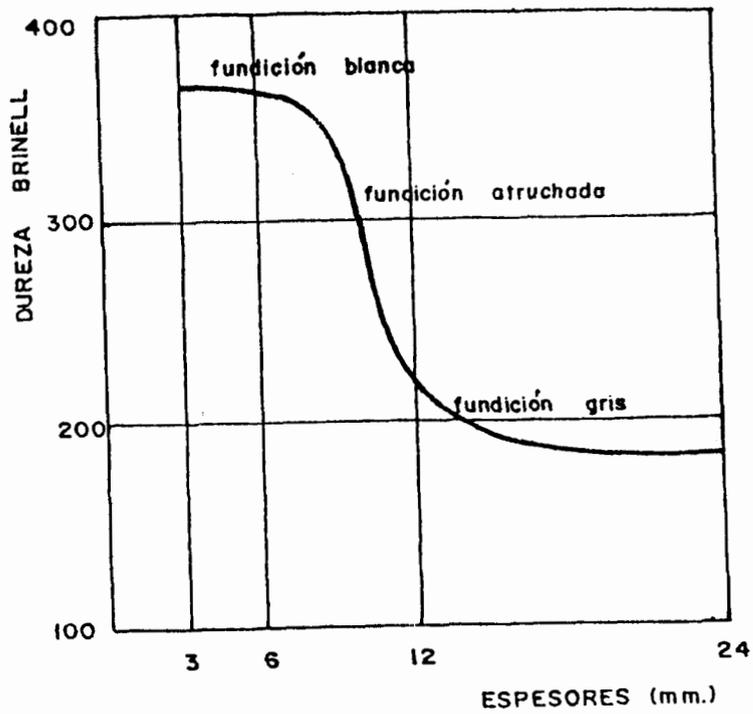


FIGURA N°5.- INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO
 (ESPESOR MUESTRA) SOBRE LA DUREZA BRINELL
 DE LAS FUNDICIONES. (Ref. 1).

170 a 180 Brinell. En el escalón de 12 mm. de espesor hay una zona intermedia de transición de fundición atruchada con 240 a 350 Brinell de dureza.

2.1.3 Características mecánicas y metalúrgicas.

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

En la figura 6, se ha representado gráficamente la relación que hay entre las diferentes clases de fundiciones que se pueden obtener con una misma composición de 3% de carbono y 2% de silicio. Se observa que con la misma composición se obtienen resistencias y durezas muy diferentes al variar la microestructura que depende principalmente de la velocidad de

E S T R U C T U R A S

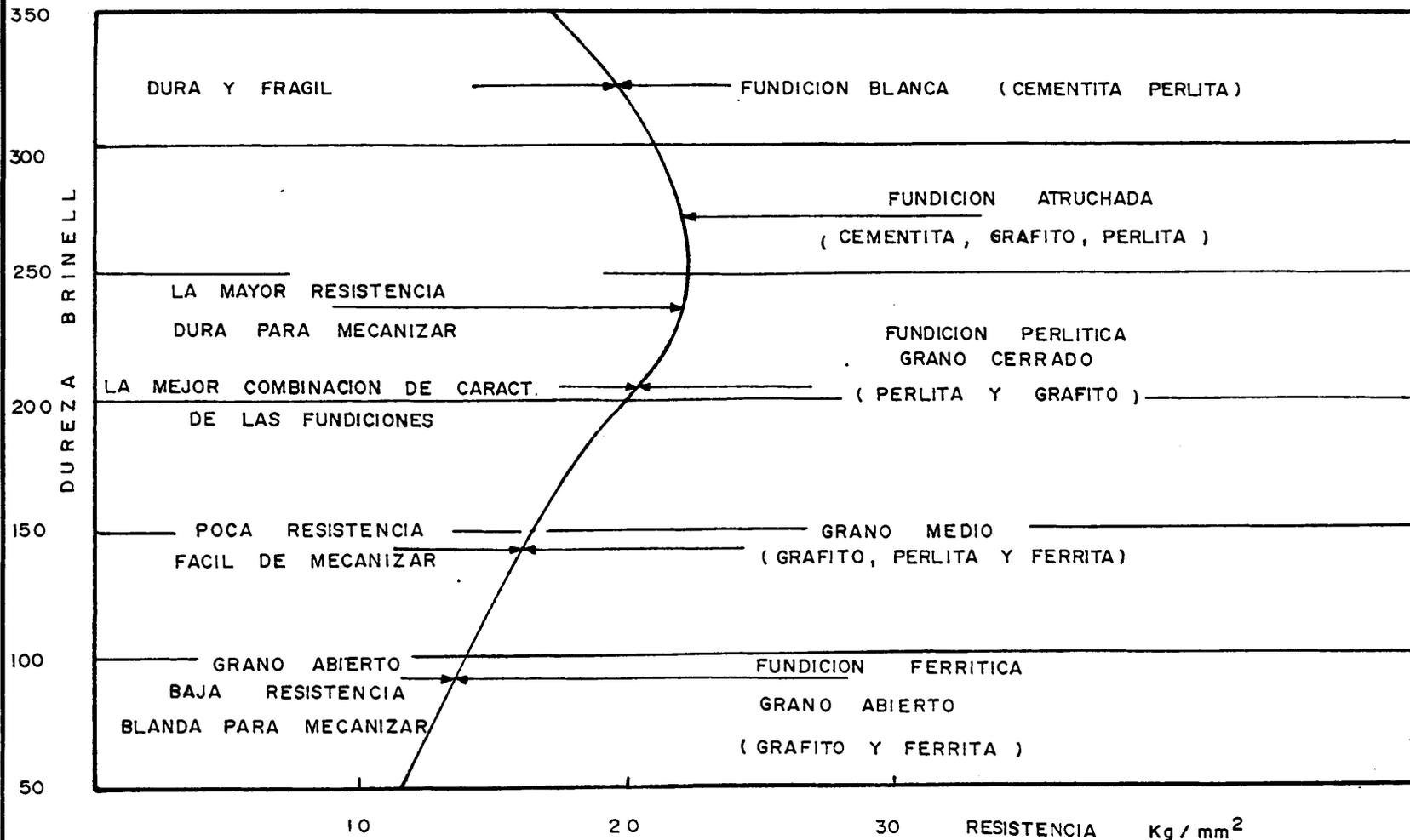


FIGURA N° 6.- RELACION ENTRE LA DUREZA Y LA RESISTENCIA A LA TRACCION DE LAS FUNDICIONES Y SU MICROESTRUCTURA. (Ref. 1)

enfriamiento. Con esa misma composición se pueden obtener fundiciones grises atruchadas y blancas con sólo variar la velocidad de enfriamiento. Se observa que en todas esas fundiciones la dureza aumenta progresivamente desde la fundición ferrítica, que con 130 brinell es la más blanda, hasta la fundición blanca, que con 300 a 550 brinell, es la más dura, teniendo las fundiciones perlíticas, que se pueden considerar de una calidad intermedia, una dureza de 180 a 250 brinell.

También se observa que a partir de la fundición gris ferrítica la resistencia va aumentando progresivamente hasta la fundición perlítica, que es la de máxima resistencia. Se observa, en cambio, que las fundiciones blancas tienen menos resistencia. En las fundiciones, al aumentar mucho la dureza hay una disminución de resistencia.

Resistencia a la tracción.-

En la práctica industrial, cada día se toma más en cuenta la resistencia a la tracción de las fundiciones grises, y es frecuente clasificarlas por la resistencia a la tracción.

Esta clasificación se obtiene en barras fundidas según norma ASTM, de la siguiente manera: (Ref. 1).

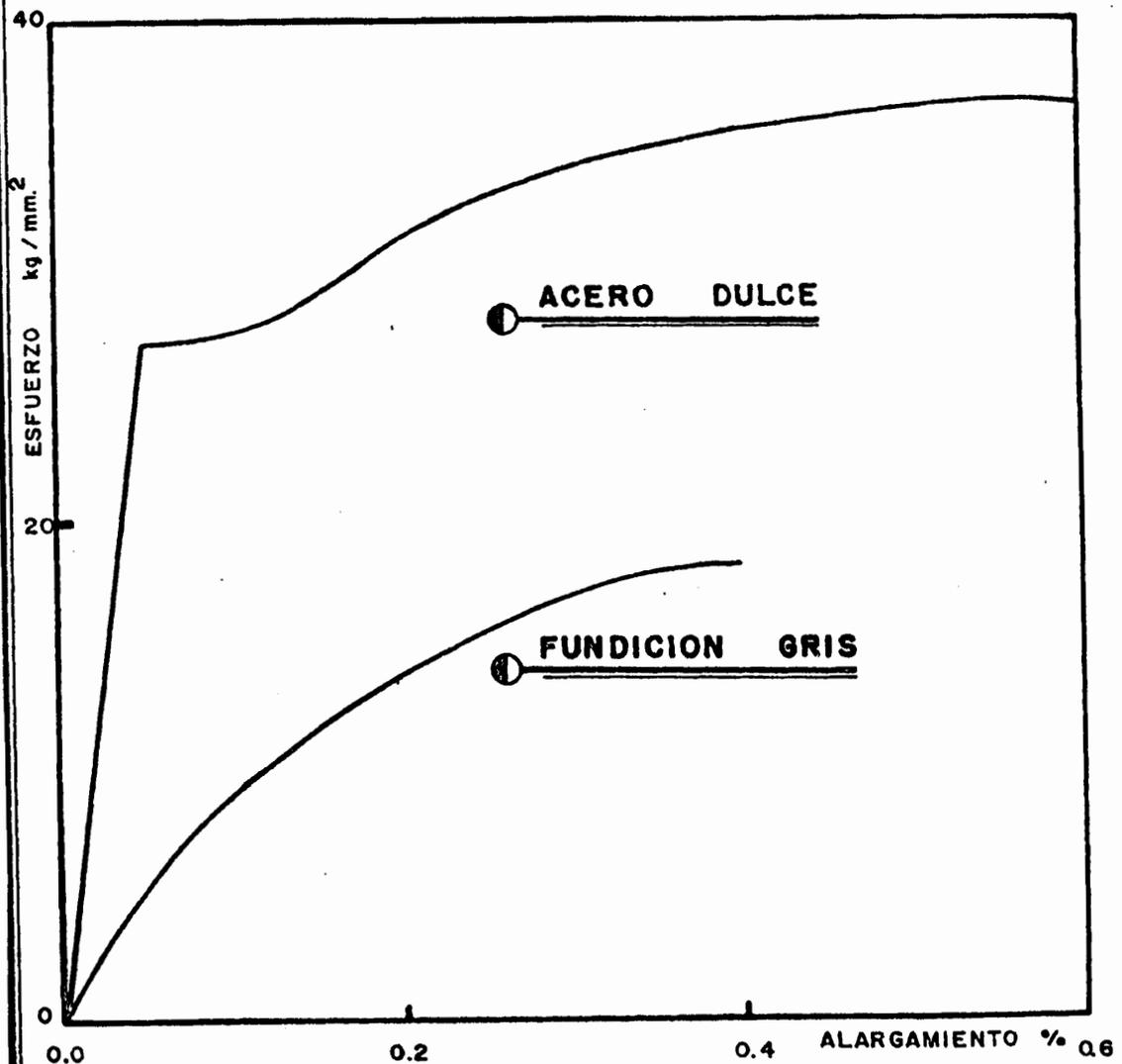
1. Fundiciones de menos de 15 Kg/mm², son en general fundiciones ferríticas.
2. Fundiciones de 20 Kg/mm², aproximadamente (15 a 25 Kg/mm²) son en general perlíticas con grafito laminar.
3. Fundiciones de 30 Kg/mm², aproximadamente (25 a 35 Kg/mm²) son fundiciones perlíticas de propiedades muy parecidas a las anteriores, aunque con frecuencia suelen ser aleadas.
4. Fundiciones de 40 Kg/mm², aproximadamente (35 a 45 Kg/mm²) son en general fundiciones aciculares con grafito laminar muy fino.
5. Fundiciones de 60 Kg/mm², aproximadamente (50 a 70 Kg/mm²) son en general fundiciones con grafito esferoidal.

MODULO DE ELASTICIDAD:

Al realizar el ensayo de tracción de una fundición gris (Figura 7) se observa que el módulo de elasticidad no es constante como en los aceros sino que disminuye a medida que aumenta la carga que actúa sobre el material. No hay por lo tanto, como en los aceros una zona en la que haya rigurosa proporcionalidad entre las cargas y las deformaciones. Por ello, a cada carga que actúa sobre el material corresponde un módulo de elasticidad, siendo frecuente que en la práctica se dé como valor del módulo de elasticidad de una fundición, el que corresponde a una carga de un 75% de la máxima rotura.

En general, al disminuir el tamaño y cantidad de las láminas de grafito, aumenta el módulo de elasticidad y también la resistencia a la tracción de las fundiciones.

El alargamiento plástico y permanente de las probetas en la mayoría de las fundiciones ordinarias es muy pequeño, puede decirse que casi nulo, ya que suele llegar al 1% mientras que en los aceros son normales los



**FIGURA N° 7.- COMPARACION DEL ENSAYO A LA TRACCION
ENTRE UN ACERO DULCE Y UNA FUNDICION
GRIS (Ref. 1)**

alargamientos que oscilan entre el 10 y 20%.
(Ref. 1-3).

Hasta aquí se ha hablado de las propiedades mecánicas. Son importantes además las características metalúrgicas de los materiales que se los efectúa por medio del examen microscópico, el cual permite determinar la naturaleza, morfología, dimensiones, cantidad y distribución de los constituyentes. Mientras que el análisis químico informa que la composición de la fundición comprende dos elementos principales, el hierro y el carbono, el análisis microscópico demuestra que tales elementos pueden existir en la estructura de las fundiciones de la siguiente forma:

- a) En el estado libre (ferrita y grafito).
- b) Como compuesto químico bien definidos (cementita).
- c) Como soluciones sólidas de composición variable.
- d) Como mezclas eutéctoides (perlita, sorbita).

FERRITA:

Normalmente se indica que el término "ferrita"

el hierro que cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo. Tal denominación se mantiene también cuando se hallan presentes en aleaciones otros elementos como silicio y manganeso, que forman con el hierro soluciones sólidas, sin alterar el aspecto de los granos. La velocidad de enfriamiento y el contenido de silicio son los factores que más influyen en la cantidad de ferrita.

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 el contorno de los cristales. En el examen microscópico la ferrita se presenta clara y constituida por cristales cuyos bordes tienen una morfología regular.

AUSTENITA:

La austenita está constituida por hierro cuyo retículo cristalino es cúbico de caras centradas conteniendo carbono en solución sólida. Es estable sólo a temperaturas

superiores a 723°C , pero puede ser estable a temperatura crítica en la que se produce la transformación.

El aspecto micrográfico de la austenita es similar al de la ferrita, sin embargo la distinción entre los dos constituyentes se hace muy fácil por observación de las uniones de los granos: rectilíneo en la austenita, regulares en la ferrita. En la fundición, tal distinción se hace posible observando que mientras en la austenita los reactivos ácidos normalmente atacan toda la superficie de los cristales, coloreando hasta el ennegrecimiento, en la ferrita el ataque se limita al borde de los granos.

CEMENTITA:

La cementita o carburo de hierro (Fe_3C) es un constituyente muy duro y frágil, que se forma durante la solidificación, dando lugar a la fundición blanca y se halla en la perlita en forma de láminas o de glóbulos.

El azufre, bismuto, cobalto, magnesio, manganeso, cromo y vanadio tienen tendencia a

hacer estable la cementita en la aleación. Por el contrario el silicio, uranio, aluminio, níquel e hidrógeno tienen tendencia a facilitar la descomposición de la cementita. Parece ser que estas sustancias trabajan como catalizadores de la transformación de la cementita en Fe y C según la siguiente reacción:



PERLITA:

La perlita es un componente formado por láminas de ferrita alternadas con cementita. Se presenta en condiciones normales de enfriamiento de las piezas.

En la observación al microscopio la perlita se la puede conocer por su semejanza con las huellas digitales. Es el constituyente que confiere a la fundición óptima características mecánicas y de resistencia al desgaste.

GRAFITO:

El grafito es carbono en estado libre que se

separa directamente del metal líquido durante la solidificación de la fundición gris y por descomposición de la cementita después de un tratamiento térmico de recocido.

Las partículas de grafito pueden tener forma:

- Laminar, su sección vista al microscopio se presenta como laminillas.

- Nodular, en forma de aglomerados más o menos compactados y regulares.

Todos los tipos de grafito, independiente de su origen cristalizan de acuerdo con el sistema exagonal. La forma en que se deposita el grafito depende de numerosos factores tales como: grado de nucleación, velocidades de enfriamiento, composición de la fundición, etc. La forma, dimensión y distribución resulta muy variable. Los principales tipos y tamaños de grafito laminar se han clasificados de acuerdo con tales características en la norma ASTM.

En la figura 8 se señalan los diferentes tamaños de las láminas de grafito clasificadas del 1 al 6.

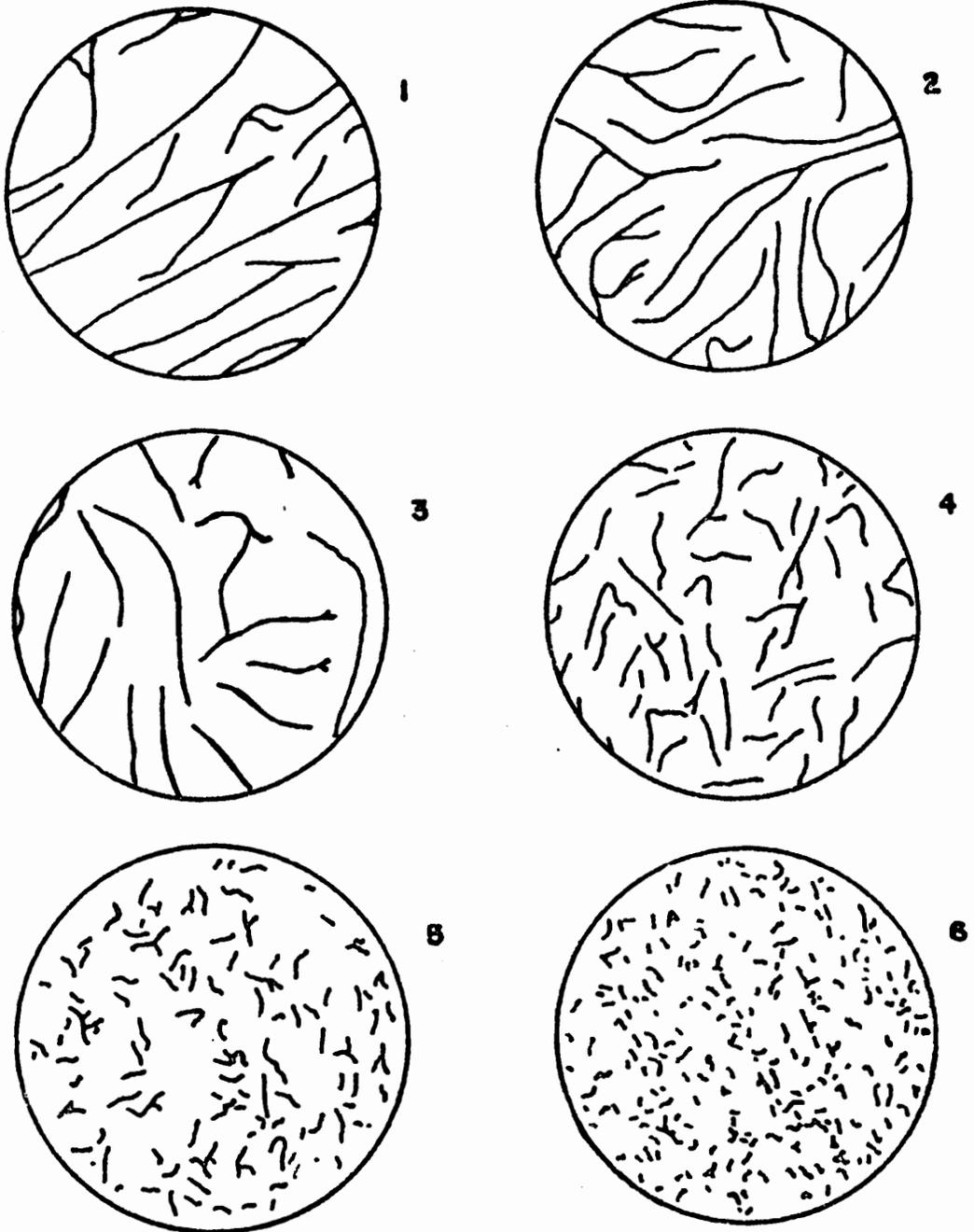


FIGURA N° 8.- TAMAÑO DEL GRAFITO LAMINAR SEGUN NORMAS
A.S.T.M. (Ref. 5).

Según la norma ASTM los tipos fundamentales de grafito laminar, y que se muestran en la figura 9, son los siguientes:

- TIPO "A"

Láminas con distribución uniforme, sin orientación preferencial. Este tipo de grafito se presenta en forma de láminas de dimensiones muy variables y curvadas, distribuidas al azar en la matriz metálica, que puede ser perlítica o ferrítica. Como se sabe, se forma durante la solidificación del eutéctico según el sistema estable.

- TIPO "B"

Láminas agrupadas en rosetas, sin orientación preferencial. Este grafito está presente en la zona sometida a enfriamiento más rápido que en el caso de grafito tipo A, por tanto, se halla en general presente en la zona exterior de las piezas. También está asociada a la ferrita cuando toda la matriz es perlítica.

