

26  
24



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "CUAUTITLAN"**

**INSPECCION CON ULTRASONIDO COMO  
"PRUEBA NO DESTRUCTIVA"**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A:

**LUIS EDUARDO MARTINEZ SALDIVAR**

**DIRECTOR DE TESIS**

**Ing. Jorge Guillen de la Serna**



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 esta 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.

## I N D I C E .

CAPITULO		Pág.
I.-	GENERALIDADES DE LA INSPECCION ULTRASONICA.	5
II.-	PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE ULTRASONIDO.	15
	A) Modos de onda.	
	B) Efectos del haz de sonido.	
	C) Zonas del haz ultrasónico.	
III.-	ACOPLEANTE	40
IV.-	GENERACION DE ONDAS ULTRASONICAS.	45
	A) Piezo-electricidad.	
	B) Construcción del transductor.	
	C) Características de la unidad buscadora.	
	D) Tipos de transductores.	
V.-	INSTRUMENTOS ULTRASONICOS	70
	A) Descripción del instrumento básico.	
	B) Función de los controles externos del equipo.	
	C) Equipo complementario.	
VI.-	METODOS DE INSPECCION ULTRASONICA.	80
	1) Método de contacto.	
	2) Método de inmersión	
	3) Prueba de resonancia.	

CAPITULO	Pág.
VII.- CALIBRACION DEL EQUIPO.	97
A) Tipos de blocks de calibración.	
B) Precauciones al usar los blocks patrones.	
VIII.- INTERPRETACION DE RESULTADOS.	113
--- RECOMENDACION	126
--- BIBLIOGRAFIA	128
APENDICE.- GLOSARIO DE TERMINOS DE ULTRASONIDO.	129

O B J E T I V O .

El objetivo de esta tesis, es dar a conocer la información fundamental sobre la inspección con ultrasonido, como una de las pruebas no destructivas, usada en las industrias, principalmente en las que manufacturan piezas metálicas y algunas no metálicas, y aún más, su aplicación también, en las programas de mantenimiento preventivo, ya que ha alcanzado a convertirse en una parte integral de dichos programas.

Por tal motivo, considero importante el conocer todas y cada una de las pruebas no destructivas, para el mejoramiento de la calidad de nuestros productos.

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

El uso de ultrasonido como un método de pruebas no destructivas, ha existido desde aproximadamente 40 años, varios instrumentos ultrasónicos han sido diseñados y fabricados para resolver el problema de inspección y calibración de espesores en materiales electrónicamente.

A principios de los años cuarentas, el Dr. F. A. Firestone desarrolló el primer instrumento de pulso-eco, para detectar fallas situadas a profundidad.

Todo fabricante consciente de calidad, desea pruebas convincentes de la confiabilidad de sus productos. Los métodos tradicionales de pruebas de calidad, requerían que varias muestras del producto fueran destruidas, para confirmar la calidad del producto, mas esto, no aseguraba que de hecho cada uno de los productos estuviera libre de defectos, solamente aquellos que habían sido probados. Por lo tanto, las pruebas no destructivas solucionan los dilemas de control de calidad, permitiendo que cada producto sea evaluado sin incurrir en el costoso desperdicio de tirar las muestras utilizadas para la prueba.

Las pruebas no destructivas están compuestas por métodos de ensayos no destructivos, que nos sirven para la detección de defectos en un producto sin destruirlo.

Las pruebas no destructivas permiten al producto que está siendo probado, el permanecer intacto mientras proporciona al técnico un análisis definitivo de la integridad estructural del producto y sus capacidades de desarrollo.

Robert C. Mc. Master, define una prueba no destructiva como: " Una prueba que incluye todos los métodos posibles en la detección o medición de propiedades o capacidades de desarrollo de materiales, partes, ensambles o estructuras, que no perjudican su utilidad ". Una definición ligeramente más acertada, en la evaluación no destructiva la ofrece el Instituto de Ingeniería de Metales (Metals Engineering Institute). " Los ensayos no destructivos, es el uso de métodos físicos para la evaluación de materiales sin perjudicar su utilidad."

A continuación se presentan algunos de los métodos más comunes de pruebas no destructivas:

--- Líquidos penetrantes.

Es uno de los métodos más antiguos de pruebas no destructivas.

Rápidamente se identifican defectos de superficie en todos los materiales no porosos. Un líquido colorante es aplicado al material bajo prueba, el cual, por acción capilar, penetra en cualquier falla en la superficie. Cuando el líquido químico revelador es aplicado, el defecto se torna visible al inspector.

### --- Partículas magnéticas.

Es un método simple y económico, pero su técnica es altamente efectiva.

Durante esta prueba, una corriente es aplicada al material en prueba, para establecer un campo magnético. En seguida, es aplicado polvo metálico a la superficie, el cual, se magnetiza.

Si una fisura o defecto está presente, esta será indicada por el alineamiento de las partículas magnéticas. Este fenómeno ocurre debido a que la fisura o defecto, crea un polo N-S localizado que atrae las partículas magnéticas.

Aplicaciones comunes para esta prueba, con muy buenos resultados son: forjas ferrosas, piezas fundidas, engranes, flechas, brocas para barrenas, rieles de ferrocarril y aparatos para levantamiento de pesos.

### ---Radiación Ionizante.

Involucra el paso de rayos gamma, de una fuente isotópica a través del material en prueba y a la película. Las sombras resultantes son exponentes del registro de vacío, fracturas o cuarteaduras, porosidades y otras discontinuidades. Es una de las más antiguas técnicas de inspección disponibles a la industria, el desarrollo del equipo nuevo para este tipo de pruebas ha logrado que sea más ligero, seguro y de mejor portatibilidad.

Este equipo se basa en el de inspección por rayos X.



### --- Ultrasonido.

Las pruebas ultrasónicas involucran la conversión de energía eléctrica en ultrasonido, por medio de un transductor (palpador), y la transmite a través de la pieza que está siendo probada, se utilizan frecuencias extremadamente altas, que son reflejadas en diferentes materiales acústicos. La interacción del sonido con el material en prueba puede indicar la velocidad, densidad, espesor y presencia de discontinuidades o fallas en el mismo. La inspección ultrasónica ha sido usada desde hace algún tiempo para la detección de discontinuidades.

Debido a que es una de las pruebas más confiables, económicas y de gran importancia dentro de las pruebas no destructivas, para mejorar la calidad de productos manufacturados y un medio importante en la detección de fallas en mantenimiento preventivo, se hace necesaria una integración de la información, para el conocimiento de los principios fundamentales, procedimientos y desarrollo de esta técnica.

## C A P I T U L O I

### GENERALIDADES DE LA INSPECCION ULTRASONICA.

La inspección ultrasónica está basada en los estudios de la propagación de ondas de sonido, que viajan a través de materiales sólidos, o piezas cuya estructura y densidad permitan el paso de las ondas de sonido.

El sonido está considerado dentro del rango que percibe el oído humano, 20 a 20 000 (20 KHz) ciclos por segundo, y por encima de esta frecuencia, es considerado como ultrasonido.

La inspección ultrasónica industrial usa un rango de frecuencia de 200 000 (0.2 MHz) a 25 000 000 (25 MHz) ciclos por segundo.

La inspección ultrasónica (Fig. 1.1) se puede aplicar en piezas que ofrezcan una pared paralela a la superficie donde se apoye el transductor o palpador, que será llamada superficie de entrada, con el propósito de asegurar la calidad en la sanidad interna de la pieza, detectando, localizando y calificando las discontinuidades, si es que estas existen y se salen de las tolerancias establecidas por normas creadas por diferentes instituciones, como son: ASTM

( Sociedad Americana de Pruebas en Materiales ), ANSI ( Instituto Nacional de Standards Americano ), AISI ( Instituto Americano del Hierro y el Acero ), Etc...., y por los requerimientos del usuario.

También se puede aplicar en piezas de superficie discontinua o asimétrica, mediante la técnica de inmersión.

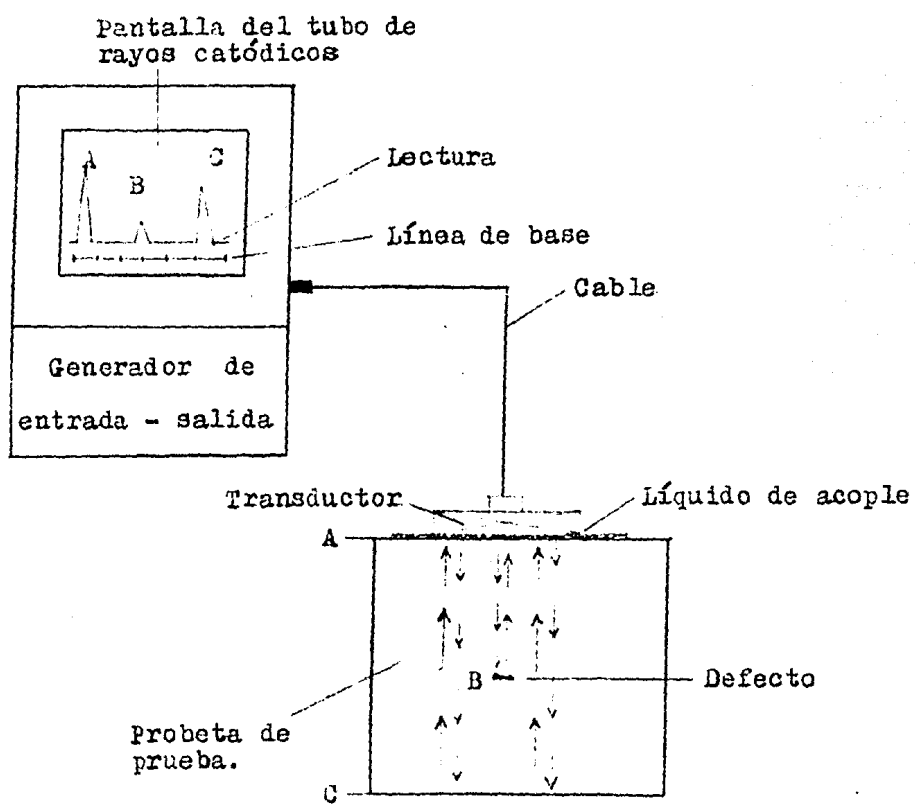


fig. 1.1 Inspección Ultrasónica.

