

24.7



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

DISEÑO Y FABRICACION DE PATRONES PARA  
LA INSPECCION ULTRASONICA DE PIEZAS DE  
FUNDICION DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A

SERGIO GARCIA GALAN



MEXICO, D. F.

**TESIS CON  
FALLA DE CRISIS**

1989.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INDICE

RESUMEN.....	1
I. INTRODUCCION.....	4
II. REVISION BIBLIOGRAFICA.....	11
II.1    DEFINICION DE CONCEPTOS TECNICOS GENERALES.....	12
II.2    GENERACION DE LAS ONDAS ULTRASONICAS.....	20
II.3    MODOS O TIPOS DE ONDAS.....	26
II.4    TRANSDUCTORES.....	34
II.5    CARACTERISTICAS DEL HAZ.....	46
II.6    ATENUACION DEL HAZ ULTRASONICO.....	50
II.7    BLOQUES DE CALIBRACION.....	55
II.8    CRITERIOS Y TECNICAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES.....	66
II.9    METODOS DE AJUSTE DE LA SENSIBILIDAD.....	70
III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	75
III.1    FABRICACION DEL PATRON.....	76
III.2    CALIBRACION DEL EQUIPO ULTRASONICO.....	84
III.2.1    CORRECCION DISTANCIA-AMPLITUD.....	84
III.2.2    CALIBRACION AREA-AMPLITUD.....	86
III.2.3    CALIBRACION MEDIANTE LA REFLEXION DE LA PARED POSTERIOR.....	90

III.3	VERIFICACION DEL PATRON.....	92
III.4	APLICABILIDAD DEL PATRON.....	96
IV.	RESULTADOS.....	100
V.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	120
VI.	CONCLUSIONES.....	127
VII.	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS POSTERIORES.....	131
	APENDICE.....	133
	BIBLIOGRAFIA.....	140

## RESUMEN

Para el presente trabajo se realizó una revisión bibliográfica tanto de los conceptos básicos en los que se apoya la técnica de inspección por ultrasonido, como las normas internacionales que rigen este tipo de ensayos; en segundo lugar se procedió a fabricar una pieza de aluminio puro con refinador de grano el cual se pudiera utilizar como un patrón de tipo secundario en la inspección de piezas fundidas de aluminio y sus aleaciones.

En la fabricación de este patrón se siguieron una serie de pasos, los cuales incluyen el diseño de la pieza (de acuerdo con los requerimientos de las normas A.S.T.M.), fabricación del modelo en madera, se moldeó en arena para vaciar la pieza de aluminio, se rectificó la pieza en el cepillo mecánico y en la fresadora y por último se probó con el equipo ultrasónico.

Para realizar las pruebas con el equipo se utilizó una serie de bloques, fabricados con diferentes elementos de aleación y en diferentes porcentajes en peso, pero, todos los bloques fueron base aluminio, además de utilizar unas piezas de aluminio comercial con las que se contaba para comprobar la aplicabilidad del patrón; al estar realizando estas pruebas se encontró que la pieza fabricada presentaba una atenuación muy grande, por lo cual no se pudo utilizar en la evaluación de pequeñas discontinuidades (tamaños de porosidades, inclusiones,

microrechupes, etc.), aunque tratándose de macrorechupes, contracciones grandes y medición de espesores los resultados obtenidos con el patrón fabricado si fueron bien evaluados, es decir, el patrón fabricado si se puede utilizar en forma cuantitativa en discontinuidades grandes y sólo en forma cualitativa para discontinuidades muy pequeñas.

## CAPITULO I

4

## INTRODUCCION



En la fabricación de componentes, equipos e instalaciones como son: tornillos, partes automotrices, reactores químicos, gasoductos, cascos de barcos, partes de aviones, etc. es necesario que estos sean sometidos a pruebas e inspecciones; las cuales pueden ser destructivas o no destructivas.

El objetivo de las pruebas destructivas es determinar cuantitativamente el valor de ciertas propiedades de los materiales como es la resistencia mecánica, etc. La ejecución de este tipo de pruebas involucra la destrucción de la probeta o pieza empleada en la determinación correspondiente.

Las pruebas no destructivas son la aplicación de métodos físicos indirectos que tienen la finalidad de verificar la sanidad de las piezas examinadas, es decir, no buscan determinar las propiedades de las piezas, sino comprobar la homogeneidad y continuidad de éstas.

Algunas de las pruebas no destructivas son:

- a) Inspección Visual
- b) Líquidos Penetrantes
- c) Partículas Magnéticas
- d) Radiografía
- e) Ultrasonido
- f) Electromagnetismo (Corrientes de Eddy)

- g) Detección de Fugas
- h) Radiografía Neutrónica
- i) Emisión Acústica

El origen de la técnica de Inspección Ultrasónica se remonta al conocido ensayo de percusión de la muestra con un martillo y la percepción del sonido emitido. Por muchos años fue práctica común observar al empleado del ferrocarril golpeando las ruedas de los vagones con un ligero martillo, con el fin de encontrar discontinuidades en las mismas.

Sin embargo los ensayos de sonoridad son muy simples y poco sensibles para la detección de discontinuidades. Con estos antecedentes en 1924, el investigador ruso Sokolov detectó la presencia de discontinuidades midiendo la caída de la intensidad acústica en un material.

En 1930 fue reconocido el uso de la energía ultrasónica en Ensayos No Destructivos. Investigadores rusos y alemanes desarrollaron el método de Inspección Ultrasónica con el cual se pueden detectar discontinuidades, pero una de las limitaciones era que tanto la superficie frontal como la posterior tenían que ser accesibles.

En 1940 el Dr. Floyd A. Firestone desarrolló el primer

detector de discontinuidades del tipo pulso-eco. el cual requiere acceso por un solo lado.

Los avances en instrumentación y tecnología electrónica, han proporcionado los equipos necesarios para hacer posible el desarrollo de la Inspección Ultrasonica como ahora se conoce, es decir, un equipo de inspección rápido y confiable.

El ultrasonido es una onda acústica de naturaleza igual a las ondas sónicas, la diferencia radica en que el rango de frecuencias se encuentra por encima de la zona audible. Por los fenómenos que provocan durante su propagación en los sólidos, líquidos y gases, han dado lugar a numerosas aplicaciones técnicas y científicas como son: en medicina, en la ciencia e investigación, en medicina veterinaria, en la navegación y pesca y en la industria metalúrgica.

A continuación detallaremos un poco más su aplicación en la industria metalúrgica, donde se utiliza principalmente para control de calidad en productos fundidos, forjados, laminados y uniones soldadas.

Dentro de estas aplicaciones se pueden mencionar:

#### 1.- Detección de discontinuidades superficiales

2.- Detección de discontinuidades sub-superficiales e internas, como son: poros, grietas, rechupes, laminaciones, inclusiones, soldaduras, traslapes, reventadas, fragilización por hidrogeno, discontinuidades en soldadura, etc.

3.- Medición de espesores de pared

4.- Determinaciones de: tamaño de grano, tratamiento térmico, constantes elásticas, mediciones de tensión, estudios de estructura, mediciones de dureza, etc.

El éxito de la examinación ultrasónica depende de la adecuación del sistema utilizado al tipo de examinación a realizar y del adiestramiento y experiencia del operador. Si cualquiera de estos requisitos no se cumple, existe una alta probabilidad de cometer grandes errores.

Las ventajas principales de la examinación ultrasónica, comparada con los otros métodos de examinación no destructiva de partes metálicas son:

1.- Alta velocidad de prueba

2.- Mayor exactitud a comparación de los demás métodos no destructivos

3.- Alta sensibilidad

4.- Alto poder de penetración

5.- Buena resolución

- 6.- Se necesita acceso a una sola superficie
- 7.- Permite la interpretación inmediata
- 8.- No utiliza radiaciones perjudiciales para el organismo
- 9.- No tiene efectos sobre el material examinado

Las limitaciones de la Inspección Ultrasonica pueden enlistarse de la siguiente manera:

- 1.- La inspección manual requiere mucha atención y concentración de técnicos experimentados
- 2.- Se requiere un gran conocimiento técnico para el desarrollo de los procedimientos de examinación
- 3.- Las piezas de geometría compleja, rugosas, demasiado asperas, muy pequeñas, muy delgadas o no homogéneas son difíciles de examinar
- 4.- Las discontinuidades muy cerca de la superficie pueden no ser detectadas
- 5.- Se necesita utilizar patrones de referencia, tanto para calibrar el equipo como para caracterizar las discontinuidades
- 6.- Su aplicación es difícil en piezas con tamaño de grano grueso y en piezas muy porosas
- 7.- Alto costo de equipo y accesorios
- 8.- Requiere una fuente de poder
- 9.- Se necesita un acoplante para obtener una transferencia efectiva de las señales, entre pieza y transductor.

Debido a que una de las limitaciones de la Inspección Ultrasonica es el uso de patrones tanto de calibración como de referencia, este trabajo de tesis tiene por objetivo diseñar y fabricar un patrón secundario de aluminio, el cual debe cumplir con los requerimientos establecidos por las normas internacionales (ASTM) y se pueda utilizar de una forma generalizada en la inspección de piezas de fundición de aluminio y sus aleaciones, es decir, de esta manera no deberemos tener un patrón para cada aleación, lo cual resultaria muy problemático dada la gran variedad de aleaciones comerciales de aluminio que se fabrican actualmente.

## CAPITULO II

### REVISION BIBLIOGRAFICA

## II.1 DEFINICION DE CONCEPTOS TECNICOS GENERALES

Para la adecuada aplicación de la técnica de Inspección Ultrasonica es necesario conocer ciertos conceptos técnicos generales.

### II.1.1 ULTRASONIDO

Son técnicas de inspección que se utilizan para verificar la sanidad interna y externa de los materiales sin destruirlos, afectar o alterar en forma permanente sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

### II.1.2 ESPECTRO DE ONDAS ACUSTICAS

El espectro de ondas acústicas es la serie resultante del análisis de las ondas de sonido expresada en terminos de frecuencias, Figura 1. En dicho espectro se observan las tres regiones o zonas:

a) INFRASONICA: Comprendida entre el rango de frecuencias de 1 a 16 c/s (ciclos por segundo) o Hz (Hertz).

b) SONICA (AUDIBLE): Comprendida entre el rango de 16 Hz a 20 KHz.



c) ULTRASONICA: Es la zona del espectro comprendida en las frecuencias mayores a 20 KHz, el límite superior de sus frecuencias no esta definido físicamente.

Las frecuencias utilizadas en ensayos no destructivos para el control de heterogeneidades en los materiales, comienzan en la proximidad de la zona audible (ensayos de hormigones) y se extienden hasta los 25 MHz. En el caso de los materiales metálicos las frecuencias utilizables varían entre 20 KHz y 25 MHz.

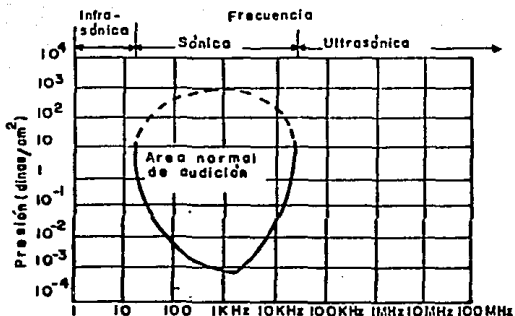


Figura 1. Espectro acústico

## II.1.3 PROPAGACION DE LAS ONDAS ULTRASONICAS

En un material sólido, las partículas que lo componen se mantienen en posición mediante fuerzas elásticas. Si el material es sometido a vibraciones, estas pasan a través del sólido como una sucesión de desplazamientos de partículas, es decir, las fuerzas elásticas transmiten las oscilaciones a las partículas mas cercanas, las cuales a su vez, transmiten el movimiento vibratorio a otras que esten próximas, y así sucesivamente.

Las vibraciones ultrasónicas siguen una trayectoria senoidal cuyo avance es común de una onda transversal simple.

### II.1.3.1 ONDA

Es una perturbación física transmitida desde un punto del espacio a otro.

### II.1.3.2 CICLO

Desde el punto de vista del movimiento oscilatorio de una partícula, ciclo es un movimiento hacia atrás y otro hacia adelante, es decir es una onda completa.

#### II.1.3.7 PERIODO (T)

Es el tiempo cubierto por cada uno de los ciclos.

#### II.1.3.4 FRECUENCIA (F)

Es el número de ciclos completos que ocurren en un tiempo dado. Se expresa en ciclos/segundo (Hertz).

#### II.1.3.5 LONGITUD DE ONDA ( $\lambda$ )

Es la distancia que existe de un punto en una onda a ese mismo punto de la siguiente onda. Su valor normalmente se expresa en milímetros.

#### II.1.3.6 VELOCIDAD ACUSTICA (V)

Es la rapidéz con que viaja el sonido a través de un medio y es igual al producto de la frecuencia por la longitud de onda.

$$V = F * \lambda$$

El sonido no se limita a propagarse en materiales sólidos, también se transmite en otros medios, como son el aire, agua, aceite, grasa, pero a diferentes velocidades. El aire no es un

buen transmisor del ultrasonido por lo que se requiere utilizar un medio de acoplamiento (acoplante) que puede ser grasa o aceite, entre el transductor y la muestra.

#### II.1.3.7 ACOPLANTE

Líquido más o menos viscoso, que se utiliza para permitir el paso de las ondas del transductor a la pieza bajo examinación, ya que las frecuencias que se utilizan en la examinación de materiales metálicos, no se transmiten en el aire.

#### II.1.3.8 AMPLITUD

**Definición General:** Es el máximo desplazamiento de una partícula desde la posición de reposo.

**Definición en Inspección por Ultrasonido:** Es el porcentaje de altura, desde la línea de tiempo base, ocasionado por la cantidad de energía reflejada desde una interfase o una discontinuidad.

#### II.1.4 INTERFASE ACUSTICA

Límite entre dos materiales con diferente impedancia acústica.

#### II.1.5 REFLEXION

Cantidad de energía ultrasónica, que es reflejada al incidir en una interfase acústica.

#### II.1.6 REFLECTOR

Es cualquier superficie reflectante dentro de un medio.

#### II.1.7 REFRACCION

La refracción se lleva a cabo cuando un haz ultrasónico pasa de un medio a otro, siendo su velocidad diferente y cambiando de dirección en relación con la dirección de incidencia.

El cambio de dirección de la onda refractada, acercandose o alejandose de la normal a la superficie de separación de ambos medios, depende de que la velocidad del sonido en el segundo medio sea menor o mayor que en el primer medio.

#### II.1.8 DIFRACCION

Es la desviación de distribución de la energía del haz ultrasónico después de pasar una discontinuidad.

Cuando una onda sonora en su movimiento de avance, rebasa un obstáculo, no se encuentra detrás de este una zona definida de reposo. El frente de onda cambia de dirección y penetra en una región de la que normalmente, podría esperarse no resultara perturbada.

### II.1.9 DISPERSION

Son las desviaciones que sufre el haz ultrasónico al pasar a través de un medio. La dispersión es debida a que los materiales no son estrictamente homogéneos desde el punto de vista ultrasónico. Esto es consecuencia de la presencia de pequeñas discontinuidades que afectan como focos dispersantes de las ondas; así como también por la naturaleza policristalina de los materiales, los granos actúan como focos de dispersión por la distinta impedancia acústica que presentan según su orientación (anisotropía elástica).

### II.1.10 INDICACION

Es una manifestación visual obtenida mediante la aplicación de un Ensayo No Destructivo.

### II.1.11 DISCONTINUIDAD

Es un termino general aplicado a cualquier interrupción en la estructura física normal o configuración de una parte, como por ejemplo: poros, grietas, rechupes, laminaciones, inclusiones, traslapes, etc.

### II.1.12 DEFECTO

Es una discontinuidad que por su tamaño, forma o ubicación no es aceptable por la norma aplicable a la inspección.

## II.2 GENERACION DE LAS ONDAS ULTRASONICAS

La generación de ondas ultrasónicas puede realizarse por diversos medios o fenómenos físicos, como son: la piezoelectricidad, la electroestricción y la magnetoestricción. Sin embargo, solamente se describirá la piezoelectricidad debido a que en ella se apoya la inspección ultrasónica.