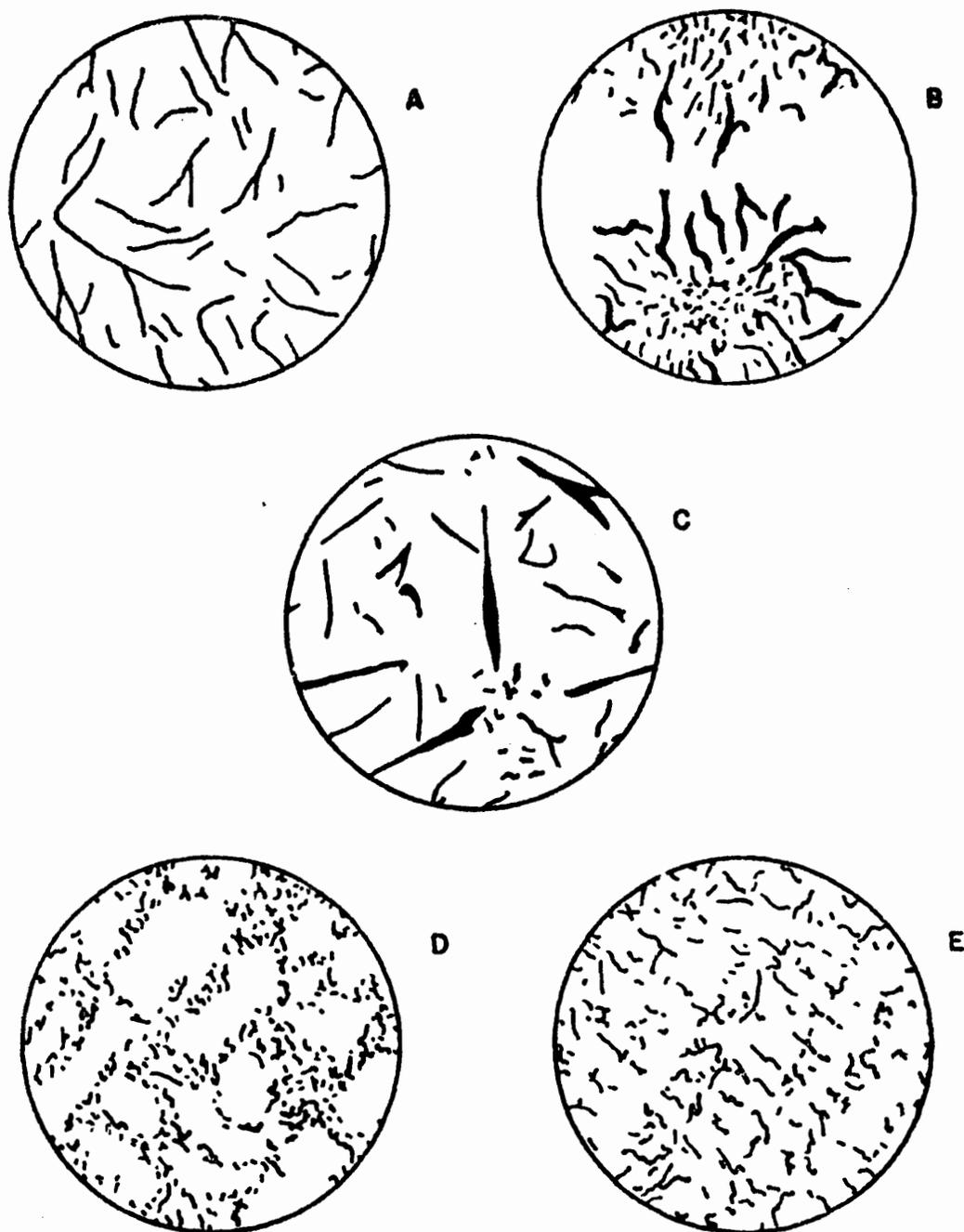


FIGURA N° 9.- DISTRIBUCION DEL GRAFITO LAMINAR SEGUN NORMAS

A.S.T.M. (Ref. 5)

- TIPO "C"

Láminas gruesas y rectas sin orientación preferencial. Este grafito característico de las fundiciones hipereutéticas se presentan en forma de láminas rectas, dispuestas también en rayas alrededor del núcleo central. A estas láminas se mezclan otras curvadas de grafito eutético.

- TIPO "D"

Láminas pequeñísimas sin orientación preferencial, reagrupadas en las zonas interdentríticas. Este tipo de grafito es el más asociado a la ferrita y se forma en la zona de la pieza sometida a elevada velocidad de enfriamiento.

Cuando tal velocidad llega a ser muy elevada pueden hallarse presente carburos libres, junto a ferrita y perlita. Este grafito por su características de formación se define por lo general como grafito de subenfriamiento.

- TIPO "E"

Láminas con orientación preferencial distribuidas en la zona interdendrítica. Este tipo de grafito es característico de las fundiciones hipoeutécticas.

2.2 CONTROL POR ULTRASONIDOS.-

2.2.1 Comportamiento del haz ultrasónico en la fundición gris.-

El comportamiento del haz ultrasónico en la fundición gris ha sido ampliamente discutido por varios autores (Ref. 4). Quizás uno de los ensayos más significativos haya sido el de determinar la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en probetas con variadas formas del grafito. Mientras que en el acero y en el aluminio y sus aleaciones los márgenes de variación de la velocidad de propagación son casi inapreciables, en la fundición grafitica existen grandes diferencias.

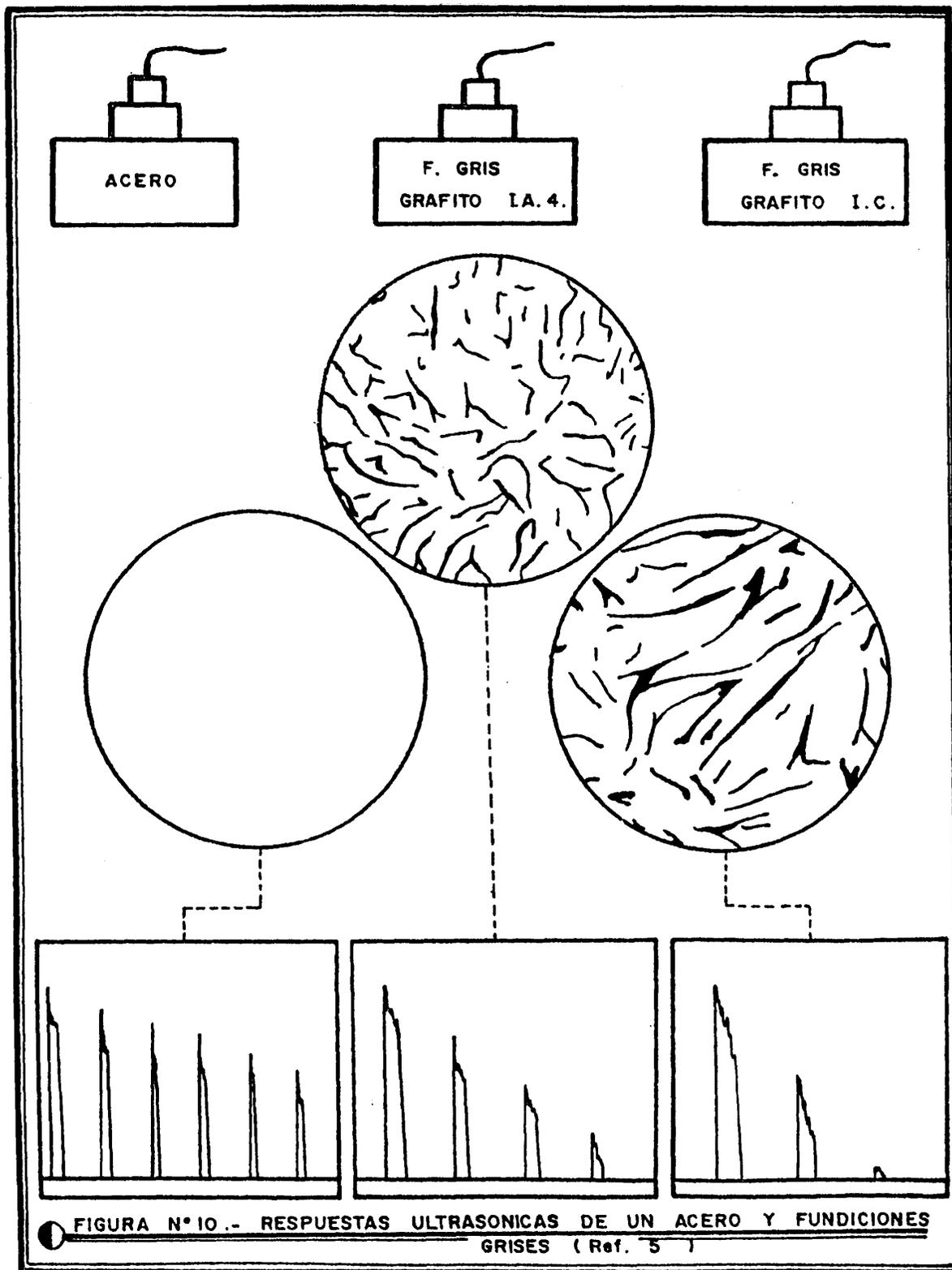
Variaciones de otros parámetros tales como el módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, etc., se supone son debidas a la heterogeneidad del medio conferida por el grafito, ya que se descarta el escaso efecto

debido a la matriz. La hipótesis sobre tales comportamientos se fundamenta en considerar a la fundición gris como un verdadero agregado de acero y carbono libre en forma grafitica. En consecuencia la velocidad de propagación depende del tamaño, cantidad y distribución del grafito presente en la fundición: a mayor tamaño y cantidad del grafito crecen los efectos de amortiguación. Es decir una fundición con grafito laminar fino y distribuidos uniformemente tendrá mayor velocidad de propagación que una fundición con grafito laminar grueso y sin orientación preferencial.

En la figura 10 se esquematizan las respuestas ultrasónicas que se obtienen de un acero, una fundición gris con grafito tipo A, tamaño 4 y una fundición gris con alto porcentaje de grafito tipo C grueso y largo, se puede apreciar el amortiguamiento de las señales ultrasónicas en las muestras de fundición gris.

2.2.2 Amortiguación de ondas longitudinales.-

El amortiguamiento de ondas mecánicas elásticas, es considerado uno de los fenómenos



más interesantes, a la vez que también más complejos, cuando dicho fenómeno se presenta a través de un medio metálico.

Bajo tal aspecto, la propagación de ondas se halla supeditada a muy diversos factores como por ejemplo: la configuración estructural del medio, las transformaciones que éste puede experimentar bajo determinadas condiciones directas o indirectas alterando las condiciones de propagación, esto trae como consecuencia el amortiguamiento de las ondas y posteriormente su extinción.

La aptitud que poseen los materiales para amortiguar las vibraciones es una cualidad muy apreciada. En el campo de las construcciones mecánicas adquiere especial interés en industrias tales como la automotriz, naval, aeroespacial y energética. Según los casos, los materiales adquieren elevada capacidad de amortiguamiento, debiendo ser considerados los factores anteriormente enunciados y cualquier otro de características influyentes.

CAPACIDAD DE AMORTIGUAMIENTO:

Esta se define como la relación existente entre la energía absorbida durante un ciclo de vibraciones y la energía total en el momento de comenzar dicho ciclo. Se trata de una pérdida relativa en el transcurso de un ciclo esfuerzo-deformación, pérdida que se representa a través de dos expresiones (Ref.5).

$$K = \frac{\Delta W}{W} = \frac{W_n - W(n + 1)}{W_n} \quad (2.2)$$

$$U = 100 K \quad (2.3)$$

Donde:

K = Capacidad de amortiguación

W = Energía absorbida en un ciclo

W_n = Energía total

U = Capacidad específica de amortiguamiento.

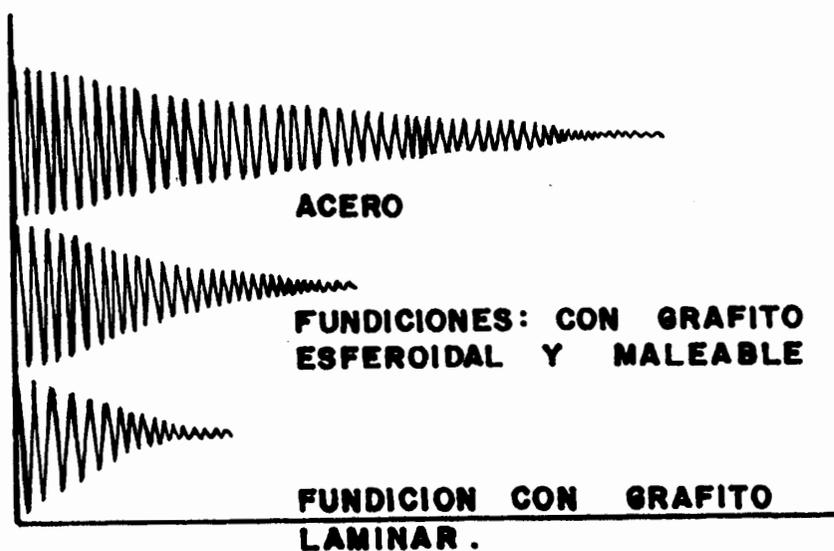
La segunda expresión recibe el nombre de capacidad específica de amortiguamiento, equivalente a expresar la primera expresión en tanto por ciento.

Para designar tal capacidad han sido empleados diversos términos como por ejemplo: histéresis mecánica, frotamiento interno, decremento logarítmico, histéresis elástica. etc.. prevaleciendo uno ú otro según el problema estudiado.

La expresión (2.2) permite determinar el frotamiento interno, parámetro característico en el caso del amortiguamiento producido por el paso de vibraciones libres a través de un sólido.

Es evidente que tal frotamiento interno ó rozamiento conduce al amortiguamiento. La hipótesis de que la causa del amortiguamiento reside en un frotamiento proporcional a la frecuencia, permite acudir a la curva de resonancia y obtener un decremento o función de la frecuencia de resonancia. Esto se obtiene de la diferencia de dos frecuencias situadas a ambas partes de la resonancia correspondiente a una misma amplitud.

Acerca de estos datos convergen una serie de trabajos muy diversos con diferentes instrumentación; masas pendulares, métodos



● FIGURA N° II .- REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL AMORTIGUAMIENTO
EN EL ACERO Y OTRAS FUNDICIONES (Ref. 9)

electrostáticos, magnéticos, etc. Muchos de esos resultados han sido comprobados por ultrasonidos.

En la figura 11(b), se da una representación esquemática del amortiguamiento experimentado en acero y otras fundiciones, destacándose la gran capacidad de amortiguamiento en las fundiciones con grafito laminar grueso.

En la Tabla I se dan a conocer las capacidades de amortiguamiento específicas de algunos medios metálicos.

2.2.3 Atenuación de la onda: influencia del medio.-

La atenuación depende esencialmente de dos factores:

- a) Características del material; y
- b) Características del sistema de emisión y propagación.

El material influye provocando una disipación interna (amortiguamiento por histéresis) de energía en un volumen determinado y en medio



TABLA N°1.- AMORTIGUAMIENTO ESPECIFICO DE DISTINTOS
MATERIALES (Ref. 9)

MATERIAL	δ %
ALUMINIO	0.008
NÍQUEL	1.4
COBRE	0.6
ACERO	0.08
FUNDICION BLANCA	0.04 - 0.08
FUNDICION MALEABLE	0.16 - 0.3
FUNDICION GRAF. ESFEROIDAL	0.1 - 0.5
FUNDICION GRAF. LAM. FINO	0.4 - 2.0
FUNDICION GRAF. LAM. GRUESO	2.0 - 1.0

microcontinuo, siempre que éste se halle sometido a esfuerzos cíclicos. Este mecanismo asociado a la macro y microestructura del material puede considerarse bajo dos aspectos distintos:

- Absorción propiamente dicha o transformaciones energéticas, principalmente de energía mecánica en calor por causas del rozamiento interno.
- Dispersión o difusión de la energía del haz, que tiene su origen en los fenómenos de reflexión, refracción y difracción.

Debe admitirse como consecuencia, que la atenuación deber ser medida a través de las pérdidas por absorción y de las pérdidas por dispersión, a las que corresponderán dos coeficientes, coeficiente de atenuación por absorción (ω_A) y coeficiente de atenuación por dispersión (ω_D), resultando para el coeficiente de atenuación la siguiente expresión:

$$\omega = \omega_A + \omega_D \quad (2.6)$$

Si no existe dispersión:

$$\alpha = \alpha_A$$

La dispersión es debida a que los materiales no son estrictamente homogéneos. Contienen superficies límites o discontinuidades (inclusiones, heterogeneidades naturales o artificiales, constituyentes precipitados. fase en la estructura cristalina de los metales, límites de grano, etc.) en las que la impedancia acústica cambia bruscamente, debido a la diferente densidad o velocidad acústica de los materiales.

La absorción es una conversión directa de la energía acústica en calor. Se puede explicar la absorción de una forma elemental, como un efecto de frenado de la oscilación de las partículas, lo cual explicaría también por qué una oscilación rápida pierde más energía que una oscilación lenta. La absorción aumenta generalmente con la frecuencia, pero en menor grado que la dispersión. Ambas pérdidas limitan las posibilidades de los ensayos no

destruictivos de materiales, de acuerdo a lo siguiente:

- a) La absorción pura debilita la energía transmitida o la amplitud del eco, tanto de la heterogeneidad como de la pared de fondo. Para contrarrestar este efecto hay que incrementar la tensión de emisión y la amplitud o recurrir al empleo de frecuencias más bajas.

- b) La dispersión es mucho más perturbadora, ya que en el método de impulso eco, no sólo reduce la amplitud del eco de la heterogeneidad y la del eco de fondo, sino que además, produce numerosos ecos parásitos con diferentes recorridos (hierva o césped) en los que los verdaderos ecos pueden quedar enmascarados. El único medio de contrarrestar este efecto de "césped" es emplear frecuencias más bajas lo cual establece un límite natural para la detención de heterogeneidades pequeñas.

El fenómeno de atenuación es función de la naturaleza, condición y estado de material. En consecuencia la medida de la atenuación puede aportar datos suficientes para permitir la caracterización de algunos materiales, como por ejemplo, las fundiciones.

2.2.4 Característica de propagación del sonido.-

La propagación de ondas ultrasonoras a través de un medio metálico se presenta sujeta a una serie de factores dependientes principalmente de la naturaleza y configuración estructural del material, así como de las propias leyes físicas que rigen dicha propagación. Este se presenta acompañada según el tiempo y la distancia de pérdidas de energía intensidad o presión, siguiendo una ley exponencial de forma semejante al amortiguamiento.

La representación del fenómeno de propagación se presenta en la pantalla del tubo de rayos

catódicos bajo la conocida forma de secuencia de señales-ecos cuya altura decrece más o menos rápidamente. El número de señales que aparecen en el tubo de rayos catódicos varía según la naturaleza del material. Las pérdidas antes mencionadas son las que conduce al debilitamiento, atenuación o extinción de la señal. La propagación se halla supeditada también a las leyes de reflexión, refracción, difracción y atenuación.

Estas leyes a su vez se encuentran más o menos subordinadas a la composición estructural y a la geometría del elemento a ensayar.

Vemos que, bajo las consideraciones expuestas, son muy diversas las causas que conducen o se conjugan, para llegar a un proceso de atenuación semejante al amortiguamiento. Podemos decir que la propagación se ve afectada por una serie de fenómenos de disipación, característico de todo sistema sometido a esfuerzos mecánicos periódicos y que conducen a un amortiguamiento de las vibraciones dependientes, en síntesis, del propio material

y del sistema en conjunto.

2.2.5 Velocidad del haz sonoro.-

Las ondas ultrasónicas viajan a través de sólidos y líquidos a velocidades relativamente altas, pero son atenuadas o extinguidas rápidamente en los gases. La velocidad de un tipo de onda específica, por ejemplo longitudinal es una constante a través de un material homogéneo dado.

Las velocidades acústicas para los diferentes tipo de ondas se calculan a partir de las constantes elásticas del material que se trate. Las constantes elásticas que intervienen en el cálculo son:

E = Módulo de elasticidad, expresada en N/m^2 ó en Kp/mm^2 ($1 Kp/mm^2 = 0.98 \times 10^7 N/m^2$).

μ = Relación o coeficiente de Poisson (adimensional).

δ = Densidad.

Las fórmulas que expresan los valores de la

velocidad para los distintos tipos de ondas son: Ref. (2).

Ondas longitudinales

$$C_l = \frac{E}{\rho} \times \sqrt{\frac{(1-\mu)}{(1-\mu)(1-2\mu)}} \quad (2.6)$$

Ondas Transversales

$$C_t = \frac{E}{\rho} \times \sqrt{\frac{1}{2(1-\mu)}} \quad (2.7)$$

La relación entre las velocidades de las ondas longitudinales y transversales está dada por:

$$\frac{C_t}{C_l} = \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)}} \quad (2.8)$$

En la tabla II se dan las velocidades longitudinales y transversales de propagación acústica para algunos materiales metálicos y no metálicos. La impedancia acústica correspondiente se muestra también en dicha tabla.

