



\*D-18538\*

669.3  
VASC  
C.2

Biblioteca Central



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica**

**CARACTERIZACION DE LA ALEACION  
BRONCE-ALUMINIO**

**C95400 por medio de Ultrasonido**

**Tesis de Grado**

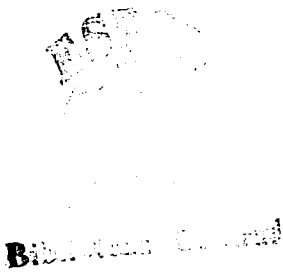
**Previa a la obtención del Título de:  
INGENIERO MECANICO**

**PRESENTADO POR:**

*Marjorie D. [Vásquez Claudett*

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**Año 1.997**



# **ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica**

**CARACTERIZACION DE LA ALEACION BRONCE-ALUMINIO  
C95400 POR MEDIO DE ULTRASONIDO**

**TESIS DE GRADO**

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

**INGENIERO MECANICO**

**Presentado por:**

**Marjorie D. Vásquez Claudett**

**Guayaquil - Ecuador**

**Año 1997**

## AGRADECIMIENTO



**Biblioteca Central**

Agradezco al Ing. Ignacio Wiesner, Director de Tesis, por su permanente ayuda y colaboración para la realización de éste trabajo.

Al Ing. Omar Serrano, quien con sus conocimiento y experiencia aportó con sus sugerencias y recomendaciones en éste trabajo.

A la ESPOL de manera especial a los profesores de la Facultad de Ing. Mecánica, quienes a través de sus enseñanzas han permitido mi formación profesional.

Al Ing. Eduardo Eras, por su colaboración en la utilización del equipo de Ultrasonido.

## **AGRADECIMIENTO ESPECIAL**



**Biblioteca Central**

Agradezco de una manera muy especial a las Intalaciones de INTRAMET Y SENDRE, por permitirme realizar las pruebas de mi Tesis

## DEDICATORIA



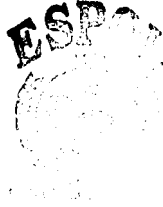
### **Biblioteca Central**

A Dios y a mi Virgencita, quienes guían mis pasos y hacen posibles todas las cosas.

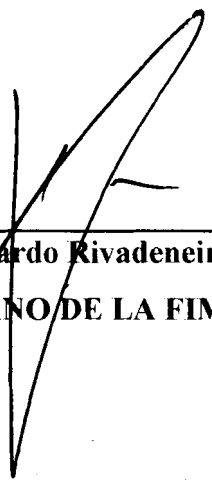
A mi familia, en especial a mis padres, que son la razón de mi vida, por impulsarme cada día a culminar mi carrera con su inmenso amor y abnegación.

A mis amigos, que de alguna u otra manera me ayudaron en mi etapa universitaria y fuera de ella.

# TRIBUNAL DE GRADUACION

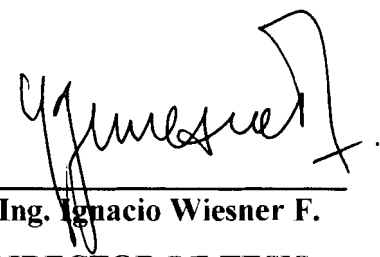


Biblioteca Central



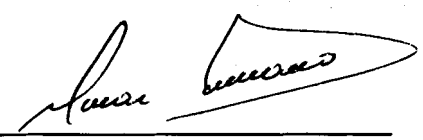
---

Ing. Eduardo Rivadeneira P.  
DECANO DE LA FIM



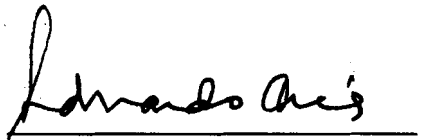
---

Ing. Ignacio Wiesner F.  
DIRECTOR DE TESIS



---

Ing. Omar Serrano V.  
VOCAL



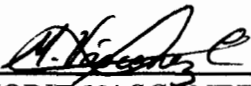
---

Ing. Eduardo Orcés P  
VOCAL

## DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

  
MARJORIE VASCÓNEZ CLAUDETT



**Biblioteca Central**

## **RESUMEN**

El tema responde a la factibilidad de utilizar un método moderno, sencillo y rápido en la determinación de las propiedades mecánicas de los bronce al aluminio cuya denominación es UNS C95400, mediante el empleo del ensayo no destructivo por ultrasonido y así reemplazar el análisis químico como elemento de control de planta.

La primera parte consiste en conocer los aspectos básicos de la fundición bronce al aluminio como sus características mecánicas, elementos que la afectan, sus ventajas y aplicaciones; además conocer los métodos de control de propiedades por ultrasonido, sus parámetros, aplicaciones y limitaciones en base a las características ultrasónicas del elemento ensayado comparado con el acero como elemento patrón.

El segundo paso consistirá en analizar probeta de diferentes espesores (forma escalonada) de aleación bronce aluminio, a fin de establecer la sensibilidad del material a los espesores y su relación con las propiedades mecánicas; Además se detalla la forma de ajuste y calibración del equipo de ultrasonido y el método que se utiliza para poder determinar las propiedades mecánicas.

Estas propiedades se contrastarán con las correspondientes a la norma UNS C95400 y se verificará la utilidad del ensayo.



**Biblioteca Central**





## Biblioteca Central INDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
RESUMEN.....	VII
INDICE GENERAL.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	XI
INDICE DE TABLAS.....	XIII
INTRODUCCION.....	15
CAPITULO I.....	17
FUNDAMENTO TEORICO.....	17
1.1. Metalurgia de la fundición Bronce al Aluminio.....	17
1.1.1. Generalidades.....	17
1.1.2. Características mecánicas.....	17
1.1.3. Influencia de los elementos aleantes.....	21
1.1.4. Aplicaciones.....	23
1.2. Método de Control de propiedades mecánicas por Ultrasonido.....	27
1.2.1. Generalidades.....	27
1.2.2. Velocidad de las ondas en sólidos.....	29
1.2.3. Atenuación de la onda: Interferencia de las ondas con los materiales.....	31
1.2.4. Aplicación y limitaciones del examen de ultrasonido.....	35
1.2.4.1. Detección de discontinuidades en materiales.....	35

	<b>Pág.</b>
1.2.4.2. Medida de espesores y estructuras metalúrgicas.....	35
1.2.4.3. Limitaciones del ensayo por ultrasonido.....	38
1.2.5. Aplicación del ultrasonido en las fundiciones.....	39
CAPITULO II.....	40
TRABAJO EXPERIMENTAL.....	40
2.1. Obtención de la probeta de aleación Bronce al Aluminio.....	40
2.2. Ensayos preliminares.....	42
2.2.1. Dureza.....	42
2.2.2. Resistencia a la tracción.....	42
2.3. Equipo utilizado.....	43
2.4. Ajuste y calibración del equipo.....	47
2.4.1. Calibración de la Linealidad.....	49
2.4.2. Calibración de la atenuación y la sensibilidad.....	54
2.5. Determinación de las propiedades mecánicas por ultrasonido.....	59
2.5.1. Determinación de los coeficientes de propagación y de atenuación.....	59
2.5.2. Medición de la resistencia.....	62
2.5.3. Determinación de las constantes elásticas: Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.....	63
CAPITULO III.....	67

	<b>Pág.</b>
ANALISIS DE RESULTADOS.....	67
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
BIBLIOGRAFIA.....	81



**Biblioteca Central**



**Biblioteca Central**

## **INDICE DE FIGURAS**

<b>No.</b>	<b>Pág.</b>
1. Variación de la microestructura según el contenido de aluminio.....	19
2. Variación de la dureza de acuerdo al contenido de aluminio.....	19
3. Dimensiones de la probeta utilizada en el análisis experimental.....	41
4. Probeta de ensayo de tracción cilíndrica.....	44
5. Equipo ultrasónico Krautkramer Usk - 6 y sus controles.....	45
6. Bloque de referencia del Instituto Internacional de la soldadura (VI)...	48
7. Posición del transductor para la evaluación de la linealidad.....	50
8. Representación del oscilograma obtenido durante la evaluación de la linealidad.....	50
9. Representación de la linealidad horizontal.....	53
10. Representación de la linealidad vertical.....	56
11. Ubicación del transductor sobre el bloque VI usando ondas longitudinales.....	58
12. Posición del transductor en el bloque VI.....	60
13. Oscilograma de una buena resolución del equipo.....	60
14. Variación del coeficiente de atenuación con la velocidad de enfriamiento en la aleación C95400.....	69
15. Variación de la resistencia a la tracción obtenida por ultrasonido con la velocidad de enfriamiento en la aleación C95400.....	71

<b>No.</b>	<b>Pág.</b>
16. Variación de la velocidad longitudinal del ultrasonido con la velocidad de enfriamiento.....	71
17. Variación del módulo de elasticidad obtenida por ultrasonido con los diferentes espesores de la aleación C95400.....	72
18. Variación del coeficiente de atenuación en las diferentes aleaciones vs. la velocidad de enfriamiento.....	77
19. Variación del módulo de elasticidad vs. la velocidad de enfriamiento, en las diferentes aleaciones.....	77

## INDICE DE TABLAS

No.		Pág.
I.	Composición química de los cuproaluminios complejos.....	18
II.	Condiciones para el torneado de los cuproaluminios complejos.....	21
III.	Propiedades mecánicas de algunos cuproaluminios complejos.....	24
IV.	Densidades, velocidades e impedancias acústicas en materiales metálicos y no metálicos.....	32
V.	Durezas obtenidas en la aleación C95400.....	42
VI.	Datos técnicos del equipo Krautkramer USK - 6.....	46
VII.	Valores obtenidos para la evaluación de la linealidad horizontal.....	52
VIII.	Valores obtenidos para la evaluación de la linealidad vertical.....	55
IX.	Valores del espesor aparente, coef. de propagación y propagación del sonido en el bronce al aluminio C95400.....	61
X.	Valores de la atenuación y resistencia a la tracción en la aleación C95400.....	66
XI.	Valores de velocidades longitudinales y transversales, densidad y módulo de Young y Poisson en la aleación C95400.....	66
XII.	Valores de velocidades longitudinal y transversal, densidad y módulos de Young.....	74
XIII.	Valores del coef. de propagación, atenuación y de la velocidad de propagación del sonido en dos diferentes aleaciones.....	75

**No.**

**Pág.**

XIV. Propiedades mecánicas de la aleación de Zinc (771) y de la  
aleación de aluminio (Zn27Al).....

78

## INTRODUCCION

En la actualidad la producción de las aleaciones de Cobre (Cupro-aluminios) tiene una gran acogida debido a las múltiples ventajas que poseen, como por ejemplo, su gran resistencia a la corrosión, su fácil deformabilidad en caliente, su agradable aspecto, etc. Por estas circunstancias las aplicaciones son diversas, entre las más comunes podemos anotar; la fabricación de: bocines, hélices, propulsores, piñones helicoidales, etc.

Uno de los problemas por los que atraviesa la industria de la fundición en nuestro país es la falta de control de la calidad de las piezas fundidas, en lo que se refiere al cumplimiento de las especificaciones de sus propiedades mecánicas.

El fundidor debe tener a su disposición algún medio rápido que le permita controlar la calidad del producto en el horno. Es decir, el fundidor debe conocer en pocos minutos si el metal contenido en el crisol posee las características adecuadas para colar determinadas piezas y tratar de eliminar pruebas de verificación que toman tiempo.

Las pruebas en el proceso de control de propiedades en planta en la actualidad son: resistencia a la tracción, dureza y la más utilizada el análisis químico.

Sin embargo el desarrollo industrial ha determinado la necesidad de explorar técnicas modernas, como es el caso del Ultrasonido para elevar la productividad del proceso de fabricación de piezas fundidas.



Ultrasonido emplea son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sónicas audibles, diferenciándose de éstas en que su campo de frecuencia (1 a 5 millones de Hz), de aquí el término *ultrasónico*.

La utilización del control por Ultrasonido para la obtención de las características mecánicas en las aleaciones de bronce al aluminio, está basada en las velocidades de propagación de las ondas sonoras, tanto longitudinales como transversales, en un medio donde son función del módulo de Young y el coeficiente de Poisson, como índice de las características elásticas.

En base a lo expuesto anteriormente, el objetivo que nos hemos planteado es el de dar a conocer al fundidor las técnicas de Ultrasonido aplicadas a los Bronces al Aluminio, a fin de que tenga una herramienta confiable y rápida en la obtención de materiales que cumplan con las características mecánicas deseadas.