Las principales aplicaciones de la prueba ultrasónica consisten en:

1. Detección de discontinuidades.

Detecta todo tipo de falla o irregularidad contenida en la pieza. Pueden ser fallas internas o superficiales.

2. Medición de espesores.

Auxiliar de metrología, se usa principalmente en lugares donde no se puede medir con otros instrumentos de metrología.

3. Estudio de estructuras metalúrgicas.

Determina el tamaño de grano (cristal) de la pieza.

4. Evaluación de la influencia de las variables de un proceso sobre el espécimen.

Podemos determinar durezas del material y tratamiento térmico.

La prueba ultrasónica es utilizada en una gran variedad de productos, metálicos y no metálicos, tales como: piezas soldadas, forjadas, fundidas, laminadas, en tuberías, plásticos, cerámicas, etc..., ya que la prueba ultrasónica es capaz de revelar a costo económico las discontinuidades (defectos) contenidos ya sea superficial, subsuperficial o internamente, en una gran variedad de materiales diferentes, resulta una herramienta muy eficiente de que se dispone para garantizar la calidad del producto.

Otra característica importante del ensayo ultrasónico es que no es una prueba destructiva.

La parte esencial del uso de esta prueba es la de garantizar la máxima confiabilidad en las piezas fabricadas, asegurando así una calidad óptima. Para lograr tal confiabilidad se han establecido normas, las cuales deben cumplir los resultados de la prueba.

Es de suma importancia que el personal responsable de llevar a cabo esta prueba, esté capacitado y calificado, y tenga los conocimientos técnicos del equipo de comprobación y de los materiales de la pieza bajo prueba, así como los procedimientos de prueba. Y es responsabilidad suya seleccionar la técnica adecuada, ejecutarla correctamente y obtener un resultado satisfactorio del objetivo de la prueba.

El objetivo de la prueba ultrasónica es, garantizar la confiabilidad del producto mediante:

- a.) La obtención de un registro visual de una imagen relacionada, con la discontinuidad contenida en la pieza bajo prueba.
- b.) El descubrimiento de la naturaleza de la discontinuidad sin causar daño a la pieza inspeccionada.
- c.) El rechazo o la aceptación del material según los resultados de la prueba, de acuerdo con las normas pre-determinadas

Ninguna prueba puede considerarse terminada satisfactoriamente hasta no evaluar los resultados de la misma.

Antes de evaluar una discontinuidad específica, es conveniente tener en cuenta que, un método puede ser complementario de otro y que varios de ellos actuando de manera conjunta pueden darnos el resultado esperado.

El hecho de escoger entre uno u otro método está basado en ciertas variables, tales como:

- a.) Tipo y origen de la discontinuidad.
- b.) Proceso de la fabricación del material.
- c.) Accesibilidad de la pieza a ensayar.
- d.) Nivel de aceptabilidad deseada.
- e.) Equipo disponible.
- f.) Costos.

Para controlar tales variables, debe hacerse un análisis del trabajo a efectuar en cada pieza, que requiera una inspección por ensayos no destructivos.

Se deben tomar en cuenta las limitaciones de la prueba, las cuales dependen de las normas a seguir, el tipo de material y el servicio que prestará la pieza.

El método de inspección por ultrasonido así como tiene grandes ventajas, también tiene sus limitaciones o circunstancias que dificultan o le restan confiabilidad al resultado. Estos inconvenientes pueden ser, la condición de la su perficie de entrada, la forma de la pieza, la localización y

la dirección de la falla, la estructura y composición química del material bajo prueba, etc.

Las ventajas principales sobre otros métodos no destructivos pueden resumirse en los siguientes puntos:

- 1) Alta sensibilidad, permitiendo la detección de defectos menores.
- 2) Gran poder de penetración, haciendo posible el examen de secciones extremadamente gruesas.
- 3) Precisión en la medida de la posición de la discontinuidad y la estimación de su tamaño.
- 4) Respuesta inmediata, permitiendo una rápida inspección.
- 5) Se requiere acceso a solo una superficie del espécimen.
- 6) Relativo bajo costo.
- 7) En general equipo portátil, se realizan pruebas directas en el campo.

Para llevar a cabo el procedimiento de una inspección con ultrasonido, se deben tomar en cuenta algunos puntos importantes para obtener la mayor confiabilidad en los resultados y para hacer más fácil la inspección.

Estos puntos son los siguientes:

- a.) Condiciones de la superficie de acople. (Método por contacto).

La posibilidad de realizar una inspección con ultrasonido, depende en gran parte del acabado de la superficie de entrada, por ejemplo, para un caso determinado,

teniendo la superficie como única variable nos demostraría que, en una superficie con un acabado más fino obtendríamos mayor sensibilidad, que en una superficie con acabado más burdo.

b.) Partes de una pieza a inspeccionar.

Las partes de una pieza a inspeccionar, deben ser seleccionadas, tanto por la persona que solicita la inspección como por la persona que va a ejecutar la prueba, tomando en cuenta que estas partes estén en buenas condiciones para que exista un acople satisfactorio para llevar a cabo la inspección. (Método por contacto). Se tomará en cuenta la geometría de la pieza, material y tamaño de la estructura del espécimen.

c.) La función del acoplante, es evitar la presencia de aire y ayudar en el acople íntimo entre el palpador y la superficie de la pieza, para evitar pérdidas de energía ultrasónica al tratar de inyectar esta energía a la pieza a inspeccionar.

d.) Unidad buscadora o transductor (Palpador).

Esta unidad es la encargada de convertir la energía eléctrica en energía mecánica o de movimiento y viceversa, a través de un material piezoeléctrico, que al ser excitado por una corriente eléctrica vibra generando así las ondas ultrasónicas.

Este material tiene la propiedad de ser emisor y receptor de ondas ultrasónicas.



Los transductores varían en tamaño y en frecuencia, ya que esto será factor importante para el ensayo.

El técnico seleccionará el transductor adecuado, para el uso en determinada prueba, ya que tiene que tomar en cuenta la magnitud de la pieza, su estructura metalográfica, geometría de la pieza y composición química, así como el método a usarse en la inspección que se va a realizar.

e.) Barrido.

Es el rastreo a base de movimientos constantes o intermitentes, que se realizan con el transductor en cualquier dirección, para cubrir con ultrasonido las determinadas superficies sometidas a inspección. Este barrido será constante o intermitente, dependiendo de las condiciones de la superficie donde se acople el transductor, pero se deberá de asegurar que toda la superficie sobre todo las consideradas como críticas, sean cubiertas ó recorridas con el haz ultrasónico.

f.) Calibración del aparato.

La calibración del aparato es un aspecto muy importante, porque con una buena calibración se obtendrán resultados más confiables y sabremos con seguridad por ejemplo: la profundidad de discontinuidades encontradas en la inspección ó las medidas exactas de la sección inspeccionada.

Para esto existe una gran variedad de blocks de calibración, que cubren las técnicas que se van a usar.

## C A P I T U L O   I I

### PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE ULTRASONIDO.

El ultrasonido se define como la propagación de ondas sonoras demasiado altas para ser detectadas por el oído humano.

El sonido, es producido por la vibración de un cuerpo, y es por sí mismo, una vibración mecánica de partículas casi en posición de equilibrio.

Todos los materiales están hechos de átomos o partículas alineadas que forman cristales, si golpeamos uno de los lados del cristal, encontraremos que la primera columna de átomos golpea la segunda columna, la cual a su vez, golpea en turno a la tercera y así sucesivamente. En este caso, la dirección de la partícula en movimiento es la misma que la dirección de la onda, llamada de compresión o longitudinal, (Fig. 2-1).

Las partículas no viajan a través del material lejos de la fuente de sonido. Es la energía alimentada la causante de la vibración de las partículas, que son movidas progresivamente a través del medio.

La emisión de una onda de sonido, es determinada por la frecuencia (F), que es definida como la cantidad de ciclos ocurridos por unidad de tiempo dado.

Esta frecuencia está ligada a dos términos que la caracterizan, estos son: La longitud de onda ( $\lambda$ ) y la velocidad (V).

La longitud de onda ( $\lambda$ ), es la distancia ocupada por una onda completa, ó es igual a la distancia a través del movimiento de la onda por periodo o ciclo.

La velocidad (V) es la tasa de rapidez con que la energía de sonido es transmitida a través de un medio (material), en la dirección de propagación, (velocidad longitudinal), (ver tabla 2-1).

Estos tres parámetros están relacionados como se muestra en la ecuación.

$$v = \lambda f$$

Donde:

$\lambda$  = Longitud de onda

f = Frecuencia

V = Velocidad del sonido  
en el material

Ejemplo: Calcular la longitud de onda en el aluminio, si es inspeccionado con un transductor de 5 MHz.

Datos:	Formula	Operaciones
$\lambda =$		
f = 5MHz.	$\lambda = \frac{V}{f}$	$\lambda = \frac{2.5 \times 10^5 \text{ pulg/seg.}}{5 \times 10^6 \text{ ciclos/seg.}}$
V del Al. = $2.5 \times 10^5$ pulg/seg.		$\lambda = 0.05 \text{ pulg/ciclo}$

La velocidad transversal es la tasa de rapidez con que la energía de sonido es transmitida a través de un medio (material), cuando el movimiento de las partículas se desarrollan en direc-

ción perpendicular a la dirección de propagación del sonido.