2.2.6 Correlación entre las propiedades

metalúrgicas y ultrasónicas

Tras las consideraciones metalúrgicas y de comportamiento del haz ultrasónico en los acápites anteriores, se puede decir que la forma, tamaño y distribución del gráfico tiene un efecto mandatorio sobre las propiedades mecánicas de la fundición gris. Tal es así, que como es conocido, el grafito largo y de gran espesor disminuye la resistencia al desgaste y el uniformemente distribuido y pequeño la aumenta. Además la función de apariencia porosa es producto del desprendimiento del grafito grueso, que si bien en aquellas piezas que trabajan en constante lubricación puede ser beneficioso por su capacidad de alojar aceite, en cambio se tendrá un excesivo consumo de aceite y menor vida útil.

TABLA No. II

**VELOCIDADES DE PROPAGACION ACUSTICA
PARA METALES Y NO METALES**

MATERIALES	P DENSIDAD $\times 10^3 \text{kg/m}$	VELOCIDADES ACUSTICA $\times 10^3 \text{ m/s}$		IMPEDANCIA CUSTICA $10^6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}$ $z = \rho \cdot C_l$
		C_l	C_t	
ACERO (baja aleación)	7.85	5.82	3.19	45.7
ACERO INOX. AUSTEN. (18.8)	8.03	5.66	3.12	45.5
ACERO INOX. MARTEN- SITICO 13 Cr.	7.67	7.39	2.99	56.7
ALUMINIO	2.71	6.32	3.08	17.1
FUNDICION (Fe - C).	7.20	3.5-5.6	2.2-3.2	25 - 40
HIERRO	7.70	5.85	3.23	45
LATON (Cu - Zn)	8.25	7.82	3.02	64.5
NÍQUEL	8.0	5.63	2.96	50
PLOMO 6% ANTIMONIO	10.9	2.16	0.81	23.6
ACEITE (SAE 20 - 30)	0.89-0.96	1.74	----	1.5 - 1.7
GLICERINA (20°)	1.26	1.92	----	2.4
ALCOHOL ETILICO (20°)	0.79	1.17	----	0.92

Fuente: Revista Ref. 2

Se puede decir también que existe una relación más o menos directa entre la velocidad de propagación y la resistencia a la tracción, la relación con la dureza es igualmente similar.

Además la velocidad de propagación disminuye cuando aumenta el tamaño de las láminas de grafito y la velocidad de enfriamiento.

La Figura 12 demuestra que la velocidad de propagación disminuye cuando aumenta el grado de saturación y que para un mismo grado de saturación la velocidad de propagación disminuye cuando lo hace la velocidad de enfriamiento. Puesto que como se ha dicho antes la forma, tamaño y distribución del grafito, así como velocidad enfriamiento afecta las señales producidas en el TRC, se concluye entonces que las características metalúrgicas y por ende las propiedades mecánicas, pueden ser evaluadas de la interpretación de las señales ultrasónicas UT obtenidas en las fundiciones grises.

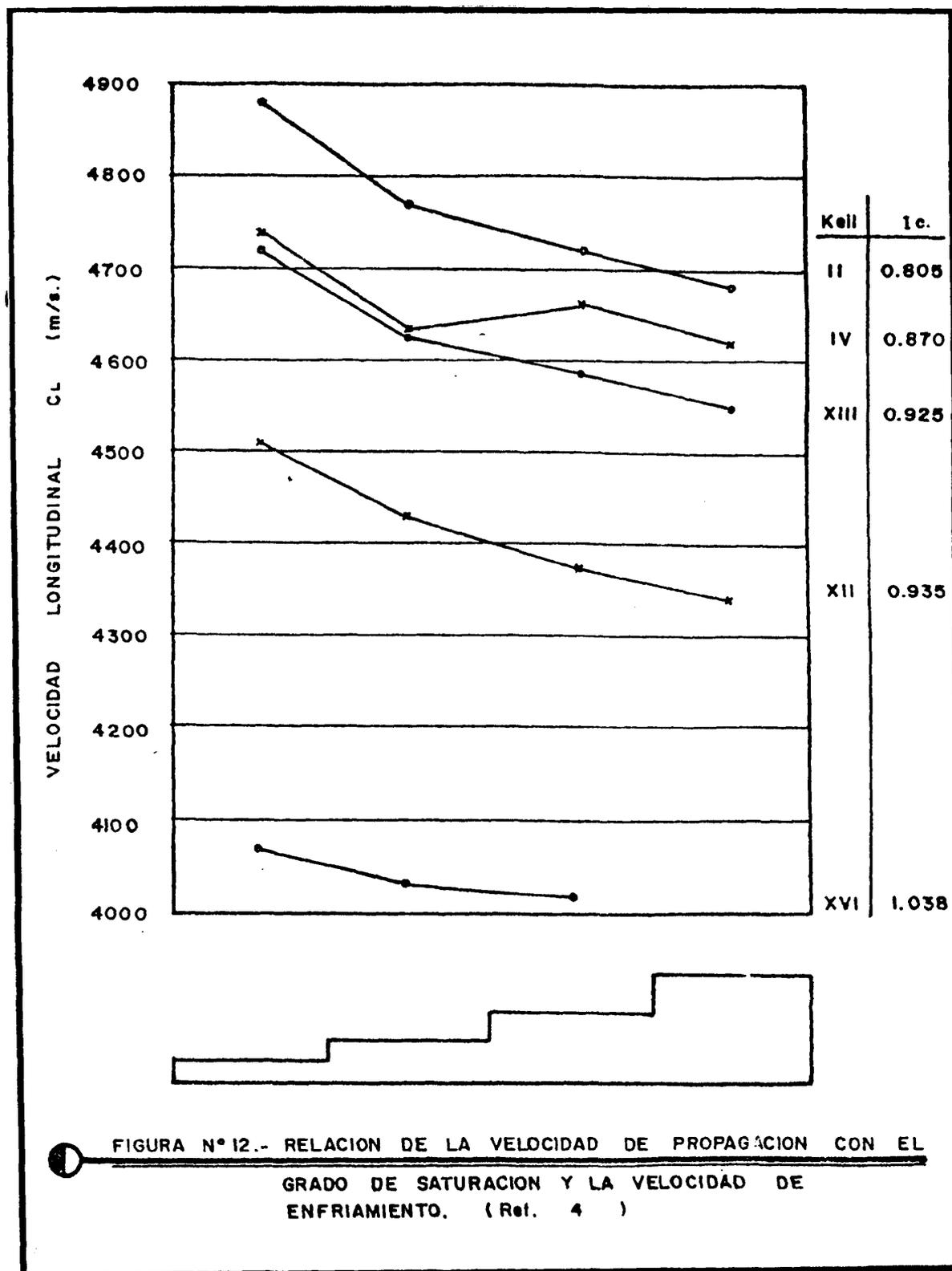


FIGURA N° 12.- RELACION DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION CON EL GRADO DE SATURACION Y LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO. (Ref. 4)

CAPITULO III

TRABAJO EXPERIMENTAL

En este capítulo se tratará sobre todos los pasos seguidos durante la investigación que consistió en ensayar probetas de distintos espesores de fundición gris, provenientes de dos fundiciones locales. Se detallará la forma de ajuste y calibración del equipo de ultrasonidos utilizado, así como el método operativo para la utilización de los ultrasonidos en la determinación de las características mecánicas de la fundición gris.

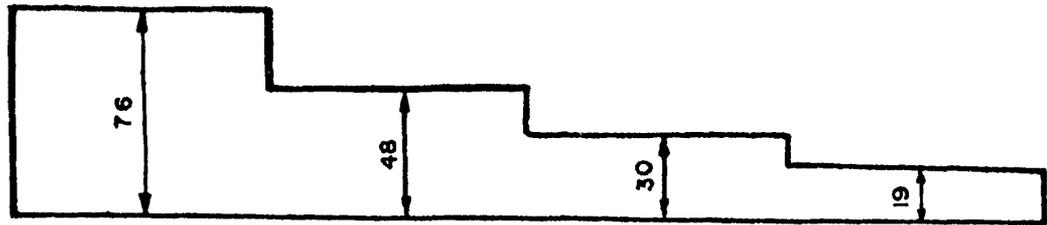
3.1 OBTENCION DE LAS MUESTRAS PARA ANALISIS

El presente trabajo se lo ha efectuado empleando fundiciones de nuestro medio. Las fábricas de fundiciones que se visitaron producen hierro en cubilotes de diámetro, comprendidos entre 330 y 600 mm, en los cuales se introduce chatarra de hierro gris preferentemente, coque, caliza, ferro-aleaciones y aire como elemento que lleva el oxígeno suficiente para producir la oxidación del combustible sólido.

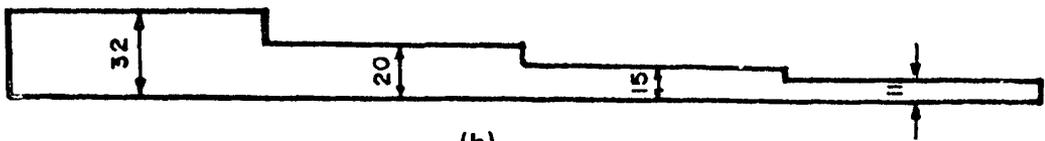
En algunas de estas fábricas que se visitaron, las materias primas que se introducen en el horno no son seleccionadas y no se posee una información cabal de sus especificaciones. Además, no se realizan ningún control de laboratorio para reconocer las cualidades de sus respectivas coladas. Por este motivo se seleccionó para la toma de muestras a dos funciones locales por considerarlas las más óptimas para este estudio.

Las probetas que se fundieron tienen forma escalonada (Figura 13) con lo cual se lograron obtener diferentes características sonoras (atenuación, velocidad de propagación, etc.) debido a la diferencia en la estructura ocasionada por la variación de la velocidad de enfriamiento.

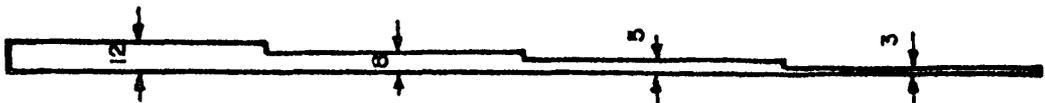
Una vez obtenidas las probetas de fundición se procedió a efectuar el maquinado de las mismas, con el objeto de quitar toda la superficie rugosa, que podría afectar el valor de la atenuación, dificultando además un buen acople en el análisis ultrasónico.



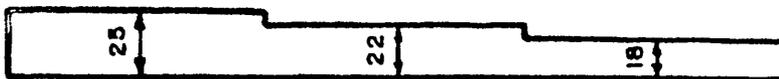
(a)



(b)



(c)



(d)

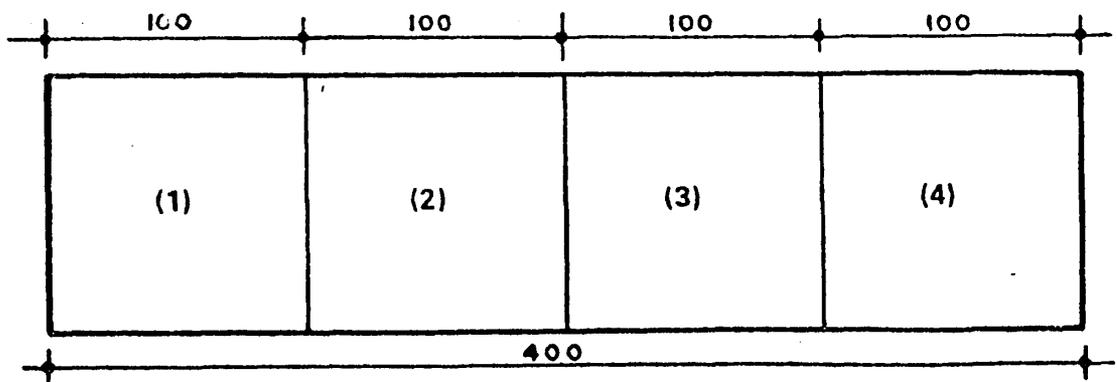


FIGURA N° 13.- PROBETAS UTILIZADAS EN EL ANALISIS EXPERIMENTAL.

(medidas en mm.)

Esc. 1:3

TABLA III
DATOS TECNICOS DEL EQUIPO KRAUTKRAMER USK-6

Gama de Frecuencias	0.5 - 15 MHz
Amplificación:	Ajuste basto en saltos de 0/20/40 dB. Ajuste fino en escalones de 2 dB entre 0 y 40 dB.
Supresión:	Regulable entre un 0 y un 30% de la pantalla.
Representación:	Representación lineal de las amplitudes de los ecos.
Deflexión horizontal:	Falta de linealidad <+1% del campo elegido. Deriva por temperatura <2% por cada 10°C.
Deflexión vertical:	Falta de linealidad <+1 dB, diferencia de amplificación. Además tolerancia según norma japonesa JISZ-2344 <6% con referencia a la altura total de la pantalla. Deriva por temperatura <0.5 dB por cada 10°C.
Campos de Control:	25 mm. a 250 mm. en acero. 250 mm. a 2.500 mm. en acero.
Desplazamiento de impulso:	0 - 250 mm. en acero. Deriva por temperatura <1% por cada 10°C.
Frecuencia de repetición de impulsos:	En consonancia con los campos de control. 1 kHz para 25 - 250 mm. 250 Hz. para 250 - 2.500 mm. Tolerancia <%.
Monitor:	Monitor de un sólo canal, con salida de coincidencia si/no (conmutable dentro del equipo a anticoincidencia)
Puerta del monitor:	Anchura regulable entre 0 y 50% de la longitud de la escala de la pantalla

3.2 EQUIPO UTILIZADO

- Equipo

Para este trabajo de investigación se ha utilizado

El equipo ultrasónico KRAUTKRAMER USK-6 cuyos datos técnicos están detallados en la Tabla III. La Fig. 14 muestra los controles del equipo ultrasónico.

- Transductores

Los transductores fueron compatibles con el equipo utilizado y sus frecuencia están comprendidas en el campo de trabajo del equipo. Para el presente trabajo se utilizó un palpador emisor de ondas longitudinales (MB5SN) con las siguientes características:

Frecuencia : 2 MHz

Tamaño : 3/4 pulgada

Sonda : Normal

- Acoplante

Al utilizar la técnica de trabajo por contacto se hace imprescindible emplear un medio acústicamente conductor interpuesto entre el

palpador y la pieza a examinar. Para nuestro caso, se ha utilizado como acoplante aceite SAE 20.

- Bloque de calibración

Para la realización práctica, tanto de la comprobación del equipo como de la calibración del sistema se utilizó el Bloque de calibración del Internacional Institute of Welding conocido como bloque VI (Figura 15).

3.3 AJUSTE Y CALIBRACION DEL EQUIPO

Como operación previa al proceso de inspección por Ultrasonidos, es necesario proceder en primer lugar a una comprobación satisfactoria del estado de funcionamiento del equipo.

Esta comprobación incluirá el ajuste de la linealidad horizontal y vertical de la pantalla, la calibración de la sensibilidad, y la proporcionalidad del control de amplificación (ganancia). Efectuada esta comprobación es necesario realizar la calibración, en su conjunto, del equipo, palpadores y cables de conexión que vayan a ser utilizados en el trabajo de inspección.

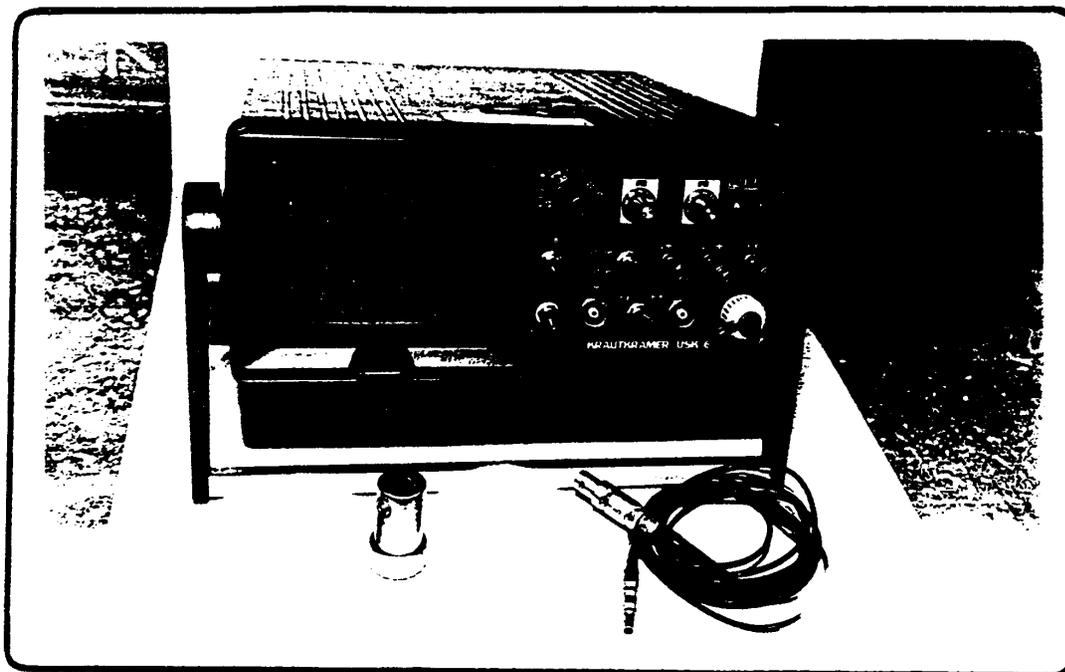


FIGURA 14 .- CONTROLES DEL EQUIPO ULTRASONICO KRAUTKRAMER USK - 6

Esta calibración de acuerdo con las recomendaciones establecidas en el código ASME (sección V, artículo 4), deberá repetirse siempre que se produzca cualquier variación en las condiciones en que inicialmente fue realizada. Es decir, la calibración será necesaria siempre que se cambie, bien de operador o cualquiera de los elementos que constituyen el sistema: equipo, palpadores, cables de conexión o medio acoplante. También se exige una comprobación de la misma, cada cuatro horas de trabajo y al término de la jornada, pudiendo realizarse esta comprobación sobre uno o dos puntos de los requeridos para la calibración total.

3.3.1 Calibración de la linealidad

Para la evaluación de la linealidad que debe tener el equipo de ultrasonidos utilizado, se ha considerado los procedimientos descritos en la norma INTA (Ref. 10). Para su realización se utilizó el siguiente instrumental:

- Transductor normal; 2MHz; tamaño 3/4 pulgadas.
- Bloque de calibración IIW (VI)

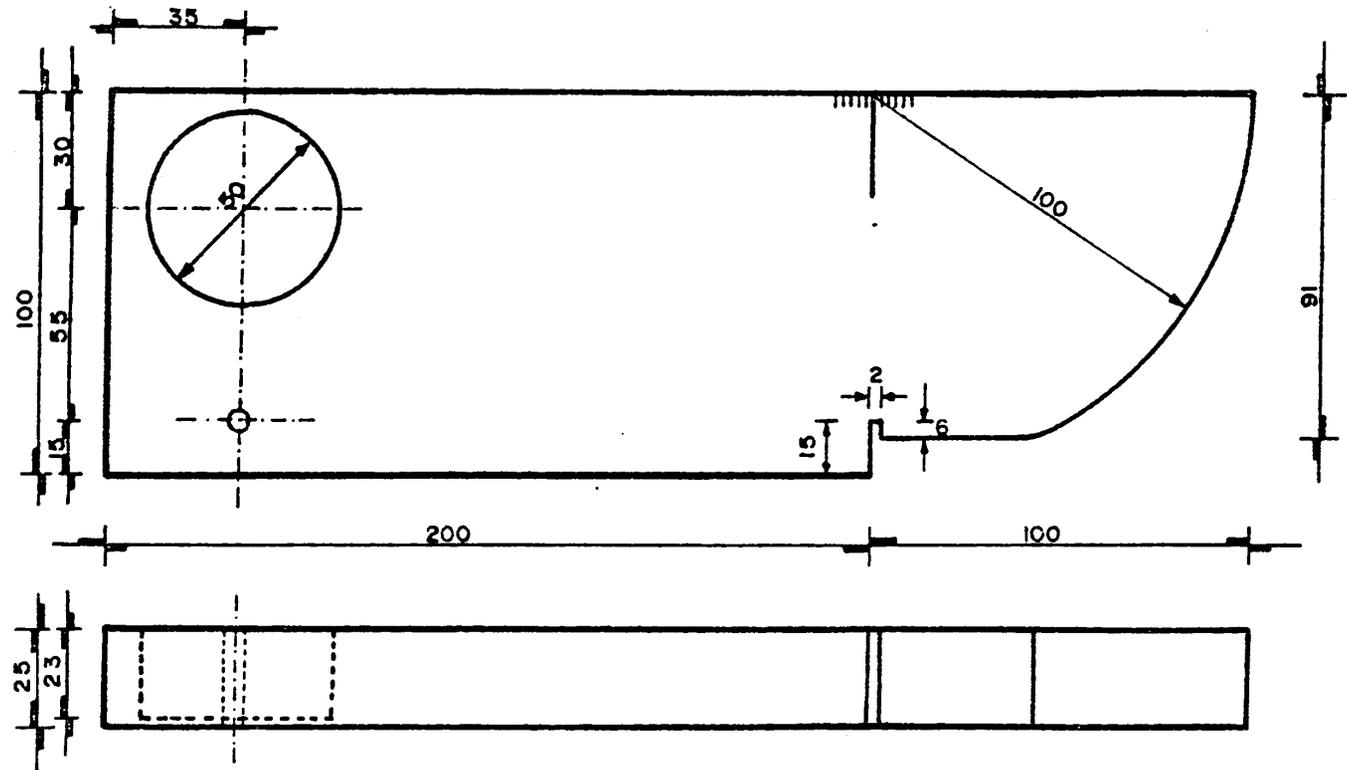


FIGURA N° 15.- BLOQUE DE REFERENCIA DEL INSTITUTO INTERNACIONAL DE LA SOLDADURA (IIW)

Esc. 1:2

- Acoplante: aceite SAE 20

EVALUACION DE LA LINEALIDAD HORIZONTAL:

Se fija el rango de la escala horizontal en 100 mm. y se apoya el transductor sobre el bloque en la posición de espesor correspondiente a 25 mm (Figura 16). La Figura 17 muestra la representación del oscilograma obtenido durante la evaluación donde se observa la sucesión de ecos de fondos. Se procede luego a tomar las lecturas correspondientes entre cada par de ecos sucesivos medidos desde el punto de arranque (Δt), y la distancia d_n obtenida entre el primer eco y los restantes. Para la toma de las lecturas es necesario que los ecos sucesivos estén aproximadamente a la misma altura, es decir a $4/5$ de la altura de la pantalla. En la Tabla IV se presenta los resultados obtenidos.