## **1.1. METALURGIA DE LA FUNDICION BRONCE AL ALUMINIO.**

### **1.1.1. GENERALIDADES.**

Los cuproaluminios son aleaciones de cobre que tienen como principal elemento aleante al aluminio, las aleaciones que contienen entre el 8 y 12 % de aluminio se denominan cupro-aluminios, cuando se les adiciona cantidades eventuales de hierro, níquel silicio y de manganeso ( entre 2 y 5 % ), se las denomina Bronces al Aluminio o “complejas”.

La extensa aplicación que se hace de los bronce al aluminio modernamente, se debe a sus buenas cualidades mecánicas, su fácil deformabilidad en caliente, su gran resistencia a la corrosión, a su agradable aspecto y facilidad de pulido (Ref.1). En la tabla I se muestra la composición de estas aleaciones.

### **1.1.2. CARACTERISTICAS MECANICAS.**

Las propiedades mecánicas de un metal o de una aleación en estado sólido son determinadas por su estructura. La estructura depende de su composición química pero también de sus tratamientos tanto térmicos como mecánicos.

Los cuproaluminios complejos poseen muy buenas propiedades mecánicas y pueden incluso reemplazar a los aceros al carbono en aplicaciones donde se requiere una alta resistencia a la corrosión.

**TABLA I**  
**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS CUPROALUMINIOS**  
**COMPLEJOS. (Ref. 1)**

<b>Aleación Cu Al</b>	<b>C95300</b>	<b>C95400</b>	<b>C95500</b>
<b>Cobre, mín.</b>	86.0	83.0	78.0
<b>Aluminio</b>	9.0-11.0	10.0-11.5	10.0-11.5
<b>Hierro</b>	0.75-1.5	3.0-5.0	3.0-5.0
<b>Manganeso</b>	-----	0.5 máx.	3.5 máx.
<b>Níquel</b>	-----	2.5 máx	3.0-5.5
<b>Total de elem. mín</b>	99.0	99.5	99.5

En las figuras 1 y 2 se muestran como afecta la variación del contenido de aluminio en la microestructura y en la dureza respectivamente. Dureza es sinónimo de mayor resistencia a la tracción y menor ductilidad. En la práctica es recomendable no sobrepasarse del 12 al 13 % de aluminio porque la aleación se vuelve completamente frágil.

Sin tratamiento la dureza puede variar de 110 a 260 HB, la elongación de 5 a 35 % y la resistencia a la tracción de 70 a 124 Ksi. (Ref. 2)

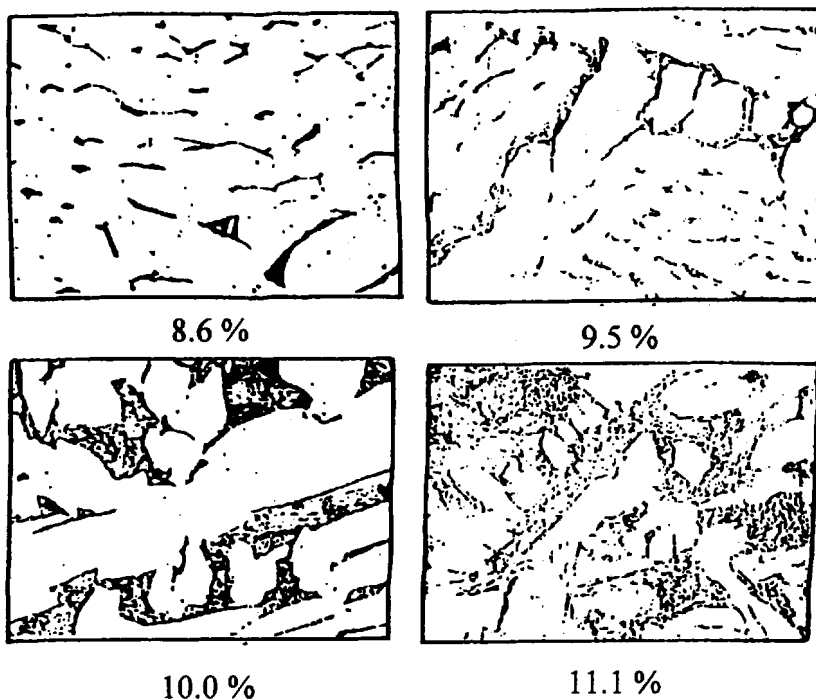


Fig. 1: Variación de la microestructura según el contenido de aluminio, (Ref.2).

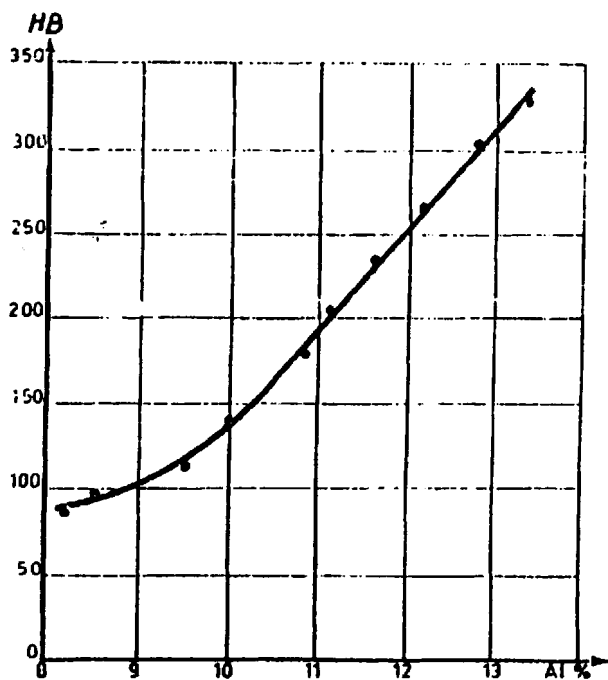
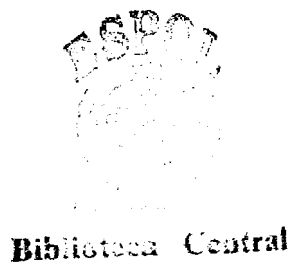


Fig. 2: Variación de la dureza de acuerdo al contenido de aluminio, (Ref. 2).



## **RESISTENCIA A LA CORROSION.**

Los cuproaluminio que poseen entre el 5 y 12 % de aluminio tienen excelentes propiedades anticorrosivas y resistencia a la oxidación a altas temperaturas. El níquel en porcentajes del 1 al 2 %, mejora la resistencia a la corrosión; mientras que el hierro no tiene efecto sobre la aleación.

Entre las aleaciones de cobre, los cuproaluminios se consideran en la categoría de menor velocidad de corrosión en medios marinos. La pérdida de metal por corrosión se puede expresar por medio de la siguiente fórmula (Ref. 3):

$$d = (0.1)t^{1/3}$$

donde:  $d$  = pérdida en micras

$t$  = tiempo de exposición en años

## **MAQUINABILIDAD.**

Estas aleaciones de cobre son las más difíciles de maquinar, su maquinabilidad es del 50 al 60 %. Por eso es conveniente el correcto afilado de las herramientas, y mantener las condiciones que indica la Tabla II para el torneado.

## TABLA II

### CONDICIONES PARA EL TORNEADO DE LOS CUPROALUMINIOS COMPLEJOS. (Ref. 4)

Número UNS	Maquinabilidad	Velocidad, smf*	Avance, ipr**
		<b>Desbaste</b>	
<b>C95300</b>	55 %	300	0.009
<b>C95400</b>	60 %	300	0.011
<b>C95500</b>	50 %	250	0.011
		<b>Acabado</b>	
<b>C95300</b>		950	0.004
<b>C95400</b>		950	0.004
<b>C95500</b>		950	0.004

\* smf = pie superficial por minuto

\*\* ipr = pulgadas por vuelta

#### 1.1.3. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES.

Las propiedades de las aleaciones bronce aluminio se pueden variar dependiendo de los elementos que se les adicione. Estos elementos pueden ser el hierro, níquel, manganeso, silicio y níquel. Como el principal elemento aleante es el aluminio, se analizará primero su influencia en las aleaciones Cu - Al.

#### ALUMINIO.

El aluminio es el responsable de la formación de una estructura eutectoide dura y quebradiza y de  $\beta$ . Cuando la presencia del aluminio es de

porcentajes menores al 8.4 % la estructura muestra un incremento de la tensión y la ductilidad, mientras que por encima de este valor aumenta bruscamente la tensión y disminuye la ductilidad (Ref. 5).

El rango de 9 - 9.8 % de aluminio es el que muestra la mejor combinación de tensión y resistencia a la corrosión, por encima del 9 - 11.5 % hay un incremento de la dureza y de los esfuerzos de tensión reduciéndose la elongación.

El rango que presenta las mejores propiedades mecánicas y de soldabilidad para este tipo de aleaciones está el 10.5 - 9 % de aluminio. Las aleaciones con un contenido superior al 16.5 % de Al llegan a ser tan quebradizas que deben descartarse en el uso industrial (Ref. 6).

### **HIERRO.**

Este elemento ayuda al refinamiento del grano, a reducir el rango de solidificación de los bronce al aluminio. Este hace que la resistencia, módulo elástico y límite de endurecimiento se incrementen, especialmente la resistencia a elevadas temperaturas.

### **NIQUEL.**

Introducido a los bronce como un elemento aleante incrementa la resistencia a la corrosión y el límite elástico, pero su influencia en el refinamiento del grano y estabilización del mismo no es tan importante

como la del hierro, si se tiene del 2 - 5 % de níquel en aleaciones del 10 % de aluminio se logra una mayor resistencia a la cavitación y a la corrosión.

### **MANGANESO.**

Es un elemento aleante cuya función primordial es la de mejorar las asperezas de las fundiciones. Este elemento ayuda a la desoxidación del metal y actúa como eliminador de gases, mejorando de esta forma la resistencia a la corrosión y al desgaste y a la vez actúa como refuerzo en el refinamiento del grano.

### **SILICIO.**

Su presencia incrementa la maquinabilidad de los bronce al aluminio, tiene un efecto similar al aluminio, por ejemplo una aleación con el 6-7 % Aluminio más el 2% de Silicio da propiedades iguales a las de una aleación al 10 % de aluminio (Ref. 7).

La tabla III muestra las propiedades que tienen los principales cuproaluminios complejos.

#### **1.1.4. APLICACIONES.**

Los bronce al aluminio son ampliamente usados donde se requiere una gran resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. Estas aleaciones están libres de defectos microscópicos, lo cual combinado con su alta



**TABLA III**  
**PROPIEDADES DE ALGUNOS CUPROALUMINIOS COMPLEJOS.**  
**(Ref. 3)**

Fundición en Bruto de Colado

Aleación	Composición					Dureza	Resistencia a la Tracción		Resistencia a la Fluencia		Elongación en 2" o 50 mm	Módulo Elástico
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	HRB	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	50mm	Gpa
C95200	88	3	9	-	-	64	80	550	27	185	35%	105
C95300	89	10	1	-	-	67	65	450	25	170	20%	110
C95400	85	11	4	-	-	83	75	515	30	205	12%	110
C95500	81	11	4	4	-	87	90	620	40	275	6%	110



### **Biblioteca Central**

resistencia hace que también su uso se extienda a aquellos sitios donde exista altas presiones de líquidos o gases.

Además estas aleaciones retienen una alta proporción de sus esfuerzos a elevadas temperaturas, este hecho junto con su excepcional resistencia a la corrosión hace que sean únicos para el servicio de máquinas de combustión interna, plantas de vapor y aplicaciones químicas que trabajan a elevadas temperaturas sobre los 316 y 399 °C.

Las principales ventajas del Bronce al aluminio en la industria dependen fundamentalmente de factores tales como:

Buena resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

Buena resistencia a la corrosión a temperaturas normales.

- a) La habilidad de retener esfuerzos a altas temperaturas especialmente cuando están presentes otros elementos.
- b) Debido a su color algunos tipos de bronce al aluminio con contenidos menores al 9.4 % son usados para fines decorativos, particularmente como un sustituto para la imitación de piezas de oro.

Las aplicaciones típicas de los cuproaluminios complejos se muestran a continuación:

Aleación C95300:

- Canastas para remojo en salmuera
- Engranés
- Equipos marinos
- Tuercas
- Herramientas antichispas, etc.



**Biblioteca Central**

Aleación C95400:

- Bocines, piñones, sin fin
- Asientos y guías de válvulas
- Impulsores de bombas
- Placas deslizadoras
- Herramientas antichispa, etc.