Por este tipo de movimiento de las partículas, la onda transversal se propaga a casi la mitad de la velocidad con la que se propaga una onda longitudinal, (Fig. 2-2).

En una aplicación de ultrasonido particular, (excepto en la aplicación de ondas Lamb) la velocidad permanecerá constante, ya que es determinada por la densidad y la constante elástica del material bajo prueba. Notemos entonces que, cambiando la frecuencia, la longitud de onda deberá cambiar por lo consiguiente.

La longitud de onda es de principal interés en pruebas ultrasónicas por dos razones:

1. La sensibilidad.
2. El poder de penetración.

1.- La sensibilidad, va a ser la habilidad de un sistema ultrasónico para detectar pequeños defectos, es una función de la longitud de onda.

2.- El poder de penetración, va a ser la habilidad que tiene la onda de sonido, para penetrar en el material y también va a ser función de la longitud de onda.

#### A) Modos de onda.

Existen cuatro modos de propagación de la onda ultrasónica, estos son:

- 1.- Ondas longitudinales.
- 2.- Ondas transversales.
- 3.- Ondas de superficie.
- 4.- Ondas de placa.

1.- Ondas longitudinales o de compresión. En este tipo de ondas. las partículas transmiten las ondas en dirección paralela a la dirección de propagación, (Fig. 2-1).

La propagación de este modo de sonido, es causado por las ligaduras elásticas entre las partículas, en donde cada partícula es movida desde la posición de equilibrio, empujando o jalando la partícula adyacente, que en seguida transmite esa energía sobre la próxima partícula adyacente y así sucesivamente.

Este modo de transmisión, es uno de los más usados en la prueba ultrasónica. Esta onda se genera y se detecta más fácilmente. Casi toda la energía de sonido usada en la prueba ultrasónica es originada como onda longitudinal y se puede convertir a otro modo, para ser aplicada en pruebas especiales. Estos modos de ondas pueden propagarse en materiales sólidos, líquidos y gaseosos.

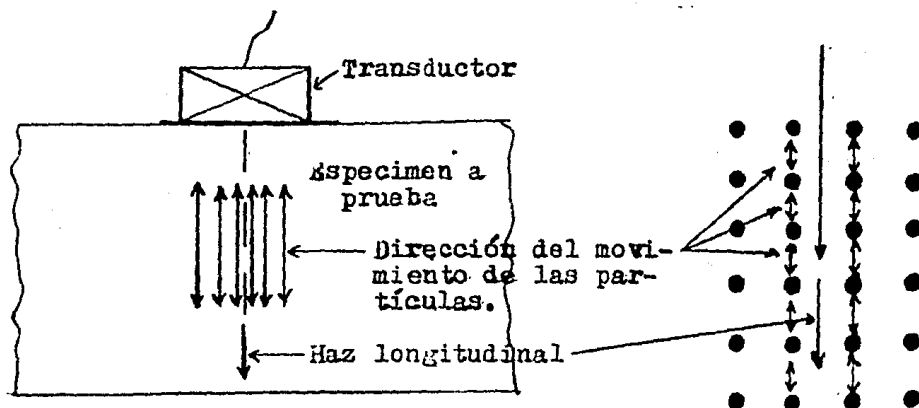


Fig. 2-1. Dirección del movimiento de las partículas en ondas longitudinales o de compresión.

2.- Ondas transversales o de corte, nombradas así, por el movimiento de las partículas en dirección transversal a la dirección de propagación del sonido. Puede ser visualizado más fácilmente el movimiento transversal de las partículas, o movimiento de corte, a través de la dirección de propagación a un ángulo recto ( $90^\circ$ ), como lo muestra la Fig. 2-2.

Como estas ondas viajan a través del material, es necesario que, cada partícula tenga suficiente fuerza de atracción sobre la partícula adyacente, de modo que la partícula en movimiento estire a la partícula vecina con ello. En este tipo de propagación de energía va a existir un determinado retraso en el tiempo, tal que, una onda transversal o de corte se va a propagar a casi la mitad de la velocidad de una onda longitudinal en el mismo material, (ver la tabla 2-1).

Por esta causa, las ondas transversales tienen longitudes de onda más cortas, a la misma frecuencia, que las ondas longitudinales. Esa longitud de onda corta, hace que estas ondas sean más sensitivas para pequeñas fallas, y consecuentemente son más fácilmente dispersadas dentro del material.

Este tipo de ondas sirven para todo propósito práctico, solamente en materiales sólidos, por la distancia entre las moléculas, la trayectoria libre del medio es tan grande en líquidos y gases, que la atracción entre las partículas no es suficiente para permitir que, una partícula mueva a otra más que una fracción de su propio movimiento, así que la onda es rápidamente atenuada.

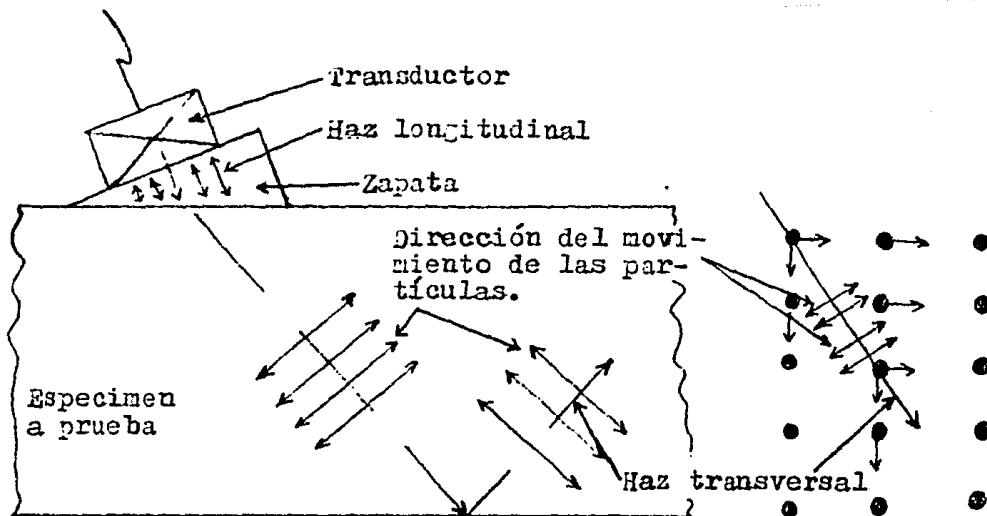


Fig. 2-2. Dirección del movimiento de las partículas en ondas transversales o de corte.

3.- Ondas Rayleigh o superficiales, (Fig. 2-3). Estas ondas viajan por encima de la superficie de el material, penetrando solamente a una profundidad de aproximadamente una longitud de onda, (es de  $1/25$  de la energía de superficie). La trayectoria de partículas oscilantes en agua, es circular en el plano donde viajan las ondas, en las ondas Rayleigh es elíptica. Este tipo de movimiento, es mostrado en la Fig. 2-4. Para la propagación de este modo, la onda estará viajando a lo largo del límite de la superficie en una cara, por la resistente fuerza elástica del sonido y sobre la otra cara, por la casi no existente fuerza elástica entre las moléculas de gas. Las ondas de superficie, por lo tanto, no van a existir en un sólido sumergido en un líquido, a menos que el líquido este cubrien —



do la superficie sólida pertinente solo por una delgada película.

Estas ondas sufren de atenuación en un mismo material, ya que produce ondas de corte y longitudinales a la vez. Tiene una velocidad de aproximadamente el 90 %, que de una onda transversal en el mismo material.

Son llamadas ondas Rayleigh, por que fueron descubiertas por Lord Rayleigh, en 1880, y son de gran interés en estudios sísmológicos, por la generación de terremotos en la corteza terrestre.

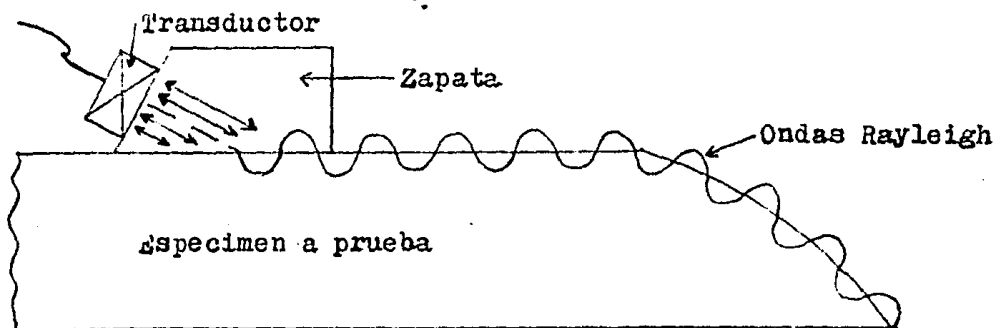


Fig 2-3 Propagación de las ondas Rayleigh o superficiales.

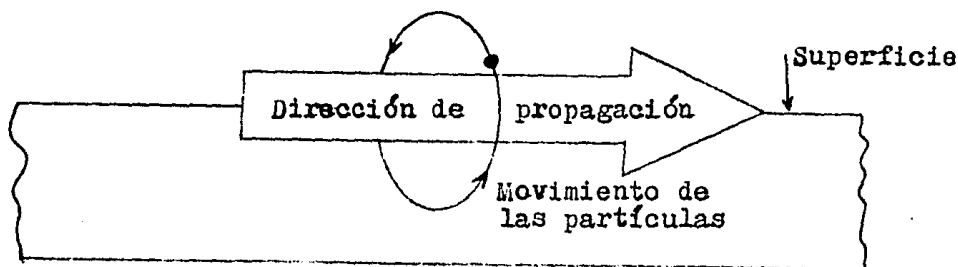


Fig. 2-4 Movimientos de las partículas en las ondas Rayleigh.