La escala debe ser considerada lineal cuando no existe diferencias entre las distancias de los distintos ecos: aún cuando exista alguna diferencia pequeña entre el pulso de entrada y el primer eco.

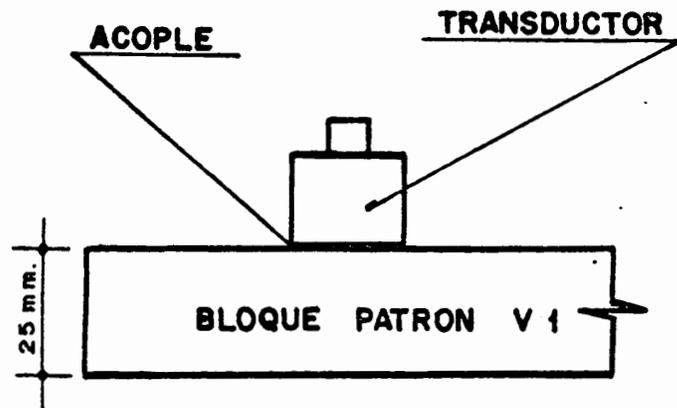


FIGURA N° 16
 POSICION DEL TRANSDUCTOR PARA LA
 EVALUACION DE LA LINEALIDAD.

Esc. 1: 1.5

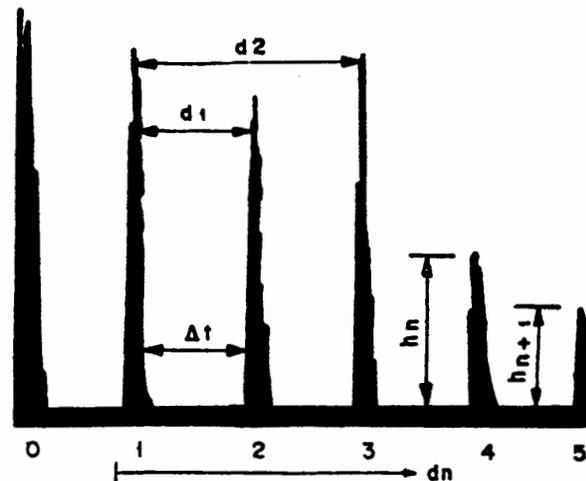


FIGURA N° 17
 REPRESENTACION DEL OSCILOGRAMA OBTENIDO DURANTE LA EVALUACION DE LA LINEALIDAD. SE IDENTIFICAN LAS SEÑALES USADAS PARA LA EVALUACION.

TABLA N° IV
**DATOS PARA LA EVALUACION
DE LA LINEALIDAD HORIZONTAL**

TRAMO	ΔT (mm.)	dn (mm.)
1 - 2	25	25
2 - 3	25	50
3 - 4	25	75
4 - 5	25	100

En la Figura 18 se observa la evaluación de la linealidad horizontal del equipo de ensayo, con lo cual se comprueba que la base de tiempo es completamente lineal.

EVALUACION DE LA LINEALIDAD VERTICAL:

Trabajando con el mismo rango de escala y manteniendo el transductor en la posición correspondiente al ensayo anterior, con el mismo oscilograma, se evalúa la linealidad vertical.

Con el mando de amplificación por pasos se lleva la altura del penúltimo eco, llamado h_n , hasta que llegue al 100% de la pantalla, luego se lee la altura del último eco, llamado h_{n+1} y se realiza el cociente de las alturas de los ecos: h_n / h_{n+1} . Aumentando un paso (2db) la ganancia, se leen nuevamente las alturas del penúltimo y último eco, y se realiza su cociente (razón de respuesta). Este procedimiento se repite hasta que la altura del eco h_n llegue al 100% de altura de pantalla.

El equipo tiene linealidad vertical si el cociente entre las alturas en cada paso de amplificación añadida, es un valor constante e igual.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla V, con los cuales se elaboró la gráfica de flexión vertical (h_n) vs razón de respuesta (h_n / h_{n+1}) la misma que se muestra en la Figura 19. en donde se observa que la razón de respuesta de dos ecos sucesivos se mantiene constante. lo cual indica que el equipo de ensayo posee una buena linealidad vertical.

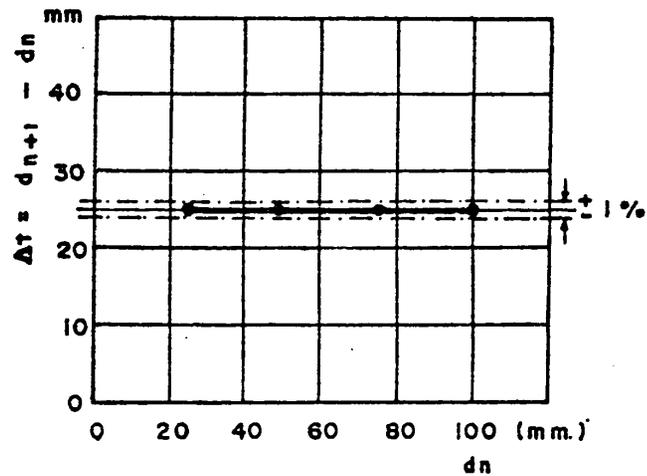


FIGURA N° 18
 REPRESENTACION DE LA LINEALIDAD HORI
 ZONTAL. CURVA Δt vs d_n PARA EL -
 EQUIPO USK - 6

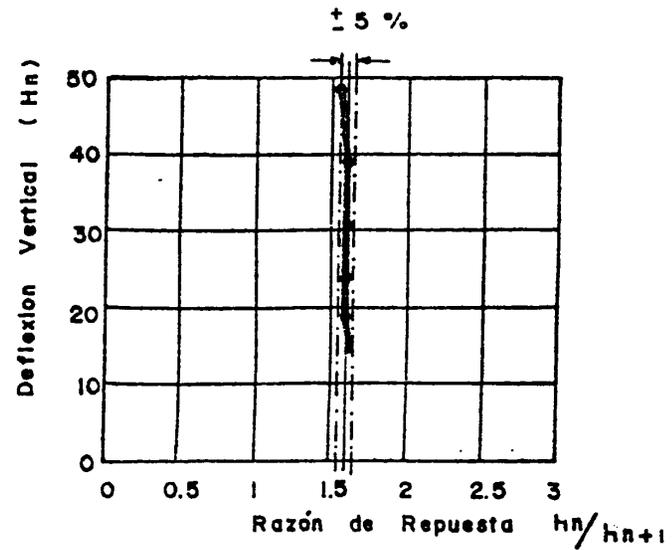


FIGURA N° 19
 REPRESENTACION DE LA LINEALIDAD VERTICAL
 CURVA DEFLEXION VERTICAL vs RAZON DE
 REPUESTA PARA EL EQUIPO USK - 6

3.3.2 Calibración de atenuación y sensibilidad

Para la realización de esta prueba se utiliza un transductor normal, cuyas ondas se propagan en forma longitudinal a través del material ensayado.

VERIFICACION DE LA SENSIBILIDAD DE TRABAJO

Esta verificación se realiza a fin de obtener datos de referencia que permitan comprobar si se mantiene la sensibilidad de trabajo del equipo durante el transcurso del ensayo.

El procedimiento de ajuste depende de si se va a trabajar con alta o baja ganancia.

- Para la regulación con alta ganancia se debe fijar el transductor en la posición 3 que se indica en la Figura 20. Se hace coincidir el primer eco en la lectura del espesor equivalente a 50 mm de la pieza de plástico (polimetacrilato de metilo). Se registra la regulación tomando nota del número de ecos y la altura del último de ellos. La Figura 21 a. muestra el oscilograma correspondiente.

TABLA N° V

**DATOS PARA LA EVALUACION
DE LA LINEALIDAD VERTICAL**

GANANCIA EN db	h_n mm.	h_{n+1} mm.	h_n/h_{n+1}
0	15	9	1.66
2	19	12	1.60
4	24	15	1.60
6	31	19	1.60
8	39	25	1.60
10	49	31	1.58

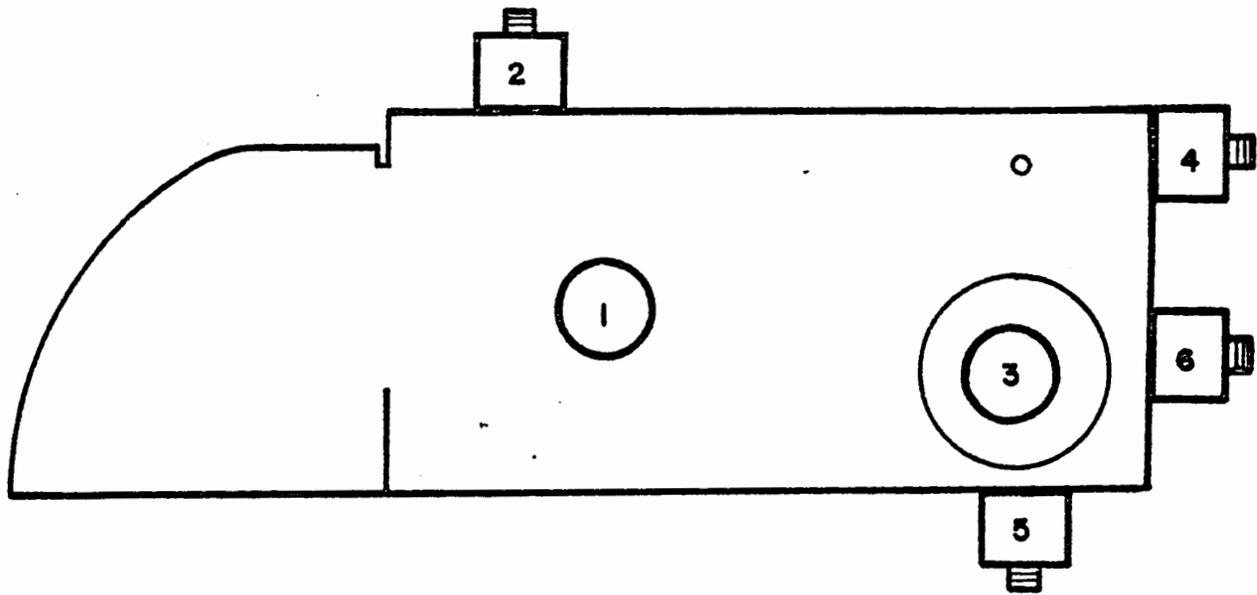


FIGURA N° 20

UBICACION DEL TRANSDUCTOR SOBRE EL BLOQUE VI
USANDO ONDAS LONGITUDINALES

Esc. 1: 2

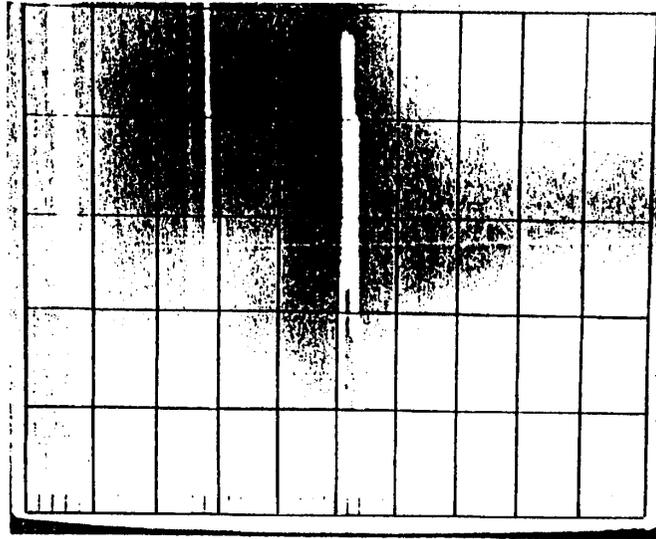
- Para la regulación con baja ganancia se fija el transductor en la posición 4 indicada en la Figura 20. Se desplaza el transductor sobre el bloque buscando la máxima altura de eco proveniente del agujero de 1.5 mm de diámetro. En la Figura 21 b, se muestra el oscilograma correspondiente a una medida de buena sensibilidad.

ESTIMACION DEL PODER DE RESOLUCION:

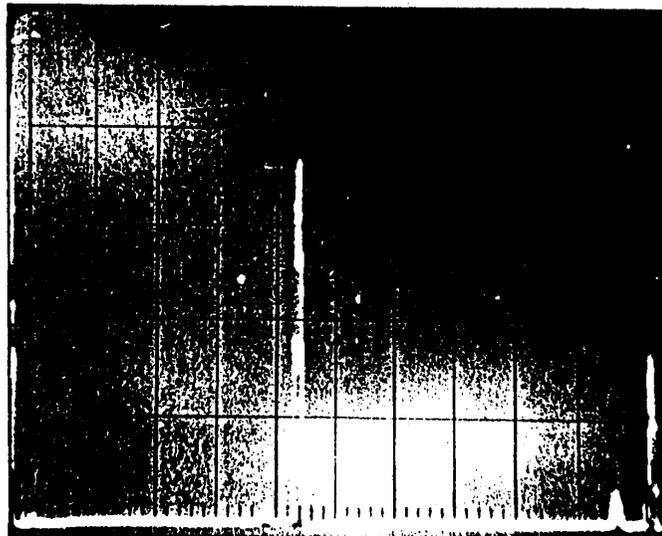
Se fija el transductor en la posición de la Figura 22. En la posición indicada se obtendrá en la pantalla del instrumento los ecos correspondientes: al espesor de 100 mm, la parte más ancha del bloque, el espesor de 85 mm, correspondiente a la ranura, y al espesor de 91 mm, correspondiente al rebaje.

Se ajusta la altura del mayor de los ecos de manera que alcance los $\frac{2}{3}$ de la altura de la pantalla. Las señales obtenidas se comparan con esquemas patrones que permiten calificar la resolución de un equipo de ultrasonidos.

En la Figura 23 se muestra el oscilograma correspondiente a una buena resolución del equipo.



a.- CON ALTA GANANCIA



b.- CON BAJA GANANCIA

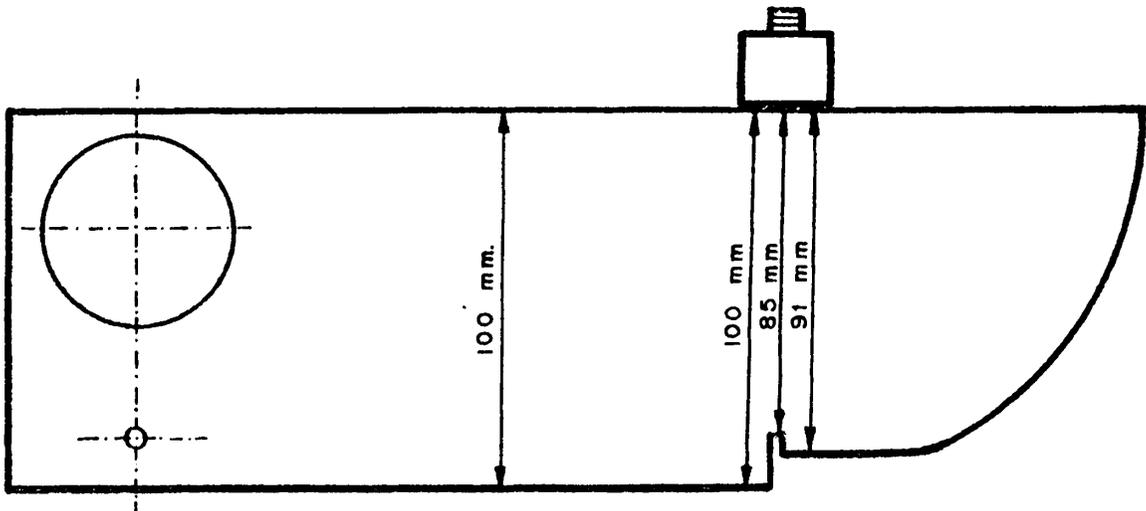


FIGURA N° 22.- ESTIMACION DEL PODER DE RESOLUCION

Esc. 1: 2

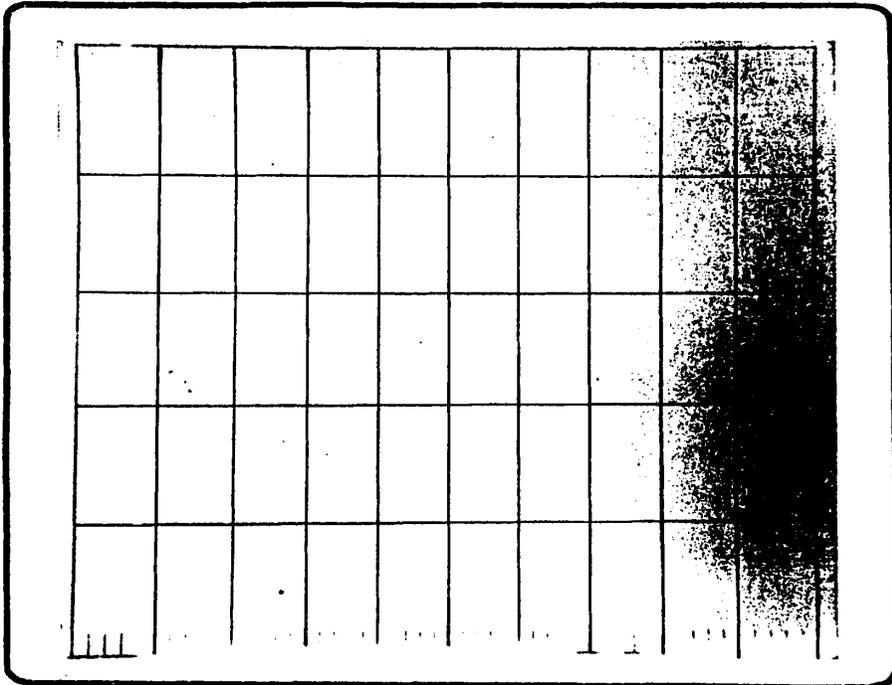


FIGURA 23.- OSCILOGRAMA CORRESPONDIENTE AL PODER DE RESOLUCION DEL EQUIPO ULTRASONICO USK - 6

3.4 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS

3.4.1 ENSAYOS PRELIMINARES

3.4.1.1 ANALISIS QUIMICO

El análisis químico comprende la determinación de los porcentajes de carbono, silicio, fósforo, manganeso y azufre en la fundición gris.

Los porcentajes de silicio, fósforo y manganeso fueron determinados en los laboratorios del Instituto de Química de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, mediante ensayos por vía húmeda con viruta que para el efecto se prepararon de los retazos provenientes de la elaboración de las probetas para el ensayo a la tracción.

La viruta fue obtenida en el torno, trabajando a bajas revoluciones para que la muestra no se quemara. Luego se la tamizó para obtener una muestra muy fina.

Los porcentajes de los otros dos elementos presentes en la fundición, esto es el carbono y azufre, fueron determinados usando el equipo determinador de carbono/azufre LECO

CS46.

Los resultados obtenidos en las muestras analizadas se encuentran en la Tabla VI.

3.4.1.2 METALOGRAFIA

Para llegar a la observación microscópica se han seguido las indicaciones generales de la práctica metalográfica, pasos que a continuación se describen:

- PREPARACION DE LA MUESTRA:

Una vez obtenidas las muestras en las fábricas de fundición, se procedió a elaborar las diferentes probetas: pedazos pequeños cortados en máquinas de disco abrasivos con enfriamiento, para así evitar posibles alteraciones en la estructura del hierro. Posteriormente 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.

TABLA N° VI

ANALISIS QUIMICO

FUNDICION	% C	% Si	% P	% S	% Mn
1	3.20	2.28	0.165	0.094	0.48
2	3.28	1.81	0.196	0.103	0.58

- PULIDO INTERMEDIO:

Se la efectuó en mesas de desbaste con lijas de granos No. 240, 320, 400 y 600. Se tuvo mucho cuidado en la presión de la probeta contra los abrasivos, ya que una práctica incorrecta destruye la estructura grafítica del material por el arranque del carbono libre. Para evitar lo anterior se utilizó cera carnauba en todos los pulidos.

- PULIDO FINAL:

Se lo realiza con la finalidad de eliminar las rayas producidas en el desbaste, con lo cual la muestra quedó perfectamente pulida. Para esto se utilizó la pulidora de paño STUERS NAP para pulido fino, montado sobre un disco cuya velocidad fue controlada hasta 500 RPM. Se utilizó como abrasivo óxido de aluminio y pasta de diamantes lubricado con alcohol y glicerina. El pulido final terminó cuando la superficie de la probeta estaba exenta de rayas. luego se procedió a un lavado de las probetas rápidamente con agua y alcohol y llevada al secador de aire caliente, quedando listas para el análisis al microscopio.