Aleación C95500:

- Propulsores marinos
- Bocines, piñones, sin fin
- Ganchos y canastas para remojo
- Agitadores para la industria de papel
- Guías y asientos de válvulas en motores de aviación, etc.

Las aleaciones C95300 y C95400 no son adecuadas para la exposición en ácidos oxidantes. Además su uso prolongado a temperaturas entre 320 y 505 °C puede reducirle ductilidad y tenacidad.

## **1.2. METODO DE CONTROL DE PROPIEDADES MECANICAS POR ULTRASONIDO.**

### **1.2.1. GENERALIDADES.**

Los ultrasonidos son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sónicas audibles, diferenciándose de éstas, en que el campo de frecuencias (1 a 5 millones de Hz), de aquí el término ultrasónico.

El ensayo de ultrasonido es uno de las más importantes métodos de control de calidad y evaluación de materiales en la industria actual; Existe una variedad de detalles que deberían ser tomadas en cuenta al observar las aplicaciones de este método. Entre éstas están:

- Alta sensibilidad, permitiendo de detección de pequeños defectos.
- Habilidad para penetrar materiales de gran espesor.
- Exactitud en la determinación de la posición y el tamaño del defecto.
- Fácil lectura de los resultados, permitiendo un ensayo rápido y automático.
- Necesidad de acceso a una sola superficie del espécimen a ensayarse.
- Uso seguro sin protección. Riesgos sin importancia para el personal.

Sin embargo, el ensayo de ultrasonido no es una solución total para los problemas de ensayo, ni es aplicable a todas las situaciones. Entre las

condiciones de ensayo que podrían limitar o impedir el uso de ensayos de ultrasonido están:

- Geometría inconveniente del espécimen de ensayo.
- Estructura interna inconveniente en el material.

Una de las claves para el éxito en el ensayo de ultrasonido, es la de reconocer las condiciones de ensayo y luego, usar técnicas convencionales convenientes para dichas condiciones.

### **PARAMETROS.**

Las ondas ultrasónicas, al igual que cualquier otro movimiento ondulatorio, se encuentran definidas por los siguientes parámetros:

- Frecuencia de la onda ( $f$ ): es el número de oscilaciones completas por segundo (ciclos / segundo o hertz).
- Longitud de onda ( $\lambda$ ): es la distancia mínima entre dos puntos en el mismo estado de vibración.
- Velocidad ( $C$ ): distancia recorrida por las ondas en el medio por unidad de tiempo.
- Amplitud de oscilación ( $A$ ): es el desplazamiento máximo de una partícula de su posición cero.

Los tres primeros parámetros están relacionados entre sí por la conocida expresión (Ref. 8):

$$\lambda = v / f$$

### 1.2.2. VELOCIDAD DE LAS ONDAS EN SÓLIDOS.

La velocidad de propagación de las ondas en sólidos depende de las constantes elásticas del material que se trate. Las constantes elásticas que intervienen en el cálculo son:

E = Módulo de elasticidad o Módulo de Young, expresada en

$$\text{N/m}^2 \text{ ó } 1 \text{ Kp/mm}^2 \text{ (} 1 \text{ Kp/mm}^2 = 0.98 \times 10^7 \text{ N/m}^2 \text{)}$$

$\mu$  = Relación o coeficiente de Poisson. (adimensional).

$\rho$  = Densidad

G = Módulo de Rigidez (N/m<sup>2</sup>)

En el caso de ondas longitudinales que se propagan en un medio de dimensiones mayores que la longitud de onda, la velocidad viene dada por la expresión (Ref. 8):

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

En el caso de ondas transversales la expresión es:

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Siendo

$$G = \frac{F}{2(1 + \mu)}$$

Las velocidades de las ondas transversales son considerablemente inferiores a las ondas longitudinales. En el caso del acero, por ejemplo, la velocidad de las ondas transversales es de  $3.2 \times 10^3$  m / seg.

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

$$C_t / C_L = \sqrt{\frac{(1 - 2\mu)}{2(1 - \mu)}}$$

En la Tabla IV se dan las velocidades longitudinales y transversales de propagación acústica para algunos materiales metálicos y no metálicos.

### **IMPEDANCIA ACUSTICA.**

Cuando una onda longitudinal se propaga a través de un medio, la relación entre la amplitud A y la sobrepresión P que se crea en el medio viene dada por la expresión:

$$P = \rho V \omega A$$

TABLA IV

**DENSIDADES, VELOCIDADES E IMPEDANCIAS  
ACUSTICAS EN MATERIALES METALICOS Y NO  
METALICOS (Ref. 8)**

MATERIALES	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> ) $\rho$	Velocidades Acústicas ( m/s x 10 <sup>3</sup> )		Imp. Acústica (Kg/m <sup>2</sup> s x 10 <sup>6</sup> ) $Z = \rho \cdot C_L$
		Long. C <sub>L</sub>	Trans. Ct	
Aceros (baja aleación)	7.85	5.82	3.19	45.7
Acero inoxidable austenítico. 18.8	8.03	5.66	3.12	45.5
Aluminio (Al)	2.71	6.32	3.08	17.1
Antimonio (Sb)	6.69	4.15		28
Bronce (Cu-Sn)	7.4 - 8.9	4.40 - 4.98	2.34	32.5 - 44.5
Cobre (Cu)	8.9	4.7	2.26	42
Estaño (Sn)	7.3	3.32	1.67	24
Fundición (Fe-Cu)	7.2	3.5 - 5.6	2.2 - 3.2	25 - 40
Hierro (Fe)	7.7	5.85	3.23	45
Latón (Cu-Zn)	8.5 - 8.6	3.83	2.05	33
Plata (Ag)	10.5	3.6	1.59	38
Aceite (SAE 20 - 30)	0.89 - 0.96	1.74		1.5 - 1.7
Glicerina (20°)	1.26	1.82		2.4
Alcohol Etilico (20°)	0.79	1.17		0.92



## **DISPERSION.**

Los orígenes de la dispersión se deben a que en la práctica los materiales presentan discontinuidades locales de impedancia acústica del orden de la longitud de onda, es decir, los materiales no son homogéneos desde el punto de vista ultrasónico. Esto es consecuencia de la presencia de pequeños defectos (poros, segregaciones, inclusiones, etc.) que actúan como focos dispersantes de las ondas. En los metales, por su naturaleza policristalina, los granos actúan como focos de dispersión por la distinta impedancia acústica que presentan según su orientación.

La dispersión producida por la estructura policristalina de los metales es de gran importancia en los ensayos ultrasónicos. Los factores que más influyen en esta dispersión son el tamaño de grano, la naturaleza del metal y la frecuencia de las ondas. La dispersión aumenta grandemente con el tamaño de grano y con la frecuencia, de aquí que el ensayo de estructuras groseras, fundiciones por ejemplo, requieren bajas frecuencias, del orden de 2 MHz. o 1 MHz. A igualdad de grano y frecuencia, la anisotropía elástica determina la mayor o menor dispersión. Desde este punto de vista el cobre es, entre los metales más usuales, el más anisótropo (más dispersante) y el aluminio el que menos, encontramos el acero en un valor intermedio (Ref. 9).

## **ABSORCION.**

La absorción es una conversión directa de la energía ultrasónica en calor, las causas que dan origen a este fenómeno son diversas y en él influyen el medio y la frecuencia de las ondas.

Se puede explicar la absorción, de 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 destructivos de materiales, según los siguiente aspectos:

- 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 el voltaje de emisión y la amplificación o, también, recurrir al empleo de frecuencias más bajas.
- Al contrario, 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, el llamado “césped”, en el que los verdaderos ecos de interés pueden

quedar enmascarados. Estas indicaciones falsas no se pueden contrarrestar aumentando el voltaje de emisión o la amplificación, ya que el efecto de césped se incrementaría simultáneamente. El único remedio consiste en emplear frecuencias más bajas, lo cual establece un límite natural e insuperable para la detectabilidad de heterogeneidades pequeñas.

#### **1.2.4. APLICACIONES Y LIMITACIONES DEL EXAMEN DE ULTRASONIDO.**

##### **1.2.4.1. DETECCIÓN DE DISCONTINUIDADES EN MATERIALES.**

El ensayo de ultrasonido se lo utiliza para detectar discontinuidades (defectos) tales como:

- Defectos de laminación (hoja)
- Rechupes escorias en lingotes
- Grietas y otros defectos de forja
- Defectos en tubos, pernos, etc.
- Defectos típicos de soldadura: grietas, faltas de fusión y penetración, escoria, etc.

##### **1.2.4.2. MEDIDA DE ESPESORES Y ESTRUCTURAS METALURGICAS.**

La determinación de espesores con ultrasonidos tiene como ventaja fundamental, el que la medida se realice por una sólo superficie y su rapidez.

Existen aparatos muy ligeros y sencillos diseñados exclusivamente para este tipo de medidas, algunos del tamaño de una cajetilla de tabaco, que conectados a un palpador emisor-receptor, alcanzan una apreciable sensibilidad ( $\pm 0.05$  mm) con presentación digital de la lectura.

El principio sobre el que se basa la medida de espesores por ultrasonidos radica en medir de forma electrónica el tiempo de tránsito del impulso ultrasónico a lo largo de la sección del material. Este tiempo es función del espesor de la sección y de la velocidad de las ondas en el material.

Con una sencilla calibración, el equipo se encuentra listo para medir espesores dentro el margen pre-



**Biblioteca Central** establecido

Otra de las aplicaciones que presentan los ultrasonidos es la determinación o estimación de la estructura de materiales policristalinos ( tamaño de grano ) por medio de la atenuación de las ondas en los mismos. El tamaño de grano de un metal o aleación afecta en gran manera a



**Biblioteca Central**

la atenuación de las ondas por el efecto de dispersión. Midiendo esta atenuación (dB) de forma que se mantengan constantes otras variables (recorrido, acoplamiento) puede disponerse de valiosa información relativa a la estructura y, como consecuencia, a tratamientos térmicos, y estado de procesado de un material (fundición, forja, laminado).

### **ESTRUCTURA INTERNA.**

La estructura interna de los materiales pueden hacer diferentes los ensayos de 2 piezas de un mismo tipo de acero.

La estructura interna es un resultado de los métodos y tratamientos usados en la producción del material. El resultado de un ensayo de ultrasonido tiene un efecto doble:

- Los granos grandes pueden causar dispersión y pérdida de la reflexión posterior, especialmente cuando el tamaño de grano y la longitud de onda ultrasónica son aproximadamente iguales.
- Con granos pequeños donde la longitud de onda puede ser significativamente más grande que los granos, se reduce la sensibilidad, aunque se reducen también las pérdidas por dispersión.

### **1.2.4.3. LIMITACIONES DEL ENSAYO POR ULTRASONIDO.**

La aplicación de este tipo de ensayo, presenta los siguientes inconvenientes o problemas:

- Dificultad de interpretación de resultados. El operador debe confiar más en su experiencia y las características del material que examina que en las indicaciones obtenidas.
- En ensayos manuales, no automáticos, no existe adecuado registro objetivo de resultados.
- El personal que realiza el ensayo debe ser experto y responsable. La validez de los resultados se encuentra fuertemente condicionada a la cualificación del operador.
- El dimensionado de defectos, muy particularmente de aquellos con dimensiones del mismo orden que las del haz ultrasónico, es tan sólo aproximado y difícil de efectuar.

En cuanto a limitaciones que este tipo de ensayo presenta, se puede establecer que todas ellas se derivan de aspectos geométricos y de estructura del metal o aleación que se ensaya. Piezas de geometría complicada en las que resulta difícil obtener ecos de fondo o acoplar el palpador (problemas de curvaturas)

resultan prácticamente inaccesibles al ensayo. Materiales o soldaduras con estructuras metalúrgicas groseras, grandes tamaño de grano, presentan dificultades de ensayo por la dispersión de las ondas que se produce en los mismos. Esto es particularmente importante en estructuras de gran anisotropía, tales como el cobre y el acero inoxidable.

#### **1.2.5. APLICACION DEL ULTRASONIDO EN LAS FUNDICIONES.**

Debido a que las fundiciones contienen usualmente estructura interna de grano grueso, generalmente se utilizan bajas frecuencias.

Las fundiciones de algunos materiales son de grano tan grueso que una gran parte del rayo sonoro se dispersa y hace impracticable el ensayo de ultrasonido. Estos materiales incluyen algunas aleaciones de bronce, hierro fundido, acero inoxidable y titanio.