### II.2.1 PIEZOELECTRICIDAD

Es un fenómeno descubierto en 1880, por los hermanos P. y J. Curie, quienes demostraron que algunos materiales como el cuarzo, al ser sometido a una presión mecánica externa, producen cargas eléctricas sobre su superficie, o bien cuando una corriente eléctrica se aplica al material, este vibrará (se expande y se contrae).

La piezoelectricidad es un fenómeno reversible en donde a un cristal, cuando se le aplica una presión mecánica se producen cargas eléctricas sobre sus caras (efecto piezoeléctrico directo) y cuando una corriente eléctrica es aplicada a un cristal, este vibrará (efecto piezoeléctrico inverso).

El fenómeno se explica analizando un cristal simple de cuarzo a escala atómica, cuya estructura contiene iones cargados



positivamente (+) e iones cargados negativamente (-) como se muestra en la Figura 2 (a); al estado libre el cristal es neutro, es decir, no lleva ninguna carga eléctrica sobre sus caras. Al aplicar una fuerza mecánica sobre el cristal, éste se deforma provocando que los iones positivos se aproximen a la cara B, en tanto que los iones negativos se aproximan a la cara A, quedando el cristal cargado eléctricamente.

La deformación relativa ( $\epsilon$ ) de un cristal piezoeléctrico, es la relación de la variación "e" del espesor al espesor inicial "h", Figura 2 (b).

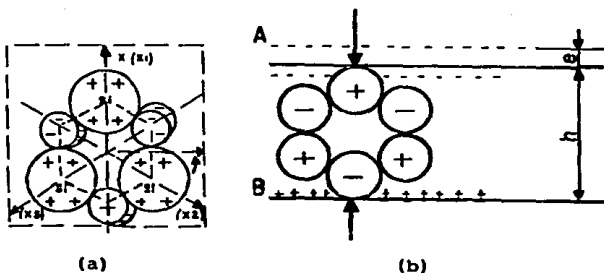


Figura 2. a) Cristal simple. b) Cristal bajo presión mecánica

## 11.2.2 MATERIALES PIEZOELECTRICOS

Dentro de los materiales piezoeléctricos más importantes utilizados en transductores ultrasónicos, se tienen: el cuarzo, cerámicas polarizadas y sulfato de litio.

Trataremos de establecer las ventajas y limitaciones de los tres materiales piezoeléctricos, en base a sus propiedades más importantes.

### a) Cuarzo

El cuarzo ( $SiO_2$ ), se obtiene a partir de cristales naturales, es transparente y muy duro.

#### Ventajas:

- Presenta estabilidad térmica, mecánica y eléctrica
- Insoluble en muchos líquidos
- Alta dureza
- Alta resistencia al desgaste
- Resistencia al envejecimiento
- Trabaja a temperaturas de hasta 550-576°C

#### Limitaciones:

- Mal emisor (módulo piezoeléctrico bajo)

- Vibra en forma longitudinal y de corte, provocando interferencias en el tubo de rayos catódicos.
- Requiere de altos voltajes para generar bajas frecuencias

#### b) Cerámicas Polarizadas

Se obtienen por sinterización y se polarizan durante su proceso de fabricación. Son de color blanco amarillento y poseen menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo.

#### Ventajas:

- Son buenos transmisores
- Tienen una temperatura crítica aproximadamente de 300°C
- Se pueden amortiguar y controlar las pulsaciones fácilmente

#### Desventajas:

- Tienden a envejecer
- Son muy quebradizos

Existen tres tipos de cerámicas polarizadas que son:

#### 1) Titanato de Bario

- Posee un módulo piezoeléctrico elevado (buen emisor)
- Su empleo está restringido a frecuencias por abajo de 15

MHz debido a su resistencia mecánica baja y a su frecuencia característica fundamental, relativamente baja

- Produce interacción entre varios modos de vibración
- Temperatura crítica de 115-150°C

## 2) Metaniobato de Plomo

- Módulo piezoeléctrico elevado
- Tiene estabilidad térmica, similar al cuarzo
- Limita su empleo a frecuencias altas, debido a que su frecuencia característica es la más baja así como su resistencia mecánica
- Produce interacción entre varios modos de vibración
- Temperatura crítica de 550°C

## 3) Zirconato Titanato de Plomo

- Mejor transmisor que los anteriores
- Es el más difícil de amortiguar
- Se utiliza donde hay problemas de penetración

## c) Sulfato de Litio

Se obtiene por cristalización y se debe proteger de la humedad.

#### Ventajas:

- Proporciona una amortiguación acústica óptima, mejorando el poder de resolución
- Módulo piezoeléctrico medio y constante de presión piezoeléctrica elevada, lo que le convierte en el mejor receptor
- Modo de conversión bajo (proporciona solo una onda de salida)
- No envejece

#### Desventajas:

- Sensible a temperaturas elevadas, ya que pierde su agua de cristalización a 75°C
- Difícil de fabricar por la humedad del medio
- Extremadamente soluble en agua

## II.3 MODOS O TIPOS DE ONDAS

Los desplazamientos que experimentan las partículas de un medio en el que se propaga una onda ultrasónica pueden ser de varias formas, lo que da lugar a diferentes tipos de ondas. Desde el punto de vista de Ensayos No Destructivos los tipos de ondas más interesantes son: longitudinales o de compresión, transversales o de corte, superficiales o de Rayleigh y de placa o de Lamb.

### II.3.1 ONDA LONGITUDINAL O DE COMPRESION

Este tipo de ondas se caracteriza porque los desplazamientos de las partículas son en dirección paralela a la de propagación. Las ondas longitudinales crean zonas de compresión y de dilatación (rarefacción), separadas entre si  $\lambda/2$ , en el cuerpo en que se propagan (Figura 3).

Estas ondas pueden propagarse a través de sólidos, líquidos y gases, siendo la forma mas rápida de viajar de una onda ultrasónica. Prácticamente todos los transductores emiten ondas longitudinales a partir de las cuales ya sea por un ángulo de incidencia diferente al normal o bien por la geometría del material sujeto a inspección, se generan otros tipos de ondas (conversión de modo).

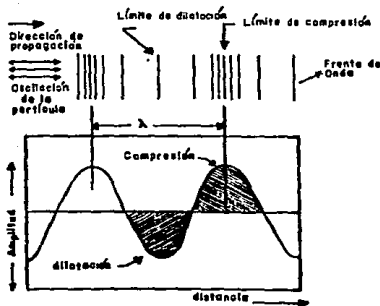


Figura 3. Representación de una onda ultrasónica longitudinal

### 11.3.2 ONDA TRANSVERSAL O DE CORTE

Una onda es llamada de modo transversal, cuando la dirección de propagación es perpendicular a la dirección de vibración de las partículas como se muestra en la Figura 4.

Para la propagación de ondas transversales, es necesario que cada partícula exhiba una gran fuerza de atracción a sus vecinas para que cuando una partícula se mueva hacia atrás y hacia adelante esta haga oscilar a las demás. La excitación de las partículas se produce aplicando una fuerza cortante periódica. En los cuerpos sólidos, tal fuerza cortante se

transmite a las partículas de los planos adyacentes, dando lugar a oscilaciones transversales, retardadas según su distancia al plano de excitación.

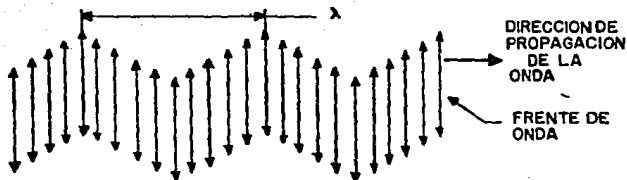


Figura 4. Onda transversal o de corte

Los gases y los líquidos son, prácticamente incapaces de transmitir ondas transversales, ya que sus moléculas apenas ofrecen resistencia al deslizamiento transversal y por lo tanto, no existiran vínculos elásticos que las ligen a su posición cero. Esta circunstancia coincide con la propiedad de tener un módulo de elasticidad transversal igual a cero, a excepción de los líquidos altamente viscosos que poseen cierto "módulo complejo de elasticidad transversal" y que por consiguiente, pueden propagar ondas transversales aunque fuertemente amortiguadas. En los casos prácticos de inspección



de materiales, solo pueden alcanzar distancias apreciables de propagación en los cuerpos sólidos.

En este tipo de onda, la longitud de onda queda determinada por la distancia entre los planos en los que las partículas están en estado similar. La velocidad de propagación de la onda transversal es aproximadamente la mitad de la onda longitudinal en un mismo material. Este tipo de onda es muy utilizado en la inspección de uniones soldadas.

### 11.3.3 ONDA DE SUPERFICIE O DE RAYLEIGH

La onda de superficie o de Rayleigh se propaga solamente en la periferia plana o curva de un sólido (Figura 5).

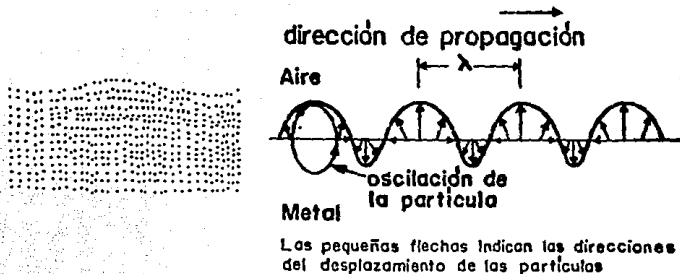


Figura 5. Onda de superficie o de Rayleigh

Este tipo de onda se propaga a través de radios, siempre y cuando estos sean mayor a 2 o 3 veces la longitud de onda que se esta empleando.

La deformación que se produce no es estrictamente senoidal y en cierto modo, se asemeja a las ondas del agua, si bien estas últimas no son ondas elásticas, sino consecuencia de la acción de las fuerzas gravitacionales. En las ondas del agua, el movimiento oscilatorio de la partículas es circular, en las ondas de Rayleigh elíptico. A profundidades mayores de la superficie la amplitud de oscilación decrece rápidamente de manera, que a una profundidad del orden de una longitud de onda, las partículas estan prácticamente en reposo. Su velocidad de propagación, como en el caso de las ondas longitudinales y transversales, es independiente de la frecuencia y por tanto, es una constante del material. La velocidad de la onda de superficie es aproximadamente igual a nueve decimos (90%) de la onda transversal en el mismo material.

Este tipo de onda es muy sensible y se atenúa grandemente cuando existe un segundo medio en su trayectoria como puede ser un líquido o un sólido en contacto con la superficie por la cual, en la práctica, se emplea para detectar discontinuidades en superficies poco rugosas. Se pueden identificar sus señales

interrumpiendo su propagación al hacer contacto con un dedo en la superficie de la pieza.

### II.3.4 ONDA DE PLACA O DE LAMB

Si un material sólido se reduce en espesor, se obtiene una placa y si ésta es sometida a una onda de Rayleigh, la onda puramente de superficie ya no puede existir como tal, a no ser que su longitud de onda sea considerablemente menor que el espesor de la placa. Cuando el espesor es del mismo valor que la longitud de onda o múltiplo de ella se producen varios tipos de ondas de placa, llamadas también de Lamb en honor a Horace Lamb, quien desarrolló esta teoría en 1916. Este tipo de ondas se clasifican en dos grandes grupos:

- Onda simétrica o de dilatación, Figura 6 (a)
- Onda asimétrica o de flexión, Figura 6 (b)

A su vez cada uno de estos grupos se desglosa en modos, de forma que existe un gran número de ondas de Lamb con características de atenuación, velocidad y ángulos de generación distintos.

En el caso de la onda simétrica, las partículas de la zona media se comportan según oscilaciones puramente longitudinales

y en el caso de la onda asimétrica, según oscilaciones puramente transversales. Las otras partículas oscilan, en ambos tipos de onda, elípticamente y para cada tipo existe un número arbitrario de armónicas.

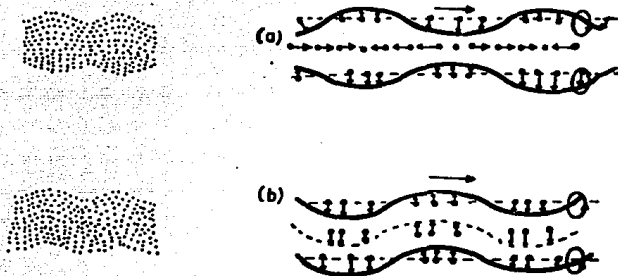


Figura 6. a) Onda de Lamb simétrica o de dilatación. b) Onda de Lamb asimétrica o de flexión

La velocidad de propagación de las ondas de Lamb no se puede considerar como constante del material, ya depende de su espesor, de la frecuencia, ángulo de incidencia, del modo (longitudinal, transversal o superficial) y tipo de onda.

NOTA: En el Apéndice A se muestran las velocidades longitudinales, transversales y superficiales de las ondas ultrasónicas en diferentes materiales, tanto metálicos como no metálicos.

## II.4 TRANSDUCTORES

El transductor es un ensamble unitario que permite generar y/o detectar ondas ultrasónicas, es decir, convierte energía mecánica a energía eléctrica y viceversa. Después de la transmisión de una onda ultrasónica, el transductor capta los ecos y relaciona la condición del material con la información que regresa al instrumento, donde ésta es presentada visualmente sobre la pantalla del tubo de rayos catódicos (TRC).

La capacidad de un transductor así como del sistema de inspección es en la mayor parte descrita por dos términos: sensibilidad y resolución.

### II.4.1 SENSIBILIDAD

Es la habilidad de un transductor para detectar ecos de pequeñas discontinuidades. La sensibilidad de un transductor es más alta entre mayor eficiencia tenga para convertir la energía eléctrica en energía ultrasónica.

Los transductores del mismo tamaño, frecuencia y material piezoeléctrico no siempre producen señales idénticas en el TRC.

#### II.4.2 PODER DE RESOLUCION

Es la habilidad de un transductor para detectar a la vez discontinuidades que se encuentran muy cercanas entre sí y a cierta distancia del transductor. La resolución puede dividirse en dos clases: Resolución en Superficie Cercana y Resolución en Superficie de Pared Posterior.

El Poder de Resolución en Superficie Cercana es la capacidad de poder detectar discontinuidades cercanas a la superficie en la que se hace contacto con el transductor. Esta resolución es dependiente del tiempo muerto en la respuesta del transductor y que se origina cuando el cristal generador esta aun oscilando y el amplificador esta saturado por el impulso de excitación; estos dos fenómenos ocasionan que el equipo no pueda detectar señales que hayan sido reflejadas en este tiempo.

La capacidad de un transductor en la Resolución de Superficie Cercana se puede verificar o comprobar empleando un bloque patrón con agujeros a diferentes profundidades a partir de la superficie de contacto.

La Resolución de un Transductor en la Superficie de Pared Posterior es la habilidad de un transductor, de poder proporcionar indicaciones separadas de discontinuidades que

tienen una profundidad en o muy cercana a la superficie de pared posterior. Esta resolución depende del ancho del pulso y de la frecuencia.

#### II.4.3 COMPONENTES DE UN TRANSDUCTOR

En su forma más sencilla un transductor consta de las siguientes partes (Figura 7):

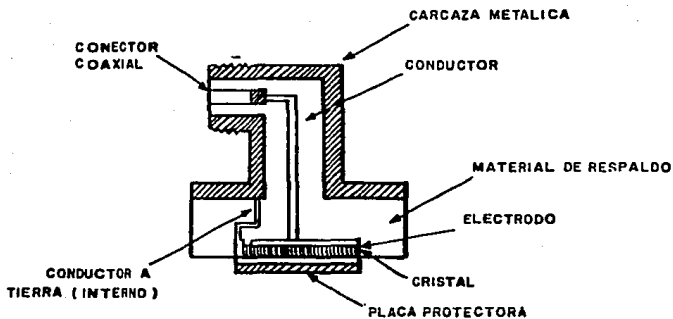


Figura 7. Componentes de un transductor



a) Carcaza Metálica

Es el envolvente que sirve como blindaje y que proporciona la resistencia mecánica necesaria.

b) Cristal

Pequeña placa de un material con propiedades piezoeléctricas, es el elemento principal del transductor.

c) Electrodo

Son placas conductoras de la corriente eléctrica que se hacen pasar a través del cristal, generalmente son de oro o plata. Pueden ser depositados sobre las caras del cristal por condensación de los vapores de oro y plata, sobre cristales de cuarzo; y en cristales de cerámicas polarizadas, los electrodos son depositados por condensación de un vapor o bien por medio de una película de pintura conductora; en los cristales de sulfato de litio, los electrodos son difíciles de colocar por los métodos anteriores, por lo que generalmente son fabricados de placas metálicas y adheridos posteriormente al cristal.

d) Placa Protectora o de Uso

Es un elemento de protección con gran resistencia al desgaste, su presencia en el transductor depende de si el cristal esta directamente en contacto con la superficie de prueba como por ejemplo el cuarzo que es muy resistente o si se

trata de otros cristales como por ejemplo el titanato de bario (frágiles), el sulfato de litio (soluble en agua), en estos cristales se emplea la placa de protección.