Para analizar completamente la microestructura del hierro gris, se efectuaron dos tipos de exámenes metalográficos: metalografía sin ataque y metalografía con ataque químico.

Mediante el primero se pudo determinar la distribución, forma y tamaño del grafito libre presente en la fundición. mediante la utilización de cartas de la ASTM que sirven de referencia en la comprobación de los distintos tipos que se presentan en la estructura micrográfica de la fundición. Las características metalográficas de las fundiciones I y II se presentan en la Tabla VII.

Con el segundo examen se puso de manifiesto la morfología y proporción de cada uno de los constituyentes metalográficos. Para observar la matriz del hierro se usó como reactivo de ataque una solución del Nital al 2% por 4 segundos.

Los resultados obtenidos se encuentran en las microfotografías que se presentarán posteriormente en el Capítulo IV.

3.4.1.3 DUREZA

Para determinar el número de dureza

se empleó el ensayo Brinell especificado en la información bibliográfica (Ref. 5) aplicando una carga de 3000 kg. con un indentador esférico de 10 mm de diámetro.

Para hallar directamente el valor de tablas en donde se lee este valor en función de la carga aplicada y el diámetro de la huella. Los resultados obtenidos en las diferentes probetas se encuentran tabuladas en las Tablas VIII Y IX.

3.4.1.4 RESISTENCIA A LA TRACCION

Esta prueba se usa a fin de evaluar las propiedades de ductilidad y resistencia de los materiales y relacionarlos con las condiciones de trabajo que tendrán que soportar.

El equipo utilizado para esta prueba fue el VERSATESTER 30 M, las probetas fueron maquinadas siguiendo normas ASTM (Figura 24); para el efecto se aplicó cargas axiales de tensión, hasta llegar al punto de ruptura. La velocidad del ensayo fue de 5mm/minuto.

TABLA No. VIII

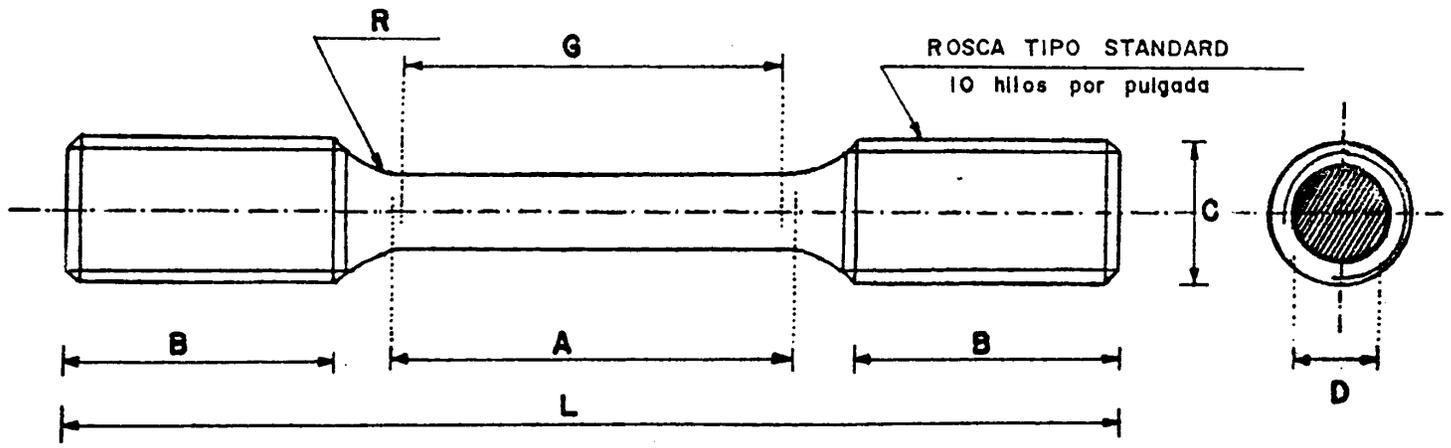
VALORES DE LA DUREZA BRINELL (HB) FUNDICION I

PROBETA	ESCALON	DIAMETRO PROMEDIO HUELLA O mm.	N° DE DUREZA BRINELL P = 3000 Kg.
a	1	4.46	182
	2	4.40	187
	3	4.12	215
	4	4.058	222
b	1	4.163	211
	2	4.075	220
	3	3.96	234
	4	4.08	219
c	1	4.06	225
	2	3.83	249
	3	3.77	259
	4	3.75	262
d	1	4.06	225
	2	3.77	259
	3	3.83	249
	4	----	---

TABLA No. IX

VALORES DE LA DUREZA BRINELL (HB) FUNDICION II

PROBETA	ESCALON	DIAMETRO PROMEDIO HUELLA 0 mm.	N° DE DUREZA BRINELL P = 3000 Kg.
a	1	4.54	176
	2	4.46	182
	3	4.16	211
	4	4.12	215
b	1	4.16	211
	2	4.06	225
	3	3.97	230
	4	4.08	219
c	1	3.98	232
	2	3.83	249
	3	3.76	258
	4	3.25	272
d	1	4.06	222
	2	3.83	245
	3	3.77	250
	4	----	---



Esc. 1:1

A	B	C	D	G	L	R
53.12 mm.	35 mm.	18.72 mm.	10.0 mm.	50 mm.	141.84 mm.	9.36 mm.

FIGURA N° 24.- PROBETA DE ENSAYO DE TRACCION CILINDRICA. (Ref.)

3.4.2 ENSAYOS POR ULTRASONIDOS

3.4.2.1 DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE PROPAGACION Y COEFICIENTE DE ATENUACION

El coeficiente de propagación (λ_c) se ha determinado como el cuociente entre el espesor real (e_r) medido con un tornillo micrométrico y el espesor aparente (e_a) determinado con el equipo ultrasónico (USK 6) previamente calibrado sobre el bloque VI. (Ref. 2).

$$(3.1) \lambda_c = e_r / e_a$$

La medida del coeficiente de atenuación de las ondas ultrasónicas se ha realizado por acoplamiento directo del transductor a la pieza, haciendo uso de la siguiente fórmula (Ref. 2)

$$\alpha = \frac{H_1 - H_2 - 6}{2e_r} \frac{db}{mm} \quad (3.2)$$

Donde:

α = coeficiente de atenuación

e_r = espesor real de la pieza

H_1 y H_2 = las intensidades en decibelios que resultan de llevar el primero y segundo eco de fondo respectivamente, a una altura de $3/4$ de la pantalla.

Los datos obtenidos se encuentran en las Tablas X y XI.

3.4.2.2 MEDICION DE LA RESISTENCIA MECANICA

- POR EFECTO DE AMORTIZACION:

Por medio de este método se realiza la comparación entre las señales ultrasónicas obtenidas al palpar dos fundiciones de diferentes procedencia pero con igual espesor. En la medida comparativa en que el eco de fondo pierda o gane altura se puede apreciar si una fundición es más o menos resistente que otra elegida como patrón.

TABLA N° XI
 VALORES DEL COEF. DE PROPAGACION, ATENUACION Y RESISTENCIA
 A LA TRACCION FUNDICION II

PROBETA	ESCALON	LECTURA DEL EQUIPO e_q mm.	LECTURA DEL CALIBRADOR e_r mm.	COEF. PROPAGACION λc	COEF. ATENUACION α db/mm.	σ_B Kg/mm ² ULTRASONICO $X = 0.5\theta$	σ_B Kg/mm ² POR TRACCION
a	1	92.6	76	0.82	0.89	24.12	23.9
	2	58.6	48	0.827	0.75	24.75	22.5
	3	36	30	0.83	0.67	25.2	23.1
	4	22.6	19	0.839	0.658	26.0	23.6
b	1	38.9	32	0.826	0.63	24.7	22
	2	24.1	20	0.829	0.55	24.9	24
	3	18.09	15	0.828	0.53	25.1	25
	4	13.25	11	0.83	0.46	-----	-----
c	1	15.5	12	0.77	0.37	26.7	14.5
	2	10.3	8	0.769	0.30	27.3	16
	3	6.42	5	0.772	0.24	27.7	-----
	4	3.85	---	-----	---	-----	-----
d	1	29.5	25	0.847	0.68	19.4	25.3
	2	25.8	22	0.852	0.59	19.6	26.8
	3	21	18	0.857	0.56	19.8	27
	4	-----	---	-----	---	-----	-----

En el capítulo siguiente se mostrarán y analizarán las señales ultrasónicas obtenidas.

- POR VELOCIDAD RELATIVA DEL SONIDO:

Este método toma en consideración la diferencia de velocidad de propagación que experimenta un haz ultrasónico al atravesar una sección de fundición gris, respecto a una sección de acero y lo relaciona directamente con la resistencia a la tracción mediante la siguiente fórmula: (Ref. 5).

$$\sigma_B = (\lambda_c - X) 100 \frac{k_g}{2} \quad (3.3)$$

Donde:

σ_B = resistencia a la tracción
por ultrasonidos.

λ_c = velocidad relativa del
sonido.

X = factor de corrección.

La velocidad relativa del sonido se la obtiene siguiendo el procedimiento para el cálculo del coeficiente de prograssación.

El factor X se lo determina por ensayo de tracción para lo cual se elaboraron probetas para ensayo según norma ASTM de las dos fundiciones estudiadas. Este factor permite calcular la resistencia a la tracción sin necesidad de efectuar el correspondiente ensayo, en fundiciones de procedencia y geometría similares.

Una vez conocido este factor se pudo obtener el valor de la resistencia mecánica por ultrasonidos para cada uno de los espesores de las probetas de fundición. El valor obtenido aplicando la ecuación (3.3) que es de 0.56 y 0.58 para las fundiciones I y II, respectivamente.

Los datos obtenidos se muestran en las Tablas X y XI, así como los

valores correspondientes obtenidos en el ensayo de tracción.

Se estimó interesante realizar el ensayo a la tracción en muestras obtenidas de cada uno de los escalones para observar la solidez del factor x cuando se lo aplica para el cálculo de la resistencia en succiones de distinto espesor. Los dos valores de la resistencia mecánica (por tracción y por ultrasonidos) son bastante aproximados, teniendo un margen de variación no mayor de 10%.

3.4.2.3 Determinación de las constantes elásticas:

Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.-

El módulo de elasticidad E y módulo de Poisson μ fueron determinados utilizando el valor de la velocidad de propagación de ondas longitudinales y transversales usando las relaciones siguientes: (Ref. 2).

$$E = \frac{\rho C_t^2 (3 C_1^2 - 4 C_t^2)}{(C_L^2 - C_t^2)} \quad (3.4)$$

$$\mu = \frac{1 - 2 (v_t/v_l)^2}{2 \cdot 1 - (v_t/v_l)^2} \quad (3.5)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad

μ = Módulo de Poisson

C_t = Velocidad transversal

C_1 = Velocidad longitudinal

ρ = Densidad

El valor de las velocidades longitudinales y transversal en la fundición se la obtuvo partiendo del conocimiento de la velocidad longitudinal y transversal en el acero (bloque VI) y utilizando las siguientes relaciones:

$$C_1 = \frac{(d_k \cdot n_1 \cdot t_1 \cdot v_k)}{(d_1 \cdot n_k \cdot t_k)}$$

$$C_t = \frac{(d_k \cdot n_1 \cdot t_1 \cdot v_s)}{(d_1 \cdot n_k \cdot t_k)}$$

Donde:

C_L = velocidad longitudinal (m/s)
 C_t = velocidad transversal (m/s)
 d_k = distancia del primero al
último eco obtenido en el
bloque V1.
 n_1 = número de ecos en la probeta
de fundición.
 t_1 = espesor de la probeta de
fundición.
 V_k = velocidad longitudinal en el
bloque V1.
 V_e = velocidad transversal en el
bloque V1.
 d_1 = distancia del primer al
último eco obtenido en la
probeta de fundición.
 n_k = número de ecos obtenidos en
el bloque V1.
 t_k = espesor del bloque V1.

Los datos obtenidos se encuentran
tabulados en las Tablas XII y XIII.

3.4.2.4 Los valores de dureza Brinell
para las fundiciones I y II
fueron ya presentados en las
Tablas VIII y IX
respectivamente. De la misma
forma se presentan los
coeficientes de propagación para
las fundiciones I y II en las

Tablas X y XI.

La relación de la dureza brisnell con el coeficiente de propagación será presentada en el Capítulo IV correspondiente al análisis de resultado.

- 3.4.2.5 La relación entre los distintos parámetros ultrasónicos que se han determinado en este capítulo, tales como: coeficiente de propagación y atenuación, velocidad longitudinal y transversal y comportamiento del haz ultrasónico en las distintas probetas analizadas serán correlacionadas en el siguiente capítulo con las características metalúrgicas y propiedades mecánicas de las dos fundiciones estudiadas.

TABLA N° XII

VALORES DE VELOCIDADES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES, DENSIDAD Y

MODULOS DE YOUNG Y POISSON FUNDICION I

PROBETA	ESCALON	10^3 CL (m/s)	10^3 Ct (m/s)	ρ (g/m ³)	10^3 E (Kg/mm ²)	μ
a	1	4.85	2.62	7.25	14.21	0.293
	2	4.95	2.64	7.20	14.43	0.296
	3	5.10	2.76	7.32	15.30	0.298
	4	5.19	2.81	7.30	15.69	0.298
b	1	5.07	3.01	7.34	15.17	0.283
	2	5.15	3.05	7.36	15.52	0.284
	3	5.21	3.06	7.39	15.78	0.284
	4	5.31	3.07	7.39	16.39	0.284
c	1	5.26	3.09	7.20	16.0	0.284
	2	5.3	3.12	7.21	16.17	0.284
	3	5.38	3.15	7.18	16.52	0.284
	---	----	----	---	-----	-----
d	1	5.12	3.03	7.39	15.39	0.286
	2	5.14	3.04	7.38	15.47	0.285
	3	5.16	3.07	7.39	15.56	0.284
	4	----	-----	-----	-----	-----

TABLA N° XIII

**VALORES DE VELOCIDADES LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL, DENSIDAD Y
MODULOS DE YOUNG Y POISSON FUNDICION II**

PROBETA	ESCALON	10^3 CL (m/s)	10^3 Ct (m/s)	ρ (g/m ³)	10^3 E (Kg/mm ²)	μ
a	1	4.8	2.65	7.31	14.0	0.283
	2	4.87	2.67	7.30	14.30	0.284
	3	4.94	2.80	7.37	14.61	0.283
	4	5.62	2.85	7.32	14.95	0.283
b	1	4.91	2.79	7.33	14.47	0.283
	2	4.95	2.83	7.34	14.65	0.284
	3	4.97	2.86	7.38	14.73	0.284
	4	5.13	2.98	7.30	15.43	0.283
c	1	4.93	3.01	7.28	14.34	0.284
	2	4.98	3.03	7.25	14.56	0.283
	3	5.01	3.08	7.29	14.78	0.283
	4	-----	-----	-----	-----	-----
d	1	5.07	2.81	7.35	15.17	0.283
	2	5.08	2.82	7.36	15.21	0.284
	3	5.09	2.83	7.39	15.26	0.284
	4	----	-----	-----	-----	-----

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 COMPOSICION QUIMICA.-

En la parte experimental se mencionó que se ensayara dos tipos de fundición gris, diferenciadas por la composición química especialmente en lo referente a la cantidad de carbono y silicio, ya que estos dos elementos tienen mayor influencia en las propiedades mecánicas de la pieza fundida. El cálculo del carbono equivalente como valor para predecir las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y dureza de la fundición arroja para la fundición I: (Ecuación 1.1).

$$C_e = 3.20 + 1/3 (2.28 + 0.165) = 4.015$$

Y para la fundición II:

$$C_e = 3.28 + 1/3 (1.81 + 0.196) = 3.95$$

El valor del grado de saturación para la fundición I es de: (Ecuación 1.2)

$$I_s = \frac{3.20}{4.3 - \frac{(2.28 + 0.165)}{3}} = 0.918$$

Y para la fundición II:

$$I_s = \frac{3.28}{4.3 - \frac{(1.81 + 0.196)}{3}} = 0.903$$

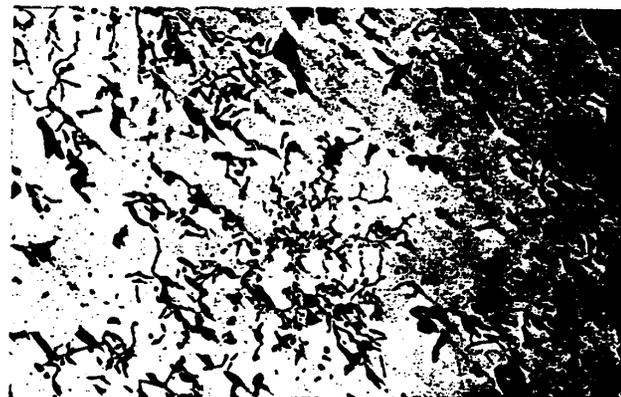
Ambos valores caen en el rango de las fundiciones hipoeutécticas características de la fundición gris. Los valores del carbono equivalente y grado de saturación son ligeramente mayores para la fundición I por su mayor contenido de silicio aunque el contenido de carbono sea menor. Evidentemente la influencia del silicio en estos dos valores ha sido mayor que la del carbono.

4.2 CARACTERISTICAS METALURGICAS.-

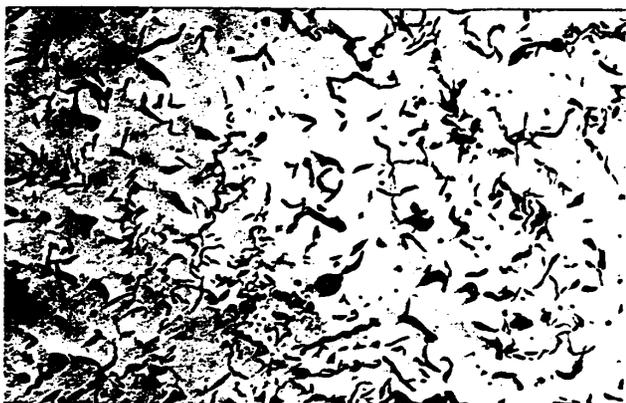
En la Tabla VII se presentaron las características de las fundiciones I y II en lo que respecta a la clasificación del grafito laminar. Las figuras 25 a la 32 que se describen a continuación permiten visualizar estas características. Las figuras 25 a 28 presentan las características microestructurales (del grafito) y ultrasónicas en la fundición I. probetas a, b, c y d, a través de los diferentes espesores 1, 2, 3, 4. Se observa que el grafito en este tipo de fundición presenta la forma I y distribución A principalmente, únicamente se obtuvo distribución B en las probetas a y c. en los



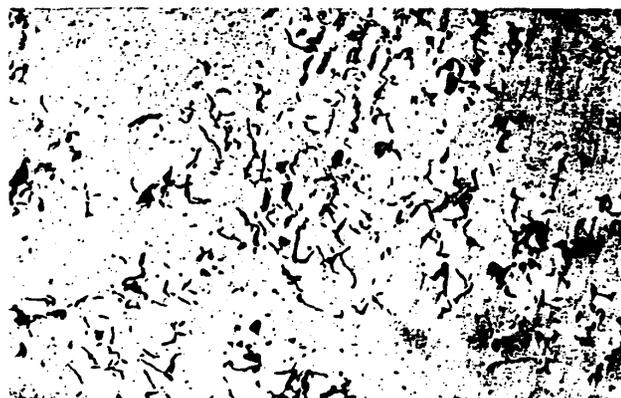
GRAFITO A 4 $\lambda_c = 0.824$, $\alpha = 0.8158$



GRAFITO A 4 $\lambda_c = 0.825$, $\alpha = 0.71$



GRAFITO A 4/5 $\lambda_c = 0.835$, $\alpha = 0.58$

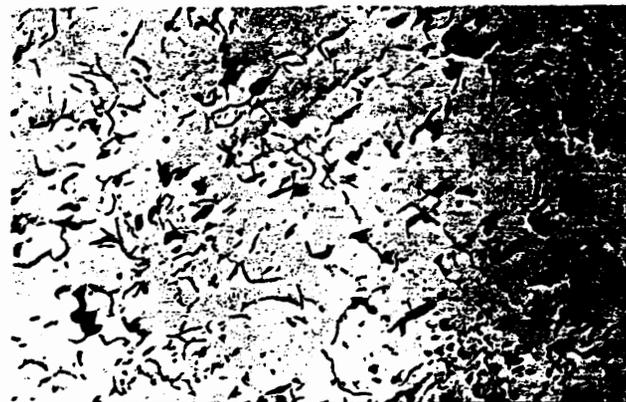


GRAFITO B 5 $\lambda_c = 0.849$, $\alpha = 0.526$

FIGURA 25.— CARACTERISTICAS MICROESTRUCTURALES Y ULTRASONICAS DEL GRAFITO EN LA FUNDICION I, PROBE-TA (a), ESCALONES 1, 2, 3, 4. SIN ATAQUE. 100 X



GRAFITO A 5 $\lambda_c = 0.829$, $\alpha = 0.57$



GRAFITO A/B 5, $\lambda_c = 0.8368$ $\alpha = 0.45$



GRAFITO A 5/6 $\lambda_c = 0.8379$, $\alpha = 0.34$

FIGURA 26.— CARACTERISTICAS MICROESTRUCTURALES Y ULTRASONICAS DEL GRAFITO EN LA FUNDICION I, PROBE-TA (b), ESCALONES 1, 2, 4. SIN ATAQUE. 100 X