4.- Ondas Lamb o de placa. Cuando las ondas ultrasónicas son generadas en una sustancia sólida relativamente delgada, cuyo espesor es el de una longitud de onda, una onda de superficie pura no puede existir, y una vibración completa ocurre a lo largo de el espesor del material. A diferencia de las ondas anteriormente vistas, las velocidades a través de un material son dependientes, no solo de el tipo de material, sino también del espesor del material, la frecuencia de la onda de sonido, su modo y tipo.

Las ondas Lamb o de placa, existen en muchos modos complejos de partículas en movimiento, estos pueden ser divididos en dos tipos básicos, los simétricos y los asimétricos.

El modo simétrico, consiste de una placa, causando sucesivas "complicaciones" y "enrarecimientos" en la placa misma. Como lo muestra la Fig. 2-5, parecido a una manguera de goma blanda con bolas de acero, de diámetro grande, estando forzadas a través de ella.

Y el modo asimétrico, puede ser comprendido relacionando la acción de una manta, siendo sacudida de arriba a abajo, como un temblor progresivo a través de ella, (Fig. 2-6).

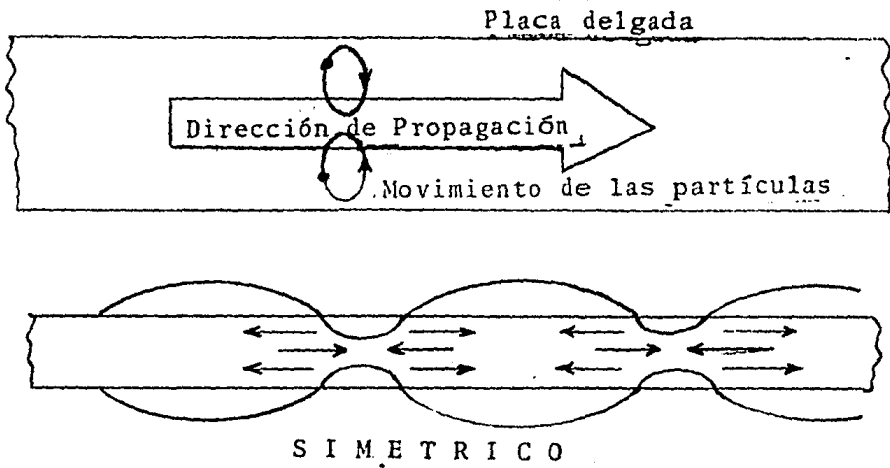


Fig. 2.5 Movimiento simétrico de partículas en Ondas Lamb o de placa.

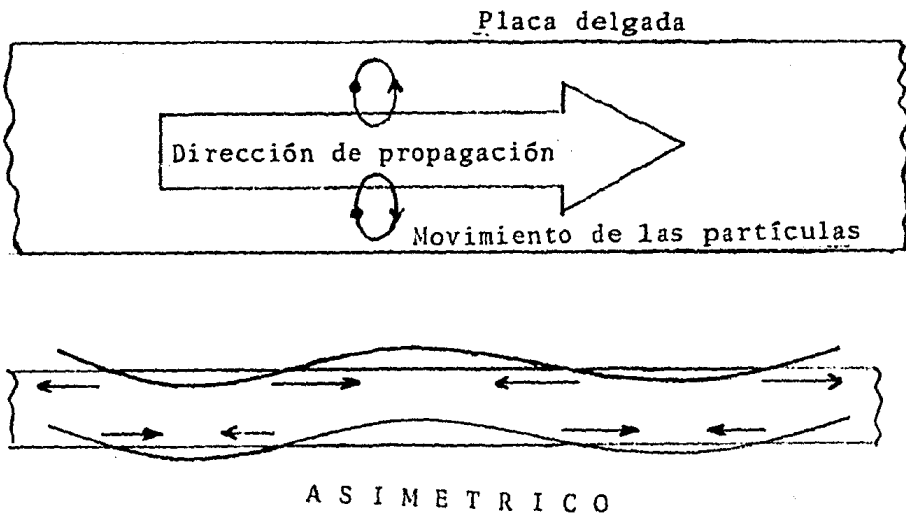


Fig. 2.6 Movimiento asimétrico de partículas en ondas Lamb.

## B) Efectos del haz de sonido.

La impedancia acústica de los materiales, es otro parámetro muy importante en la prueba ultrasónica. Cuando un haz de sonido infringe sobre una interface entre dos materiales, no toda la energía es reflejada, solo parte de esta pasa hacia el segundo material. Lo expuesto anteriormente es cierto, excepto en interfaces entre un sólido o un líquido y un gas como el aire, en el cual, en la interface ocurren reflexiones virtualmente del 100%. La cantidad de energía que pasa hacia el segundo material, depende de la impedancia acústica de los dos materiales. La impedancia es representada con la letra "Z" y es el producto de la densidad del material y la velocidad del sonido en el material, (Ver la tabla 2-1).

$$Z = D V$$

Donde:

D = Densidad

V = Velocidad de sonido en el material.

El porcentaje de sonido incidente que es reflejado en una interface, depende de:

1. La diferencia de impedancias.
2. El ángulo de incidencia.

Así la cantidad de energía reflejada, cuando el ángulo de incidencia es de  $90^\circ$  (normal), puede ser calculado por la siguiente

te fórmula.

$$\text{Energía reflejada (Re)} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Los siguientes cálculos, determinan la reflexión de energía, cuando el haz de sonido se refleja en una interface acero-aire.

MATERIAL	DENSIDAD (gm/cm <sup>3</sup> )	VELOCIDAD (cm/seg)	Z
Acero	7.8	5.9 X 10 <sup>5</sup>	4.68 X 10 <sup>6</sup>
Aire	0.0013	0.33 X 10 <sup>5</sup>	0.00033 X 10 <sup>5</sup>

$$Re = \frac{(4.68 \times 10^6 - 0.00033 \times 10^5)^2}{(4.68 \times 10^6 + 0.00033 \times 10^5)^2} = (\text{aproximadamente}) 1$$

Estos medios, en esa interface, prácticamente se refleja el 100% de la energía de sonido.

Una demostración de reflexión es una interface plomo-acero, se muestra en la Fig. 2-7.

Los parámetros que se desprecian en la figura 2-7, son:

a) pérdidas por acople, b) atenuación del haz de sonido y c) divergencia del haz.

La tabla 2-2 muestra los factores aproximados de energía reflejada entre varios materiales.

TABLA 2-1

PROPIEDADES ACÚSTICAS DE LOS MATERIALES.				
Material	V long.	V. Transv.	Impedancia Acústica Z	Densidad
	$\frac{\text{cm} \times 10^4}{\text{seg}}$	$\frac{\text{cm} \times 10^4}{\text{seg}}$	$\frac{\text{gm}}{\text{cm}^2 \text{ seg}} \times 10^4$	$\frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$
Aceite (SAS 30)	1.7	---	1.5	.9
Acero	5.9	3.2	46.0	7.8
Acero inoxidable	5.8	3.1	45.4	7.0
Aire	.33	---	.00033	.001
Agua	1.48	---	1.48	1.0
Aluminio	6.3	3.1	17.1	2.7
Ox. de aluminio	8.7	---	32.0	---
Berilio	12.9	8.9	23.5	1.8
Bronce	3.5	2.2	31.3	8.9
Caucho	1.8	---	2.0	1.1
Cobre	4.7	2.3	41.6	8.9
Cuarzo	5.8	2.2	15.2	2.65
Estano	3.3	1.7	24.2	7.3
Hielo	4.0	2.0	4.0	1.0
Hierro	5.9	3.2	45.4	7.7
Hierro fundido	4.8	2.4	37.4	7.8
Latón	4.3	2.0	36.6	8.5
Lucita	2.7	1.1	3.1	1.18
Magnesio	5.8	3.0	10.0	1.74
Molibdeno	5.3	3.4	63.1	10.0
Monel	5.4	2.7	47.6	8.8
Neopreno	1.6	---	2.1	1.3
Niquel	5.6	3.0	49.5	8.9
Nylon	2.6	1.1	2.9	1.1
Oro	3.2	1.2	62.5	19.3
Plata	3.5	1.5	38.0	10.6
Plomo	2.2	.7	25.0	11.4
Poliétileno	1.9	.5	1.7	.9
Poliestireno	2.7	1.3	2.8	1.1
Poliacetato	1.9	---	1.9	1.0
Película	1.4	---	3.0	2.2
Titanio	6.1	3.1	27.3	4.5
Tungsteno	5.2	2.9	101.0	19.4
Uranio	3.4	2.0	63.0	10.5
Vidrio	5.7	3.4	14.2	2.5
Zinc	4.2	2.4	29.6	7.1



Donde:

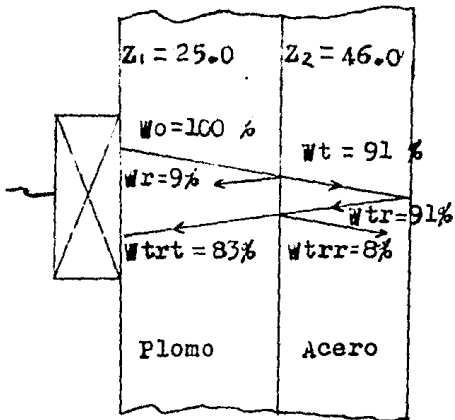
 $Z_1$  y  $Z_2$  - Imped. acúst. 1er. y 2o. medio $W_o$  - Onda inyectada 1er. medio $W_r$  - Onda reflejada 1er. medio $W_t$  - Onda refractada al 2o. medio $W_{tr}$  - Reflexión de la onda refractada del 2o. medio $W_{trr}$  - Reflexión de  $W_{tr}$  en el 2o. medio $W_{trt}$  - Refracción de  $W_{tr}$  al 1er. medio

Fig. 2-7 Porcentajes de reflexiones de energía, entre una interface plomo-acero.