#### e) Material de Respaldo

Es un amortiguador sónico y mecánico que se adhiere firmemente al cristal por la cara opuesta a la de contacto y tiene dos funciones que son:

1.- Amortiguar las vibraciones por inercia del cristal evitando así que vibre libremente al ser excitado.

2.- Absorber las vibraciones radiadas en el sentido opuesto al deseado. Esto se logra con materiales que tengan una alta impedancia acústica y alto coeficiente de atenuación.

Lo anterior es importante ya que si no se eliminan las vibraciones por inercia y las generadas en sentido opuesto, la zona muerta del transductor se incrementa y la señal inicial presentaría perturbaciones que reducirían la resolución y la sensibilidad del transductor.

El grado de amortiguamiento de un transductor determina si es de banda ancha o angosta. El ancho de la banda de un transductor significa el rango de frecuencias que estan por

arriba o igual a una amplitud del 70%, encontrándose al 100% la frecuencia central.

A

#### II.4.4 TRANSDUCTOR DE BANDA ANCHA

Cuando el amortiguamiento es grande, se obtienen pulsos cortos, por lo que decimos que tenemos un transductor de banda ancha.

Las características principales de un transductor de banda ancha son:

- Reducción del campo muerto
- Pulsos acústicos de corta duración, de uno a dos ciclos de vibración
- Elevado poder de resolución que permite realizar mediciones de tiempo de recorrido sumamente exactos
- Menor poder de penetración, mayor atenuación
- Menor sensibilidad

#### II.4.5 TRANSDUCTOR DE BANDA ANGOSTA

Si el amortiguamiento es bajo, el pulso es largo y en consecuencia su espectro de frecuencias es de banda angosta (Figura 9), estando situado cerca de la frecuencia de

resonancia del cristal piezoeléctrico; tiene de dos a cinco ciclos de vibración, y sus características principales son:

- Ensanchamiento del campo muerto
- Mayor sensibilidad
- Mayor poder de penetración, menor atenuación

Al aumentar el amortiguamiento, se reduce la sensibilidad del transductor y se incrementa su poder de resolución al tenerse pulsos de corta duración. Sin embargo, al comparar transductores de una misma serie (igual grado de amortiguamiento) e iguales dimensiones, se comprueba que al aumentar la frecuencia del transductor se incrementa el poder de resolución.

#### II.4.6 CLASIFICACION DE LOS TRANSDUCTORES

Los transductores constituyen una de las unidades básicas del equipo de ultrasonido y se deben considerar como parte integrante del mismo, ya que del transductor dependen las características y cualidades del haz de ultrasonido que se propagará en el material.

Se dispone de una diversidad de transductores que han sido diseñados para el gran número de técnicas de inspección

existentes actualmente. Los transductores se pueden clasificar en dos grandes grupos: Transductores de Contacto y Transductores de Inmersión.

#### II.4.6.1 TRANSDUCTORES DE CONTACTO

Son aquellos que se aplican directamente a la superficie de la muestra, aplicando cierta presión y empleando un medio de acoplamiento, salvo en el caso de frecuencias muy bajas empleadas en el ensayo de ciertos materiales.

Estos transductores de contacto se clasifican a su vez, según la dirección de propagación del haz con relación a la superficie de la muestra, en transductores de incidencia normal también llamados de haz recto y en transductores angulares.

##### a) Transductores de Incidencia Normal

Este tipo de transductor se emplea en los equipos que operan por los métodos de Pulso-eco, de transparencia y de resonancia y se aplican a problemas de defectología y metrología. El rango de frecuencia utilizable en este tipo de transductor es de 0.5 a 10.0 MHz.

Según el número de cristales piezoeléctricos que llevan incorporados, se consideran los siguientes tipos:

- 1.- Transductor de cristal único, emisor y receptor
- 2.- Transductor de doble cristal, uno emisor y otro receptor
- 3.- Transductor de cristales múltiples
- 4.- Transductor para altas temperaturas

#### b) Transductores de Incidencia Angular

Los transductores angulares de contacto consisten, en esencia, en un cristal de ondas longitudinales aplicado a una de las caras de una zapata de plástico, que presenta un ángulo de incidencia adecuado al ángulo de refracción o de penetración que se desea para el material de la muestra sujeta a ensayo. El rango de frecuencia utilizable en este tipo de transductores es de 1.0 a 5.0 MHz.

Los transductores angulares de contacto se emplean preferentemente en los equipos de Pulso-eco y se aplican casi exclusivamente a problemas de defectología.

Dentro de la clasificación de transductores angulares se tienen los siguientes tipos:

- 1.- Transductor de ondas transversales
- 2.- Transductor de ondas longitudinales y transversales
- 3.- Transductor de ondas de superficie

#### 4.- Transductor de ondas de Lamb

##### 4.1.4.6.2 TRANSDUCTORES DE INMERSION

Los ensayos por inmersión, se llevan a cabo sumergiendo la muestra en un tanque o mediante el empleo de transductores de inmersión local, estos son empleados cuando se precisa realizar exploraciones de gran volumen y extensión, para examinar lotes grandes de muestras o para muestras de forma relativamente compleja.

La transmisión del ultrasonido desde el transductor a la muestra, se efectúa a través de una columna de líquido, es decir, sin que exista contacto directo, presión o rozamiento entre el transductor y la muestra, lo cual permite:

a) Eliminar los riesgos de rotura y desgaste del cristal piezoeléctrico, evitando el empleo de la membrana protectora.

b) Emplear frecuencias más elevadas (cristales de espesor más fino), que las posibles con los transductores de contacto, ya que el riesgo de rotura de los cristales es mínimo.

c) Propagar el haz ultrasónico en la muestra con el ángulo de penetración deseado, bien como ondas longitudinales o como ondas transversales, pudiéndose variar la inclinación del

transductor con relación a la superficie de la muestra (ángulo de incidencia) de forma continua.

d) Aumentar la velocidad del ensayo, al no haber contacto o rozamiento, por lo que los ensayos por inmersión están especialmente indicados para ensayos automáticos o semiautomáticos.

Los transductores de inmersión se emplean en los equipos que operan por métodos de Pulso-eco, de transparencia y de resonancia y se aplican perfectamente a problemas de defectología y metrología.

Al igual que en la técnica de contacto, se emplean transductores de un cristal, emisor y receptor; transductores de doble cristal, uno emisor y el otro receptor y en menor extensión, transductores de cristal múltiple. Pero en esta técnica de inmersión, se aplican con frecuencia los transductores focalizados que son útiles en ensayos que requieren obtener mayor sensibilidad y poder de resolución a una profundidad preestablecida. El rango de frecuencias utilizadas van de 200 KHz a 25 MHz.

Como una variante de los transductores de inmersión se tienen los transductores de inmersión local, los cuales trabajan bajo



el mismo principio y consisten de un dispositivo que asegura en todo momento el contacto acústico entre el transductor y la muestra a través de una columna de líquido de manera que el cristal no roza con la superficie de la muestra y se asegura el acoplamiento acústico en forma continua.

Se aplican preferentemente a muestras de forma simple tales como chapas, barras, tubos, piezas redondas, muestras cilíndricas y prismáticas; este tipo de transductores son una solución intermedia entre las técnicas de contacto manual y las de inmersión con operación automática.

## II.5 CARACTERISTICAS DEL HAZ ULTRASONICO

El campo emitido por un transductor depende fundamentalmente de la geometría y frecuencia del cristal. Para cualquier caso este campo también llamado Haz Ultrasonico esta compuesto de (Figura B):

- Un campo muerto o zona muerta
- Un campo cercano o zona de Fresnel
- Un campo lejano o zona de Fraunhofer
- Un eje central
- Un ángulo de divergencia

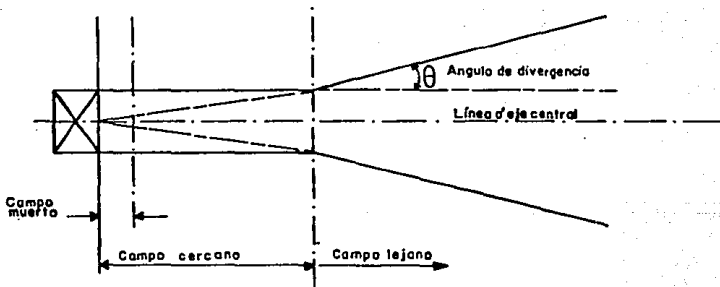


Figura B. Representación simplificada del haz ultrasonico

### II.5.1 CAMPO MUERTO

Es la distancia en frente del transductor (trayecto previo), y su extensión es equivalente a la longitud de un pulso completo, en esta zona ninguna indicación de algún reflector puede ser distinguida.

### II.5.2 CAMPO CERCANO O ZONA DE FRESNEL

Las partículas que están inmediatamente en el frente del transductor vibran creando una onda particular, cada una de ellas tiene su propia oscilación y originan de esta forma una zona de interferencia llamada zona de Fresnel; después estas oscilaciones tienden a formar una sola, iniciándose la zona de Fraunhofer. La zona de Fresnel consiste en regiones de intensidades máximas y mínimas que corresponden a regiones donde la interferencia de la dispersión están respectivamente en fase y fuera de fase. Como en esta zona la intensidad varía irregularmente cerca de la cara del transductor, no se puede evaluar una discontinuidad ya que se tienen variaciones en la amplitud del eco.

La forma de evaluar la longitud del campo cercano es mediante una curva de calibración distancia amplitud o utilizando la siguiente ecuación:

$$N = D^2 * F / 4 * V \quad \text{o también} \quad N = D^2 / 4 * \lambda$$

Donde:

- N = Longitud del campo cercano
- D = Diametro del cristal de transductor
- F = Frecuencia central del transductor
- V = Velocidad acustica en el material de prueba

Cuando una discontinuidad se encuentra en la zona cercana es recomendable disminuir D y F a la vez, ya que dicha zona se acorta.

### II.5.3 CAMPO LEJANO O ZONA DE FRAUNHOFER

Es la region después del campo cercano que se caracteriza porque la intensidad del haz ultrasónico decrece proporcionalmente conforme la distancia al transductor se incrementa.

Cuando una discontinuidad se encuentra en la zona lejana, es necesario aumentar D y F para obtener una mayor sensibilidad y reducir la divergencia del haz.

#### II.5.4 DIVERGENCIA DEL HAZ

En el campo cercano el haz ultrasónico se propaga en línea recta y en el campo lejano, la onda acústica se expande al aumentar la distancia desde el emisor, este fenómeno puede apreciarse en la Figura 8.

Para una frecuencia dada, a mayor diámetro del cristal de un transductor, el haz presenta una menor dispersión; a menor diámetro del cristal la divergencia del haz se incrementa. Adicionalmente el ángulo de divergencia disminuye al aumentar la frecuencia manteniendo constante el diámetro del cristal.

La mitad del ángulo de divergencia del haz, desde el eje central de un emisor circular, es determinado como sigue:

$$\text{Sen } \theta = 1.22 * ( V / F * D )$$

Donde:

- V = Velocidad acústica en el material de prueba
- F = Frecuencia central del transductor
- D = Diámetro del elemento del transductor

## II.6 ATENUACION DEL HAZ ULTRASONICO

La atenuación es la pérdida de la energía de una onda ultrasónica al desplazarse a través de un material, o bien es la pérdida de energía por unidad de distancia.

La intensidad de un haz ultrasónico recibido por un transductor es considerablemente menor que la intensidad de la emisión inicial. Los factores que afectan la pérdida de la intensidad del haz se clasifican como sigue:

- Pérdida por Transmisión
- Efectos de Interferencia
- Divergencia del Haz

La pérdida por transmisión es debida a los efectos de la impedancia acustica en las interfases, la absorción y la dispersión del haz. Los efectos de interferencia incluyen la difracción y los efectos que originan un cambio de fase o cambio de frecuencia. La divergencia del haz se debe principalmente a una transición de onda plana a onda esférica, dependiendo esta transición de la forma de la cara del elemento del transductor.

### 11.6.1 EFECTOS DE LA IMPEDANCIA ACUSTICA

La disminución de la intensidad del haz ultrasónico es debido al efecto de la impedancia acústica, que puede ser en algunos casos severa, debido a que si una fracción del área de un haz sónico es reflejada por pequeñas discontinuidades, el instrumento debe ser muy sensible para detectar las pequeñas variaciones de la intensidad del haz.

Mediante el uso de las fórmulas de Relación de Impedancias, del Coeficiente de Reflexión y del Coeficiente de Transmisión se puede calcular la pérdida de energía en una inspección ultrasónica.

- Relación de Impedancias:  $( Z_2 / Z_1 )$

- Coeficiente de Reflexión:  $( Z_2 - Z_1 )^2 / ( Z_1 + Z_2 )^2$

- Coeficiente de Transmisión:  $( 4 * Z_1 * Z_2 ) / ( Z_1 + Z_2 )^2$

Donde:

-  $Z_1$  = Impedancia acústica del material 1

-  $Z_2$  = Impedancia acústica del material 2

## II.6.2 ABSORSION

La absorción de las ondas ultrasónicas ocurre por la conversión de la energía mecánica de las mismas en calor; las causas que dan origen a este fenómeno son diversas, pero influye el medio y la frecuencia de las ondas. Para las frecuencias utilizadas en ensayos no destructivos, la absorción es directamente proporcional a la frecuencia. En general, para los metales, la atenuación por absorción es considerablemente menor que la producida por la dispersión del haz.

El fenómeno de la absorción también puede explicarse de forma elemental, como un efecto de frenado en la oscilación de las partículas, lo que también explica que un movimiento más rápido pierda más energía que un movimiento lento. El movimiento rápido es producto de una alta frecuencia y por lo tanto, la absorción es mayor, es decir, parte de la energía ultrasónica es absorbida en forma de calor; la absorción debilita la energía transmitida o la amplitud del eco, tanto de una heterogeneidad como de la pared posterior. Para contrarrestar este efecto, hay que incrementar el voltaje de emisión y la amplificación o recurrir al empleo de frecuencias más bajas.



### II.6.3 DISPERSION

La dispersión es debida a que los materiales no son estrictamente homogéneos, contienen superficies límites o pequeñas interfases, en las que la impedancia acústica cambia bruscamente, debido a la diferente densidad o velocidad acústica en los materiales, de naturaleza, condición o estado diferente en dichas interfases. Estas pequeñas heterogeneidades pueden ser: inclusiones, heterogeneidades originales o naturales o intencionadas, tal como la porosidad en materiales sinterizados; constituyentes precipitados de naturaleza distinta, tal como el grafito en las fundiciones grises; fases en la estructura cristalina de los metales, con diferentes estructuras y composición, tal como los aceros, latones, etc.

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 que determina su anisotropía elástica y la frecuencia de las ondas. La dispersión aumenta con el tamaño de grano y con la frecuencia, de aquí que el ensayo de estructuras de grano burdo, fundiciones por ejemplo, requiere de frecuencias del orden de 1 a 2 MHz. A igualdad de grano y longitud de onda, 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, encontrándose el acero en un valor intermedio.

#### II.6.4 LEY DE LA ATENUACION

La ley de la variación de la presión acústica de una onda ultrasónica en el campo lejano, que decrece exclusivamente por efecto de la atenuación, es una función de carácter exponencial, dada por la siguiente ecuación:

$$P = P_0 * \text{EXP} ( -\alpha * L )$$

donde  $P_0$  y  $P$  son las presiones acústicas del origen y a una distancia  $L$ , respectivamente, y con un coeficiente de atenuación  $\alpha$ .

En ocasiones, el coeficiente , no se refiere a la presión acústica, sino a la intensidad. Si el de ésta última se designa por  $\alpha_1$ , la ley de la atenuación de la intensidad será:

$$I = I_0 * \text{EXP} ( -\alpha_1 * L )$$

donde  $I_0$  e  $I$  son las intensidades en el origen y a una distancia  $L$ , respectivamente.