GRAFITO A 4 $\lambda_c = 0.774$, $\alpha = 0.35$



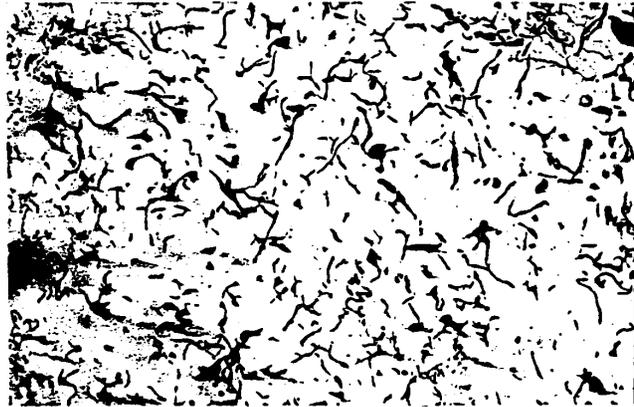
GRAFITO A/B 4 $\lambda_c = 0.775$ $\alpha = 0.28$



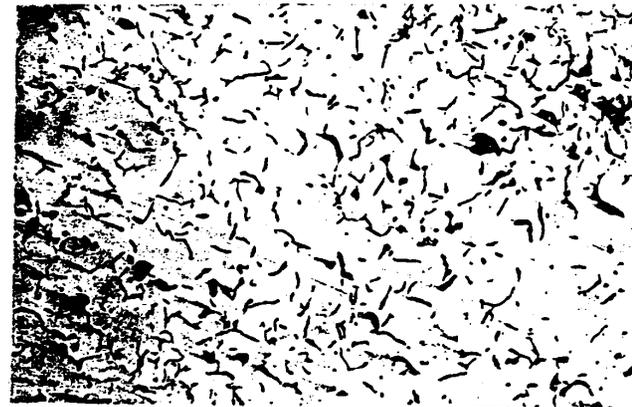
GRAFITO A 5, $\lambda_c = 0.774$, $\alpha = 0.225$



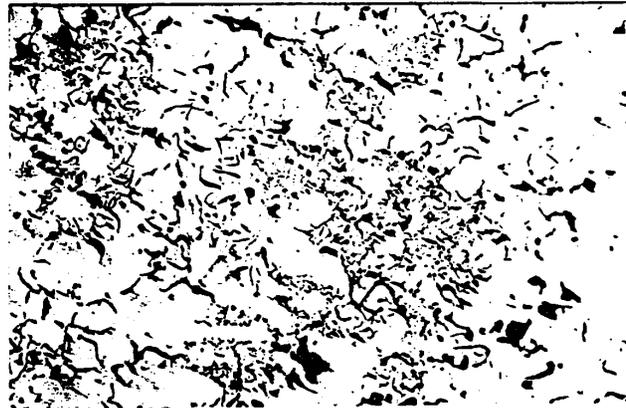
FIGURA 27.— CARACTERISTICAS MICROESTRUCTURALES Y ULTRASONICAS DEL GRAFITO EN LA FUNDICION I, PROBE-TA (c), ESCALONES 1, 2, 3, 4. SIN ATAQUE. 100 X



GRAFITO A 4, $\lambda_c = 0.8561$ $\alpha = 0.64$



GRAFITO A 5, $\lambda_c = 0.856$, $\alpha = 0.55$



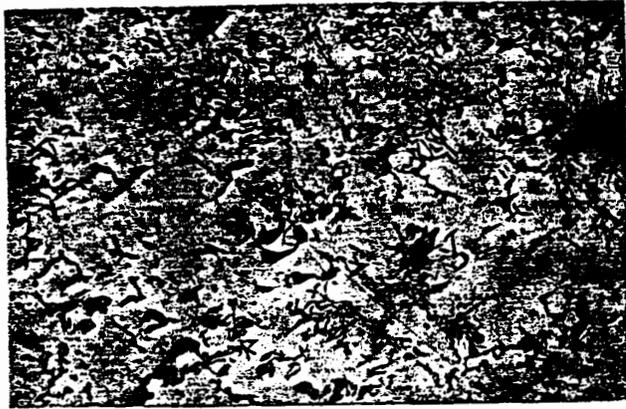
GRAFITO B 4, $\lambda_c = 0.8612$, $\alpha = 0.48$

FIGURA 28.— CARACTERISTICAS MICROESTRUCTURALES Y ULTRASONICAS DEL GRAFITO EN LA FUNDICION I, PROBE-TA (d), ESCALONES, 1, 2, 3. SIN ATAQUE. 100 X.

espesores menores de 19 y 18 mm respectivamente. De acuerdo a la literatura (Ref. 1 y 6), la forma y distribución A provee a las fundiciones grises las mejores características mecánicas.

Respecto al tamaño de las láminas de grafito se encuentra que varía entre un tamaño 4 hasta 6. El menor tamaño del grafito se encontró como era lógico suponer en los escalones de menor espesor en donde la velocidad de enfriamiento es mayor.

En las Figuras 29 a 32 se presentan las características microestructurales (del grafito) y ultrasónicas en la fundición II en las probetas correspondientes. La forma del grafito es del tipo I y distribución que varía entre A hasta E, siendo la distribución E la que ha predominado. Esta distribución predominante del grafito difiere a la distribución A predominante en la fundición I debido a su ligeramente menor contenido de Si. El tamaño de las láminas de grafito en la fundición II varía similarmente al tamaño encontrado en el caso de la fundición I, es decir de 4 a 6. No se ha encontrado por lo tanto diferencias notables en esta medición debido a que los espesores examinados y por ende su correspondiente velocidad de enfriamiento, así como el grado de saturación en las dos fundiciones no



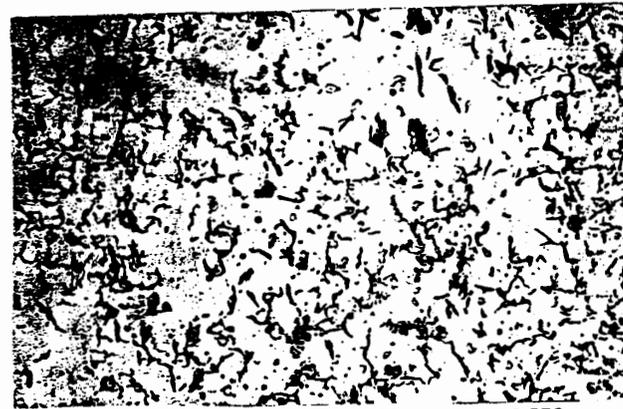
GRAFITO A/D 4/5, $\lambda_c = 0.819$, $\alpha = 0.89$



GRAFITO D 5, $\lambda_c = 0.82$, $\alpha = 0.75$

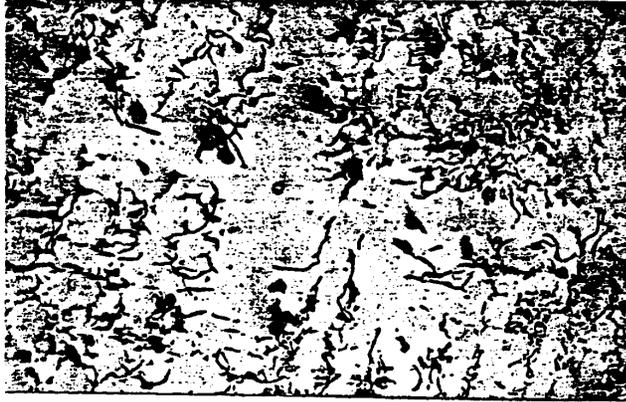


GRAFITO E 5, $\lambda_c = 0.829$, $\alpha = 0.67$

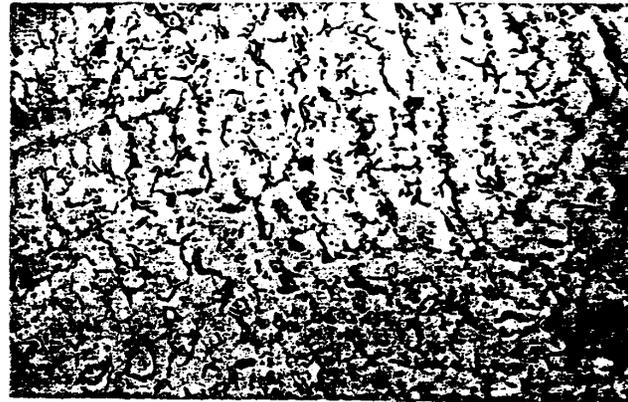


GRAFITO A 5, $\lambda_c = 0.830$, $\alpha = 0.658$

FIGURA 29.— CARACTERISTICAS MICROESTRUCTURALES Y ULTRASONICAS DEL GRAFITO EN LA FUNDICION II, PRO-
BETA (a), ESCALONES 1, 2, 3, 4. SIN ATAQUE. 100 X



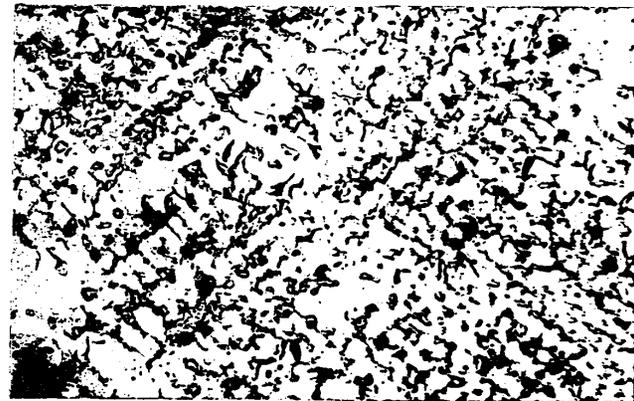
GRAFITO E 4, $\lambda_c = 0.826$ $\alpha = 0.63$



GRAFITO E 5 $\lambda_c = 0.829$ $\alpha = 0.55$

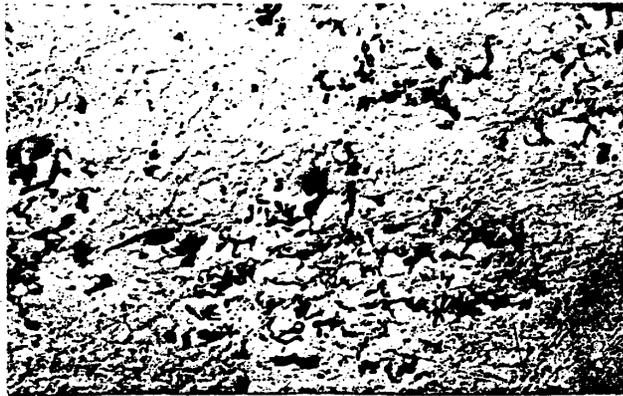


GRAFITO B/E 6, $\lambda_c = 0.829$ $\alpha = 0.53$

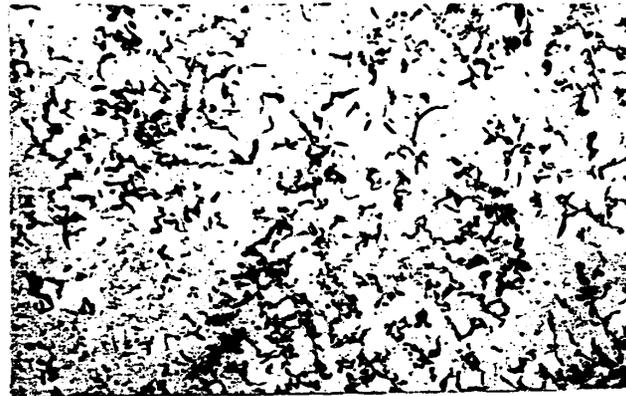


GRAFITO E 5, $\lambda_c = 0.83$ $\alpha = 0.46$

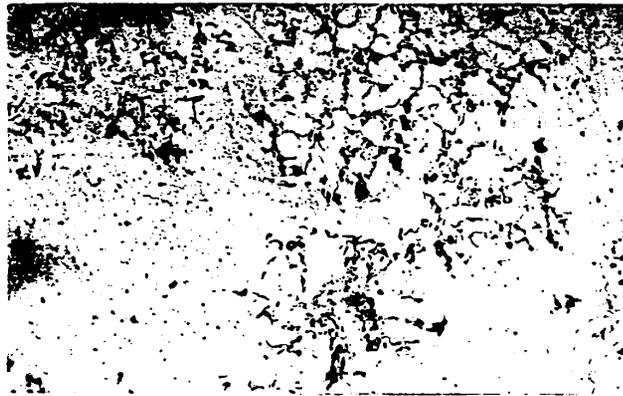
FIGURA 30.— CARACTERISTICAS MICROESTRUCTURALES Y ULTRASONICAS DEL GRAFITO EN LA FUNDICION II, PRO-BETA (b), ESCALONES 1, 2, 3, 4. SIN ATAQUE. 100 X



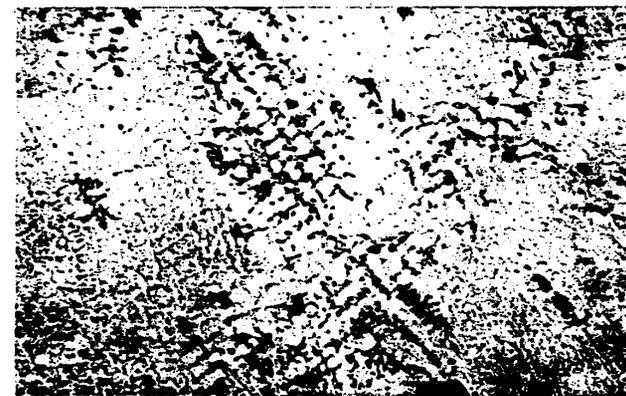
GRAFITO B 4/5 $\lambda_c = 0.771$ $\alpha = 0.37$



GRAFITO A/E 4/5 $\lambda_c = 0.769$ $\alpha = 0.30$



GRAFITO B/D 5, $\lambda_c = 0.772$, $\alpha = 0.24$



GRAFITO E 5, -----

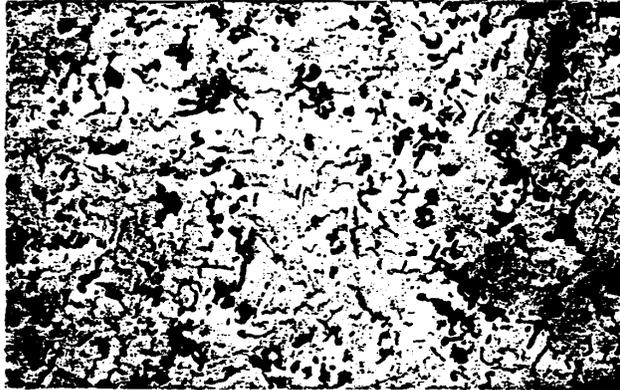
FIGURA 31.— CARACTERISTICAS MICROESTRUCTURALES Y ULTRASONICAS DEL GRAFITO EN LA FUNDICION II, PRO-BETA (c), ESCALONES 1, 2, 3, 4. SIN ATAQUE. 100 X



GRAFITO A 4, $\lambda_c = 0.847$ $\alpha = .68$



GRAFITO A/D 4/6, $\lambda_c = 0.852$, $\alpha = 0.59$



GRAFITO A 4, $\lambda_c = 0.857$, $\alpha = 0.56$

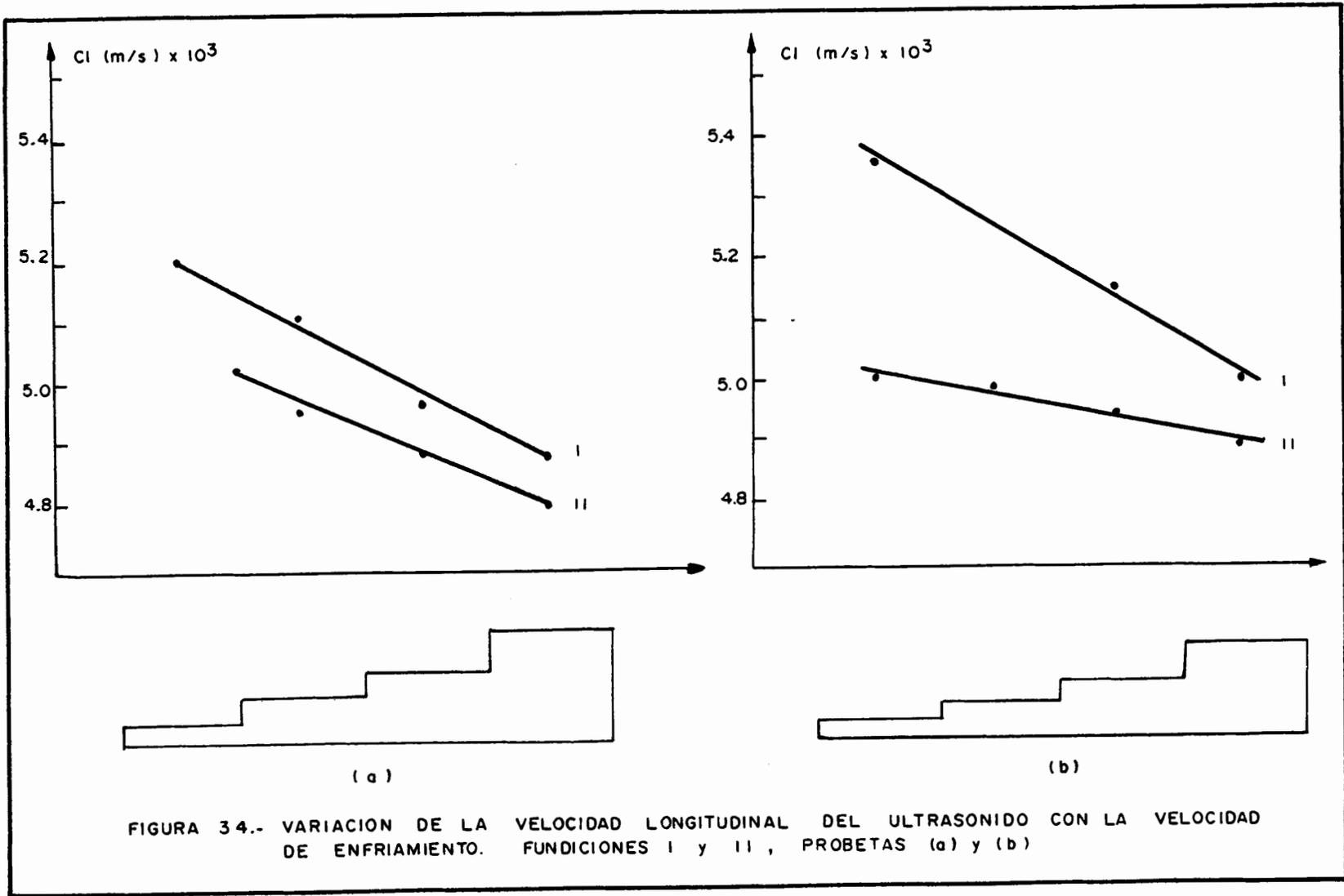
FIGURA 32.— CARACTERISTICAS MICROESTRUCTURALES Y ULTRASONICAS DEL GRAFITO EN LA FUNDICION II, PRO-BETA (d), ESCALONES 1, 2, 3. SIN ATAQUE. 100 X

difieren apreciablemente. Adicionalmente, en las Figuras 25 a 32 se indican las características ultrasónicas de las dos fundiciones en lo que respecta al coeficiente de propagación (C) y al coeficiente de atenuación (ω) que fueron presentados en las Tablas X y XI.

En la Figura 33 se representa la microestructura del tipo de matriz obtenidas en las dos fundiciones. Se observa que la matriz es perlítica con algo de ferrita. Matrices perlíticas dan la mejor combinación de características mecánicas para un gran número de aplicaciones. (Ref. 1).

4.3 CARACTERÍSTICAS ULTRASONICAS.-

En las figuras 34 y 35 se representa la velocidad longitudinal del ultrasonido en función de la velocidad de enfriamiento dada por los diferentes escalones de las probetas: a, b, c y d, pertenecientes a las fundiciones I y II. Se observa que en general la velocidad disminuye conforme disminuye la velocidad de enfriamiento, tal como lo predice la literatura correspondiente (Ref. 4). Se alcanzan mayores velocidades del ultrasonido en el caso de la fundición I aún teniendo un mayor carbono equivalente y grado de saturación.