Como se anotó anteriormente, es frecuente una determinada orientación de grano en las fundiciones y el rayo sonoro será atenuado en mayor o menor grado dependiendo de su dirección con respecto de la orientación de los granos. (Ref. 10)

## **CAPITULO II**

### **TRABAJO EXPERIMENTAL**

En este capítulo explicaremos la forma de ajustar y calibrar el equipo de ultrasonido. Además se detallará el método operativo que se utiliza en la determinación de las características mecánicas, para examinar una probeta de diferentes espesores de una fundición de Bronce - Aluminio (C95400).

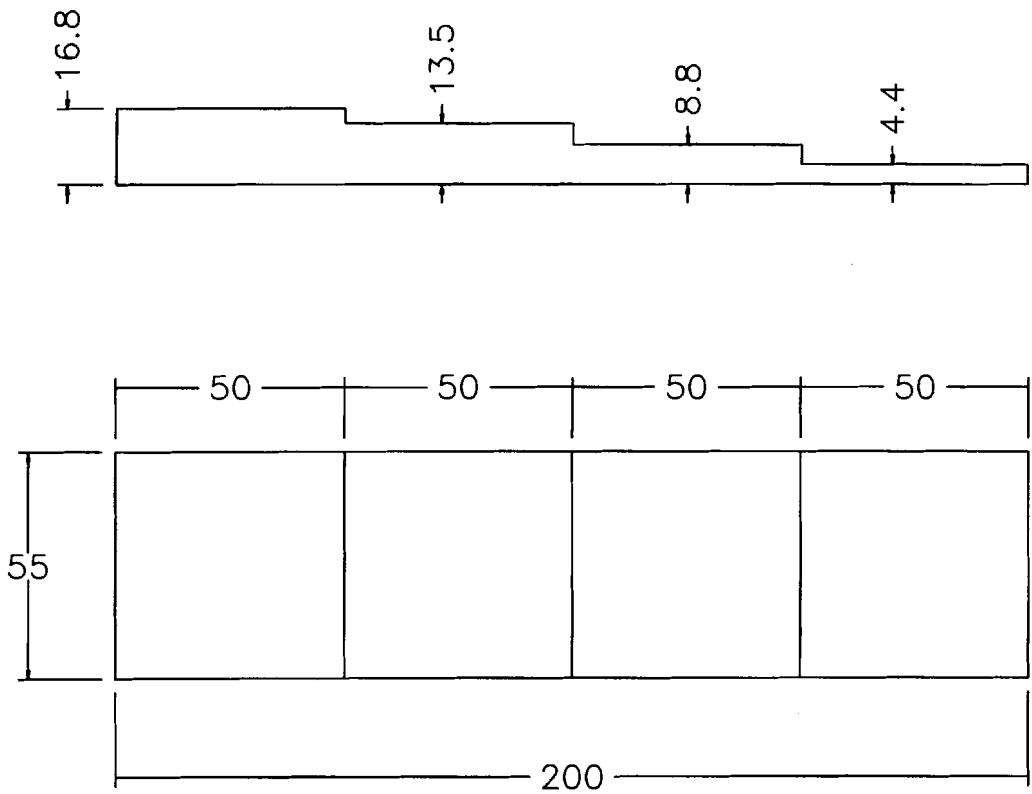
#### **2.1. OBTENCION DE LA MUESTRA DE ENSAYO PARA EL ANALISIS.**

La elaboración de la aleación se la ha realizado en el taller de fundición INTRAMET; los lingotes que se utilizaron fueron obtenidos a partir de chatarra de cobre y aluminio en alambre, se preparó una aleación cuyo porcentaje fue de 85 Cu - 4Fe - 11Al.

La probeta que se fundió tiene la forma escalonada (Fig. 3) con lo cual se obtuvieron diferentes características sonoras (velocidad de propagación, atenuación, etc.). Una vez obtenida la probeta no hubo necesidad de maquinarla, ya que el molde de hierro fundido donde se fundió la misma produjo una superficie lisa, para así tener un buen acople en el análisis ultrasónico.

Las pruebas del ensayo no destructivo se realizaron en las Instalaciones de SENDRE.





**Fig. 3**  
**DIMENSIONES DE LA PROBETA UTILIZADA EN EL**  
**ANALISIS EXPERIMENTAL (Medidas en mm)**  
**Esc. 1:1.66**

## 2.2. ENSAYOS PRELIMINARES.

### 2.2.1. DUREZA.

Para determinar la dureza de la muestra se empleó el ensayo Brinell, aplicando una carga de 3000 Kg. con un indentador esférico de 10 mm de diámetro. Los resultados obtenidos en la probeta de fundición se encuentran en la Tabla V.

**TABLA V**

**DUREZAS OBTENIDAS EN LA  
ALEACION C95400**

ESCALON	DIAMETRO PROMEDIO HUELLA (mm)	DUREZA	
		BHN	HRB
1	48	156	82
2	48	156	82
3	47	159	83
4	47	159	83

### 2.2.2. RESISTENCIA A LA TRACCION.

Después de la prueba de dureza, la prueba de tensión es la realizada más frecuente para medir las propiedades de ductilidad, resistencia de los materiales y consiste en someter a la pieza de forma y dimensiones

determinadas a un esfuerzo de tracción en dirección de su eje hasta romperla.

Para esta prueba se ha utilizado el equipo VERSATESTER 30 M, la probeta fue maquinada siguiendo las normas ASTM (Fig. 4); Se aplicaron cargas axiales de tensión, hasta llegar al punto de ruptura. La velocidad del ensayo fue 5 mm / min. Los resultados se encuentran en la Tabla X.

### **2.3. EQUIPOS UTILIZADO**

Para la realización de este trabajo se ha utilizado el Equipo KRAUTKRAMER USK - 6 cuyos datos técnicos están detallados en la Tabla VI. La figura 5 muestra todo el equipo ultrasónico y sus controles.

- **Transductores.**

Al realizar las diferentes pruebas se utilizó un transductor con las siguientes características :

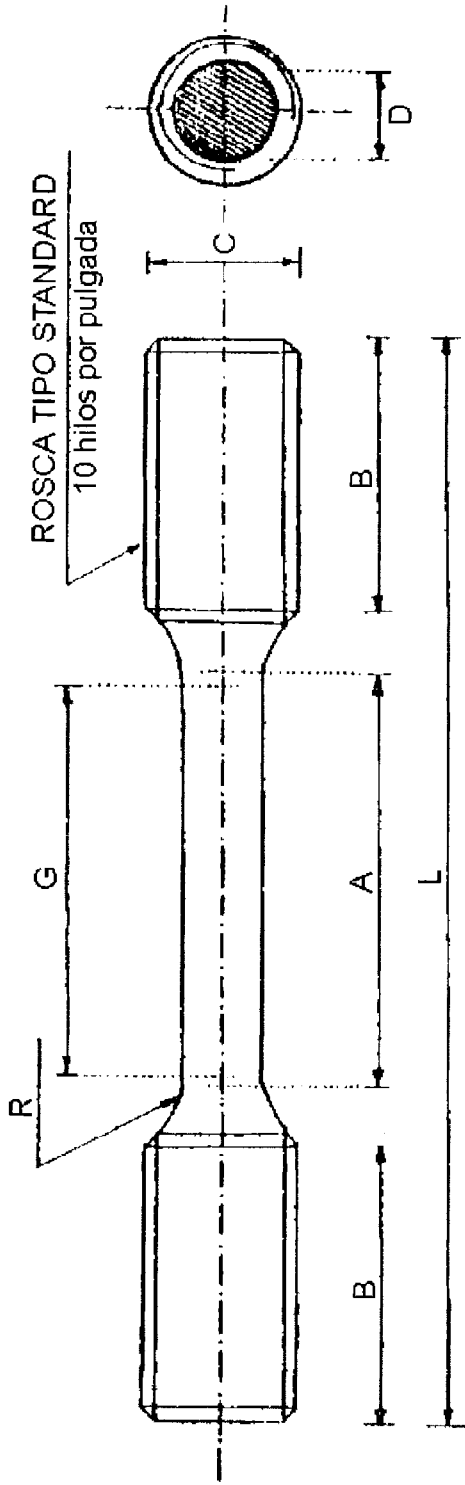
Marca: Harisonic Cr-0508-S

Frecuencia: 2.0 MHz

Dimensión: 0.5 plg Dia.

- **Acoplante**

Se utilizó un acoplante tipo gel con las siguientes características:



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.

Fig. 4  
 Probeta de Ensayo de tracción cilíndrica (Ref. 11)

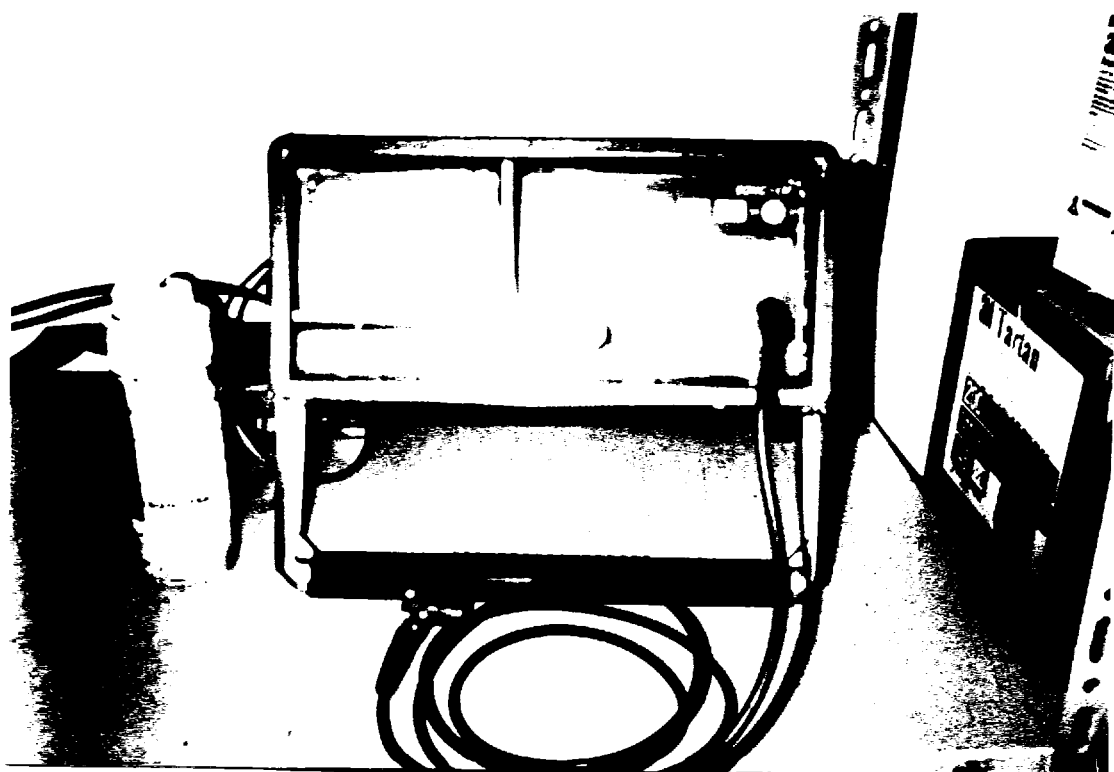


Fig. 5

EQUIPO ULTRASONICO Y SUS CONTROLES

**TABLA VI**  
**DATOS TECNICOS DEL EQUIPO KRAUTKRAMER USK-6**

GAMA DE FRECUENCIA	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 <+ - 1db, 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. y 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 <1%.
Monitor:	Monitor de un sólo canal, ccon 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.

Ultrasonic Couplant ( Ultragel II )

No inflamable, ni tóxico.

- **Bloque de calibración.**

Tanto para la calibración del equipo como para la calibración del sistema se utilizó el Bloque de calibración del Internacional Institute of Welding designado como Bloque VI (Fig. 6).

## **2.4. AJUSTE Y CALIBRACION DEL EQUIPO**

Con el fin de que la información que se obtiene mediante el ensayo ultrasónico sea comparable y repetitiva, se hace necesario calibrar y fijar las condiciones de funcionamiento y sensibilidad del equipo de ensayo que se emplea.

Como se sabe, el equipo de ensayo ultrasónico está compuesto por un número de componentes, cuyo comportamiento debe ser evaluado en su funcionamiento en conjunto. Al efectuar el ensayo se debe tener la seguridad de que el equipo utilizado (equipo, transductores y cables de interconexión) estén operando en condiciones de sensibilidad determinadas y reproducibles de tal manera que la información obtenida pueda ser directamente comparable.

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).