## II.7 BLOQUES DE CALIBRACION

En las inspecciones ultrasónicas, todas las indicaciones de discontinuidades son comparadas con los estándares de referencia. Los bloques de referencia también pueden ser denominados como "bloques de prueba"; los cuales son empleados para estandarizar el equipo ultrasónico y evaluar la indicación de la discontinuidad de la muestra inspeccionada. La estandarización del equipo ultrasónico con el bloque de prueba establece:

- a) La verificación de que la combinación del transductor y el equipo este funcionando adecuadamente
- b) Fijar la ganancia o sensibilidad en la cual todas las discontinuidades de un tamaño específico o mayores, serán detectados

La evaluación de las discontinuidades en las muestras que se inspeccionan, se realizan comparando las indicaciones de estas, con la indicación de una discontinuidad artificial de un tamaño conocido y a la misma profundidad, en un bloque de referencia de un material similar al que se está inspeccionando. Las discontinuidades artificiales son cuidadosamente barrenadas o taladradas en forma de agujeros de fondo plano. Estos bloques son hechos de tal forma que solamente la indicación de la

discontinuidad, añadida intencionalmente, sea obtenida.

Cabe mencionar que no solamente se tienen bloques de referencia con discontinuidades artificiales sino que también se pueden tener bloques de referencia que contengan discontinuidades naturales. Este tipo de bloques son secciones de material similar a aquellas muestras que se inspeccionan. Las secciones que se sabe que contienen discontinuidades naturales y que son consideradas como defectos, son seleccionadas para "bloques de prueba".

Los bloques que contienen discontinuidades naturales tienen un uso limitado como estándares por dos principales razones:

Primero.- Es difícil obtener bloques de prueba que den respuestas idénticas. Las discontinuidades naturales varían en forma, características superficiales y orientación; de acuerdo a esto, los ecos de este tipo de discontinuidades varían.

Segundo.- Es frecuentemente imposible de determinar la naturaleza exacta de una discontinuidad natural existente en un bloque de prueba sin destruir la sección o echar mano de otras técnicas de inspección, como por ejemplo: radiografía, gamagrafía, etc.

Los bloques que contienen discontinuidades artificiales, consisten de secciones de metal que contienen muescas, ranuras, o agujeros barrenados o taladrados y son este tipo de bloques de referencia los más ampliamente aceptados como estándares que los bloques con discontinuidades naturales.

Los bloques de prueba que contienen agujeros taladrados son ampliamente empleados para inspecciones con haz recto o de onda longitudinal. El agujero en el bloque debe ser hecho de tal forma que la energía ultrasónica a partir del transductor es reflejado ya sea del costado del agujero, o del fondo del mismo. El agujero de fondo plano es el más usado porque ofrece una superficie óptima de reflexión. Un agujero de fondo cónico, tal y como es obtenido con un taladro convencional no es deseable porque una gran porción de la energía reflejada puede nunca alcanzar el transductor. Diferencias de un 50% o más pueden fácilmente ser encontradas entre la energía reflejada al transductor de un agujero de fondo plano y uno cónico del mismo diámetro. La diferencia es una función tanto de la frecuencia de inspección como de la distancia desde el transductor al fondo del agujero. En la inspección de láminas, placas, tuberías y líneas de tubería, la inspección con haz angular puede ser usada. Este tipo de inspección generalmente requiere de un bloque de referencia con una muesca internamente maquinada. El costado o lado de la muesca puede ser recto y en

ángulo recto a la superficie del bloque de prueba, o bien puede estar formando un ángulo (incluso un ángulo de  $60^\circ$ ). La amplitud, longitud y la profundidad de la muesca son generalmente definidas por la inspección aplicable. La profundidad es generalmente expresada como un porcentaje del espesor de la pieza. La Figura 9 muestra un diseño típico de estos bloques de prueba.

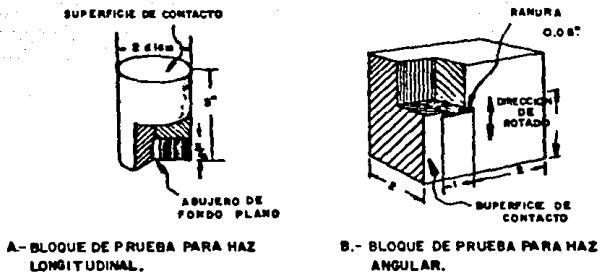


Figura 9. Diseño típico de bloques de prueba usados como patrón en la detección de discontinuidades por inspección ultrasónica

Conocido es que numerosos factores afectan la inspección ultrasónica de tal forma que una determinación cuantitativa exacta del tamaño de una discontinuidad será extremadamente

difícil, casi imposible. Puesto que la evaluación del tamaño de la discontinuidad se realiza comparando las intensidades del eco o pico (amplitud o altura visualizada en la pantalla del equipo) del haz ultrasónico reflejado del bloque y del material que se inspecciona. Un factor principal que afecta a la inspección es la naturaleza del área de reflexión ya que un agujero de fondo plano ofrece una superficie óptima de reflexión; una discontinuidad en el material puede ser de diversas formas y ofrecer una superficie de reflexión no uniforme. El origen de una discontinuidad y el grado de procesamiento que el material ha recibido tienen influencia en la forma de la discontinuidad por ejemplo: un poro en un lingote podría ser esférico y dispersar el haz sónico de tal forma que una pequeña cantidad de energía reflejada es la que recibe el transductor para producir el eco o pico de la discontinuidad. No obstante, el mismo poro en un material forjado o laminado, se aplana y esto ocasiona una reflexión mayor de energía al transductor. Esto es independientemente de la atenuación que sufra el haz en el material por la estructura, el tamaño de grano, etc.

Otro factor a tomarse en cuenta es el siguiente: si un bloque de referencia hecho de acero, de un tamaño de grano fino, es empleado para establecer un nivel de sensibilidad de prueba, no debe ser tomado como referencia para realizar la inspección en

un material con un tamaño de grano grueso ya que las indicaciones que se obtendrían podrían ser un poco menores a las obtenidas por el agujero de fondo plano. De igual forma si un bloque de referencia con un tamaño de grano grueso es empleado para establecer la sensibilidad e inspeccionar un material de un tamaño de grano fino, el equipo podría estar tan sensible que discontinuidades pequeñas aparecerían como discontinuidades mayores.

Las características del haz ultrasónico son afectadas por el material bajo examinación por las siguientes variables que deben ser consideradas antes de seleccionar algún bloque de referencia.

- a) Naturaleza de la pieza de prueba
- b) Tipo de aleación
- c) Tamaño de grano
- d) Efectos de procesos térmicos o mecánicos
- e) Efectos de distancia-amplitud
- f) Tamaño de la discontinuidad
- g) Dirección de haz ultrasónico

Existen tres tipos de bloques de referencia que se utilizan generalmente para la calibración del equipo o como referencia y son: bloques área-amplitud, bloques distancia-amplitud y los



bloques del tipo sancionado por el Instituto Internacional de Soldadura (International Institute of Welding. IIW). Estos bloques deben ser fabricados con materiales de composición química, tratamiento térmico y condiciones de maquinado en frío o en caliente similares a la del material que se examinará, y esto es para asegurar una velocidad sónica, atenuación e impedancia acústica igual entre el bloque de referencia y el material sometido a prueba.

#### II.7.1 BLOQUES AREA-AMPLITUD

Los bloques área-amplitud están provistos de defectos artificiales de diferentes tamaños pero a la misma profundidad. El juego bloques área-amplitud de la ASTM consta de 8 bloques redondos de 2" de diámetro y 3.750" de longitud. Cada bloque tiene una perforación de fondo plano (PFP) de 0.750" de profundidad en el centro de la superficie inferior, teniendo cada bloque una perforación de diferente diámetro que va desde 0.016" hasta 0.125". Bloques similares pero cuadrados con dimensiones de 1.938" por 3.750" son conocidos como la serie Alcoa-A, estos también tienen la misma serie de perforaciones que los ASTM. (Norma E-127).

Estos bloques sirven para verificar la linealidad del sistema de prueba; esto es, confirmar que la amplitud aumenta en forma

proporcional con el aumento del tamaño de la discontinuidad. Debido a que la perforación de fondo plano (FFP) es un reflector ideal y la mayoría de las discontinuidades tienen propiedades reflectivas menores a la ideal, los bloques área-amplitud definen el límite inferior para un tamaño dado de la discontinuidad, lo cual nos da una señal de cierta altura en la pantalla del osciloscopio.

#### II.7.2 BLOQUES DISTANCIA-AMPLITUD

Los bloques distancia-amplitud también conocidos como la serie Alcoa B o juegos de bloques Hitt, consiste en diecinueve bloques cilíndricos de 2" de diámetro, todos con FFP a 0.750" de profundidad y del mismo diámetro, taladrados en el centro del extremo inferior; estos bloques varían en altura para proveer distancias de metal de 0.063" a 5.750" desde la superficie de prueba hasta el PFP. Los diámetros de las perforaciones pueden ser de 0.047" o 0.078". Las distancias del metal son: de 0.063", 0.125" hasta 1" en incrementos de 0.125" de pulgada y de 1.250" a 5.750" en incrementos de media pulgada.

Estos bloques sirven como referencia para evaluar el tamaño de las discontinuidades a varias profundidades dentro del material de prueba. También sirven como referencia para estandarizar la

sensibilidad o ganancia del equipo de prueba, que pueda mostrar indicaciones legibles para todas las discontinuidades de un tamaño dado o mayores, pero no saldrán en la pantalla indicaciones de pequeñas discontinuidades que no son de interés.

Pueden utilizarse para establecer el DAC (corrección distancia-amplitud) para que una discontinuidad de un tamaño dado produzca una indicación con la misma amplitud, sin importar la profundidad.

#### II.7.3 JUEGO DE BLOQUES BASICOS DE CALIBRACION ASTM, DISTANCIA-AREA/AMPLITUD

El juego básico de ASTM consiste de diez bloques de 2" de diámetro, también tienen un PFP de 0.750" de profundidad. Un bloque tiene un PFP de 0.047" de diámetro y una distancia de metal de 3". Los siguientes siete bloques cada uno tiene un PFP de 0.078" de diámetro y una distancia de metal de 0.125", 0.250", 0.500", 0.750", 1.500", 3" y 6". Los dos bloques que restan tienen un PFP con 0.125" de diámetro y distancia de metal de 3" y 6" respectivamente.

Los bloques 3, 5 y 8 con una distancia de metal de 3", proveen una relación de area/amplitud, y los siete bloques

restantes, seis con PFP de 0.078", de diámetro y uno con PFP de 0.125", proveen la relación distancia-amplitud.

Es importante que el material de que están hechos los bloques de prueba sea el mismo o similar al del espécimen de prueba. El contenido de aleantes, tratamiento térmico, grado de trabajo en frío o caliente desde forja, rolado, etc., todos afectan las propiedades acústicas del material. Si los bloques de prueba de material idéntico al sometido a inspección no están disponibles, se debe buscar un material con propiedades similares en atenuación de sonido, velocidad e impedancia.

#### II.7.4 BLOQUE BASICO DE CALIBRACION

Las perforaciones del bloque básico de calibración sirven como reflectores para establecer una respuesta de referencia primaria del equipo y para construir la curva de corrección de distancia-amplitud para detectar, localizar y evaluar discontinuidades en uniones soldadas usando transductores de haz angular.

#### II.7.5 BLOQUES DE CALIBRACION ESPECIALES

Estos bloques no se les considera precisamente como bloques de referencia, ya que su función no es específicamente la de

establecer la sensibilidad o fijar la ganancia en la cual todas las discontinuidades del tamaño especificado o mayores serán detectadas.

Son usados en la prueba de contacto para verificar la operatividad de los instrumentos ultrasónicos y de los transductores para hacer ciertos ajustes a los instrumentos, con el propósito de situar mejor las condiciones de prueba.

Los bloques de este tipo pueden ser:

- a) Bloque A2 (BS 2704) o V-1 (IIW)
- b) Bloque A3 (Sulzer)
- c) Bloque DIN 54 122 y sus variantes
- d) Bloque DSC
- e) Bloque IOW para el perfil de haz
- f) Bloque de resolución de 30 agujeros de fondo plano
- g) Bloque de pasos

NOTA 1. En el APENDICE B se ilustran los bloques antes mencionados

NOTA 2. Las dimensiones se dan en pulgadas debido a que tanto la norma utilizada (ASTM, E-127) y el equipo de ultrasonido utilizan estas unidades. En el APENDICE C se da una tabla de conversión de unidades

## II.8 CRITERIOS Y TECNICAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES

El dimensionamiento de las discontinuidades comprende cuatro aspectos importantes de estas que son:

- a) Posición con respecto a la junta
- b) Tipo
- c) Ancho
- d) Largo

Para poder determinar el tipo de discontinuidad, primero se tiene que hacer un estudio completo del proceso de fabricación del material bajo examinación; despues hacer una examinación completa con ultrasonido y sólo hasta entonces se podría hablar de que tipo de discontinuidad se trata.

La determinación del tamaño de una discontinuidad es, sin duda, el aspecto mas controvertido de la interpretación y el que ha dado lugar a más trabajos de investigación y abundancia de bibliografía técnica. Especialmente, cuando se trata de una discontinuidad cuyo tamaño es menor que la sección transversal del haz ultrasónico.

Las dos dimensiones críticas de una discontinuidad son:

profundidad y longitud.

a) LONGITUD: La longitud se determina esencialmente moviendo el transductor paralelo a la cara de la discontinuidad y en seguida usar cualquier método de reducción o caída: 6 db o 20 db.

b) PROFUNDIDAD: La profundidad es más difícil de determinar ya que es altamente dependiente de la orientación de la discontinuidad. Sin embargo se puede hacer una determinación adecuada moviendo perpendicularmente el transductor a la discontinuidad y usando los métodos de reducción o caída de 6 db o 20 db, tomando en cuenta la geometría angular del haz.

Desde el punto de vista de inspección ultrasónica, se establece una clasificación del tamaño de las discontinuidades en "muy grandes" y "normales", sobre la base de que sean mayores o menores respectivamente que la sección transversal del transductor. Desde este punto de vista la determinación de su tamaño se realiza por técnicas diferentes.

#### II.8.1 DISCONTINUIDADES MAYORES QUE LA SECCION TRANSVERSAL DEL HAZ ULTRASONICO

El tamaño se determina desplazando el transductor por la

superficie de la pieza, de manera que quede trazado el contorno de la proyección de la discontinuidad sobre dicha superficie.

Esta técnica se denomina exploración "dinámica", en contraste con la exploración "estática" que se realiza para discontinuidades menores que la sección transversal del haz.

Una discontinuidad muy grande de forma arbitraria (grietas oblicuas o cavidades) se pueden explorar de igual manera, siempre que sea posible observar la variación de la altura de la indicación del eco de fondo que seguirá siendo regular. El tamaño así obtenido es, sensiblemente, independiente del nivel de sensibilidad del ensayo.

La técnica de exploración dinámica se aplica también en los casos en que la discontinuidad no intercepta totalmente el haz, pero presenta una dimensión preferente que la hace extenderse fuera de los límites del cono de radiación. Este es el caso de algunos tipos de grietas, inclusiones o cavidades alargadas, cuya logitud se determina moviendo el transductor desde la posición de máxima altura de la indicación hasta que, a ambos lados, se reduzca su amplitud a valores previamente definidos ( $1/5$  de la altura inicial, por ejemplo).



## II.8.2 DISCONTINUIDADES MENORES QUE LA SECCION TRANSVERSAL DEL HAZ ULTRASONICO

En este caso, no se puede realizar la exploración dinámica y la determinación del tamaño de la discontinuidad se lleva a cabo ajustando el sistema de inspección a un cierto patrón. Hay dos razones para hacer esto:

- a) Asegurar la repetibilidad de la inspección
- b) Establecer un criterio de aceptación

El patrón de calibración común es una pieza de material lo más similarmente posible al material que esta siendo inspeccionado. Esta pieza de calibración (bloque patron) deberá proveer una representación artificial de las condiciones reales de trabajo y esto se puede lograr mediante agujeros de fondo plano, agujeros laterales, ranuras, hendiduras, escalones o algunas grietas de fatiga deliberadamente inducidas. Los tipos de bloques de calibración así como las discontinuidades artificiales contenidas en ellos, dependerán del código de inspección aplicable.