Las pérdidas por acople, se deben principalmente al mal estado de la superficie de contacto, ya sea un mal acabado de la superficie, o el uso inadecuado de el líquido de acople, ya que distorsionan las indicaciones ultrasónicas de la manera siguiente:

a) Disminuyen la amplitud del eco de respuesta de discontinuidades de la pieza, estas disminuciones pueden ser debido a la dispersión en la superficie del haz de sonido.

b) Disminuye el poder de resolución, el cual es causado por un incremento en la longitud del eco en la superficie.

c) El ensanche del haz, que es debido a la dispersión en la superficie, por un requerimiento de la más baja frecuencia para disminuir la dispersión.



Las pérdidas por atenuación se deben a que cada vez, que un haz de sonido atraviesa un objeto habrá un proceso de disminución de la cantidad de energía introducida en una relación que dependerá de las propiedades del medio u objeto atravesado. Es la atenuación la que provoca diferencias cuando se prueban materiales de granos gruesos o finos, estructuras forjadas o coladas, etc..

Las principales causas de atenuación, se deben a la dispersión y absorción del haz de sonido. La dispersión es debida al hecho de que el material no es absolutamente homogéneo. La inhomogeneidad puede ser, considerada como una frontera entre dos materiales de diferente impedancia acústica, como inclusiones, poros o posiblemente solo fronteras de granos conteniendo contaminantes. Ciertos materiales son inherentemente inhomogéneos, como el hierro fundido, compuesto de una matriz de estructura de grano y partículas de grafito, el cual difiere grandemente en elasticidad y densidad. Cada grano en la aglomeración tiene una diferencia radical de impedancia acústica y produce severa dispersión del haz. Si granos individuales están orientados al azar por todas partes en un material, la dispersión ocurrirá como si el material estuviera compuesto de diferentes tipos de cristales o fases.

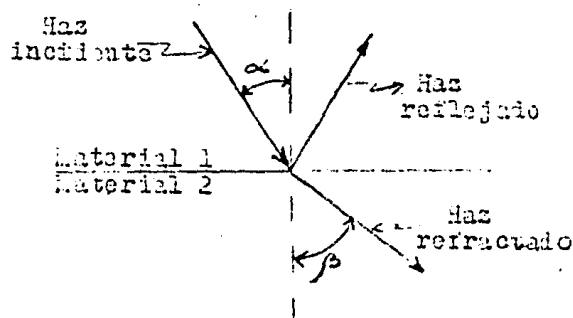
La segunda causa de atenuación, es la absorción. Esto resulta de la conversión de una parte de la energía de sonido

en calor. En algunos materiales no es absolutamente cero el movimiento de las partículas, es al azar el movimiento, como un resultado del contenido de calor. Como la temperatura se incrementa, habrá un incremento en la actividad de las partículas.

Ahora, cuando el haz infringe sobre una interface entre dos materiales, ya sea líquido y sólido ó solido y solido, la energía que no es reflejada pasa al 2o medio, al paso de esta energía de un medio a otro, se le llama refracción, esta refracción se debe a la diferencia de velocidades del sonido en los materiales. Esta energía transmitida tiene cambios de dirección de propagación. Esto ocurre en una forma análoga a la acción de un haz de luz, pasando a un ángulo diferente a  $90^\circ$ , desde un material de un índice de refracción, hacia un material con un índice diferente de refracción.

El ángulo a la cual la transmisión de sonido es refractada es determinada por: a) la velocidad del sonido en ambos materiales y b) el ángulo de incidencia.

Esto puede ser calculado según la ley de Snell. (Fig, 2-3)



Ley de Snell.

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Figura 2.3 Ley de Snell.

Nota.- Ley de Snell. Los ángulos están medidos desde la línea normal ( $90^\circ$  a la superficie de prueba), no desde la superficie de prueba.

Tiene que ser observada esta diferencia del haz, una onda de sonido de un tipo como es la onda longitudinal, no solo será refractada en el segundo material, según el ángulo de incidencia, sino que también es transformada parcial o completamente en ondas de otro tipo como son ondas de corte, superficiales o de placa. En cada caso, estas ondas van a tener diferentes velocidades en el mismo material, ellas son refractadas a ángulos diferentes.

Es posible crear ondas de dos tipos diferentes en el mismo material al mismo tiempo. La Fig. 2-9 muestra este fenómeno en un caso en el cual, un tipo de onda es parcialmente transformada y refractada en una interface agua-metal.

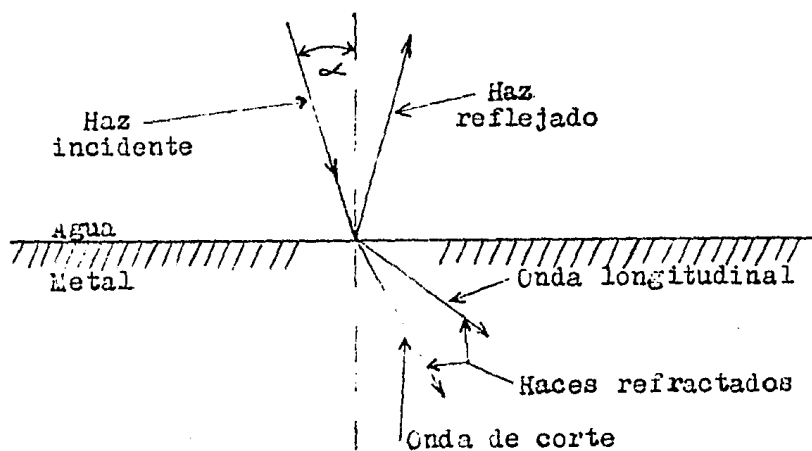


Fig. 2-9 Diagrama esquemático de un haz de sonido, en una interface agua-metal.

Para determinar el ángulo de refracción de un tipo de onda específica de sonido, en un material es necesario substituir la velocidad de este tipo de onda en la fórmula de la ley de Snell. En otras palabras, si deseamos determinar el ángulo de refracción de una onda de corte en acero, la velocidad transversal del acero debemos usarla en la ecuación.

Es casi imposible evaluar una discontinuidad haciendo dos tipos de ondas ultrasónicas a diferentes velocidades y ángulos de refracción, presentándose en un material al mismo tiempo, debido a que no son conocidos los tipos de onda detectados.

Puede aliviarse este problema, si determinamos antes de llevar a cabo la prueba, que solo un modo de onda se presenta en el material. Esto es posible, si los cálculos son hechos para determinar el ángulo a la cual, las ondas longitudinales serán refractadas a  $90^\circ$  de la normal. Por lo tanto, las ondas longitudinales no se presentarán a partir de determinado ángulo incidente en el cual esto ocurre, este es llamado "primer ángulo crítico", (Fig. 2-10) criterio que se toma para la construcción de zapatas para transductores angulares.

Si el ángulo de incidencia es aumentado hasta transformar las ondas de corte refractadas a  $90^\circ$ , y viajando en dirección paralela a la superficie de la pieza, habremos obtenido el segundo ángulo crítico, (Fig. 2-11), criterio que fué tomado por Rayleigh, para determinar las ondas de superficie y de placa.

Este tipo de ondas son fácilmente amortiguadas fuera del objeto, ya sea oprimiendo con un dedo la superficie por donde pasa la trayectoria del haz de sonido o por el contenido de líquido o muciedad, en la superficie del material; por lo tanto, no pueden ser generadas estas ondas superficiales en la prueba de inmersión.

Si deseamos conocer el ángulo de incidencia límite, para la generación de ondas de superficie, usaremos en la fórmula 1. la velocidad de las ondas superficiales en el material que se está probando.

$$\text{sen } \alpha = \frac{v_1 \text{ longitudinal}}{v_2 \text{ Rayleigh}} \quad \text{para ángulo pequeño.}$$

Y para el cálculo del ángulo de incidencia, para obtener el segundo ángulo crítico, se usará la velocidad transversal del segundo medio. (Ver figura 2-11).

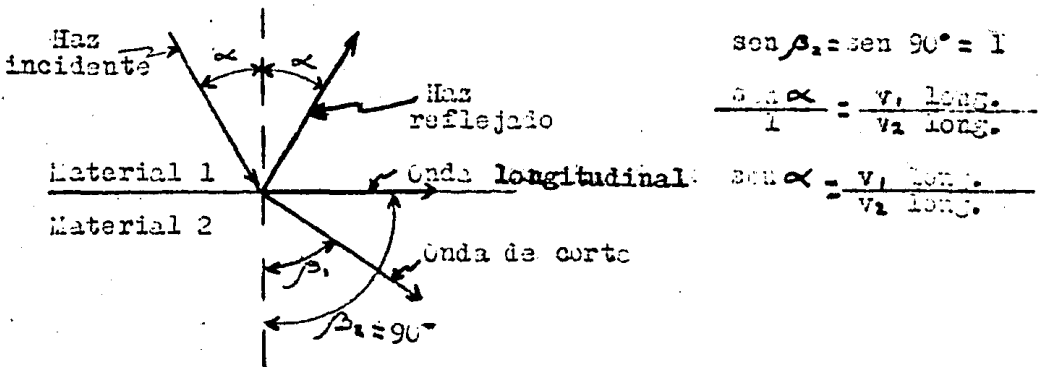


fig. 2-10 Cálculo del primer ángulo crítico.

Nota: En la figura, se usan velocidades longitudinales en los cálculos.