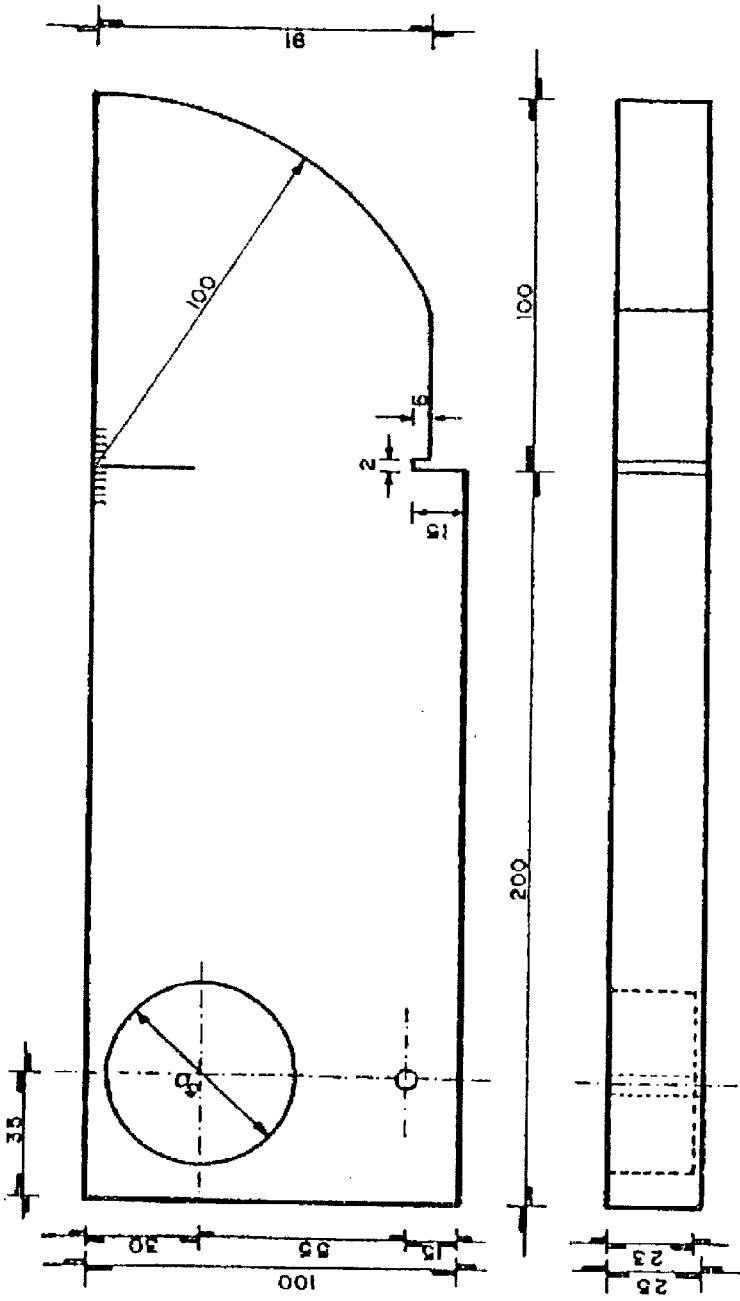


Fig. 6  
Bloque de referencia del Instituto Internacional de la Soldadura (VI)

Esc. 1:2



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

#### **2.4.1. CALIBRACION DE LA LINEALIDAD.**

##### **EVALUACION DE LA LINEALIDAD HORIZONTAL.**

Cuando los desplazamientos en sentido horizontal de los ecos en la pantalla es la misma que la correspondiente a los respectivos caminos que debe recorrer el haz ultrasónico en un medio transmisor uniforme, se dice que el equipo tiene linealidad horizontal.

La Norma INTA (Ref. 12) describe el procedimiento que se debe seguir para evaluar la linealidad horizontal del equipo, la cual se enuncia a continuación:

Se fija el rango de la escala horizontal en 100 mm y se apoya el transductor normal sobre el bloque patrón V1 en la posición de espesor correspondiente a 25 mm (Fig.7). La Fig. 8 muestra la representación del

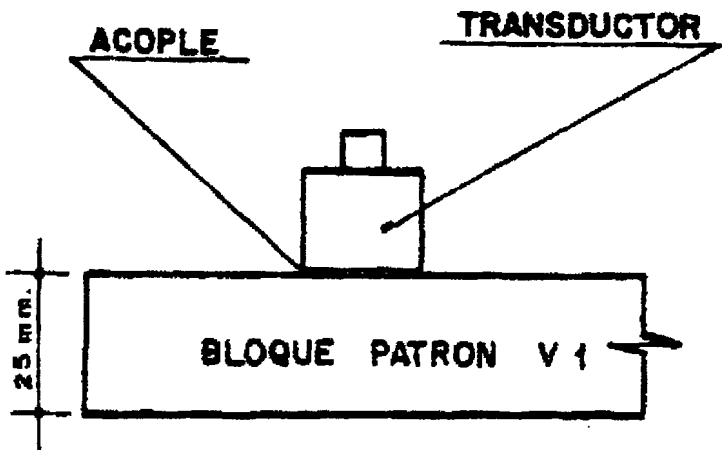


Fig. 7  
 Posición del transductor para la evaluación de la Linealidad  
 Esc. 1:1.5

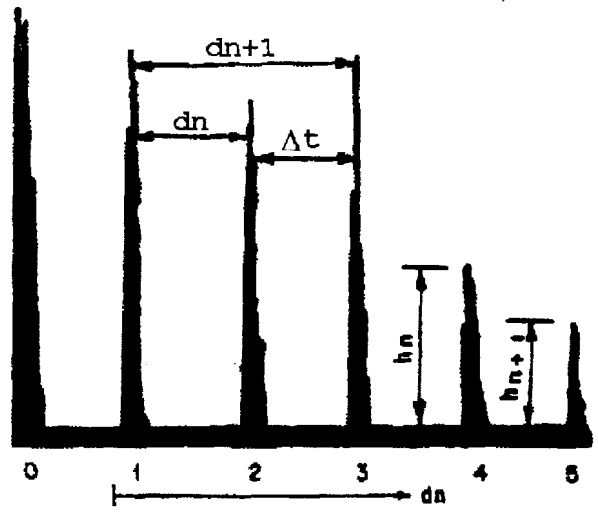


Fig. 8  
 Representación del oscilograma obtenido durante la  
 evaluación de la Linealidad. Se identifican las  
 señales usadas para la evaluación.

oscilograma obtenido durante la evaluación donde se observa la sucesión de ecos de fondo. Se procede luego a tomar las lecturas correspondientes a la distancia entre cada par de ecos sucesivos medidos desde el punto de arranque ( $\Delta t$ ), 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, haciendo que el primer eco alcance  $4/5$  de la altura de la pantalla. En la Tabla VII se presentan los resultados obtenidos en la evaluación.

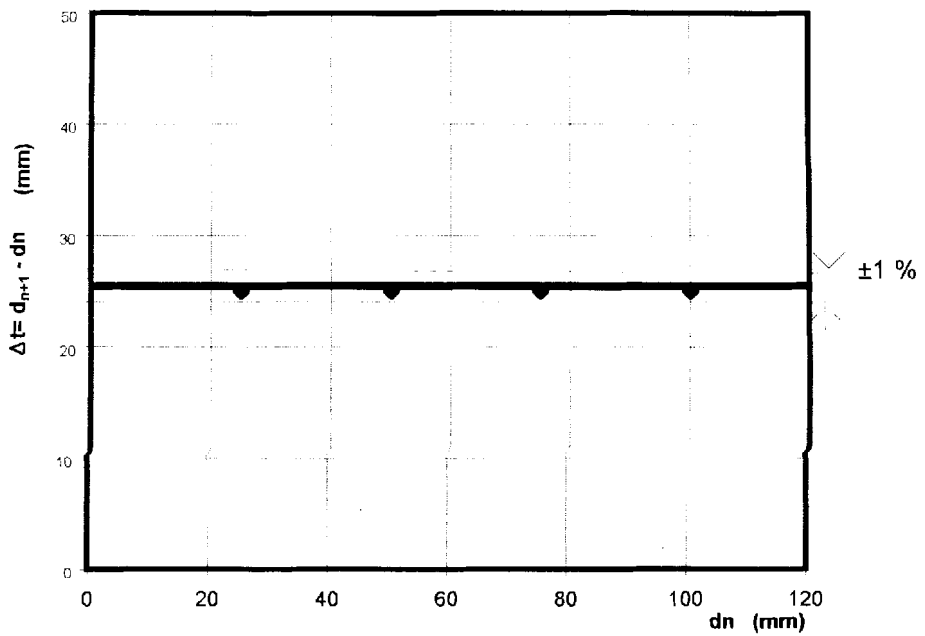
La escala se considera lineal cuando no existe diferencias entre las distancias de los distintos ecos; aún cuando exista una pequeña diferencia entre el pulso de entrada y el primer eco. La Fig. 9 muestra la evaluación de la linealidad horizontal del equipo de ensayo, donde se comprueba que la base de tiempo es totalmente lineal, lo que significa que la velocidad de barrido del pincel electrónico se mantiene constante a lo largo de su recorrido en la pantalla. La linealidad horizontal es condición necesaria para facilitar la ubicación de las discontinuidades.

#### **LINEALIDAD VERTICAL.**

Se dice que el equipo tiene linealidad vertical cuando dado un eco representado en la pantalla, al variar la ganancia mediante el control calibrado, la relación de amplitudes es la misma que la relación de ganancias correspondientes.

**TABLA VII**  
**VALORES OBTENIDOS PARA LA EVALUACION DE**  
**LA LINEALIDAD HORIZONTAL**

TRAMO	$\Delta T$ (mm)	$d_n$ (mm)	$d_{n+1}$ (mm)
1 - 2	25	25	50
2 - 3	25	50	75
3 - 4	25	75	100
4 - 5	25	100	125



**FIG. 9**  
**REPRESENTACION DE LA LINEALIDAD**  
**HORIZONTAL**  
**Curva  $\Delta t$  vs  $dn$  para el Equipo USK - 6**

La evaluación se realiza manteniendo el transductor normal en la posición correspondiente al ensayo anterior y utilizando el mismo oscilograma. Se lleva por pasos utilizando el mando de amplificación la altura del penúltimo eco, llamado  $h_n$ , hasta que llegue al 100% de la pantalla. Luego se lee la altura del último eco  $h_{n+1}$ , y se encuentra la relación de la altura (razón de respuesta =  $h_n / h_{n+1}$ ). Aumentando un paso la ganancia (2 db en el Krautkramer USK-6), se leen nuevamente las alturas de los ecos  $h_n$  y  $h_{n+1}$  y se encuentra la razón de respuesta. Este procedimiento se repite hasta que la altura del eco  $h_n$  llegue al 100 % de la altura pantalla.

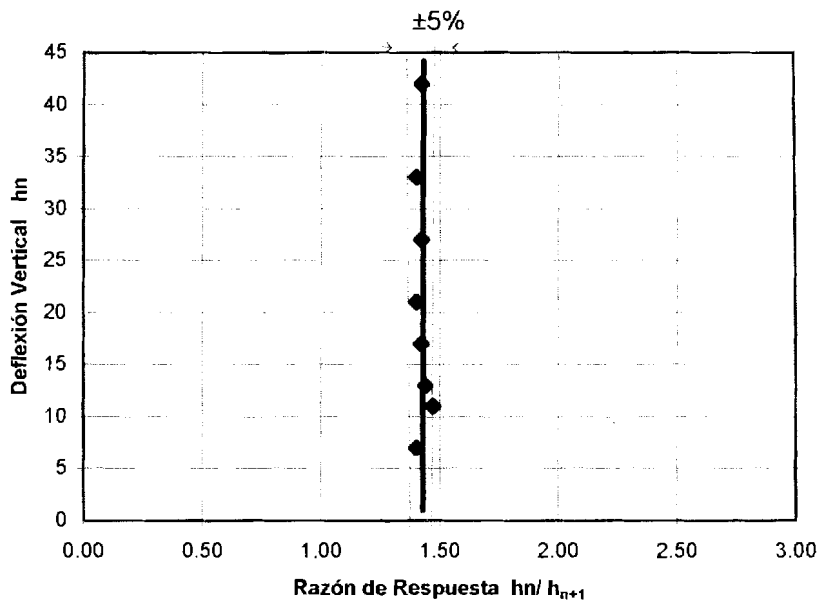
En la Tabla VIII se presentan los datos obtenidos en la evaluación, con cuyos valores se construyó la gráfica deflexión vertical ( $h_n$ ) vs. razón de respuesta ( $h_n/h_{n+1}$ ), la misma que se muestra en la Fig. 10, en donde se observa que la razón de respuesta de dos ecos sucesivos se mantiene constante, lo cual indica que el equipo de ensayo posee una buena linealidad vertical. La linealidad vertical es condición necesaria para poder establecer las magnitudes de distintas discontinuidades en función de la amplitud de los ecos y de los valores de ganancia correspondientes.