## II.9 METODOS DE AJUSTE DE LA SENSIBILIDAD

Para efectuar el ajuste de la sensibilidad existen dos grandes métodos:

### II.9.1 METODO DE REFLEXION DE PARED POSTERIOR

Con este método el sistema ultrasónico se ajusta para que la primera reflexión de pared posterior sea de una amplitud determinada (75% +/- 5% según ASME), cuando el transductor es colocado en un área libre de indicaciones de la pieza bajo examinación. El método solo es aplicable para partes con caras paralelas, normalmente con haz longitudinal. El ajuste se debe hacer cada vez que varíe el espesor, condición superficial o la estructura del material.

### II.9.2 METODO DE BLOQUES DE CALIBRACION

Los bloques de calibración empleados en este método pueden ser aquellos que tengan agujeros de fondo plano, agujeros laterales, ranuras, hendiduras, escalones, etc.

Los factores que determinan la evaluación de una discontinuidad son los siguientes:

- a) Orientación de la discontinuidad en el material de prueba
- b) Tamaño de la discontinuidad
- c) Forma de la discontinuidad
- d) Ubicación de la discontinuidad
- e) Tipo y condición del material de prueba

#### II.9.2.1 ALTURA DE LA PANTALLA SHM (SCREEN HEIGHT METHOD)

Este es uno de los métodos de evaluación más simple y sencillo, para ello es necesario un bloque de referencia con una discontinuidad artificial de tamaño conocido y una distancia o profundidad similar a la de la discontinuidad que se desea evaluar. Al efectuar el ajuste del instrumento la amplitud de la reflexión del fondo de la perforación es regulada al 50% y se realiza un barrido en el material de prueba observando las señales que se producen en el osciloscopio.

#### II.9.2.2 CORRECCION DISTANCIA-AMPLITUD (DAC)

En este método se corrige la amplitud de la señal de acuerdo a la distancia a la cual está el reflector de la superficie. En este caso se debe utilizar un juego de bloques de corrección Distancia-Amplitud.

En este método se utiliza una curva obtenida con las señales de los bloques de calibración, a esta curva se le conoce como "línea de amplitud de referencia" o "curva de amplitud".

Con este método únicamente podemos aceptar o rechazar, es decir, las reflexiones cuya amplitud rebase la curva de amplitud, se rechazan y las reflexiones por abajo o sobre la curva de amplitud se aceptan.

### II.9.2.3 CORRECCION AREA-AMPLITUD

En este método se usa el control de ganancia calibrada y se cuantifica la ganancia que se tiene que usar para el reflector de referencia.

Se coloca el transductor sobre el reflector y se obtiene la señal de máxima amplitud. Se ajusta la amplitud al 70% y se toma nota de la cantidad de decibels y esta cantidad será el nivel de referencia.

Una discontinuidad en el material de prueba que esté a la misma profundidad del reflector calibrado, producirá una amplitud mayor o menor del 70%:

- a) Amplitud mayor al 70%

Con el control de ganancia se ajusta la señal al 70%, tomándose en cuenta la cantidad de decibeles que se requirieron para el ajuste. Esta cantidad de decibeles nos lleva a una tabla de "decibeles contra relación de amplitud" (Tabla 1), y por una relación directa, se calcula la magnitud de la discontinuidad.

b) Amplitud menor al 70%

Con el control de ganancia, incrementamos los decibeles hasta hacer que la reflexión de la discontinuidad tenga una amplitud igual al 70%. Con la cantidad de decibeles incrementados se saca la relación y el área de referencia se divide entre la relación encontrada en la tabla.

Ejemplo:

- 13 decibeles nos da una relación de 4.47:1

- 1/8" area de referencia

$$.125 / 4.47 = 0.027"$$

Por lo tanto ese es el tamaño real de la discontinuidad.

Tabla 1. Decibeles contra Relación de Amplitud

dB	RELACION	dB	RELACION
0	1.00:1	11	3.55:1
.5	1.06:1	12	3.98:1
1	1.12:1	13	4.47:1
2	1.25:1	14	5.01:1
3	1.41:1	15	5.62:1
4	1.58:1	16	6.31:1
5	1.78:1	17	7.08:1
6	2.00:1	18	7.94:1
7	2.24:1	19	8.91:1
8	2.51:1	20	10.00:1
9	2.82:1	40	100.00:1
10	3.16:1	60	1000.00:1

## CAPITULO III

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

### III.1 FABRICACION DEL PATRON

En la elaboración del patrón para realizar la Inspección Ultrasonica en piezas fundidas de aluminio, se vieron implicadas una serie de etapas, que corresponden a la totalidad de un proceso de fabricación comercial de productos de fundición.

A continuación se detallaran estas etapas para una mejor comprensión del trabajo realizado.

#### 1.- Diseño:

Se pensó en hacer una placa como patrón, por tener una gran versatilidad para darle ciertas características (que detallaremos posteriormente), que necesitamos para calibrar el equipo de Inspección Ultrasonica.

Las dimensiones de esta placa son:

- Largo: 8"
- Ancho: 4"
- Espesor: 1"



## 2.- Modelo:

El modelo de la placa se realizó en madera. El modelo se sobredimensionó para evitar los problemas que nos puede traer la aparición de contracciones y/o rechupes en el cuerpo de la placa, así como para poder realizar todos los cortes y perforaciones necesarios. De tal forma que las dimensiones del modelo eran 9" X 5" x 2".

La placa se moldeó en arena (Moldeo en Verde), con esto ya se tenía listo el modelo y solo hacía falta vaciar el aluminio.

## 3.- Fusión:

Se fundió aluminio puro de grado conductor, al cual una vez estando líquido y a una temperatura adecuada se le dió un tratamiento, el cual consistió en utilizar un refinador de grano y posteriormente una desgasificación.

Terminado este tratamiento se vació el metal en el molde obteniéndose la placa antes mencionada.

## 4.- Rectificado de la Placa:

Debido a que la pieza obtenida de la fundición está

sobredimensionada fue necesario corregirlas, de tal forma que mediante el uso de un capillo mecánico se eliminó el material sobrante hasta dejar la placa en las dimensiones correctas de 8" X 4" X 1" +/- 0.025".

Teniendo la placa las dimensiones correctas se le mandó a hacer una radiografía, esto para ver si la pieza tenía imperfecciones internas o no. En caso de que presentara defectos como atrapamiento de escoria o gases así como porosidad se pudiera localizar y evaluar para evitar problemas posteriores.

#### 5.- Características Especiales en la Placa:

Llamaremos características especiales a una serie de perforaciones y cortes que se le hicieron a la placa, estos cortes y perforaciones tienen por objetivo servir como fallas artificiales, para poder utilizarlas posteriormente como referencia en la calibración del equipo de ultrasonido.

Las perforaciones se realizaron de tal forma que, además de tener una profundidad bien definida y tener diferentes diámetros tienen el fondo plano. La profundidad y los diámetros de éstas se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Profundidad y Diámetro de las Perforaciones

DIAMETRO DE PERFORACION ( in )	PROFUNDIDAD DE LA PERFORACION ( in )	DISTANCIA DEL METAL ( in )
0.047	1.000	3.000
0.078	0.250	0.750
0.078	0.500	0.500
0.078	0.750	0.250
0.078	0.875	0.125
0.078	1.000	3.000
0.078	1.500	1.500
0.125	1.000	3.000

Con la profundidad definida de la perforación queda fijada implícitamente la distancia del metal, esto es, la distancia que existe entre la superficie de entrada del haz ultrasónico en la pieza y la superficie de la perforación de fondo plano (Figura 10).

Esta distancia es la que se utiliza para la calibración de distancia-amplitud, siempre y cuando sea con las perforaciones del mismo diámetro.

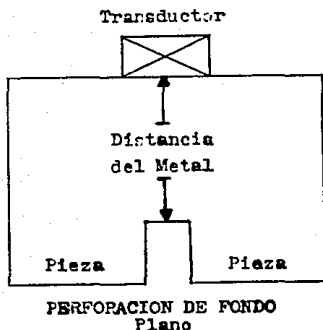


Figura 10. Representación esquemática de la distancia del metal

Por lo que respecta a los cortes estos se realizaron principalmente, para tener las distancias necesarias para la calibración del equipo entre la superficie de entrada y las discontinuidades creadas en la placa; así como también la fabricación de escalones en un extremo de la placa, estos últimos para poder realizar la medición de espesores.

A continuación mediante una serie de figuras se ilustrará como fue la distribución tanto de los cortes como de las perforaciones en la placa.

- a) Sobre la superficie de 1" X 8" se hicieron tres

perforaciones, de las cuales la primera esta a 0.500" de la orilla. la segunda y la tercera a 1" cada una con respecto a la otra. Las tres perforaciones tienen una profundidad de 1", pero, son de distintos diámetros, la primera es de 0.047", la segunda es de 0.078" y la tercera de 0.125". En la Figura 11 se ilustra lo anteriormente explicado para una mejor comprensión.

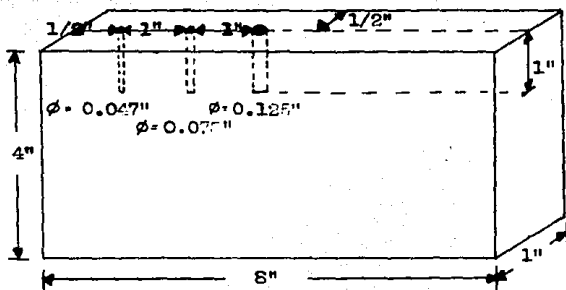


Figura 11. Ilustración de la perforaciones que se utilizan en la calibración área-amplitud

b) En la parte central de la placa, sobre el área de 4" X 8" se hicieron cuatro perforaciones, que están situadas de la siguiente manera; el primero a 0.500" de la orilla y los demás

a 1" cada una respecto a la anterior quedando la última a 0.500" de la otra orilla; estas perforaciones tienen el mismo diámetro que es de 0.078", pero la profundidad de las perforaciones fue diferente para todas ellas. Las profundidades fueron 0.875", 0.750", 0.500" y 0.125". Esto se ilustra en la Figura 12.

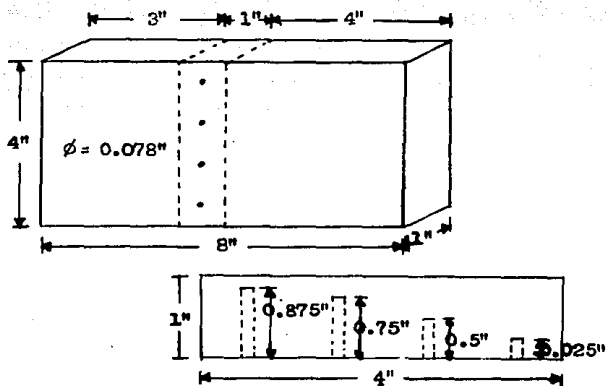


Figura 12. Perforaciones que se utilizan en la calibración distancia-amplitud

c) En el extremo restante, que es una superficie de 4" X 3", se hicieron una serie de escalones a lo largo de las 3" que se tenían disponibles. Estos escalones se hicieron de tal forma

que las alturas de cada uno de ellos fuera: partiendo del centro de la placa hacia la orilla, el primero tuviera un espesor de 0.8", el segundo de 0.6", el tercero de 0.4", el cuarto de 0.2" y el último de 0.1". Estos escalones se muestran en la Figura 13.

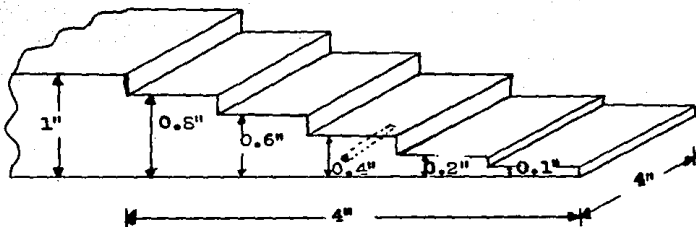


Figura 13. Representación de los escalones que se hicieron en la placa

d) En un costado del escalón de 0.6" de espesor se hizo una perforación de 0.078" de diámetro con una profundidad de 1.500". Esta perforación se puede observar en la Figura 13.

Todas las dimensiones de la placa tienen una tolerancia de  $\pm 0.025"$ , con una superficie lo más tersa que fuese posible, por lo que toda la placa se desbastó con lija grado 600.

### III.2 CALIBRACION DEL EQUIPO ULTRASONICO

El equipo ultrasónico se calibró utilizando el patrón fabricado; los métodos de calibración que se utilizaron fueron el de área-amplitud, el de distancia-amplitud y el de reflexión de pared posterior.

#### III.2.1 CORRECCION DISTANCIA-AMPLITUD

Para la calibración por el método de Corrección Distancia-Amplitud (DAC) se hizo lo siguiente:

- 1.- Se utilizaron exclusivamente las perforaciones cuyo diámetro fuese el mismo.
- 2.- Se seleccionó la perforación con menor distancia del metal, esto es, el de 0.078" de diámetro y de 0.125" de distancia de metal, asegurandonos con esto que los ecos subsecuentes aparecerán en la pantalla.
- 3.- Se posiciona el transductor en la parte superior de la superficie de entrada sobre la perforación aproximadamente.
- 4.- Se mueve el transductor en forma horizontal hasta que la indicación en la pantalla tiene su máxima amplitud.



5.- Se ajusta el control de ganancia de modo que la amplitud tenga un 80% de la altura de la pantalla.

6.- Se coloca el transductor sobre otra perforación del patrón y así sucesivamente.

7.- Con cada nueva posición del transductor se repiten los pasos 3 y 4.

8.- Se leen las alturas de las señales obtenidas por cada una de las perforaciones.

9.- Se grafican las alturas de cada perforación contra su distancia del metal. La gráfica resultante debe ser similar a la que se presenta en la Figura 14.

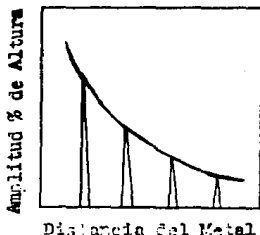


Figura 14. Curva de corrección distancia-amplitud

### III.2.2 CALIBRACION AREA-AMPLITUD

La curva de Area-Amplitud se determinó por el procedimiento que a continuación se enlista:

1.- Se utilizan aquellas perforaciones del patrón que tienen la misma distancia del metal.

2.- Se selecciona la perforación de 0.078" de diámetro.

3.- Se coloca el transductor en la superficie de entrada.

4.- Se mueve el transductor de modo que la señal que se obtenga tenga una máxima amplitud.

5.- Se ajusta el control de la ganancia de manera que la señal tenga una altura del 70% de la altura total de la pantalla.

6.- Se desliza el transductor sobre la superficie del patrón de modo que quede sobre otra perforación y se repiten los pasos 3 y 4.

7.- Se grafican las amplitudes de cada perforación contra el cuadrado del diámetro de la perforación.

8.- Se traza una línea recta entre el origen y la señal obtenida por la perforación que se utilizó para fijar la ganancia. Una desviación significativa de la línea recta es notada y usada como corrección a las indicaciones de fallas reales (zona sombreada en la Figura 15).



Figura 15. Gráfica de calibración área-amplitud

Otra forma de realizar la calibración Area-Amplitud es mediante el continuo ajuste del control de ganancia.

Este método se utiliza cuando el equipo que se emplea tiene control de ganancia calibrada, con el que se puede determinar el tamaño de falla.

El método utiliza un patrón de referencia, con un reflector de diámetro y a una distancia de la superficie definida.

La señal de la pantalla se ajusta al 70% de la altura total de la pantalla. Al número de decibeles de ganancia calibrada que deben ser fijados en el instrumento, para hacer que la señal del reflector de referencia obtenga su punto máximo en la línea de referencia que se le denomina "nivel de referencia".

La señal que se obtenga de un material de prueba, debe también ajustarse al 70% de la altura de la pantalla. Al número de decibeles de ganancia calibrada que deben ser fijados en el instrumento para que la señal de un reflector suba o baje la línea de referencia previamente establecida se le denomina "nivel de indicación".

La diferencia entre el nivel de referencia y el nivel de indicación nos muestra la relación existente entre la magnitud de la falla y la del reflector del patrón.