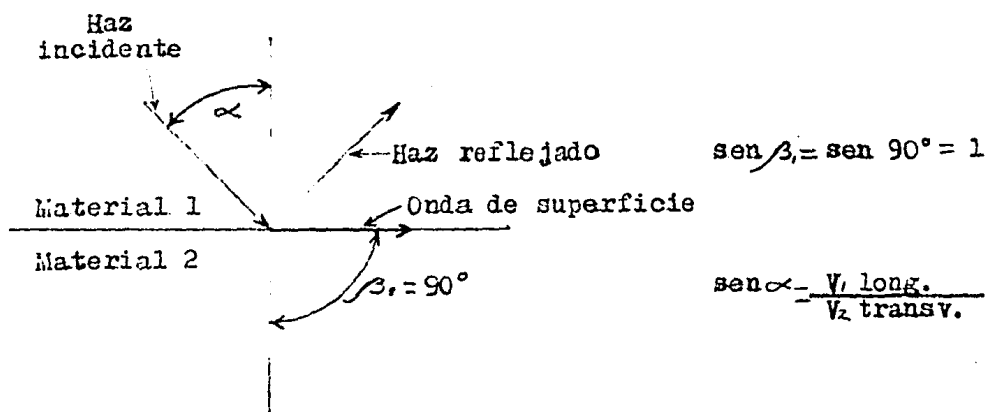


Fig. 2-11 Cálculo del segundo ángulo crítico.  
 Nota: Se usa velocidad transversal del segundo medio cuando se calcula el segundo ángulo crítico.

En la tabla 2-3, se dan los ángulos críticos para diferentes materiales de ensayo, usando agua como primer medio ( $V_1 = 0.149$  cm/ $\mu$ seg), y en la tabla 2-4 se dan los valores usando plástico como primer medio, ( $V_1 = 0.267$  cm/ $\mu$ seg.).

T A B L A 2 - 3				
MATERIAL ENSAYADO	1er. ANGULO CRITICO	2o. ANGULO CRITICO	VELOCIDAD (cm/ $\mu$ seg)	
			$V_l$	$V_t$
Berilio	7	10	1.280	0.871
Aluminio 17ST	14	29	0.625	0.310
Acero	15	27	0.585	0.323
Acero inoxidable 302	15	29	0.566	0.312
Tungsteno	17	31	0.518	0.287
Uranio	26	51	0.338	0.193

T A B L A 2 - 4

MATERIAL ENSAYADO	1er. ANGULO CRITICO	2o. ANGULO CRITICO	VELOCIDAD (cm/μseg)	
			V <sub>l</sub>	V <sub>t</sub>
Berilio	12	18	1.280	0.871
Aluminio 17ST	25	59	0.625	0.310
Acero	27	56	0.585	0.323
Acero inoxidable 302	28	59	0.566	0.312
Tungsteno	31	68	0.518	0.287

V<sub>l</sub> = Velocidad longitudinal.

V<sub>t</sub> = Velocidad transversal.

### C) Zonas del haz ultrasónico.

La onda que emerge de un transductor y penetra un medio de longitud infinita, puede separarse en dos zonas: una, la zona o campo cercano, llamada también zona de Fresnell, de longitud "N" (medida a lo largo del eje del transductor) y la otra zona o campo lejano, llamada también zona de Fraunhofer, de longitud determinada por el tamaño del objeto.

La longitud de la zona cercana, depende del diámetro del transductor y de la longitud de onda de la radiación ultrasónica, y podemos calcularla de acuerdo con la fórmula:

$$N = \frac{D^2 f}{4 V}$$

Donde:

N = Longitud de la zona cercana.

D = Diámetro del cristal.

V = Velocidad.

f = Frecuencia.

En la zona cercana, la amplitud de la reflexión de una discontinuidad particular, varía notablemente de un sitio a otro, como resultado de la interferencia, debido a esto, ese efecto que se lleva a cabo en esta zona muchas veces es ignorado o mal entendido, ocasionando errores en los resultados, puesto que, la validez de los resultados de la prueba son afectados por este fenómeno. Por tal motivo, esta zona no permite la detección de discontinuidades cercanas a la superficie de ensayo del objeto.

Las discontinuidades aparecidas en la zona de Fresnell, deben ser cuidadosamente interpretadas, porque, una discontinuidad puede producir múltiples indicaciones y la amplitud de la reflexión, desde una discontinuidad puede variar mucho, si la distancia efectiva desde el transductor varía.

La siguiente Fig. (2-12), nos muestra las zonas de el haz de sonido y su divergencia.



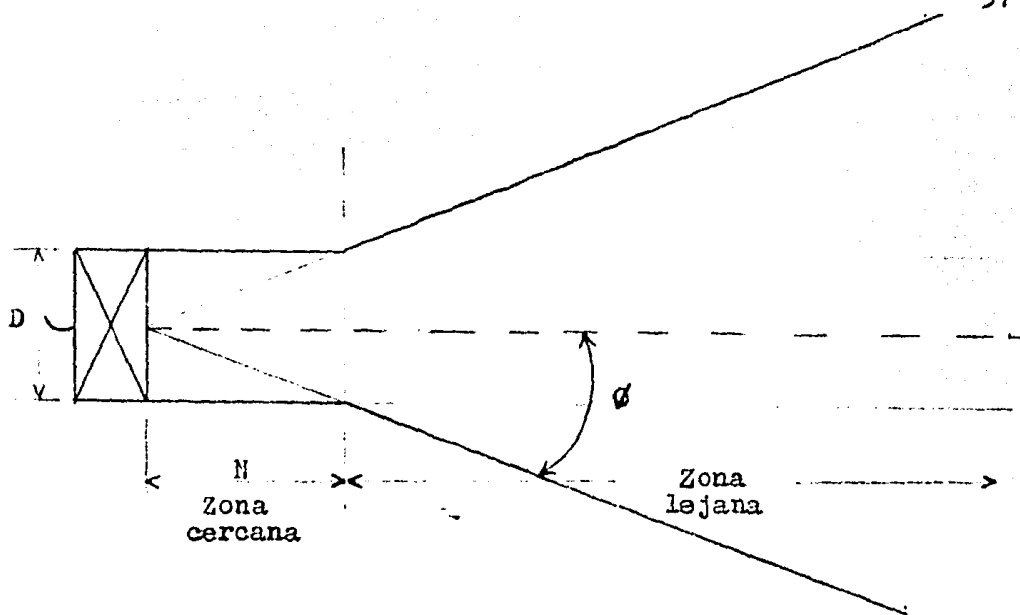


Fig. 2-12 Divergencia del haz de ultrasonido en el campo lejano.

Más allá del campo de interferencia o campo cercano, está un campo lejano libre de interferencia. La amplitud de la reflexión desde un reflector en el campo lejano, disminuye exponencialmente a medida que la distancia se incrementa. La amplitud de una reflexión desde una discontinuidad es máxima en el centro del rayo.

La pérdida de la amplitud de la señal en este campo, es el resultado de dos causas principales:

- 1). La atenuación,
- 2). La dispersión del rayo (divergencia).

Las causas de la atenuación han sido explicadas en el inciso b), solo nos resta explicar, que este efecto es notado sola-

mente en el campo lejano, porque el efecto de interferencia "cubre" toda atenuación en el campo cercano.

La dispersión del rayo o divergencia, no empieza en la cara del transductor, dado que el campo cercano está comprendido de a nillos de energía, que convergen en el eje central a el punto de intensidad primaria.

Si un transductor es considerado como transductor de enfoque, no tendrá ninguna relación con la divergencia del rayo.

El ángulo de divergencia en el campo lejano, puede ser determinado por la siguiente fórmula:

$$\text{Sen } \phi = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \frac{V}{fD}$$

Donde:

$\phi$  = Ángulo de divergencia.

D = Diámetro del cristal.

$\lambda$  = Longitud de onda.

V = Velocidad longitudinal de la onda en el material.

f = Frecuencia.

Nótase por lo tanto, que el ángulo de divergencia depende de el diámetro del transductor y de la longitud de onda.

Cuando la longitud de onda decrece (la frecuencia se incrementa) la divergencia del ángulo también decrece y cuando el diámetro del transductor aumenta la divergencia del haz decrece también.

Una línea trazada desde el centro del transductor, a través de un punto en la periferia de el rayo de sonido, donde la zona cercana termina, producirá una aproximación de la divergencia del ángulo, (observese en la Fig. 2-12).

## C A P I T U L O    I I I

### A C O P L A N T E .

Como su nombre lo indica, ayuda al acople del transductor con la superficie de la pieza que se está probando, para asegurar la transmisión de energía ultrasónica, del transductor al material de la pieza.

El acoplante logra cubrir las irregularidades en la superficie de contacto, por la exclusión del aire entre el transductor y la superficie.

El acoplante puede ser de una gran variedad de líquidos, semi-líquidos, pastas o algún sólido, que satisfaga los siguientes requisitos indispensables.

- a) Un acoplante debe mejorar el acople entre la superficie de prueba y la cara del transductor y excluirá todo el aire entre ellas.
- b) El acoplante debe ser fácil de aplicar.
- c) Será homogéneo y estará libre de burbujas, o partículas no sólidas en el caso específico de un sólido.
- d) Tener una tendencia para deslizarse sobre la superficie, pero fácil de remover.

- e) No deberá dañar al material y al transductor.
- f) El acoplante tendrá una impedancia acústica promedio de las impedancias del material y el transductor a utilizar en la prueba.

En la prueba de contacto, la selección del acoplante depende primordialmente de la condición de las superficies que harán contacto con el transductor.

Si el acoplante no humedece la superficie, es recomendable la adición de un apropiado agente humectante.

Otro parámetro importante para la selección del acoplante, es la temperatura, se recomienda un rango de temperatura de 60 a 90 °F, para obtener una mejor confiabilidad en los resultados, y además, para ayudar a proteger la vida del cristal piezo-eléctrico del transductor.

Los siguientes acoplantes se recomiendan según la rugosidad superficial.

1. Pulido o superficie limpia de arena.

Líquidos delgados, por ejemplo: agua, aceite ligero como SAE 10 (aceite de motor), o una solución de 50 % de agua y 50 % de glicerina con agente humectante.

2. De 50 a 200 r.m.s. de acabado.

Líquidos un poco densos, equivalente a SAE 20 (aceite de motor).