#### **2.4.2. CALIBRACION DE ATENUACION Y SENSIBILIDAD.**

##### **VERIFICACION DE LA SENSIBILIDAD DE TRABAJO.**

**TABLA VIII**  
**VALORES OBTENIDOS PARA LA EVALUACION DE**  
**LA LINEALIDAD VERTICAL**

<b>GANANCIA En dB</b>	<b>hn (mm)</b>	<b>hn+1 (mm)</b>	<b>hn / hn+1</b>
<b>2</b>	6	3	2.00
<b>4</b>	7	5	1.40
<b>6</b>	11	7.5	1.47
<b>8</b>	13	9	1.44
<b>10</b>	17	12	1.42
<b>12</b>	21	15	1.40
<b>14</b>	27	19	1.42
<b>16</b>	33	23.5	1.40
<b>18</b>	42	29.5	1.42



**FIG.10**  
**REPRESENTACION DE LA LINEALIDAD VERTICAL.**  
**Curva deflexión vertical vs Razón de respuesta**  
**para el equipo USK-6**



El procedimiento de ajuste depende de si se va a trabajar con alta o baja ganancia. La verificación se realiza con el fin de obtener datos de referencia que permitan comprobar si se mantiene o no la sensibilidad de trabajo.

- Para la regulación con alta ganancia se debe fijar el transductor en la posición 3 que se indica en la Fig. 11. Se hace coincidir el primer eco con 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.
- Para la verificación con baja ganancia se fija el transductor en la posición 4 indicada en la Fig. 11. Se desplaza el transductor sobre el bloque buscando la máxima altura de eco proveniente del agujero de 1.5 mm de diámetro.

### **VERIFICACION DEL PODER DE RESOLUCION**

Primero se coloca el transductor en la posición que se indica en la Fig. 12. En la pantalla se obtienen los ecos correspondientes a los espesores de 100 mm, la parte más ancha del bloque, el espesor de 85 mm, correspondiente a la ranura, y al espesor de 91 mm, que corresponde al rebaje. Se ajusta la altura del mayor de los ecos de manera que alcance los  $2/3$  de la altura de la pantalla.

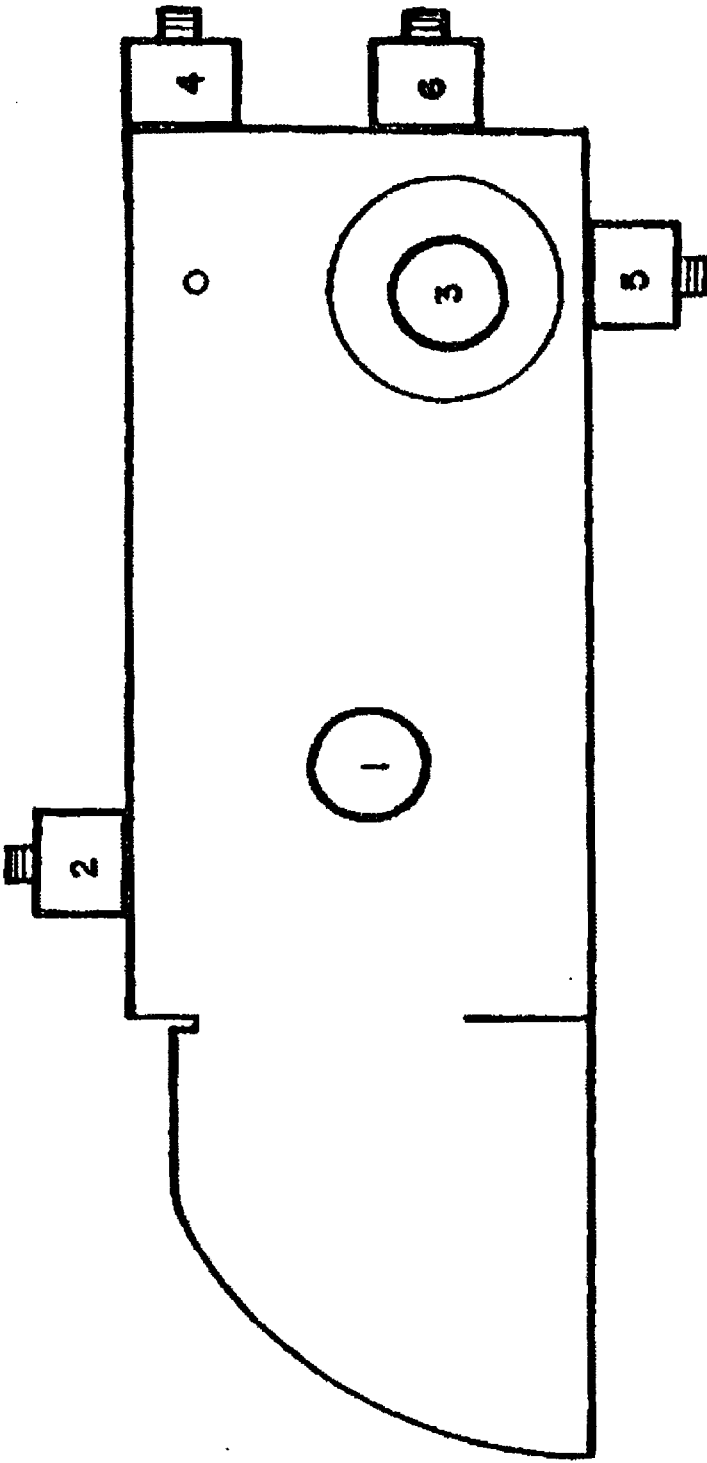


Fig. 11

Ubicación del transductor sobre el bloque VI  
usando ondas longitudinales

Las señales obtenidas se comparan con esquemas patrones que permitan calificar la resolución de un equipo de ultrasonidos. En la Fig. 13 se muestra el oscilograma de una buena resolución del equipo.

## **2.5. DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS POR ULTRASONIDOS.**

### **2.5.1. DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE PROPAGACION Y EL COEFICIENTE DE ATENUACION.**

El coeficiente de propagación ( $\lambda c$ ) se lo determina como el cociente entre el espesor real ( $e_r$ ) medido con un vernier y el espesor aparente ( $e_a$ ) determinado con el equipo ultrasónico previamente calibrado sobre el bloque VI. (Ref. 13).

$$\lambda c = e_r / e_a$$

Una vez obtenido el coeficiente de propagación se puede determinar la velocidad de propagación del sonido en materiales sólidos, a través de la siguiente fórmula:

$$V = \lambda c ( V \text{ acero} )$$

Siendo la velocidad del acero 5920 m/s. Los resultados se encuentran en la Tabla IX .

Biblioteca Central

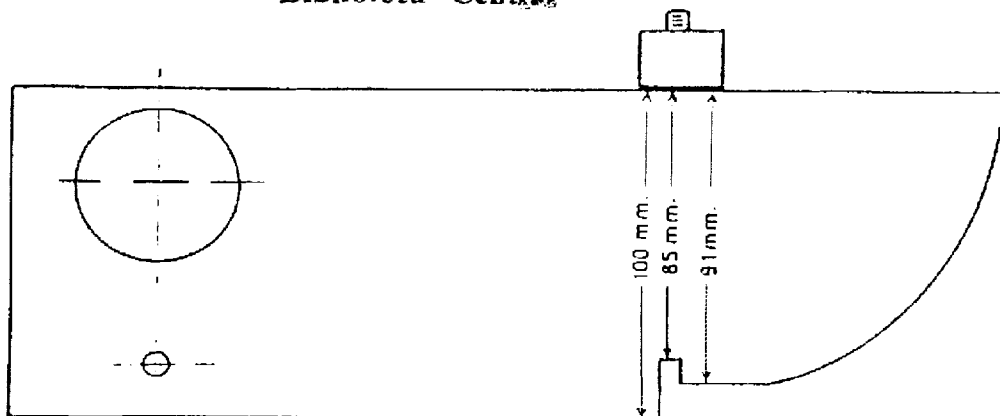


Fig. 12  
Posición del transductor en el bloque VI

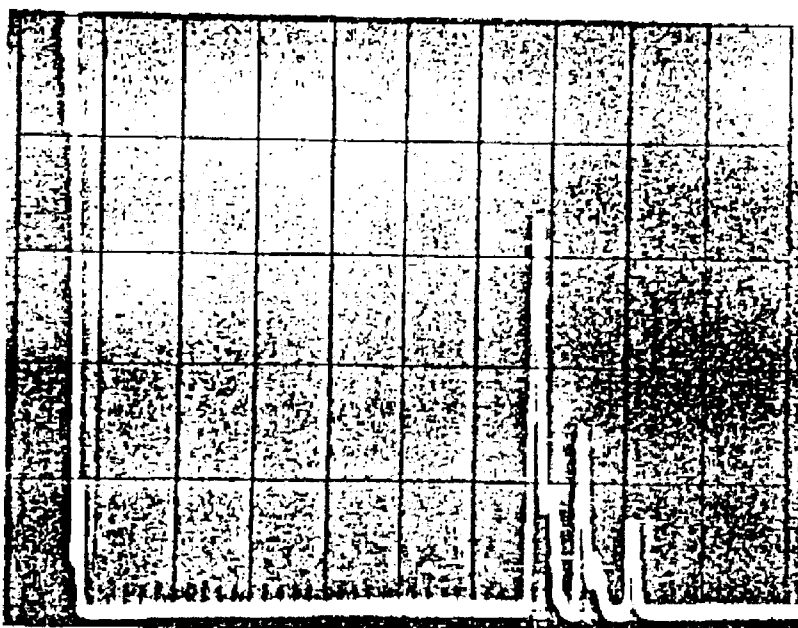


Fig. 13  
Oscilograma de una buena resolución del equipo

**TABLA IX**

**VALORES DEL ESPESOR APARENTE, COEF.  
DE PROPAGACION Y VEL. DE PROPAGACION  
DEL SONIDO EN EL BRONCE AL ALUMINIO  
C95400**

ESCALON	Lectura del Equipo $e_a$ (mm)	Lectura del Calibrador $e_r$ (mm)	Coefficiente de Propagación $\lambda c$	Velocidad de Propagación del Sonido m/s
1	20	16.8	0.84	4972.8
2	16	13.5	0.844	4996.5
3	10	8.8	0.88	5209.6
4	5	4.4	0.88	5209.6

Por otro lado se ha determinado el coeficiente de atenuación ( $\alpha$ ) por acoplamiento directo del transductor a la pieza, haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{H_1 - H_2 - 6}{2 e_r} \text{ dB / mm}$$

donde  $e_r$  es el espesor real de la muestra,  $H_1$  y  $H_2$  las intensidades en decibelios necesarias para llevar el primero y segundo eco de fondo a una altura de  $\frac{3}{4}$  de la pantalla\*. Los datos obtenidos se encuentran en la Tabla X.

## 2.5.2. MEDICION DE LA RESISTENCIA.

### • POR VELOCIDAD RELATIVA DEL SONIDO.

Para realizar esta prueba se debe tomar en consideración la diferencia de velocidad de propagación que experimenta un haz ultrasónico al atravesar una sección de fundición, respecto a una sección de acero y lo

\*Debido a que el coeficiente de atenuación ( $\alpha$ ) es función variable de la frecuencia utilizada y que para su determinación es necesaria la adopción de estrictas condiciones de trabajo, los resultados obtenidos no pueden considerarse del todo fiables en término absolutos y únicamente se mencionan a título informativo. (Ref. 13).

relaciona directamente con la resistencia a la tracción mediante la siguiente fórmula: (Ref. 14).

$$\sigma_B = (\lambda c - x) 100 \text{ Kg/mm}^2$$

Donde:

$\sigma_B$  = resistencia a la tracción por ultrasonidos.

$\lambda c$  = 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 propagación.

El factor  $X$  se lo determina por ensayo de tracción para lo cual se fabricaron probetas de la aleación para el ensayo según norma ASTM. Este factor permite calcular la resistencia a la tracción sin necesidad de efectuar otra vez el ensayo en otras probetas del mismo material.