De tal forma que si restamos el nivel de indicación ( $N_i$ ) del nivel de referencia ( $N_r$ ) nos da una cantidad de decibeles que, comparandolos con los de la Tabla 2 obtendremos la relación del reflector del material de prueba y de la del reflector del patrón.

Si el nivel de indicación es mayor que el nivel de referencia, es decir, la diferencia de la resta es negativa la relación se toma en forma inversa.

Para una mejor visualización de esto es necesario observar los ejemplos siguientes:

Ejemplo 1.

Si un patrón de prueba necesita 32 db para fijar su nivel de referencia y el material a probar, con un reflector a la misma profundidad, se requieren de 26 db para ajustar la señal del reflector al nivel de referencia, tendremos:

$$N_r = 32 \text{ db}$$

$$N_i = 26 \text{ db}$$

$$N_r - N_i = 32 - 26 = 6 \text{ db}$$

De acuerdo a la Tabla 2, 6 db representan una relación de 2.00:1, lo que significa que el reflector del material de prueba tiene una extensión del doble del área de dicho reflector del patrón.

Ejemplo 2.

Si el reflector del material de prueba del ejemplo anterior

hubiera necesitado de una ganancia de 38 db para llevarlo al nivel de referencia, tendríamos:

$$N_r = 32 \text{ db}$$

$$N_i = 38 \text{ db}$$

$$N_r - N_i = 32 - 38 = -6 \text{ db}$$

Lo que significa que el reflector del material de prueba tendría la mitad de la extensión del área del reflector del patrón.

### III.2.3 CALIBRACION MEDIANTE LA REFLEXION DE LA PARED POSTERIOR

Este tipo de calibración se aplica cuando se van a medir espesores, para hacer esto se utilizan los escalones que se fabricaron en la placa.

La manera de realizar esta calibración es:

- 1.- Se fija en el instrumento el rango en el cual vamos a realizar la inspección, esto para no tener señales fuera de la pantalla.

- 2.- Se coloca el transductor sobre uno de los escalones y se

ajusta la posición de la señal a la del espesor del escalón utilizado.

3.- Se comprueba esto observando el segundo eco, que debe estar a la misma distancia que el primero está de la señal inicial.

4.- Una vez hecho esto se toma una medición de otro escalón, con lo que tenemos una señal que la comparamos con el espesor del escalón que ya conocemos.

### III.3 VERIFICACION DEL PATRON

El objetivo de esta sección es comprobar si el patrón fabricado se puede utilizar en la calibración del equipo ultrasónico y en consecuencia en la inspección de diferentes aleaciones de aluminio.

Para hacer esto se fabricaron seis aleaciones base aluminio, con ciertos tratamientos del metal líquido como son desgasificación, modificación y refinamiento de grano.

En la Tabla 3 se muestran las diferentes aleaciones fabricadas así como el tratamiento del metal líquido que tiene.

Con las aleaciones fabricadas se hicieron unos pequeños bloques a los cuales les corresponde el número de pieza indicado en la Tabla 3. A estos bloques se les hicieron varias perforaciones las cuales nos sirven para simular que se esta examinando una pieza con uno o varios defectos.

Por otra parte, como estos bloques estan fabricados con diferentes aleaciones y estas a su vez tienen diferente tratamiento del metal líquido se pueden utilizar para establecer que tipo de aleación y que tratamiento son los más adecuados para la elaboración de patrones.



Tabla 3. Aleaciones Fabricadas y su Tratamiento

BLOQUE No.	ALEACION	TRATAMIENTO
1	Al - 5% Si	Desgasificado
2	Al - 5% Si	Desgasificado y Modificado
3	Al - 5% Si	Desgasificado y Refinado
4	Al - 5% Si	Desgasif., Modificado y Refinado
5	Al - 4% Cu	Desgasificado
6	Al - 4% Cu	Desgasificado y Refinado
7	Al - 6% Zn	Desgasificado
8	Al - 6% Zn	Desgasificado y Refinado
9	Al - 1% Ni	Desgasificado
10	Al - 1% Ni	Desgasificado y Refinado
11	Al - 4% Mg	Desgasificado
12	Al - 4% Mg	Desgasificado y Refinado
13	Al - 6% Sn	Desgasificado
14	Al - 6% Sn	Desgasificado y Refinado

Los porcentajes de los elementos de aleación que se utilizaron para fabricar los bloques son porcentos en peso.

Los bloques se fabricaron con las siguientes dimensiones (Figura 16):

Largo: 3"

Ancho: 2"

Espesor: 1"

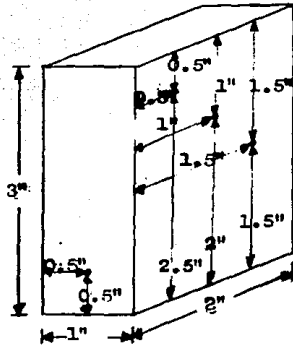


Figura 16. Ilustración de los bloques de prueba

La dimensión de las perforaciones así como sus distancias a las orillas se ilustran también en la Figura 16.

Estando el equipo calibrado con el patrón de aluminio puro se inspeccionan los bloques determinando los siguientes aspectos:

- Detección de fallas
- Determinación de la profundidad de la falla
- Determinación del tamaño de la falla
- Medición de espesores

Una vez hechas todas las determinaciones descritas anteriormente se podrá tener la capacidad para decidir si el patrón fabricado realmente se puede utilizar en la inspección ultrasónica de piezas fundidas de aluminio y sus aleaciones.

### III.4 APLICABILIDAD DEL PATRÓN

La aplicabilidad del patrón se refiere a que una vez estando calibrado el equipo de ultrasonido, se pueda utilizar en la detección de defectos (macrorechupes, macroinclusiones, etc.) en piezas provenientes de fundición.

Para realizar esto se utilizaron las piezas de aluminio que se tienen en el almacén del edificio "D"; estas piezas tienen la característica de tener rechupes en ciertas zonas, estos rechupes en algunas piezas son internos y en otras son externos, también es posible que tengan cierta cantidad de porosidades las cuales se intentará encontrar su localización y evaluar su tamaño y por otra parte detectar la posible presencia de escoria u otro material atrapado en la pieza. Una ventaja que presenta la utilización de estas piezas es que están fabricadas con una aleación de aluminio comercial cuya composición es:

Cu: 0.076 %

Mn: 0.120 %

Mg: 0.002 %

Fe: 0.680 %

Pb: 0.030 %

Zn: 1.680 %

Si: 0.026 %

Ti: 0.001 %

También se utilizó una pieza con una aleación diferente a la anterior. Esta pieza es de Al - 12% Si (aleación eutéctica). Al igual que las otras piezas esta también presenta ciertas características que se pueden utilizar en la comprobación de la aplicabilidad del patrón.

La técnica de examinación que se utilizó para pequeñas piezas de fundición consiste en:

1.- Realizar un desbaste manual sobre la superficie de prueba con un lija de grado 100 y otra de grado 320, esta operación tiene el fin de evitar la rugosidad de la superficie que tiene la pieza después de ser desmoldeada y de este modo aseguramos un contacto adecuado entre la superficie de prueba y el transductor.

2.- Recorrer toda la superficie de prueba lentamente con un movimiento en la dirección X primero y después en la dirección Y en un plano formado en la pieza, esto se hace para poder detectar los defectos, si es que estos están presentes en la misma.

3.- Analizar las señales de la pantalla para determinar la

profundidad de los defectos, así como su dimensión.

4.- Estando detectados los defectos se corta la pieza para verificar si la interpretación de la lectura hecha con el equipo ultrasónico es correcta o no. Es decir se miden las profundidades y distancias del defecto para comprobar los datos obtenidos.

Con estos pasos realizados podremos decir que el patrón sirve o no en la inspección de piezas de aluminio.

Las piezas que se utilizaron en la comprobación de la aplicabilidad del patrón fueron:

Pieza 1.- La pieza tiene forma de "X" la cual presenta un rechupe en la parte central, este rechupe llega a la superficie.

Pieza 2.- Esta también tiene forma de "X", pero no presenta un rechupe interno si no que tiene contracciones externas en una de sus superficies.

Pieza 3.- Tiene forma de "L" y también presenta contracciones externas en una de las superficies.

Pieza 4.- La pieza tiene forma de "T" y tiene un rechupe interna que también llega a la superficie por la base de la "T".

Pieza 5.- Consta de cuatro escalones, en el más grande se encuentra un rechupe interno el cual apenas llega a la superficie, pero este rechupe se prolonga hacia el interior de la pieza en forma irregular.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS



Una vez teniendo el patrón terminado lo primero que se hizo fue colocar el transductor sobre la placa, esto para realizar una pequeña inspección en todas sus dimensiones, de tal forma que pudieramos observar que aparecieran todos los ecos en la pantalla.

Al realizar esta pequeña inspección nos percatamos que la señal ultrasónica era atenuada en gran medida. Esto se notó cuando al colocar el transductor sobre la superficie de 4" X 8" solo se obtenía el eco de la superficie posterior y no los dos ecos que deberíamos observar ya que el equipo estaba ajustado en un rango de 2.5", de igual forma cuando se ajusto en 10" solo se observó un eco y no los 10 que deberíamos observar.

Cuando se efectuó la pequeña inspección en las otras superficies de la placa, se observaron resultados similares de atenuación, pero en este caso colocando el transductor en la superficie de 1" X 8" solo aparecía el eco de la superficie posterior si aplicabamos una alta sensibilidad (mucho ganancia). Al inspeccionar por la superficie de 1" X 4" no se pudo encontrar el eco de la superficie posterior.

Al aplicar las diferentes técnicas de calibración mencionadas en el capítulo anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

Primero.- Correccion Distancia-Amplitud

Para realizar esto se utilizó un transductor de 5 MHz, con un diámetro de 0.75", el equipo ultrasónico se ajustó a un rango de 2.5" y los resultados fueron:

DISTANCIA DEL METAL	AMPLITUD % ALTURA
0.125"	--
0.250"	90
0.500"	70
0.750"	42
1.000"	2

Con estos datos se construyo la curva de corrección Distancia-Amplitud (Figura 17).

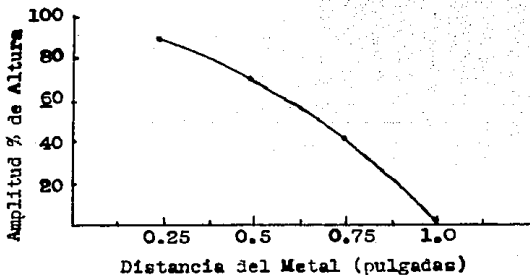


Figura 17. Curva experimental distancia-amplitud

## Segundo.- Calibración Area-Amplitud

Esta prueba se complicó en su realización debido a la atenuación del haz ultrasónico, por lo que fue necesario reducir la distancia del metal en la zona donde se tenían las 3 perforaciones de fondo plano con los siguientes diámetros 0.047", 0.078" y 0.125". De esta forma la distancia del metal de 3" que teníamos se redujo primero a 2" pero tampoco se tenía ningún resultado por lo que se quitó otra pulgada de metal, quedando esta distancia en 1".

En estas condiciones si fue posible detectar las señales y proceder con la técnica de calibración la cual produjo los siguientes resultados:

Utilizando la perforación de 0.078" como referencia se fijó la altura del eco en 70% y esto fue con una ganancia de 68 db.

Cuando se colocó el transductor sobre la perforación de 0.047" se ajustó la altura del eco a 70% obteniendo una lectura en el control de ganancia de 72 db.

Haciendo lo mismo para la perforación de 0.125" se obtuvo un nivel de ganancia de 64 db.

Al realizar las operaciones se vió que:

- Perforación de referencia 0.078"
- Nr = 68 db
- Ni = 72 db para 0.047"
- Ni = 64 db para 0.125"
- Relación de la Tabla 2, 4 db = 1.58:1

para la perforación de 0.047"

$$0.078" / 1.58 = 0.049"$$

para la perforación de 0.125"

$$0.078" * 1.58 = 0.123"$$

Tercero.- Calibración Mediante la Reflexión de la Pared Posterior

Esta prueba se realizó utilizando los escalones del patrón y ajustando el equipo ultrasónico en un rango de 2.5", obteniéndose los siguientes resultados:

DISTANCIA DEL META.	LECTURA EN LA PANTALLA	DIMENSION MEDIDA
0.1"	---	---
0.2"	1.0	0.25"
0.4"	1.8	0.45"
0.6"	2.5	0.63"
0.8"	3.2	0.80"
1.0"	4.0	1.00"

En la Figura 18 se observa la desviación que presentan las lecturas del equipo con respecto al verdadero espesor de los escalones.

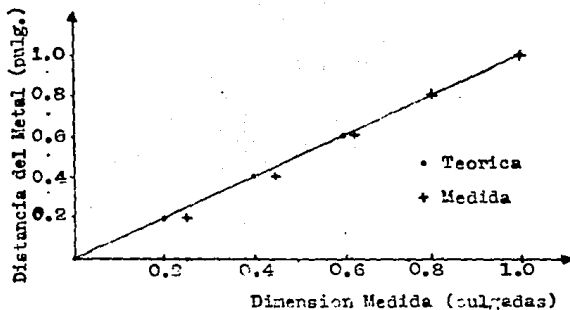


Figura 18. Resultados de la medición de espesores en el patrón

#### Cuarto.- Verificación del Patrón

Para la verificación del patrón se utilizaron los bloques hechos de diferentes aleaciones, así como con diferentes tratamientos del metal líquido.

En la Figura 16 se muestran las dimensiones que se revisaron en los bloques, estando el equipo calibrado con respecto a la sección que presenta 1" de espesor. Debido a que no se tenían todos los ecos solo se tomó el primero para ajustar los controles y poder tener una respuesta más o menos aproximada al momento de realizar la inspección de los bloques.

La inspección se realizó con el equipo ajustado primero en un rango de 2.5" y después en el rango de 10". Los resultados de las inspecciones se muestran en las Tablas 4 y 5; en las cuales el número de los bloques corresponde a la aleación de la cual están hechos así como su tratamiento del metal líquido (Tabla 3).