3. Aspero o superficie en mal estado.

(entre 200 y 1000 r.m.s.)

Líquidos densos, tales como: aceite de motor SAE 30 o SAE 40, grasa ligera, petróleo gelatinoso o glicerina,

4. Sobre 1000 r.m.s. aplicar grasa.

En la prueba de inmersión, se utiliza agua limpia, des-aerada, con un agente humedecedor.

Para tener seguridad en la operación, la temperatura del agua se mantendrá a 70°F, mediante controles automáticos.

## C A P I T U L O I V

### GENERACION DE ONDAS ULTRASONICAS.

Cuando un diapasón es golpeado con un martillo, este vibra y produce ondas de sonido por la compresión del aire. Estas ondas viajan a través del aire al oído de la persona que (capta) escucha el sonido.

Esta vibración y la producción de ondas no se generan por mucho tiempo. Similarmente, en pruebas ultrasónicas, un pulso corto de corriente eléctrica, golpea o excita a un transductor (cristal) que vibra como un diapasón generando ondas ultrasónicas.

En el caso de ultrasonido, podemos usar indistintamente los términos cristal (piezoeléctrico) ó transductor, para hablar del dispositivo generador de ondas.

#### A) Piezo-electricidad.

Efecto piezo-eléctrico, es el efecto que se lleva a cabo debido a las propiedades del un cristal, de convertir energía eléctrica en mecánica o viceversa. Y el cristal que realiza esta conversión se le llama cristal piezo-eléctrico. Este fenómeno fué descubierto por los hermanos Curie en 1880, y el efecto reversible fué descubierto por Lippman en 1881.

Si un transductor puede convertir energía eléctrica en mecánica y viceversa, puede decirse que es capaz de emitir y recibir energía.

Por ejemplo, si se colocan transductores en los lados opuestos de una muestra como se observa en la Fig. 4-1, se puede usar un transductor para emitir ondas y el otro para recibirlas, una vez que ellas han atravesado el objeto, o si se coloca un solo transductor como en la Fig. 4-2, se inyectan ondas a intervalos de tiempo regulares, debiendo ser capaz, en teoría, de recibirlas el mismo cristal.

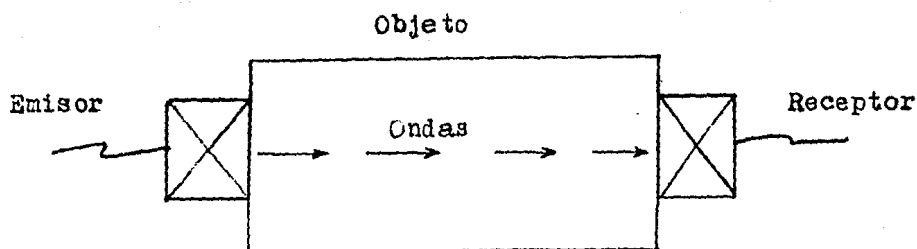


Fig. 4-1

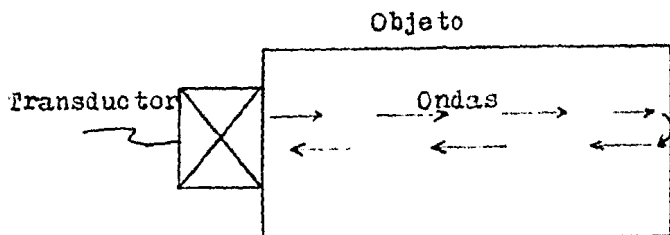


Fig. 4-2



La combinación de estos dos efectos hacen posible el sistema ultrasónico.

Un cristal simple piezo-eléctrico es anisótropo en sus propiedades eléctricas, mecánicas y ópticas, y así la placa (cristal) con sus diferentes propiedades puede ser obtenida por el corte a través de varias direcciones en el cristal.

Cada cristal tiene tres ejes polares X, Y y Z. Como se representa en la Fig. 4-3.

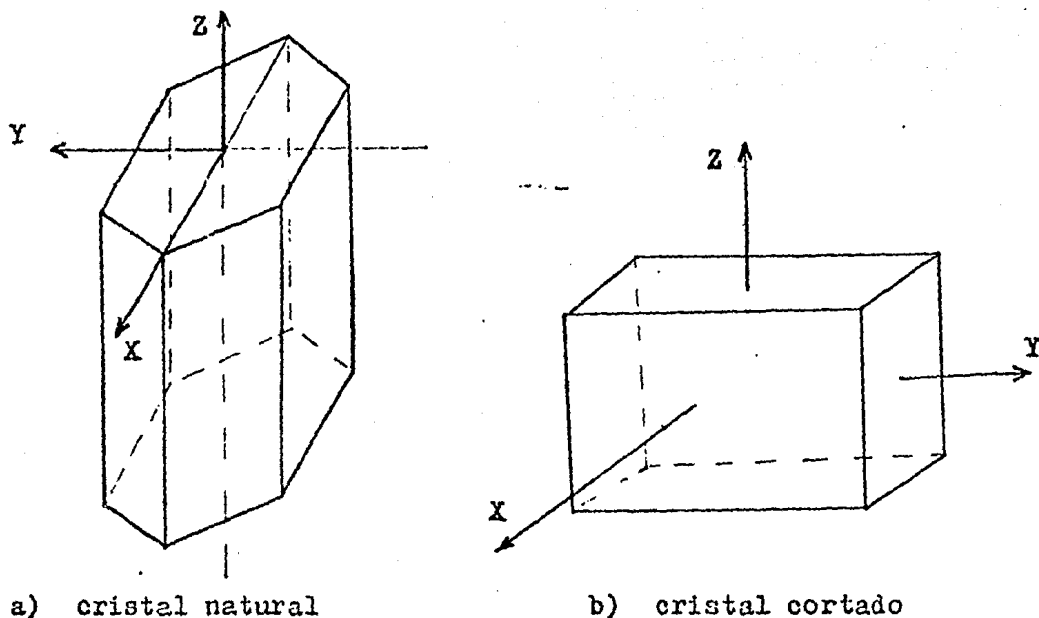


Fig. 4-3. Orientación típica de los ejes de un cristal de cuarzo.

El efecto piezo-eléctrico es más fácilmente visualizado, por el uso de una placa de cristal cortado desde un ángulo recto a el eje "X" como se muestra en la Fig. 4-3b.

Los cristales naturales como el cuarzo, utilizados en transductores se cortan en uno o dos planos. Los cristales de corte en X, son cortados perpendicularmente al eje X, y producen ondas sónicas longitudinales. Los cristales de corte en Y son cortados perpendicularmente al eje Y y producen ondas sónicas transversales.

Al aplicar una tensión sobre dos placas colocadas en determinada posición sobre el cristal piezo-eléctrico, (como lo muestra la Fig. 4-4), este cristal realiza un cambio en su espesor, debido a los cambios de carga eléctrica en los elementos (iones) del cristal, de manera relativa, al seguir aplicando tensiones a las placas, el cristal se pondrá eléctricamente polarizado. Como resultado, la carga positiva (+) aparece sobre un lado de la placa y la carga negativa (-) sobre el otro, creando un capacitor. Los iones negativos son atraídos por el lado positivo y los iones positivos por el conductor negativo. Estas dos zonas paralelas en seguida atraen el uno al otro, debido al potencial en cada uno, y la placa se hace delgada y más larga, como se muestra en la Fig. 4-4. Cuando el potencial es eliminado, los iones negativos repelen a los positivos y la placa se hace gruesa y corta. La placa vibra hasta alcanzar su equilibrio.

Considerando una dirección fija, el cristal piezo-eléctrico se expande por un voltaje de una polaridad y se contrae, por un voltaje de polaridad opuesta. Esto es un fenómeno donde, por la presión sobre el cristal se pone tenso, las caras muestran cargas de signo contrario, por lo tanto, la frecuencia de salida es función directa de la frecuencia de entrada.

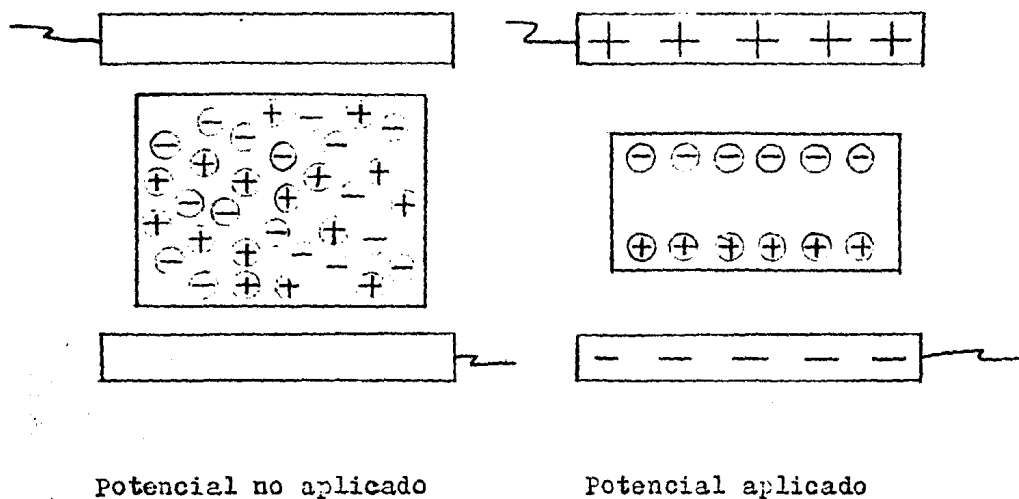


Fig. 4-4. Cambio de forma del cristal, como resultado de la aplicación de un potencial.

En la tabla 4-1, se hacen comparaciones entre cuatro diferentes materiales (cristales) piezo-eléctricos, para indicar la magnitud de las diferencias en sus características.