El factor  $X$  obtenido fue de 0.33, con este valor y la ecuación (9) se pudo determinar la resistencia mecánica por ultrasonidos para cada uno de los espesores de la probeta. Los resultados se encuentran en la Tabla X.

### **2.5.3. DETERMINACION DE LAS CONSTANTES ELASTICAS:**

#### **MODULO DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTE DE POISSON.**

Utilizando el valor de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales fueron determinados el módulo de elasticidad E y el módulo de Poisson  $\mu$  a través de las siguientes fórmulas: (Ref. 13).

$$E = \frac{\rho C_t^2 (3 C_l^2 - 4 C_t^2)}{(C_l^2 - C_t^2)}$$

$$\mu = \frac{C_l^2 - 2 C_t^2}{2 (C_l^2 - C_t^2)}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad

$\mu$  = Módulo de Poisson

$C_t$  = Velocidad transversal

$C_l$  = Velocidad longitudinal

$\rho$  = Densidad

Los valores de las velocidades longitudinales y transversales en la fundición se la obtuvo a través de la velocidad longitudinal y transversal en el acero (bloque VI) y utilizando las siguientes fórmulas:



$$C_L = \frac{d_k n_l t_l v_k}{d_1 n_k t_k}$$

$$C_t = \frac{d_k n_l t_l v_s}{d_1 n_k t_k}$$

Donde:

$C_L$  = Velocidad longitudinal (m/s)

$C_t$  = Velocidad transversal (m/s)

$v_k$  = Velocidad longitudinal en el bloque VI

$v_s$  = Velocidad transversal en el bloque VI

$d_k$  = Distancia del primero al último eco obtenido en el bloque VI

$n_k$  = Número de ecos obtenidos en el bloque VI.

$t_k$  = Espesor del bloque VI

$d_1$  = Distancia del primero al último eco obtenido en la probeta de fundición

$n_l$  = Número de ecos obtenido en la probeta de fundición

$t_l$  = Espesor de la probeta de fundición

En la Tabla XI se encuentran los datos obtenidos en esta prueba.

TABLA X

**VALORES DE LA ATENUACION Y RESISTENCIA  
A LA TRACCION EN LA ALEACION C95400**

ESCALON	Coefficiente de Atenuación $\propto$ db/mm	$\sigma$ Kg/mm <sup>2</sup> Ultrasonico X = 0.33	$\sigma$ Kg/mm <sup>2</sup> Por tracción
1	-0.29	51	51
2	-0.32	51.4	52
3	-0.42	55	52.5
4	-0.95	55	53

TABLA XI

**VALORES DE VELOCIDADES LONGITUDINAL Y  
TRANSVERSAL, DENSIDAD Y MODULOS DE YOUNG  
Y POISSON EN LA ALEACION C95400**

ESCALON	$C_L$ 10 <sup>3</sup> (m/s)	$C_t$ 10 <sup>3</sup> (m/s)	$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	E GPa	$\mu$
1	4.34	2.38	7.45	108.45	0.29
2	4.36	2.39	7.45	109.38	0.295
3	4.55	2.49	7.45	118.82	0.297
4	4.55	2.49	7.45	118.82	0.297

## **CAPITULO III**

### **ANALISIS DE RESULTADOS**

El objetivo principal de la experimentación de la presente tesis fué el establecer un método eficaz y rápido en planta, para determinar propiedades mecánicas (módulo de elasticidad) de los bronce por medio de ultrasonido.

El módulo de elasticidad es una propiedad muy útil en la Ingeniería ya que nos indica la rigidez que poseen los materiales. Esta propiedad se representa mediante la pendiente de la curva esfuerzo-deformación para un material dado.

Es por esto que una vez determinado el módulo de elasticidad por medio de ultrasonido estaremos en capacidad de distinguir cualquier tipo de material o aleación y por consiguiente obtener información de otras propiedades mecánicas.

Se ha comenzado por obtener una probeta en forma escalonada fundida en las instalaciones de INTRAMET, cuya composición esta de acuerdo a la norma UNS C95400.

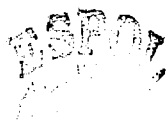
Al obtener la probeta se ha podido observar que usando un molde de hierro fundido no hubo necesidad de maquinarse la pieza y así obtener una superficie lisa para poder ensayarla por ultrasonido.

Antes de realizar las pruebas por ultrasonido, se procedió a la calibración y ajuste del equipo según el procedimiento explicado en el literal 2.4, una vez realizado esto se

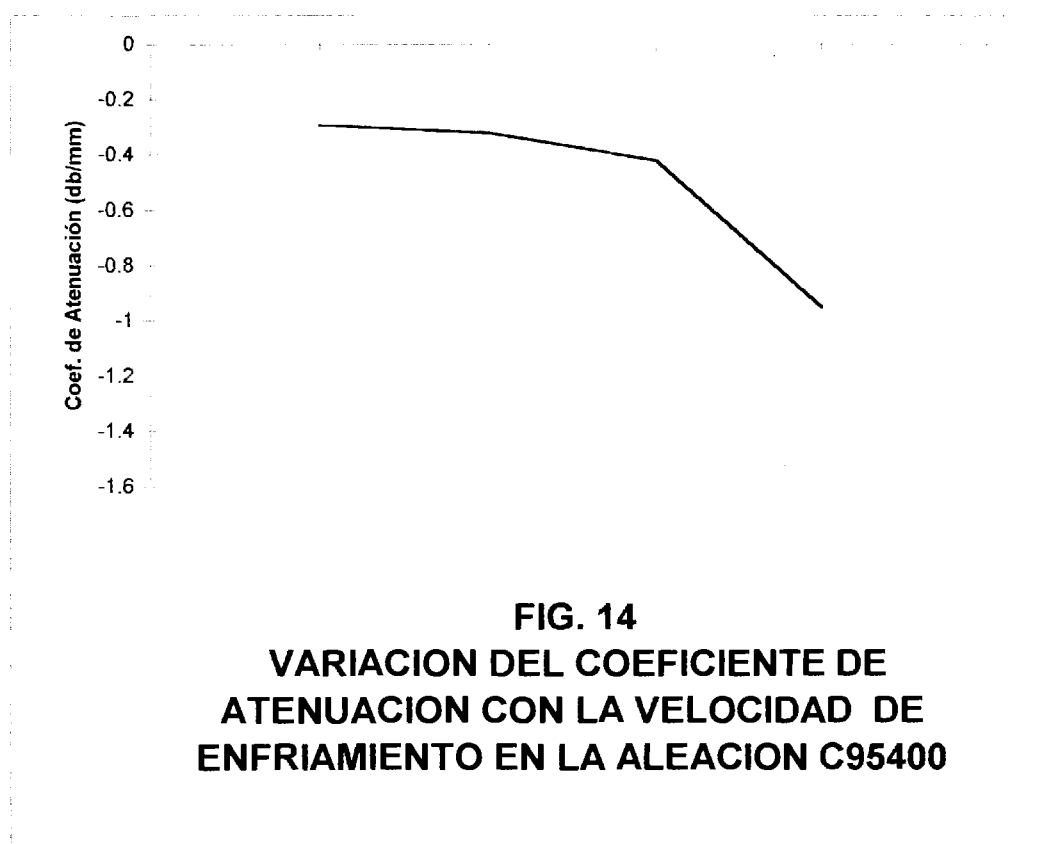
procedió a la lectura del espesor del material (espesor aparente) para así calcular el coeficiente de propagación y su velocidad del sonido através del material (Ec. en la pág. 59), el resultado nos indica que el sonido atraviesa el material bronce al aluminio a una velocidad entre 4972 m/s a 5209 m/s.

También se tomaron los valores de las intensidades en decibelios del primero y segundo eco de fondo a  $\frac{3}{4}$  de pantalla, para determinar la atenuación en el material (Ec. en la pág. 62), en la Tabla X se indican los valores del coeficiente de atenuación en cada uno de los escalones, aquí se observa que la atenuación aumenta con el espesor atravesado; es decir, conforme disminuye la velocidad de enfriamiento como podemos darnos cuenta en la Figura 14. Cabe señalar que al pasar la señal con el transductor del bloque patrón ( $H_1$ ) a la probeta de bronce al aluminio, la señal se pierde, esto se debe a que el material absorbe la energía ultrasónica al viajar a través del material. En otras palabras el material amortigua mucho el sonido y al hacerlo nos indica que el tamaño de grano es grande en la aleación. Para hallar la señal en la probeta ( $H_2$ ) se debió elevar la ganancia del equipo haciendo que el tiempo de recorrido sea mayor en las aleaciones de bronce que en el acero, por esta razón el valor de la atenuación tiene un valor negativo.

Por medio de la ecuación en la pág. 63 encontramos la resistencia mecánica a través de ultrasonido, sus valores se encuentran en la Tabla X y se observa que los mayores valores de resistencia a la tracción corresponden a los menores espesores de los escalones de la probeta en donde la velocidad de enfriamiento es



### Biblioteca General



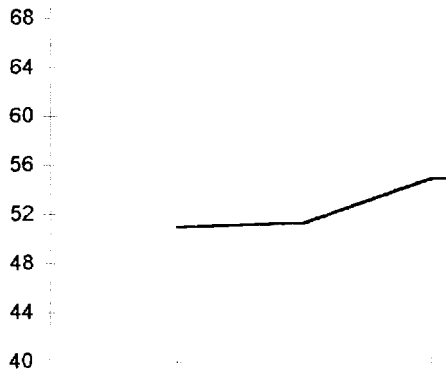
**FIG. 14**  
**VARIACION DEL COEFICIENTE DE**  
**ATENUACION CON LA VELOCIDAD DE**  
**ENFRIAMIENTO EN LA ALEACION C95400**

mayor ( Fig. 15 ), además los valores que se acercan a la resistencia teórica ( $51.5 \text{ Kgf/ mm}^2$ ) se encuentran en los espesores de 13.5 y 16.8 mm. En espesores pequeños existe una dispersión mínima los que no serán tomados en cuenta; por lo tanto podemos concluir que la resistencia a la tracción disminuye conforme lo hace la velocidad de enfriamiento y por ende al aumentar la atenuación.

Para establecer el análisis de resultados principal del presente trabajo nos vamos a referir a la determinación de las constantes elásticas: Módulo de elasticidad (  $E$  ) y coeficiente de Poisson (  $\mu$  ). Estas constantes fueron determinadas matemáticamente utilizando la densidad del material, las velocidades longitudinales y transversales ( Ecuaciones en las páginas 64 y 65 ), estos valores son indicados en la Tabla XI.

En la figura 16 se muestra la variación de la velocidad longitudinal en función de la velocidad de enfriamiento dada por los diferentes escalones de la probeta; Se observa que en general, la velocidad disminuye conforme decrece la velocidad de enfriamiento, pero esta disminución es casi constante, la cual está alrededor de  $4.34$  a  $4.55 \times 10^3$  m/s. Siendo el módulo de elasticidad dependiente de las velocidades del ultrasonido, se ha determinado que el módulo de Young se incrementa en un rango muy pequeño conforme lo hacen las velocidades, pero sólo en los espesores de 13.5 y 16.8 mm los valores son cercanos al valor teórico (110 GPa). En la Figura 17 se muestra como el módulo de elasticidad disminuye cuando aumenta la velocidad de enfriamiento, es decir; al disminuir los

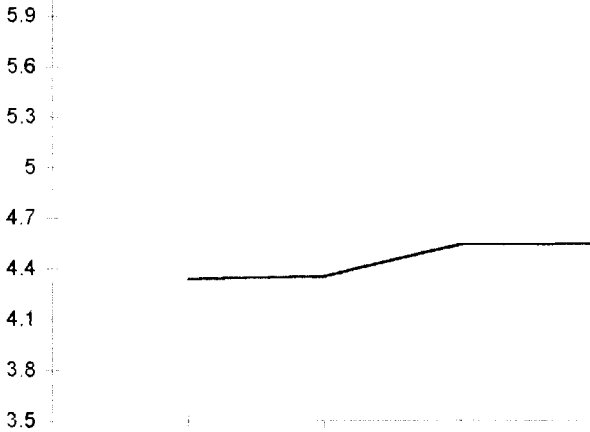
Resistencia a la Tracción (Kgf/mm<sup>2</sup>)



**FIG.15**  
**VARIACION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION**  
**OBTENIDA POR ULTRASONIDO CON LA VELOCIDAD DE**  
**ENFRIAMIENTO EN LA ALEACION C95400**

1 2 3 4

VELOCIDAD LONGITUDINAL (m/s) x 10<sup>3</sup>



**FIG. 16**  
**VARIACION DE LA VELOCIDAD LONGITUDINAL DEL**  
**ULTRASONIDO CON LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO**

Módulo de Elasticidad GPa

135  
130  
125  
120  
115  
110  
105  
100  
95  
90

**FIG. 17**  
**VARIACION DEL MODULO DE**  
**ELASTICIDAD OBTENIDA POR**  
**ULTRASONIDO CON LOS DIFERENTES**  
**ESPEORES DE LA ALEACION C95400**

1

2

3

4



espesores de la probeta. Con respecto al coeficiente de Poisson se ha determinado que es prácticamente constante en los diferentes escalones de la probeta.