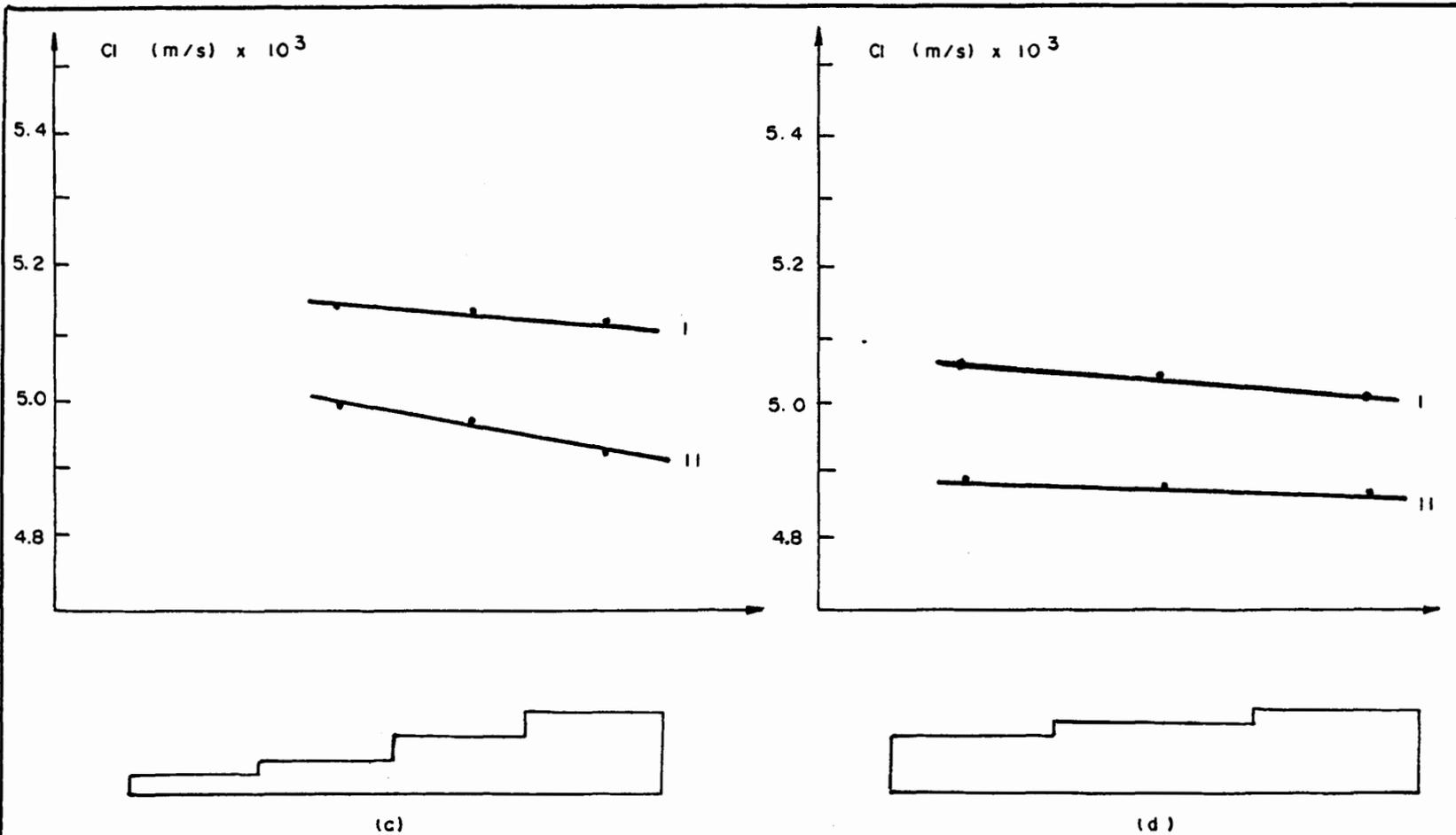


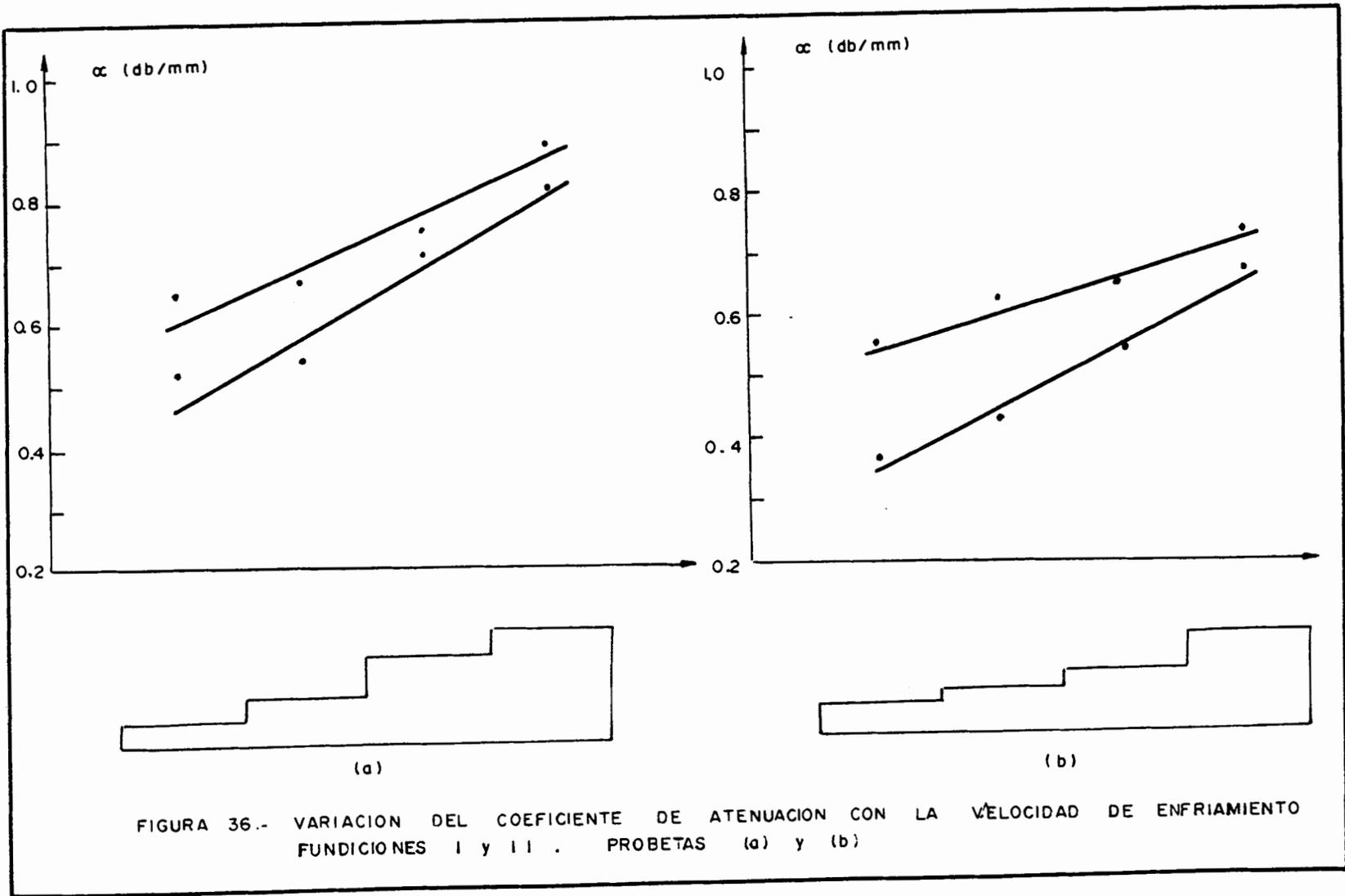
FIGURA 35.- VARIACION DE LA VELOCIDAD LONGITUDINAL DEL ULTRASONIDO CON LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO. FUNDICIONES I y II , PROBETAS (c) y (d)

Era de esperarse que el mayor grado de saturación de la fundición I disminuyera su velocidad de propagación; sin embargo el valor de este parámetro es tan similar para las dos fundiciones (0.981 vs 0.903) que no influye en la velocidad del ultrasonido y más bien es la microestructura la que ha determinado que la velocidad de propagación sea mayor en la fundición I. La mayor velocidad de propagación de esta fundición es corroborado con su mayor coeficiente de propagación.

La diferencia en velocidad entre las dos fundiciones es menos marcada en el caso de la probeta (a) porque en ambas fundiciones se encuentra una estructura similar del grafito en cuanto a su distribución y tamaño. No sucede lo mismo con las otras probetas (b, c y d) lo cual trae como consecuencia que la diferencia entre las velocidades longitudinales entre una y otra fundición sea mayor.

No se ha estimado necesario representar la variación de la velocidad transversal del ultrasonido en vista de que la relación entre las velocidades y transversal es prácticamente constante, tal como se aprecia en las Tablas XII y XIII.

En las figuras 36 y 37 se representan la relación entre el coeficiente de atenuación y la velocidad de enfriamiento, indicada por los diferentes escalones de las muestras a, b, c y d, en las dos fundiciones ensayadas. Se observa que en todos los casos la atenuación aumenta con el espesor atravesado, es decir, conforme disminuye la velocidad de



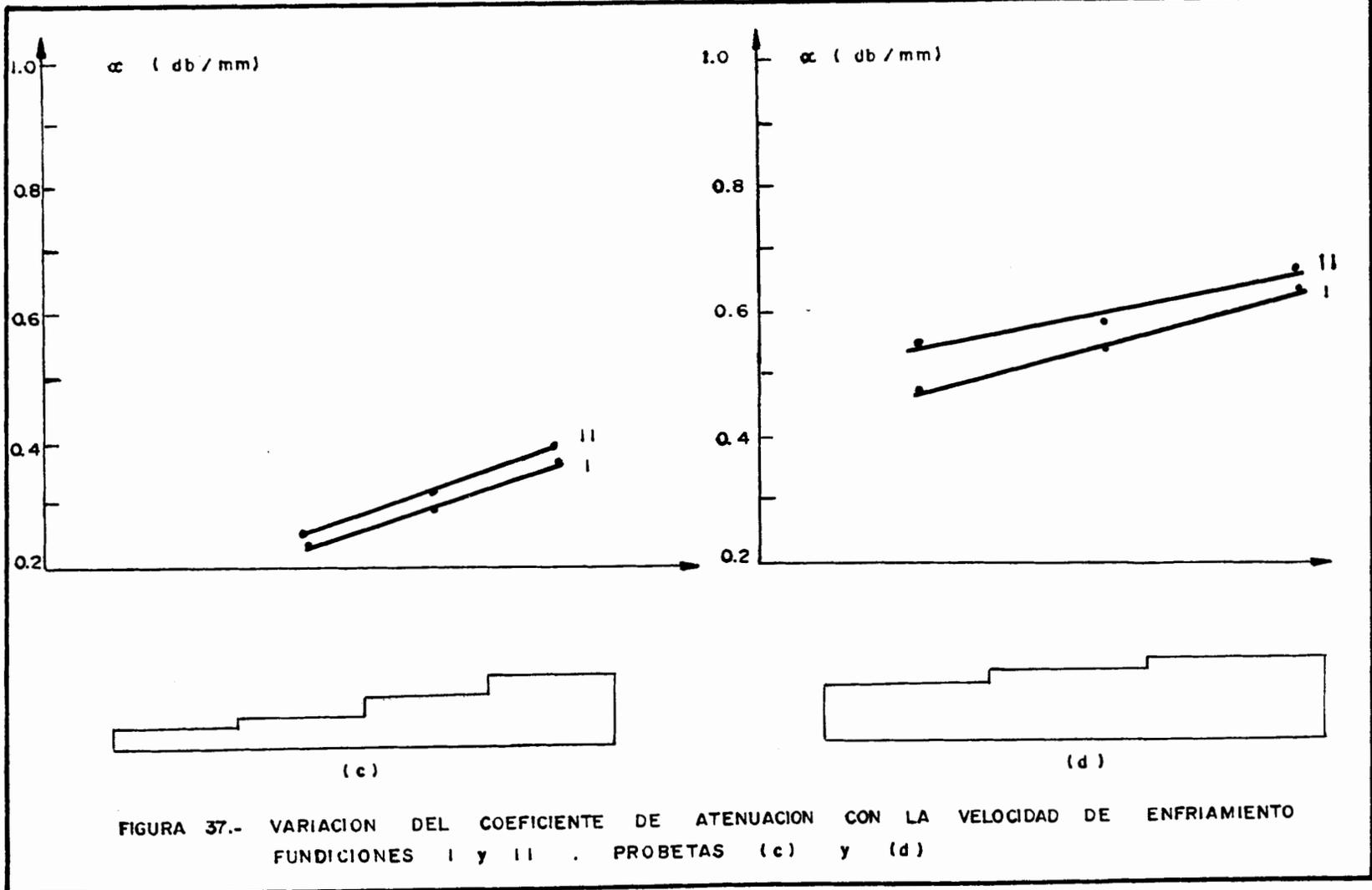


FIGURA 37.- VARIACION DEL COEFICIENTE DE ATENUACION CON LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO FUNDICIONES I y II . PROBETAS (c) y (d)

enfriamiento. La variación es muy similar en todas las probetas examinadas, sin embargo, el coeficiente de atenuación es en general mayor en el caso de la fundición II que en la I, lo cual se debe nuevamente a las diferencias microestructurales. Si bien es cierto el grado de saturación es un poco mayor en la fundición I y es presumible que la atenuación sea también mayor; sin embargo, la distribución más uniforme del grafito encontrado en esta fundición hace que se atenuación sea menor.

El conocimiento de la influencia de la microestructura sobre la atenuación es hasta cierto punto relativo y no fundamental para predecir las características de las fundiciones, ya que otros factores externos tales como: presión del transductor sobre la pieza, acabado superficial, frecuencia utilizada, etc., influyen también sobre el coeficiente de atenuación. En el presente trabajo estos factores externos han sido controlados a fin de que no incidan sobre los resultados obtenidos.

4.4 CARACTERISTICAS MECANICAS.-

En este punto se va a analizar la influencia de la composición química y características metalográficas del grafito laminar de las fundiciones I y II y su correspondiente influencia en las características ultrasónicas sobre las propiedades mecánicas de dichas fundiciones.

En la Figura 38 se representa la variación de la resistencia a la tracción obtenida por ultrasonidos

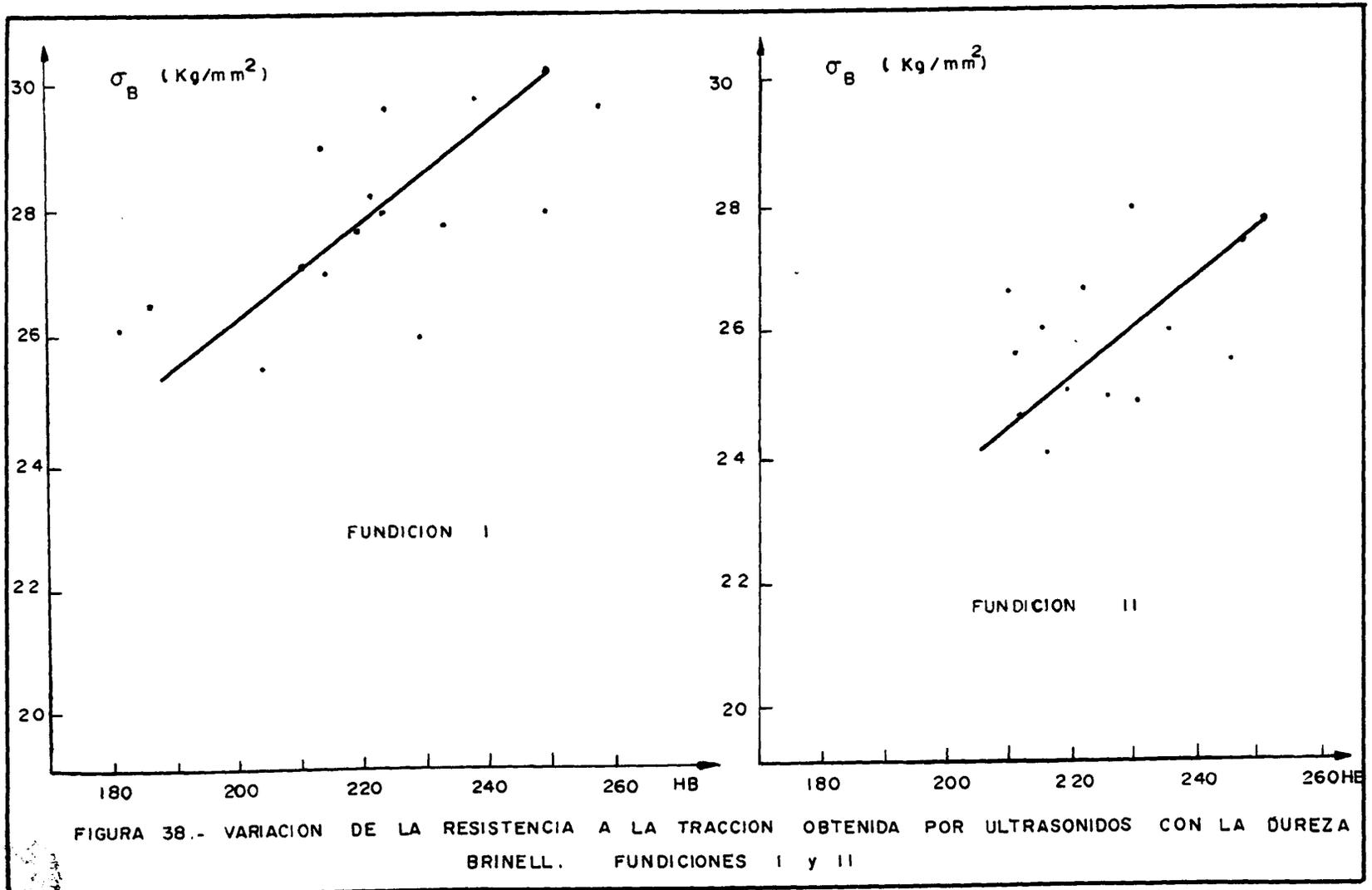


FIGURA 38.- VARIACION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION OBTENIDA POR ULTRASONIDOS CON LA DUREZA BRINELL. FUNDICIONES I y II

con respecto a la dureza. Estos valores fueron presentados en las Tablas VIII, IX, X y XI. Se observa que la resistencia a la tracción es mayor para cualquier valor de la dureza en la fundición I. Esto se debe a que esta fundición presenta mejores características ultrasónicas que la fundición II en lo que se refiere a la atenuación y coeficiente de propagación. Esto a su vez causado por la morfología del grafito laminar presente.

Examinado individualmente las dos fundiciones y con la ayuda de las Tablas VIII a XI, se observa que los mayores valores de dureza y resistencia a la tracción corresponde a los menores espesores de los escalones de las probetas en donde la velocidad de enfriamiento fue mayor. Esta correspondencia es más definida en el caso de la dureza que por la resistencia mecánica, ya que existe cierta dispersión en los datos obtenidos de esta propiedad.

Es notoria la dispersión de los valores representados en la Figura 38, lo cual puede ser debido a que la resistencia mecánica es obtenida indirectamente mediante un cálculo y puede tener divergencias respecto a las características microestructurales del grafito laminar presente en los diferentes escalones de las probetas.

Una menor dispersión se observa en la Figura 39 cuando se ha representado σ_B en la función del producto λ_c y HB, en lugar de dureza Brinell simplemente. Esto se debe a que el coeficiente de propagación fue calculado experimentalmente en cada

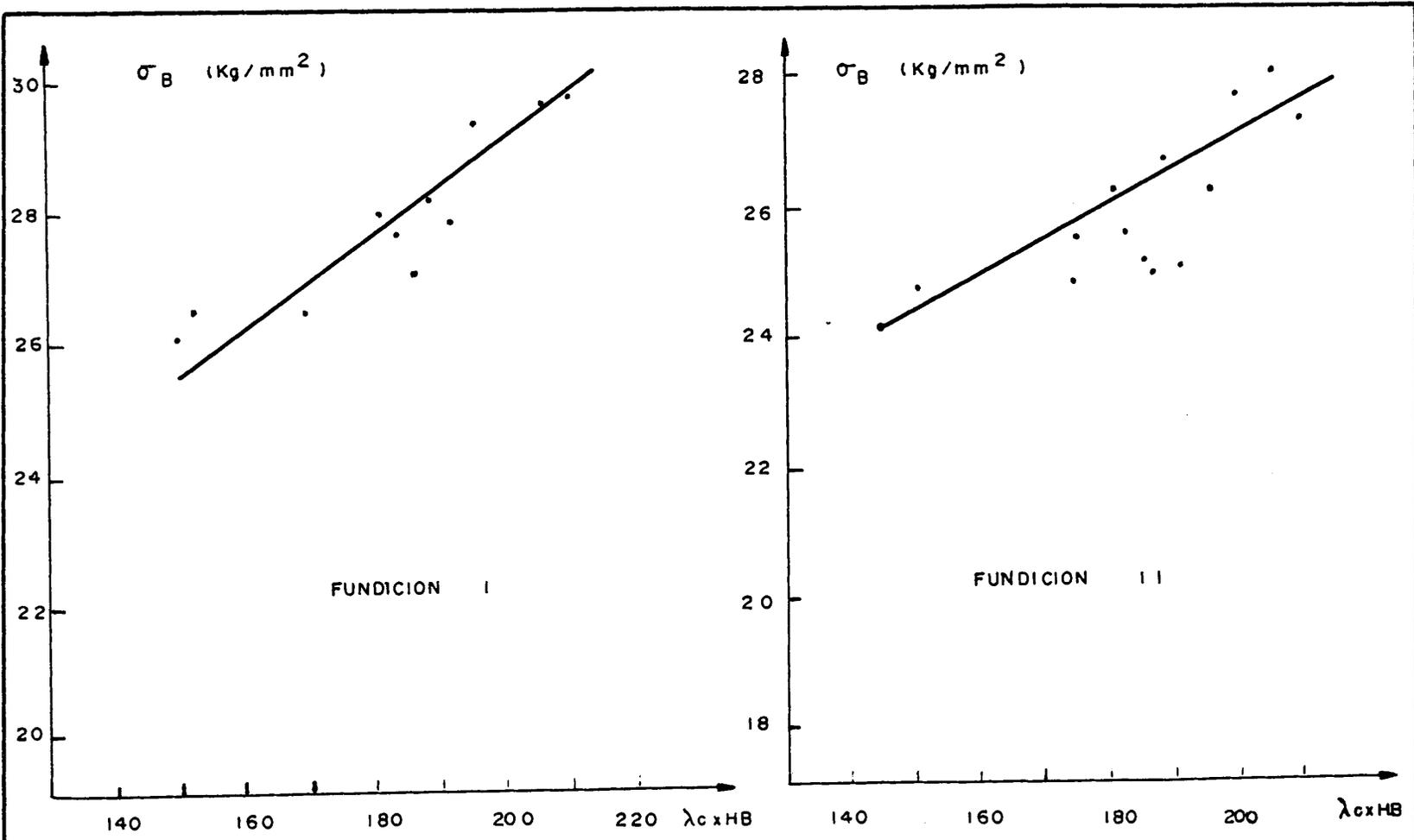


FIGURA 39.- VARIACION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION OBTENIDA POR ULTRASONIDOS CON EL PRODUCTO COEFICIENTE DE PROPAGACION / DUREZA BRINELL. FUNDICIONES I y II

punto en donde correspondientemente se determinó la dureza. El coeficiente λ_c no es otra cosa que la velocidad relativa del sonido que es afectada por los cambios microestructurales.