Tabla 4. Resultados de la Inspección con Rango de 2.5"

No. de BLOQUE	DIMENSION REAL	LECTURA OBSERVADA	DIMENSION REGISTRADA
1	0.5"	1.9	0.475"
	1.0"	3.8	0.950"
	1.5"	5.8	1.450"
	2.0"	7.6	1.900"
	2.5"	---	-----
2	0.5"	1.9	0.475"
	1.0"	3.8	0.950"
	1.5"	---	-----
	2.0"	7.6	1.900"
	2.5"	---	-----
3	0.5"	1.9	0.475"
	1.0"	3.9	0.975"
	1.5"	5.9	1.475"
	2.0"	7.6	1.900"
	2.5"	---	-----
4	0.5"	---	-----
	1.0"	3.9	0.950"
	1.5"	---	-----
	2.0"	---	-----
	2.5"	---	-----
5	0.5"	---	-----
	1.0"	---	-----
	1.5"	---	-----
	2.0"	---	-----
	2.5"	---	-----
6	0.5"	2.0	0.500"
	1.0"	4.0	1.000"
	1.5"	---	-----
	2.0"	7.9	1.975"
	2.5"	---	-----
7	0.5"	2.0	0.500"
	1.0"	3.9	0.950"
	1.5"	5.7	1.425"
	2.0"	7.6	1.900"
	2.5"	---	-----

Tabla 4. Continuación

No. de BLOQUE	DIMENSION REAL	LECTURA OBSERVADA	DIMENSION REGISTRADA
8	0.5"	1.9	0.475"
	1.0"	3.8	0.950"
	1.5"	5.6	1.400"
	2.0"	7.6	1.900"
	2.5"	---	-----
9	0.5"	2.0	0.500"
	1.0"	4.1	1.025"
	1.5"	---	-----
	2.0"	8.0	2.000"
	2.5"	---	-----
1	0.5"	2.1	0.525"
	1.0"	4.1	1.025"
	1.5"	---	-----
	2"	8.0	2.000"
	2.5"	---	-----
11	0.5"	2.0	0.500"
	1.0"	3.9	0.975"
	1.5"	5.6	1.400"
	2.0"	7.8	1.950"
	2.5"	---	-----
12	0.5"	2.0	0.500"
	1.0"	3.9	0.975"
	1.5"	5.7	1.425"
	2.0"	7.7	1.925"
	2.5"	9.5	2.375"
13	0.5"	2.0	0.500"
	1.0"	4.2	1.050"
	1.5"	---	-----
	2.0"	---	-----
	2.5"	---	-----
14	0.5"	2.0	0.500"
	1.0"	4.0	1.000"
	1.5"	---	-----
	2.0"	8.0	2.000"
	2.5"	---	-----



Tabla 5. Resultados de la Inspección con Rango de 10"

No. de BLOQUE	DIMENSION REAL	LECTURA OBSERVADA	DIMENSION REGISTRADA
1	0.5"	0.5	0.500"
	1.0"	1.0	1.000"
	1.5"	1.4	1.400"
	2.0"	1.9	1.900"
	2.5"	---	---
	3.0"	2.9	2.900"
2	0.5"	0.5	0.500"
	1.0"	1.0	1.000"
	1.5"	---	---
	2.0"	1.9	1.900"
	2.5"	---	---
	3.0"	2.8	2.800"
3	0.5"	---	---
	1.0"	1.0	1.000"
	1.5"	1.5	1.500"
	2.0"	1.9	1.900"
	2.5"	---	---
	3.0"	2.9	2.900"
4	0.5"	---	---
	1.0"	1.0	1.000"
	1.5"	---	---
	2.0"	---	---
	2.5"	---	---
	3.0"	---	---
5	0.5"	---	---
	1.0"	---	---
	1.5"	---	---
	2.0"	---	---
	2.5"	---	---
	3.0"	---	---
6	0.5"	0.4	0.400"
	1.0"	1.0	1.000"
	1.5"	---	---
	2.0"	2.0	2.000"
	2.5"	---	---
	3.0"	---	---

Tabla 5. Continuación

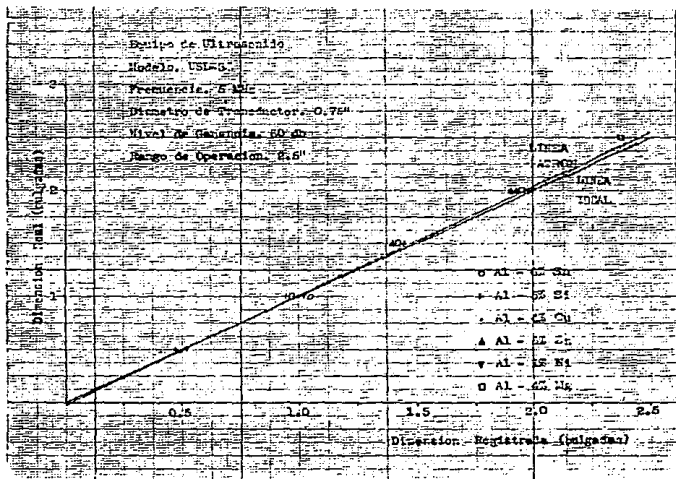
No. de BLOQUE	DIMENSION REAL	LECTURA OBSERVADA	DIMENSION REGISTRADA
7	0.5"	0.5	0.500"
	1.0"	0.9	0.900"
	1.5"	1.5	1.500"
	2.0"	1.9	1.900"
	3.0"	2.9	2.900"
8	0.5"	0.5	0.500"
	1.0"	1.0	1.000"
	1.5"	1.5	1.500"
	2.0"	1.9	1.900"
	3.0"	2.9	2.900"
9	0.5"	0.5	0.500"
	1.0"	1.0	1.000"
	1.5"	---	---
	2.0"	2.0	2.000"
	3.0"	---	---
10	0.5"	0.5	0.500"
	1.0"	1.0	1.000"
	1.5"	---	---
	2.0"	2.0	2.000"
	3.0"	---	---
11	0.5"	0.5	0.500"
	1.0"	1.0	1.000"
	1.5"	1.4	1.400"
	2.0"	2.0	2.000"
	3.0"	---	---
12	0.5"	0.5	0.500"
	1.0"	1.0	1.000"
	1.5"	1.5	1.500"
	2.0"	2.0	2.000"
	3.0"	2.5	2.500"

Tabla 5. Continuación

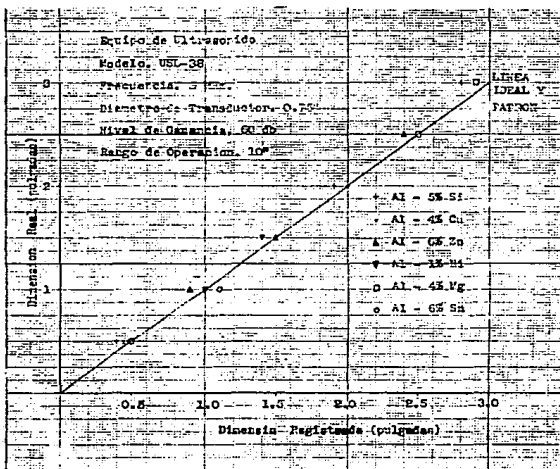
No. de BLOQUE	DIMENSION REAL	LECTURA OBSERVADA	DIMENSION REGISTRADA
13	0.5"	0.5	0.500"
	1"	1.1	1.100"
	1.5"	---	-----
	2"	---	-----
	2.5"	---	-----
	3.0"	---	-----
14	0.5"	0.5	0.500"
	1"	1.0	1.000"
	1.5"	---	-----
	2"	2.0	2.000"
	2.5"	---	-----
	3"	---	-----

Los bloques cuentan con una perforación de 0.078", la cual fue hecha en la sección que tiene 2" de espesor, de modo que la perforación solo tiene 1" de profundidad quedando otra pulgada de espesor en el bloque.

Como el equipo estaba calibrado para poder medir el tamaño de las discontinuidades se realizó una inspección de estas perforaciones, registrandose las diferencias en el control de ganancia. Para establecer el tamaño de las perforaciones es necesario recordar que el nivel de referencia es de 68 db para una perforación de 0.078". En la Tabla 6 se muestran los resultados de esta inspección.



Grafica 1. Resultados obtenidos en la medición de espesores y detección de discontinuidades para las diferentes aleaciones inspeccionadas (Rango = 2.5")



Grafica 2. Resultados obtenidos en la medición de espesores y detección de discontinuidades para las diferentes aleaciones inspeccionadas (Rango = 10")

Tabla 6. Resultados de la Medición del Tamaño de las Perforaciones

No. de BLOQUE	NIVEL DE INDICACION	DIFERENCIA DE db.	TAMANO MEDIDO
1	65	3	0.110"
2	85	-17	0.011"
3	60	8	0.196"
4	68	0	0.078"
5	70	- 2	0.062"
6	66	2	0.156"
7	60	8	0.196"
8	60	8	0.196"
9	66	2	0.156"
10	64	4	0.123"
11	68	0	0.078"
12	66	2	0.156"
13	68	0	0.078"
14	70	- 2	0.062"

Quinto.- Aplicabilidad del Patrón

Para verificar la aplicabilidad de la calibración realizada

con el patrón se inspeccionaron las piezas mencionadas en el inciso III.4, esta inspección se hizo con el equipo ajustado en un rango de 2.5"; en la inspección se registraron los siguientes resultados:

Pieza 1.- Para una mejor explicación la pieza se dividió en cinco partes como se ve en la Figura 19. A estas partes les corresponden los siguientes resultados.

a.- Respuesta homogénea en 1.750" y la pieza tiene un espesor de 1.750"

b.- Respuesta igual que en "a"

c.- La señal obtenida oscilaba entre 1.700" y 1.750", siendo el espesor real 1.750"

d.- Respuesta similar que en "a"

e.- En el extremo en el cual el rechupe llegaba a la superficie la lectura fue de 0.900" y fue aumentando hasta 1.075" en el otro extremo; las medidas reales para estos extremos fueron 1.000" y 1.100" respectivamente.

Pieza 2.- No se pudieron hacer las mediciones debido a que la superficie aun y cuando se desbastó es muy irregular lo cual no permite que se haga el contacto adecuado entre el transductor y la superficie de la pieza.

Pieza 3.- Esta pieza se dividió en tres partes las cuales se muestran en la Figura 19. A estas partes les corresponden los siguientes resultados.

a.- Registró una lectura de 1.750" en toda esa superficie y el espesor real es de 1.750"

b.- Esta superficie presentó los mismos resultados que la superficie "a"

c.- En esta parte se registró una disminución en el espesor; la medición fue de 1.550" a la cual le corresponde un espesor real de 1.500"; en los límites de las partes "a" y "b" se nota una pequeña disminución en la medición del espesor

Pieza 4.- Al igual que las piezas anteriores esta también se dividió pero en cuatro partes como se muestra en la Figura 19. En la inspección de esta pieza se obtuvieron los siguientes resultados:

a.- En esta parte de la "T" se observó un rechupe que llegaba a la superficie por la base de la "T", al hacer las mediciones con el equipo ultrasónico se encontró una variación en la lectura que va de 0.975" hasta 1.150" en la parte donde se une a la sección "c"; en las orillas la lectura era de 1.750" ya que el rechupe no salía por las paredes de la pieza. Estas mediciones se comprobaron haciendo una medición directa sobre la pieza con un Vernier y las dimensiones si correspondían a las determinadas con el equipo ultrasónico.



b.- Aquí se registró una distancia uniforme de 1.750" en toda la zona.

c.- No se obtuvo ninguna lectura ya que la pieza en esta zona presentaba una contracción lo cual no permitía el adecuado contacto entre el transductor y la superficie sujeta a examinación.

d.- Presenta las mismas condiciones que la zona "b", con un espesor de 1.750" tanto determinado con el equipo así como el medido con el Vernier.

Pieza 5.- Esta pieza que está formada por cuatro escalones también se dividió en cuatro, es decir, cada escalón se inspeccionó por separado; en la Figura 19 se ilustran tanto la pieza completa como cada escalón que a su vez fue dividido. Los resultados obtenidos fueron.

a.- En esta parte se apreciaba un rechupe que salía a la superficie, pero en el interior de la pieza era mayor. En las zonas "1" y "2" se obtuvo una medición de 1.825" que sí correspondía con el espesor verdadero; la zona "3" presentaba un espesor de 1.650" debido a una contracción en la superficie posterior a la de inspección; en la zona donde se encontraba el rechupe interno se tomaron las siguientes mediciones: zona "4" espesor de 0.900", la zona "5" un espesor de 1.000" y en la zona "6" la lectura varía desde 0.800" hasta 1.100", siendo éstas las medidas reales con una variación de +/- 0.050".

b.- En este escalón los dos extremos presentaron la misma lectura de 1.400" y en la zona central un espesor de 1.275" esto debido a la contracción de la superficie posterior, en ambos caso las dimensiones reales son 1.500" y 1.300" respectivamente.

c.- Casi toda la pieza presentó un espesor único de 0.950" al cual le corresponde el espesor real de 1.000"; la única zona donde presentó una disminución del espesor fue en la zona central y tendiendo al escalón "b" donde la lectura fue de 0.900" esto debido a la última parte de la contracción que afectó a los escalones "a" y "b".

d.- Este escalón presenta en uno de los extremos un espesor 0.500" y en el otro de 0.450" siendo la variación uniforme desde un extremo al otro; en este escalón el espesor real era de 0.500".

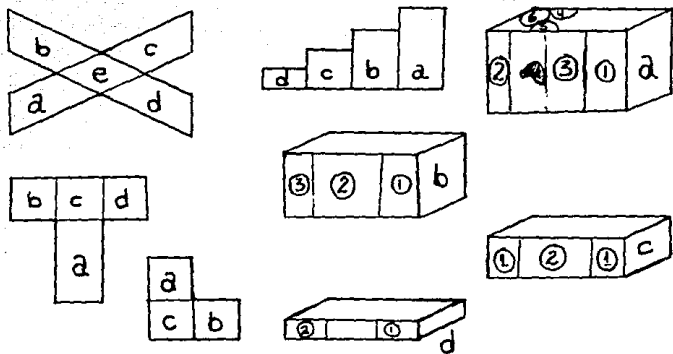


Figura 19. Representación esquemática de las piezas y sus secciones sometidas a inspección

**CAPITULO V****ANALISIS DE RESULTADOS**

Analizando los resultados obtenidos durante la etapa en la cual se probaron las formas en que se realizó la calibración del patrón nos muestran lo siguiente:

- Al referirnos a la gran atenuación que se encontró en el patrón tenemos que: a las partes que se cortaron para poder calibrar con el método de área-amplitud, se les preparó para un análisis metalográfico y al realizar un ataque macro se encontró que la estructura de dichas partes no era homogénea, encontrándose regiones con grano columnar grueso y otras con grano equiaxial fino. De igual forma se realizó otro análisis metalográfico en la parte de los escalones, encontrándose también la presencia de grano columnar en los escalones desde el de 0.1" hasta el de 0.6" en donde comenzaba a aparecer el grano equiaxial.

- En la realización de la curva de Corrección Distancia-Amplitud los resultados fueron de tipo satisfactorio, teniendo en cuenta la gran heterogeneidad que presenta el patrón, sobre todo en el aspecto de la gran atenuación que sufría el haz ultrasónico. Esto se pudo observar ya que para una distancia del metal de 0.750" la lectura de por ciento de altura de la pantalla fue de 42 unidades y para la de 1.000" fue de tan solo 2, reflejándose desde la lectura de 42% una alta atenuación de la señal, con lo cual fue imposible poder

detectar los orificios que estaban a una mayor profundidad.

- Calibración Area-Amplitud. Para la comprobación de esta parte una vez teniendo librado el obstáculo que presenta la atenuación por la estructura de la pieza, los resultados obtenidos fueron muy buenos, puesto que al establecer el nivel de referencia de 68 db con una perforación de  $5/64$ " (0.078"), se encontró que al hacer la inspección a las otras dos perforaciones del patrón que el de  $3/64$ " (0.047") nos daba un tamaño de discontinuidad de 0.049" y para el de  $1/8$ " (0.125") era de 0.123", con esto se vio que la diferencia de su tamaño real con el que se obtuvo mediante la medición del nivel de indicación fue de 0.002", lo cual representa una mínima variación.

- En lo que respecta al método de Calibración Mediante la Reflexión de la Pared Posterior, los resultados que se obtuvieron fueron bastante aceptables, ya que la diferencia que existe entre la línea Teórica y la Experimental conforme va aumentando la distancia del metal (espesor de la pieza) las dos líneas se van haciendo más afines es decir se aproxima una a la otra hasta llegar a juntarse en 0.6" y seguir así al aumentar el espesor.

- Los resultados de la Verificación del Patrón utilizando los

bloques nos muestran que la señal ultrasónica presenta diferentes características, dependiendo estas de la aleación que se trate. Así pues la aleación de Al - 5% Si, muestra que los mejores resultados tanto en un rango de 2.5" y de 10" fueron los bloques No. 1 y No. 3 es decir los que estaban desgasificados y el tercero además refinado. Con respecto a la aleación Al - 4% Cu, tanto en el rango de 2.5" y al de 10" se observo que la respuesta del equipo era mejor para el bloque No. 6, que es la que tiene desgasificador y refinador; pero aún así la señal es muy pobre en comparación de las otras es decir tenemos que aumentar la sensibilidad para detectar las discontinuidades y por lo tanto tenemos una serie de ecos en la pantalla. La aleación Al - 1% Ni, presenta mejores resultados en el bloque No. 8 o sea el que está desgasificado y refinado; en el rango de 10" se obtuvo un mejor resultado que en el de 2.5" aunque en ambos se tenía una respuesta bastante aceptable debido a que estaban presentes los ecos posteriores y no solo el primero como en el caso del patron. En la aleación Al - 6% Zn, los resultados obtenidos muestran que la señal recibida en el equipo es deficiente en ambos rangos, aunque las mediciones realizadas muestran una buena precisión. Por otro lado la aleación Al - 4% Mg, en ambos bloques se obtuvieron resultados muy buenos, pero en el bloque que tenía desgasificante y refinador la señal fue la mejor debido a que presentaba todos los ecos que debería y también la inspección realizada sobre

este bloque tanto en el rango de 2.5" como en el de 10" los resultados fueron muy buenos teniendose una detección de todas las discontinuidades aunque la precisión de las lecturas no fue muy aceptable debido a que presentó variaciones hasta de 0.125" para la profundidad de 2.5" en el rango de 2.5". La aleación Al - 6% Sn, al igual que la mayoría de las otras aleaciones no presentó buenos resultados aunque en el bloque No. 14 las mediciones tenían una buena exactitud en ambos rangos de detección.