Al final de la investigación se obtuvieron las propiedades mecánicas por ultrasonido en el bronce al aluminio C95400, pero cabe acotar que el método no puede determinar valores en aleaciones con una variación muy pequeña entre sus componentes. Es este el caso de las aleaciones C95300 y C95500 cuyo módulo de elasticidad es igual al Bronce C95400, por lo tanto no podría diferenciárselos por el módulo de elasticidad sino por la resistencia a la tracción.

Pero ya no cumpliría con el objetivo principal de obtener un método rápido, ya que el valor de la resistencia a la tracción depende de un factor  $X$  que se lo obtiene en el ensayo de tracción.

Por esta razón se tomaron aleaciones con módulos de elasticidad mayores y menores a 110 GPa para realizar las mismas pruebas con diferentes metales base. Como el procedimiento es rápido (aproximadamente 5 minutos) para hallar el módulo de elasticidad, se procedió a obtener las probetas fundidas de dos materiales: el 771 (Aleación de Zinc) y ZA27 (Aleación de aluminio) obteniéndose los resultados expresados en la Tabla XII.

Luego se tomaron los datos para determinar la atenuación, el coeficiente de propagación y la velocidad de propagación del sonido cuyos valores se encuentran en la Tabla XIII.

TABLA XII

**VALORES DE VELOCIDADES LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL, DENSIDAD Y MODULOS DE YOUNG**

**Aleación de Aluminio ( ZA27 )**

ESCALON	$C_L$ $10^3$ (m/s)	$C_t$ $10^3$ (m/s)	$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	E GPa
1	6.15	3.37	5.01	146.27
2	6.2	3.4	5.01	148.8
3	6.45	3.53	5.01	160.5
4	6.55	3.59	5.01	165.2
<b>Aleación de Zinc ( 771 )</b>				
1	5.8	3.17	2.82	72.94
2	5.88	3.22	2.82	75.19
3	5.9	3.23	2.82	75.67
4	5.97	3.27	2.82	77.12

**Biblioteca Central**

**TABLA XIII**

**VALORES DEL COEF. DE PROPAGACION,  
ATENUACION Y DE LA VEL. DE PROPAGACION  
DEL SONIDO EN DOS DIFERENTES ALEACIONES**

**Aleación de Aluminio ( ZA27 )**

ESCALON	Lectura del Equipo $e_a$ (mm)	Lectura del Calibrador $e_c$ (mm)	Coefficiente de Propagación $\lambda_c$	Coefficiente de Atenuación $\alpha$ db/mm	Velocidad de Propagación del Sonido m/s
1	29	23.76	0.819	-0.555	4850.2
2	21	17.5	0.833	-0.674	4931.4
3	15	12.7	0.846	-0.685	5008.32
4	7.2	6.23	0.865	-1.219	5268.8

**Aleación de Zinc ( 771 )**

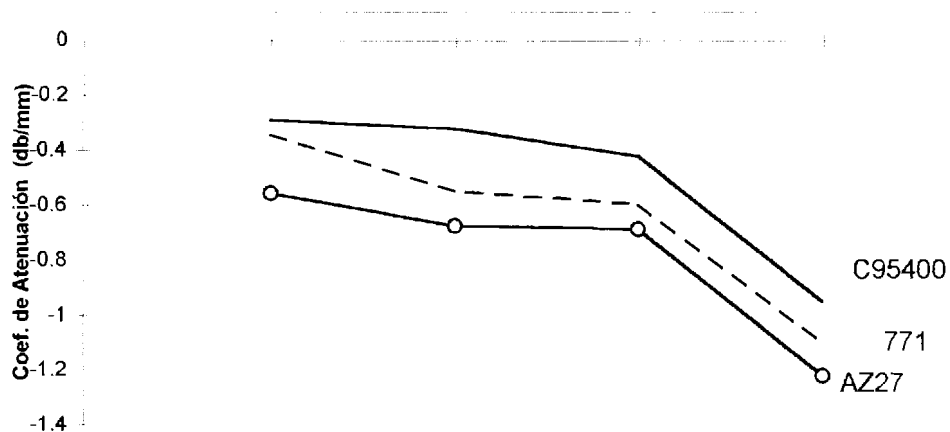
1	23.5	23.76	1.011	-0.341	5985.1
2	17	17.5	1.029	-0.548	6091.68
3	12	12.7	1.058	-0.685	6263.4
4	5.8	6.23	1.074	-1.461	6358.1

En la Figura 18 se representa la variación de la atenuación en cada una de las aleaciones a diferentes tamaño de espesor y se puede observar que el Bronce al aluminio tiene mayor atenuación que las aleaciones de aluminio y zinc; a su vez la aleación de aluminio posee mayor atenuación que la aleación de zinc, lo cual indica que la aleación 771 posee un tamaño de grano más fino que las otras aleaciones. Otra forma de confirmar que la aleación 771 tiene grano fino en su estructura es al determinar el espesor aparente, ya que el valor que se obtiene es menor al espesor real de la probeta y por ende la onda atraviesa más rápido en el material (entre 5985 y 6358 m/s).

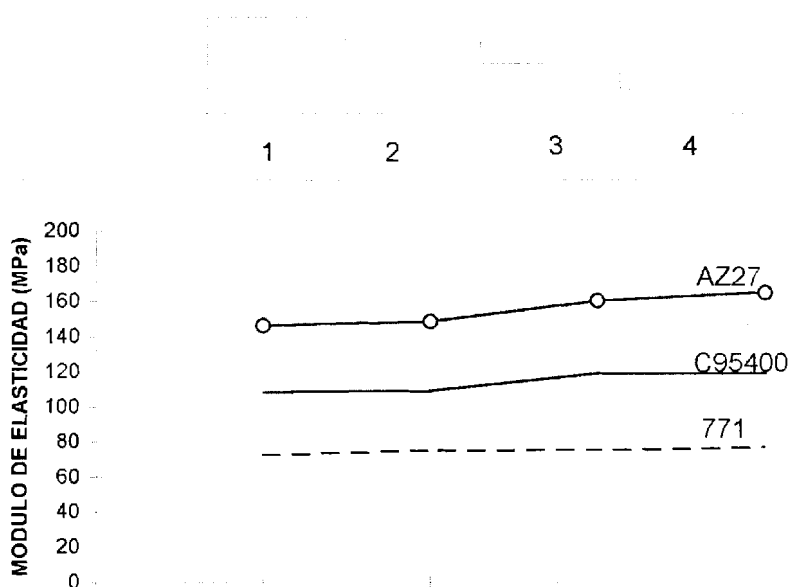
Se observa en la Tabla XII que el módulo de elasticidad más cercano al valor teórico se encuentra en el espesor de 23.73 mm y al disminuir el espesor el módulo de elasticidad aumenta.

En la Figura 19 se comparan los módulos de elasticidad de las tres probetas, nos podemos dar cuenta que el módulo aumenta conforme disminuye el espesor es decir conforme aumenta la velocidad de enfriamiento, en conclusión el método de ultrasonido si puede determinar el módulo de elasticidad en diferentes aleaciones con distintos metal base en forma rápida.

En la Tabla XIV se encuentra los valores teóricos de las propiedades mecánicas de las aleaciones de zinc ( 771 ) y de la aleación de aluminio ( ZA27 ).



**FIG.18**  
**VARIACION DEL COEFICIENTE DE**  
**ATENUACION EN LAS DIFERENTES**  
**ALEACIONES VS. LA VELOCIDAD DE**  
**ENFRIAMIENTO**



**FIG. 19**  
**VARIACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD**  
**VS. LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO, EN**  
**LAS DIFERENTES ALEACIONES**



**Biblioteca Central**

**TABLA XIV**

**PROPIEDADES MECANICAS DE LA ALEACION  
DE ZINC (771) Y DE LA ALEACION DE ALUMINIO  
( Zn27Al ) (Ref. 3)**

Aleación	Dureza	Resistencia a la Tracción		Resistencia a la Fluencia		Módulo Elástico
	HRB	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	Gpa
771	120	48	330	45	310	71
Zn27Al	110 120	58 64	400 440	53	365	145

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

1. La aplicación del método por ultrasonido nos permite determinar las características mecánicas de la aleación Bronce al Aluminio C95400 en forma rápida (aprox. cinco minutos luego de haber calibrado el equipo).
2. Al aplicar el ensayo por ultrasonido no podemos diferenciar la clasificación UNS para Bronces al Aluminio cuando existen pequeñas variaciones de elementos aleantes (entre 81 y 88 % de Cu), pero si se puede indicar el tipo general de aleación con la cual estamos trabajando.
3. Un resultado práctico lo constituye poder diferenciar aleaciones con un rango amplio de módulo de elasticidad.
4. Cuando se ensayan probetas con espesores comprendidos entre 10 a 15 mm se obtienen mejores resultados, logrando obtener una mayor confiabilidad del método



**Biblioteca Nacional**

## **RECOMENDACIONES.**

1. Se recomienda obtener las probetas fundidas de bronce al aluminio en moldes metálicos para tener una superficie lisa, libre de rugosidades y lograr realizar las pruebas por ultrasonido
2. Para poder diferenciar los diversos tipos de bronce al aluminio se recomienda tomar como patrón de control de propiedades a la resistencia a la tracción y no al módulo de elasticidad.
3. Se recomienda a los talleres de fundición el uso del método de Ultrasonido para la determinación de las propiedades de los Bronces al Aluminio sin omitir el análisis químico como ensayo de verificación.



## BIBLIOGRAFIA.

1. LASHERAS, José María. Materiales Industriales, Los Bronces, capítulo XLV, 662-664 pp.
  2. CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES DE LA FONDERIE, Atlas Metallographique del Alliages Cuivreux, Paris, 1975.
  3. METAL HANDBOOK, Selection and Aplication Of Copper And Copper Alloy Castings, Vol. 2, USA, 1989.
  4. METAL HANDBOOK, Stainless Steels, Tool Material and Purpose Metal, Vol. 3, USA, 1972.
  5. HIGGINS, R. A, Applied Physical Metallurgy, Robert Kriesen Publishing Company, 1993, 404-409 pp.
  6. BIEDERMANN, A. y HASSEKIEFF, L.M. Fundición de Metales No Féreos, Horno Eléctrico y Ensayo de los Metales, segunda edición, 1955, Pag. 70.
  7. CARAHUANA G., F. González Carpenter y J.J. Regidor, Mejoras en las Características Mecánicas de los Cupro-Aluminios Bifasicos. 127 - 136 pp.
  8. BAEZ, Juan N. Ensayos ultrasónicos de materiales, Comisión Nacional de Energía Atómica, 1976.
  9. INTA, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Introducción a los Métodos de END de Control de la Calidad de los Materiales, tercera edición.
  10. ORTIZ, Homero. y SERRANO Omar., Ensayo No Destructivos, ESPOL, FIM, 1985, 130 - 176 pp.
-

11. ASME, The American Society of Mechanical Engineers, Sec. IX, 1992.
  12. NORMA INTA 11 04 22 - 12 04 22 - 13 04 22. Recomendaciones para el Ensayo por Ultrasonidos de Materiales Metálicos por el Método de Contacto, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas, Madrid, Enero 1981.
  13. 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.
  14. SANTIAGO, Alfredo E., Determinación de la resistencia mecánica con métodos ultrasónicos en fundiciones grises, I Conferencia Regional sobre Ensayos no destructivos, Buenos Aires, Argentina, 1979.
  15. METAL HANDBOOK, Nondestructive inspection and analysis control, Vol. 11, 8ava. edition.
  16. ORDOÑEZ, Carlos. Aplicaciones de Técnicas de Ultrasonidos en Uniones Soldadas de Aceros Estructurales, Tesis de la Facultad de Ingeniería Mecánica, ESPOL, 1983.
  17. BENAVIDES, Inés R. Determinación de las Propiedades Mecánicas de la Fundición Gris por el Método de Ultrasonidos, Tesis de la Facultad de Ingeniería Mecánica, ESPOL, 1994.
-