La figura 40 muestra la variación de la resistencia a la tracción obtenida por ultrasonidos con el coeficiente de atenuación para las dos fundiciones investigadas. En ambos casos se observa un decrecimiento de la resistencia a la tracción al aumentar la atenuación. Esto se explica por el hecho de que valores mayores de la atenuación corresponden a estructuras metalúrgicas representativa de una distribución menos uniforme del grafito laminar presente. Correspondientemente este tipo de estructuras posee una menor resistencia mecánica. Los valores mayores de atenuación corresponden a los mayores espesores de las probetas en donde la velocidad de enfriamiento fue menor. Podemos concluir entonces que la resistencia a la tracción disminuye conforme la hace la velocidad de enfriamiento.

La Figura 40 indica además que la fundición I posee una mayor resistencia a la tracción que la fundición II ya que su atenuación ultrasónica es menor. Esto es naturalmente representativo de sus mejores características metalúrgicas.

Las Figuras 41 y 42 demuestran que la resistencia a la tracción disminuye en los espesores mayores de las probetas de las fundiciones investigadas en donde la velocidad de enfriamiento es menor. Se

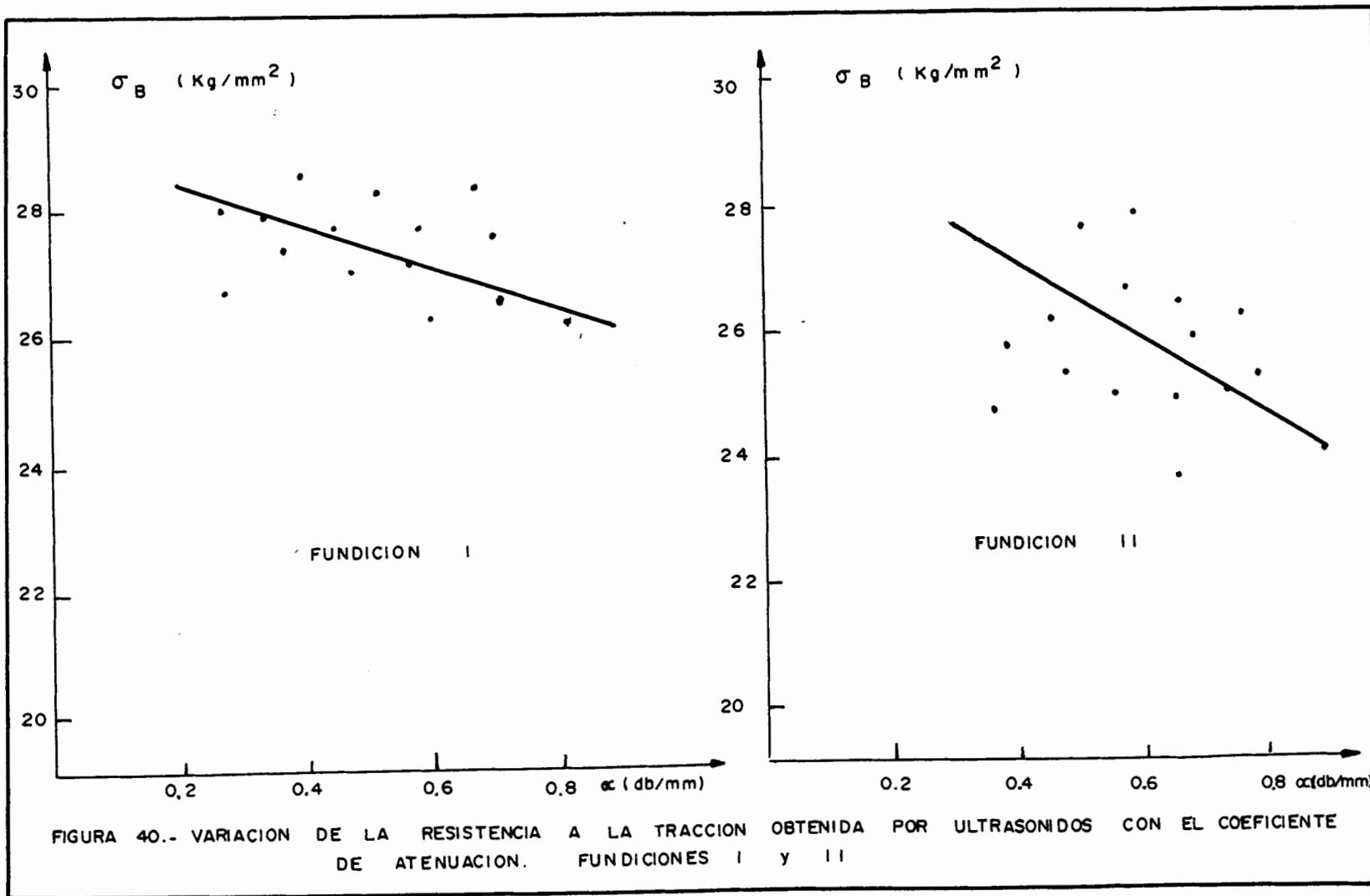


FIGURA 40.- VARIACION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION OBTENIDA POR ULTRASONIDOS CON EL COEFICIENTE DE ATENUACION. FUNDICIONES I y II

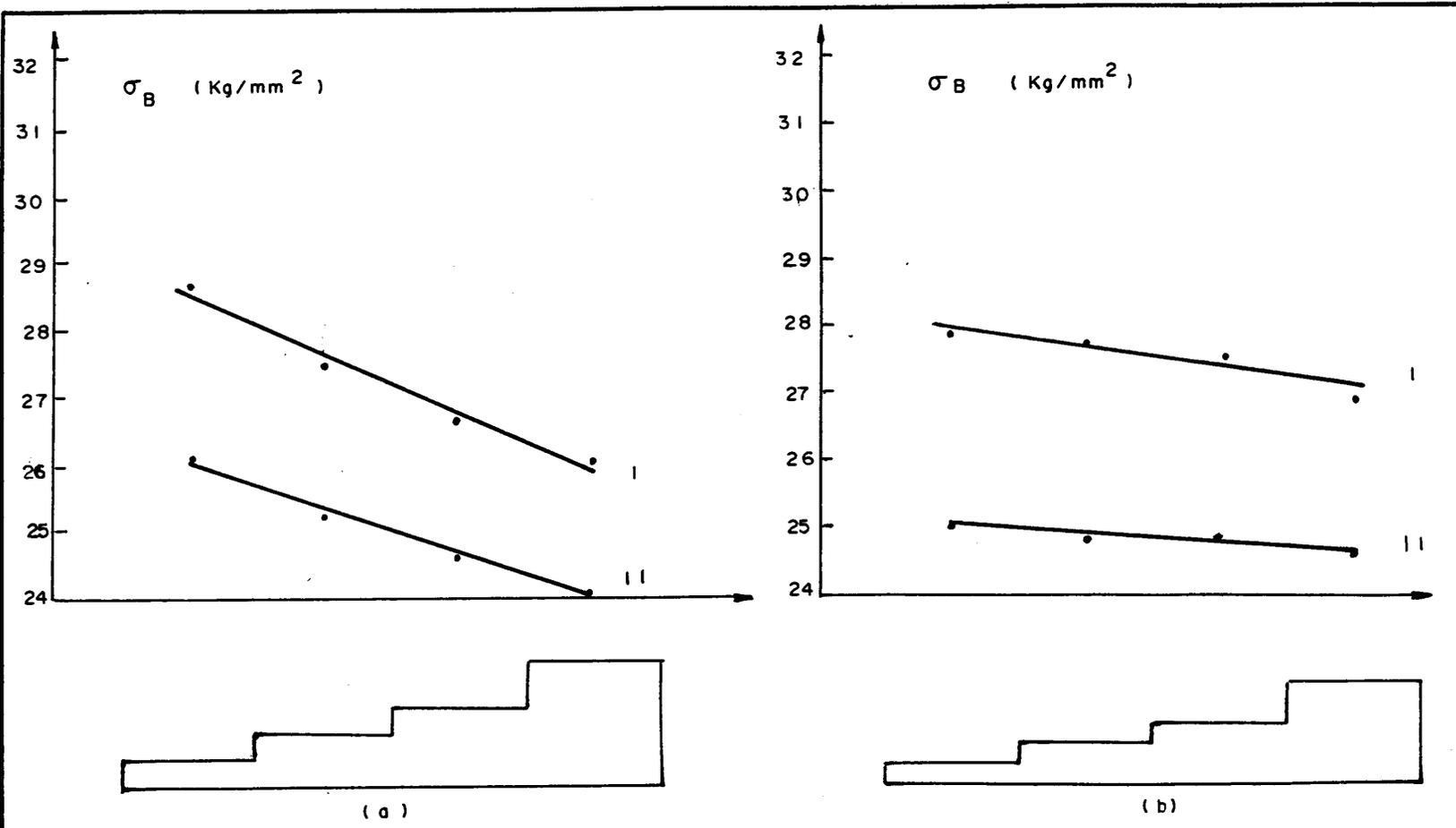


FIGURA 41.- VARIACION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION OBTENIDA POR ULTRASONIDOS CON LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO. FUNDICIONES I y II. PROBETAS (a) y (b)

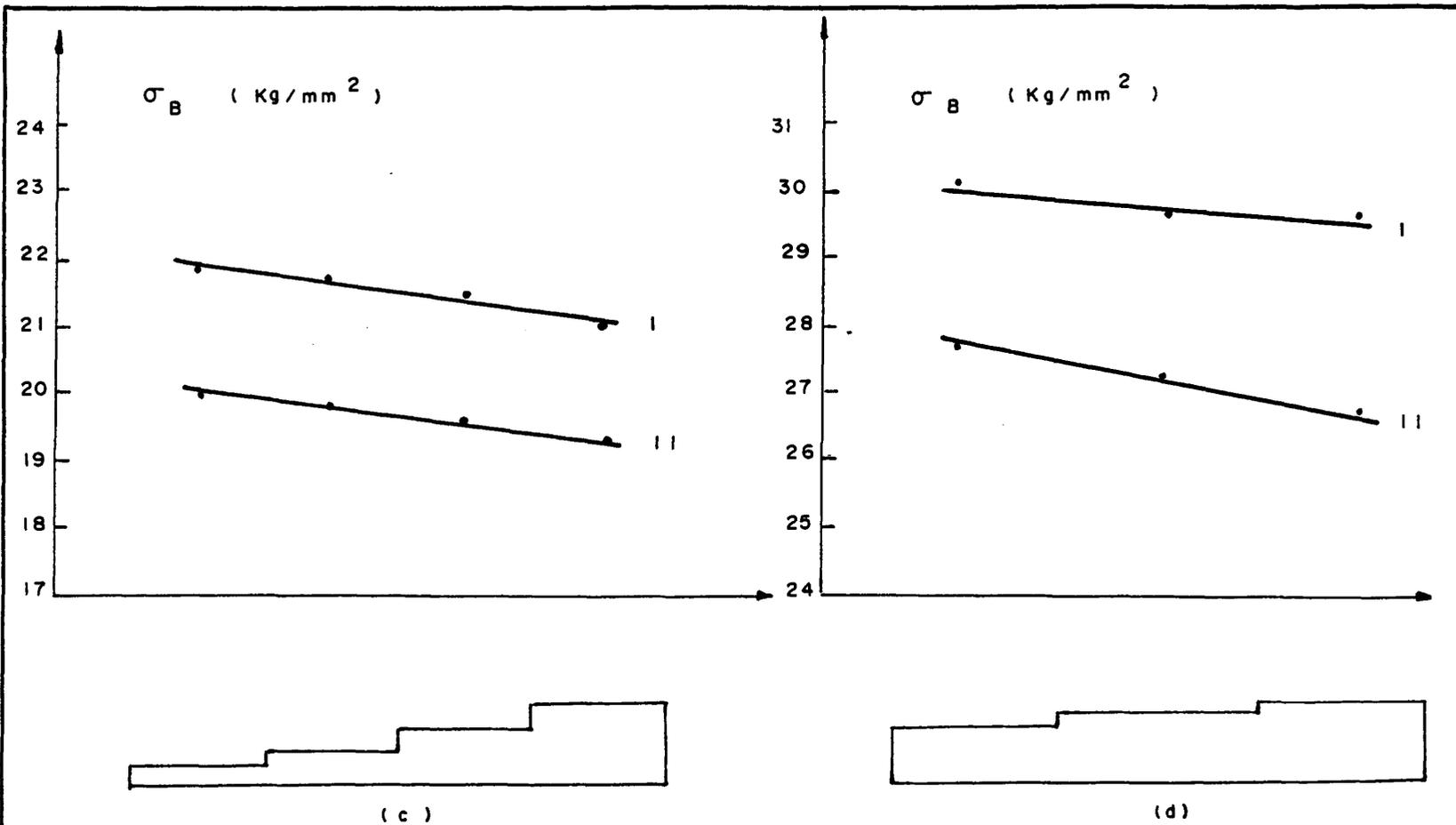


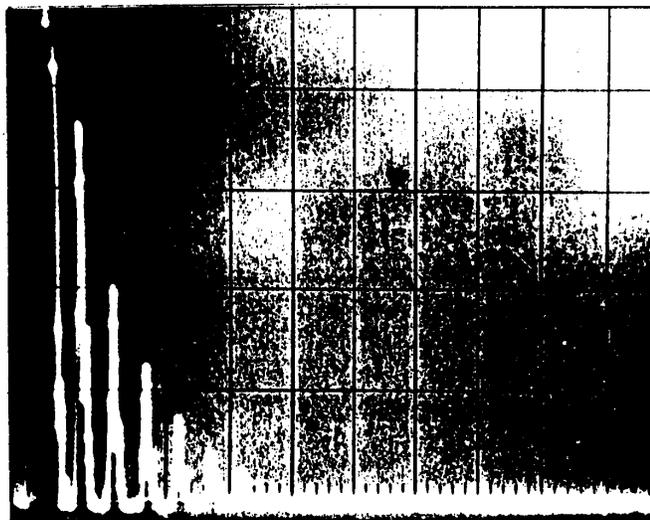
FIGURA 42.- VARIACION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION OBTENIDA POR ULTRASONIDOS CON LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO. FUNDICIONES I y II . PROBETAS (c) y (d)

manifiesta además en estas figuras la mayor resistencia a la tracción de la fundición I.

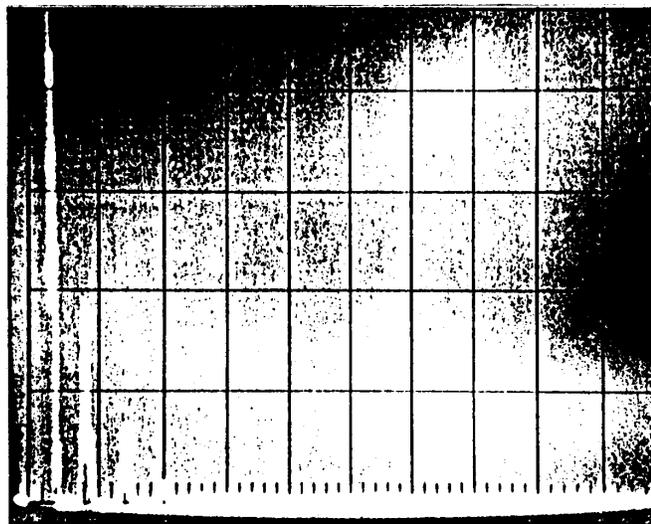
Las señales ultrasónicas representadas en la Figura 43 obtenidas al analizar las dos fundiciones para un espesor de 11 mm, corroboran los resultados obtenidos anteriormente. En efecto, se aprecia que la atenuación es menor y la velocidad de propagación es mayor para la fundición I puesto que la amplitud de señales es mayor. En dicha figura se ha indicado que la resistencia a la tracción es de 26.7 Kg/mm² para la fundición I y 25 Kg/mm² para la fundición II. La mayor atenuación de la fundición II trae como consecuencia una disminución en su resistencia.

El conocimiento de la atenuación ultrasónica es de gran interés para evaluar de manera rápida la resistencia de las fundiciones comparando las señales ultrasónicas obtenidas con otras señales elegidas como patrón.

Para determinar el análisis de resultados obtenidos en el presente trabajo nos vamos a referir brevemente a la determinación de las constantes elásticas: Módulo de Young (E) y Coeficiente de Poisson (μ). Estas dos constantes fueron determinadas matemáticamente utilizando las



FUNDICION I $\sigma_B = 27.9 \text{ Kg/mm}^2$ $\alpha C = 0.27 \text{ dB/mm}$
 $CL = 5.356 \text{ m/s}$



FUNDICION II $\sigma = 25 \text{ Kg/mm}^2$ $\alpha C = 0.46 \text{ dB/mm}$
 $CL = 5.131 \text{ m/s}$

FIGURA 43.- SEÑALES ULTRASONICAS OBTENIDAS EN LAS
 FUNDICIONES I y II EN UN ESPESOR DE 11 mm

velocidades longitudinal y transversal del ultrasonido y la densidad de las fundiciones. Los valores encontrados fueron presentados en las Tablas XII y XIII. Siendo el Módulo de Young dependiente principalmente de las velocidades del ultrasonido, ya que la densidad es prácticamente constante, se ha determinado que (E) de manera general aumenta conforme lo hacen las velocidades. Por lo tanto (E) es algo mayor para el caso de la fundición I, lo que significa que posee mejores características elásticas. Con respecto al Coeficiente de Poisson se ha determinado que es prácticamente constante en los distintos escalones de las probetas pertenecientes a la fundiciones I y II.

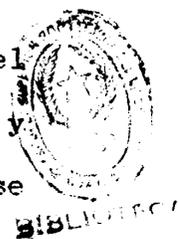
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Diferencias menores en la composición química de las fundiciones grises I y II investigadas no producen una diferencia apreciable en el grado de saturación, sino más bien en la morfología del grafito laminar presente. La fundición I teniendo un grado de saturación ligeramente mayor, pero una mejor distribución del grafito presenta una menor atenuación y mayor coeficiente y velocidad de propagación del ultrasonido.

Las mejores características ultrasónicas de la fundición I le confieren una mayor resistencia a la tracción y dureza Brinell, y mejores características elásticas Módulo de Elasticidad y de Poisson.

Se demuestra además que la resistencia a la tracción en muestras de fundición gris de diferente espesor pero de igual procedencia, puede ser evaluada utilizando un factor de corrección X determinado mediante el ensayo de tracción en una muestra representativa de dicha fundición.

En el presente trabajo se ha demostrado la ventaja del uso de los Ultrasonidos para la determinación rápida y confiable de las características de la fundición gris, se



recomienda entonces finalmente a la industria de la fundición local el uso de esta técnica para el control de las propiedades de estos materiales, para de esta manera elevar la productividad y la competitividad en proceso de fabricación de piezas fundidas.

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

1. APRAIZ BARREIRO, José. "Fundiciones". Editorial Dossat, Madrid, 1977.
2. LOPEZ, L. B. "Aplicación de los ultrasonidos a la determinación de las características mecánicas de la fundición gris". Revista de Metalurgia Vol. 14 Nº 3. CENIN, Madrid, Mayo, Junio. 1978.
3. CAPELLO, Eduardo. "Tecnología de la Fundición". Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1974.
4. ARESTES S. "Control por ultrasonido de las propiedades mecánicas de fundición gris". Jornadas Nacionales de Ensayos no Destructivos. Bilbao. 1976.
5. SANTIAGO, Alfredo E. "Determinación de la resistencia mecánica con métodos ultrasónicos en fundiciones grises", I Conferencias Regional sobre Ensayos no Destructivos, Buenos Aires. Argentina. 1979.
6. AVNER. S. "Introducción a la metalurgia física". Mc. Graw-Hill, México, 1975.
7. BAEZ, Juan N. "Ensayos ultrasónicos de materiales". Comisión Nacional de Energía Atómica, 1976.

8. ORDÓÑEZ, Carlos. "Aplicación de Técnicas de ultrasonidos en uniones soldadas de aceros estructurales, ESPOL, 1983.
9. ORS, J. "Medidas de atenuación de ondas ultrasonoras: I Jornadas Nacionales de Ensayos no Destructivos.
10. Metal Handbook 8ava. edition vol. XI nondestructive inspection and analyt control.
11. ORTIZ, H., y SERRANO, O. "Métodos de ultrasonidos". ESPOL, 1976.
12. Annual book of ASTM standard, part 11, 1979.