Como se observa en la Grafica 1 la mayoría de los puntos se mantienen cerca tanto de la línea ideal como de la del patrón, de la misma manera vemos que mientras menor distancia de metal existe entre la superficie de inspección y la discontinuidad las mediciones guardan una cierta precisión y exactitud, en cambio a medida que aumentamos la distancia del metal las mediciones van perdiendo la precisión y la exactitud. En la Grafica 2 observamos que la línea ideal y la del patrón coinciden; también observamos que las mediciones tienen poca exactitud pero una buena precisión, en esta gráfica se ve como la distancia que existe entre la superficie de inspección y la discontinuidad no afecta la variación de las lecturas, es decir, casi todas las mediciones presentan una desviación de 0.100" de su profundidad real.



Observando los resultados que se obtuvieron al tratar de medir el tamaño de las discontinuidades, notamos que en la mayoría de los bloques el tamaño medido fue mucho mayor que el real; solo tres bloques presentaron una medida que sí correspondía a la real, estos bloques fueron los números "4", "11" y "13"; por otro lado en tres bloques el tamaño de la discontinuidad fue menor al real.

- En la Aplicabilidad del Patrón encontramos que todos los resultados obtenidos corresponden muy bien a los espesores reales de las piezas, aún y cuando la calibración del equipo no estaba hecha correctamente debido a la atenuación que sufrió el haz ultrasónico, por el cambio de tipo y tamaño de grano en la estructura del patrón, en cuanto a la evaluación del tamaño de las discontinuidades no se pudo realizar cuando estas era menores que el área transversal del cristal piezoeléctrico, en cambio cuando eran mayores como en el caso de los rechupes si se podía determinar tanto su profundidad como su tamaño, por otro lado al determinar los espesores en las zonas que presentaron contracciones debidas al proceso de solidificación se pudieron determinar con una buena precisión. El único problema para realizar estas inspecciones fue que las piezas presentaban cierto grado de concavidad en todas las superficies de las piezas lo cual dificultó la inspección por la falta de contacto entre el transductor y la pieza sometida a la prueba,

llegándose al extremo de no poder realizar la inspección en una pieza en forma de "X".

## CAPITULO VI

## CONCLUSIONES

En base a lo anteriormente expuesto se puede concluir que:

1. La presencia de grano columnar en el patrón posiblemente se deba a una cantidad insuficiente de refinador de grano, a que la distribución del refinador no halla sido completa en la olla al momento de agitar, etc. Esta presencia de grano columnar provocó una atenuación del haz ultrasónico, la cual trajo como consecuencia que se tuvieran problemas al momento de calibrar el equipo y esto es debido a que como se menciona anteriormente en el capítulo II, el grano columnar tiene un efecto atenuante muy marcado en las ondas ultrasónicas. Aunado a esto si consideramos que el tamaño del grano era grueso tenemos en consecuencia que la atenuación es mayor y por ende los problemas también fueron mayores.

2. Cuando se hizo la curva de Distancia-Amplitud los resultados para espesores pequeños fueron bastante buenos, pero, al aumentar el espesor y encontrar la región en la cual había una mezcla de tipos y tamaños de grano, los resultados se apartaron de la tendencia que venían siguiendo. Por el efecto negativo de la heterogeneidad en el material no era posible detectar discontinuidades a profundidades mayores de una pulgada.

3. En lo que respecta a la curva Area-Amplitud los resultados

mostraron que comparando las perforaciones del mismo patrón las mediciones eran bastante aceptables pero al compararlas con los bloques los resultados discrepaban.

4. En base a esto podemos decir que el patrón fabricado se puede utilizar en la inspección ultrasónica de piezas fundidas de aluminio y sus aleaciones, siendo esta inspección a un nivel cuantitativo y cualitativo si las discontinuidades son mayores que la sección transversal del cristal piezoeléctrico (en este caso mayor de 0.75"), es decir en rechupes ya sean internos o externos y en contracciones, pero si se trata de pequeñas oclusiones de gas, microrrechupes o porosidades sólo se debe utilizar como un método cualitativo y no cuantitativo debido a que se pueden tener grandes errores en la interpretación de las señales. Si las discontinuidades son menores que la sección transversal del cristal piezoeléctrico, podemos detectarlas si estas son mayores a 0.200". En resumen se puede decir que el patrón fabricado si se puede utilizar en forma semi-cuantitativa en la detección y evaluación de rechupes y contracciones.

5. El patrón fabricado si se puede utilizar en la medición de espesores, siendo su limitación la extensión del campo muerto en el cual no se puede hacer ningún tipo de medición. Tanto en el caso que se tenía un rango de 2.5" y 10" los espesores

límites fueron de 0.200" el mínimo debido al campo muerto del equipo y el máximo fue de 1.00" debido a la atenuación que sufrió el haz ultrasónico. Desafortunadamente no se pudieron hacer pruebas con varios transductores debido a que sólo se cuenta con uno, el cual es de 0.750" de diámetro y una frecuencia de 5 MHz, por lo tanto no fue posible ver la variación del campo muerto al variar la frecuencia y el diámetro, así como tampoco encontrar que transductor es el que presenta mejores resultados en la inspección de aluminio y sus aleaciones.

6. Por otra parte todas las mediciones hechas en la verificación de los bloques se hicieron a 60 db. Este nivel de sensibilidad fue en el que se tenía una mejor detección de las discontinuidades, sin crear una serie de irregularidades en la señal observada en la pantalla. Estas irregularidades aparecían si se aumentaba la sensibilidad del equipo y por el contrario si se disminuía la detección de las discontinuidades era muy pobre, es decir, casi no podíamos detectar nada.

## CAPITULO VII

### RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS POSTERIORES

En trabajos futuros en los que se desee fabricar un patrón, que sea más cuantitativo en lo que respecta a la evaluación de pequeñas discontinuidades, para la inspección ultrasónica de piezas fundidas de aluminio y sus aleaciones se recomienda que se fabriquen de alguna de las siguientes aleaciones Al - Si (recorriendo por lo menos las aleaciones hipoeutécticas), Al - Ni o Al - Mg, todas ellas en sus diferentes modalidades que son:

- a) Desgasificado
- b) Refinamiento y Desgasificado
- c) Modificado y Desgasificado
- d) Refinado, Modificado y Desgasificado

ya que fueron las que presentaron los mejores resultados, tanto en su respuesta al ensayo de ultrasonido como al utilizarlo como patrón de referencia para otros materiales base aluminio.

Aunque en este trabajo no se conto con el transductor adecuado, se recomienda tratar de obtener los transductores adecuados para metales no ferrosos, además de trabajar con transductores de inmersión para no tener problemas debidos a la rugosidad de las superficies de las piezas, así como también se recomienda realizar mediciones con transductores de haz angular.



## APENDICE

Apéndice A. Propiedades Acústicas de algunos Metales y No metales

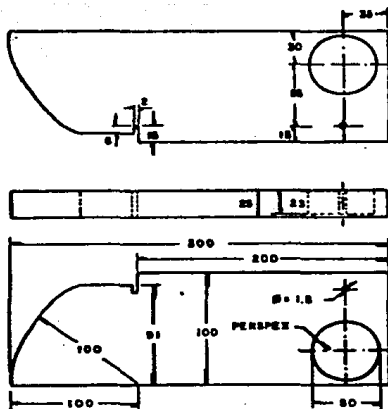
MATERIAL	DENSIDAD g/cm <sup>3</sup>	VELOCIDADES SONICAS km/seg			IMPEDANCIA ACUSTICA g/cm <sup>2</sup> -seg (d)
		Vl(a)	Vt(b)	Vs(c)	
Metales Ferrosos					
Acero recocido	7.85	5.94	3.24	3.0	4.66
Aceros aleados:					
Recocido	7.86	5.95	3.26	3.0	4.68
Endurecido	7.8	5.90	3.23	...	4.6
Hierro colado	6.95-7.35	4.55	2.70	...	2.5-4.0
Acero 52100:					
Recocido	7.83	5.99	3.27	...	4.69
Endurecido	7.8	5.89	3.20	...	4.6
Acero Herram. D6:					
Recocido	7.7	6.14	3.31	...	4.7
Endurecido	7.7	6.01	3.22	...	4.6
Acero inoxidable:					
Tipo 302	7.9	5.66	3.12	3.12	4.47
Tipo 304L	7.9	5.64	3.07	...	4.46
Tipo 347	7.91	5.74	3.10	2.8	4.54
Tipo 410	7.67	5.39	2.99	2.16	4.13
Tipo 430	7.7	6.01	3.36	...	4.63
Metales no ferrosos					
Aluminio 1100-O	2.71	6.35	3.10	2.90	1.72
Aluminio 2117-T4	2.80	6.25	3.10	2.79	1.57
Berilio	1.85	12.80	8.71	7.87	2.37
Cobre 110	8.9	4.70	2.26	1.93	4.18
Cobre aleado:					
260 (latón 70%)	8.83	3.83	2.05	1.86	3.27
464 (latón naval)	8.41	4.43	2.12	1.95	3.73
510 (bronce al P)	8.86	3.53	2.23	2.01	3.12
752 (Ni-Ag 65-18)	8.75	4.62	2.32	1.69	4.04
Plomo:					
Puro	11.34	2.16	0.70	0.64	2.45
Duro (94Pb-6Sb)	10.88	2.16	0.81	0.73	2.35
Magnesio aleado M1A	1.76	5.74	3.10	2.87	1.01
Mercurio líquido	13.55	1.45	...	...	1.95
Molibdeno	10.2	6.23	3.35	3.11	6.38
Niquel:					
Puro	8.8	5.63	2.96	2.64	4.95
Inconel	8.5	5.82	3.02	2.79	4.96
Inconel X-750	8.3	5.94	3.1	...	4.93

Apéndice A. (Continuación)

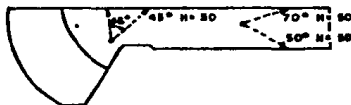
MATERIAL	DENSIDAD g/cm <sup>3</sup>	VELOCIDAD SONICAS			IMPEDANCIA ACUSTICA g/cm <sup>2</sup> -seg (d)
		Vl (a)	Vt (b)	Vs (c)	
Monel	8.85	5.35	2.72	2.46	4.72
Titanio puro com.	4.5	6.10	3.12	2.79	2.75
Tungsteno	19.25	5.18	2.87	2.65	9.98
No. metales					
Aire	0.00129	0.331	...	...	0.00004
Vidrio Pyrex	2.23	5.57	3.44	3.13	1.24
Glicerina	1.26	1.92	...	...	0.24
Aceite:					
De Maquina (SAE 20)	0.87	1.74	...	...	0.150
De Transformador	0.92	1.38	...	...	0.127
Parafina (cera)	0.9	2.2	...	...	0.2
Plásticos:					
Metil metacrilato, (Plexiglas)	1.18	2.67	1.12	1.13	0.32
Poliamida (Nylon)	1.10	2.0	...	...	0.225
Politetrafluoruro de etileno (Teflon)	2.2	1.35	...	...	0.30
cuarzo natural	2.65	5.73	...	...	1.52
Hule vulcanizado	1.3	2.3	...	...	0.31
Carburo de Tungsteno	12.0	6.66	3.98	...	8.3
Agua:					
Líquida	1.0	1.49	...	...	0.149
Hielo	0.9	3.98	1.99	...	0.36

(a) Velocidad de la Onda Longitudinal. (b) Velocidad de la Onda Transversal. (c) Velocidad de la Onda Superficial. (d) Para Velocidades de Ondas Longitudinales.

Apéndice B. Esquemas de diferentes tipos de bloques de calibración

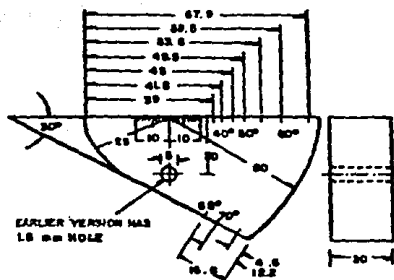


Bloque A2 (BS 2704) '6 V-1 (IIW)

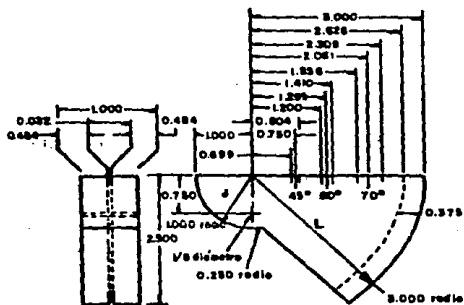


Bloque A3 (Sulzer)

Apéndice B. (Continuación)

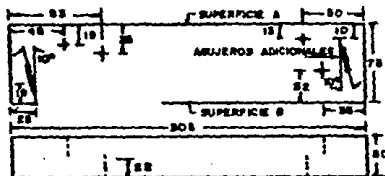


Bloque DIN 54 122

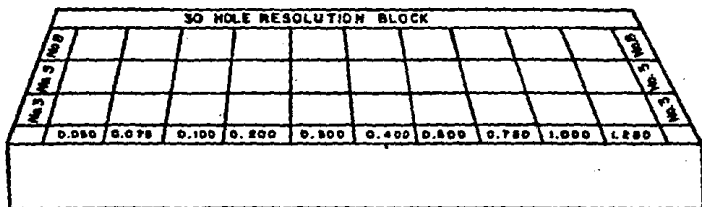


Bloque de calibración distancia y sensibilidad  
(DSC)

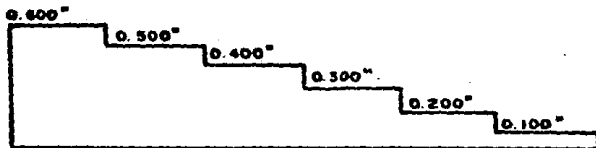
Apendice B. (Continuación)



Bloque IO<sup>W</sup>



Bloque de resolución de 30 agujeros de fondo plano (FBH)



Bloque escalonado o de pasos

Apéndice C. Tabla de conversión de unidades

Pulgadas (in)	Milímetros (mm)
0.016	0.406
0.025	0.635
0.031	0.787
0.047	1.194
0.063	1.600
0.078	1.981
0.094	2.388
0.100	2.540
0.109	2.769
0.125	3.175
0.200	5.080
0.250	6.350
0.400	10.160
0.500	12.700
0.600	15.240
0.750	19.050
0.800	20.320
0.875	22.225
0.900	22.860
1.000	25.400
1.500	38.100
1.750	44.450
2.000	50.800
2.500	63.500
3.000	76.200
4.000	101.600
5.000	127.000
6.000	152.400
8.000	203.200
9.000	228.600
10.000	254.000

## BIBLIOGRAFIA



- 1.- Metals Engineering Design  
A.S.M.E Handbook  
Nondestructive Testing  
Part 4, Seccion 2  
Second Edition  
Mc. Graw Hill, New York, 1965
  
- 2.- Nondestructive Evaluation  
Otto Buck & Stanley M. Wolf  
Metallurgical Society of A.I.M.E.  
New York, U.S.A., 1981
  
- 3.- Metals Handbook  
Nondestructive Inspection and Quality Control  
Vol. 11, 8' Edition, 1976  
American Society for Metals  
Metals Park, Ohio, U.S.A.
  
- 4.- Ensayo Ultrasonico de Materiales  
Juan N. Baez  
Comision Nacional de Energia Atomica  
Buenos Aires, Argentina, 1980.

- 5.- Tesis. Inspección Ultrasonica  
Echeverria Gonzalez Jose Antonio  
Facultad de Química  
Ciudad Universitaria, Mexico, 1982
- 6.- Nondestructive Testing  
American Society of Mechanical Engineers  
Seccion V, Edition 1980  
U.S.A.
- 7.- Manual Book of A.S.T.M. Standars  
Metallography, Nondestructive Testing  
Part. 11, Edition 1980  
Philadelphia, U.S.A.
- 8.- Introducción a los Ensayos no Destructivos  
Silvia B. Becerril y Alfonso R. Garcia  
Mexico, 1988
- 9.- Apuntes del Curso de Inspección Ultrasonica  
Ing. Bonifacio Alanis T.  
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial  
México, 1986