T A B L A 4-1

## PROPIEDADES COMUNES DE MATERIALES PIZZO-ELECTRICOS.

MATERIAL	CUARZO	SULFATO DE LITIO	TITANATO DE BARIO	CERAMICA POLARIZADA
Punto de Curie* °C	575	75	120	340
Constante de transmisión	2	16	140	320
Constante de recepción	50	175	15	24
Densidad ( $10^3 \text{ Kg/m}^3$ )	2.65	2.055	5.4	7.5
Impedancia acústica	15.2	11.2	24	28.4
Constancia dieléctrica ( E )	4.5	10	1050	1500
Coefficiente de acople ( % )	11	38	45	68

NOTA: Los datos dados para el titanato de bario y la cerámica polarizada dependen de la composición y son solamente valores típicos.

\* Punto de Curie.- Temperatura crítica a la cual una substancia ferromagnética pasa a diamagnética.

Los materiales piezo-eléctricos más comunes usados en la construcción de transductores son:

- a) Cuarzo
- b) Sulfato de litio
- c) Cerámicas polarizadas

a) Cuarzo.

El cuarzo fué el primer material usado en la construcción de transductores, pero con el descubrimientos de nuevos materiales su uso es menor cada día.

VANTAJAS.

- Excelente estabilidad química, eléctrica y térmica.
- Es insoluble en la mayoría de líquidos.
- Es duro y resistente al desgaste.
- Tiene buena uniformidad y resistencia al envejecimiento.
- Habilidad para operar a temperaturas altas.

DESVENTAJAS.

- Menos eficaz generador de energía acústica de los materiales empleados.
- Experimenta interferencia en el modo de conversión.
- Requiere altos voltajes para excitarlo a bajas frecuencias.

b) Sulfato de litio.

El sulfato de litio es otro de los materiales usados en la construcción de palpadores ultrasónicos.

#### VENTAJAS.

- Son los más eficientes receptores de energía ultrasónica.
- Regulares generadores de dicha energía.
- Resistentes al envejecimiento.
- Son afectados muy poco por la interferencia en el modo de conversión.

#### DESVENTAJAS.

- Es muy frágil.
- Es soluble en agua.
- Esta limitado a temperaturas más bajas que 155 °F (73.8 °C).

#### c) Cerámicas polarizadas.

Las cerámicas polarizadas más comunes son: Titanato de bario, metaniobato de plomo y titanato circonato de plomo.

#### VENTAJAS.

- Son los más eficientes generadores de energía ultrasónica.
- Operan bien a bajo voltaje.
- No les afecta la humedad.
- Resisten a altas temperaturas, a casi 300 °C (572 °F).

#### DESVENTAJAS.

- Resistencia mecánica relativamente baja.
- Experimenta cierta interferencia en el modo de conversión.
- Tiende a envejecer.

Estos materiales de cerámica polarizada, son producidos como el nombre lo indica, parecido a vasijas de cerámica.

Son multicristalinos y son hechos de la mezcla de polvos mixtos y calentados hasta hacerse sólidos. Pueden ser hechos en una forma necesaria para un trabajo, pueden ser moldeados, estampados o fundidos. Las características requeridas de un cristal, para una cierta aplicación es controlada por el hecho de agregarle varios componentes químicos en diferentes proporciones. Como todas las cerámicas, tiene una gran conversión sensitiva, de "elétrica a mecánica". La eficiencia mecánica (acústica) a eléctrica, es más baja que la de cuarzo; pero la ganancia (la sensibilidad total de un transductor, cuando es usado como ambas, un transmisor y un receptor) es superior.

#### B) Construcción del transductor.

No existe un solo transductor apropiado para todas las aplicaciones, por ello, se fabrica una gran variedad en tamaños, frecuencias, lentes y ángulos, para cubrir prácticamente cualquier necesidad industrial, las variadas formas son el resultado de mucha experiencia y de las necesidades de las diversas aplicaciones especiales.

El tamaño del elemento (cristal), es el factor más importante para el diseño del transductor, y es el que determinará la frecuencia debido a sus dimensiones.

En transductores de cara plana, determina el ancho del material que será inspeccionado en un paso.

En transductores de inmersión enfocados, determina la profundidad de campo y la unidad enfocada.

Para transductores de baja frecuencia, un elemento de diámetro muy pequeño causará excesiva divergencia del rayo. Para un tamaño de elemento dado, los efectos de esta divergencia pueden ser disminuidos, aumentando la frecuencia. Por lo tanto, la frecuencia va a ser un factor dependiente de el tamaño del elemento.

La selección de la frecuencia está generalmente basada en dos requerimientos:

- 1). Penetración.
- 2). Detección de pequeñas discontinuidades.

Primeramente, si se disminuye la frecuencia aumenta la penetración y viceversa.

Pero también, si aumenta la frecuencia, se incrementa la habilidad de detectar fallas más pequeñas. Generalmente, las fallas de una magnitud igual a la mitad de la magnitud de la longitud de onda ( $\lambda$ ), puede ser confiablemente detectadas.

De acuerdo a la relación:

$$\lambda = \frac{v_l}{f}$$

Donde:

$\lambda$  = Longitud de onda.

$v_l$  = Velocidad longitudinal en el material.

$f$  = Frecuencia del transductor.



Y considerando lo descrito anteriormente, se dará una tabla de la magnitud de las discontinuidades mínimas detectables en el acero.

Para A C E R O		
$V_L^* = 2.3 \times 10^5$ pulg./seg.		
Frecuencia	Magnitud de la longitud de onda ( $\lambda$ )	Magnitud de la discontinuidad mínima detectable.
MHz.	Pulg.	Pulg.
0.5	0.460	0.250
1.0	0.230	0.115
2.25	0.102	0.051
5.0	0.046	0.023
10.0	0.023	0.0115

\*  $V_L$  = Velocidad longitudinal en el acero.

Otro aspecto importante en la construcción del transductor, es el de la configuración del lente de apoyo,

Todos los transductores tienen una superficie de apoyo, llamada superficie de desgaste, debido a varias razones. En los transductores de contacto, el deterioro es un factor importante y es necesario sumar placas para proteger la fragilidad del cristal al desgaste, a la rotura, o a efectos dañinos de sustancias extrañas o líquidos, y para proteger al electrodo frontal. Por

lo general, estas placas se construyen de óxido de aluminio, por ser un material que resiste la abrasión. Algunos transductores de contacto se usan con una membrana de protección, removible, generalmente de polietileno, (de determinado espesor), para aumentar el acople con superficies rugosas y para proteger a la vez al lente de desgaste.

Los transductores con línea de retardo, tienen puntos de defasamiento fijos o reemplazables, fabricados de poliestireno o de algún material especial resistente a altas temperaturas que retarde la abrasión.

Los transductores de haz en ángulo, tienen cubierta de epoxyco para permitir una mejor igualdad acústica dentro de la zapa ta de plástico, y para que el transductor tenga mayor sensibilidad.

Para acoplarse a las curvaturas de la superficie, y hacer máxima la confiabilidad de las pruebas, las superficies de opo yo del transductor pueden ser contorneadas.

En la prueba de inmersión, las lentes contorneadas de los transductores son un parámetro primordial de función de la unid ad, puesto que permiten que el haz sea afocado, ya sea a un pun to o configuración de línea a una distancia específica del obje tivo. La elección de una longitud focal optimiza la forma, pun to o línea, al considerar su relación con el tamaño de el elemen to y la profundidad de campo es crucial, para una apropiada selec ción del transductor de inmersión.

Las unidades frontales, formadas para dirigir energía sonora, perpendicularmente a la superficie a todos los puntos situados en superficies curvas, son llamados lentes de corrección del contorno. Estas lentes cilíndricas agudizan el sonido entre el transductor y la superficie. Una comparación entre lentes planas y contorneadas de los transductores se muestra en la Fig.

4-5.

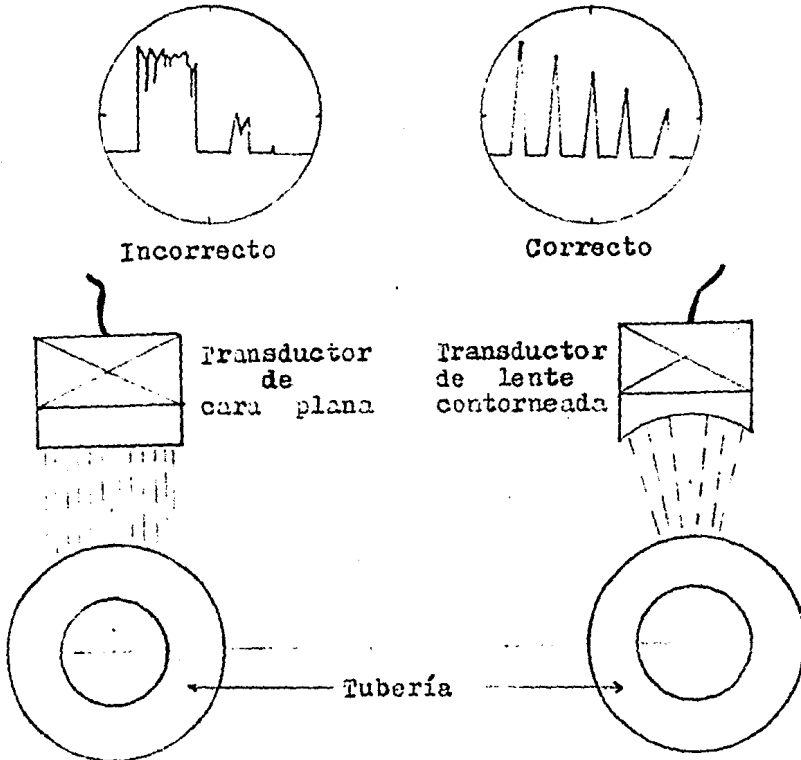


Fig. 4-5.

Todos los transductores tienen las mismas características en su construcción, con excepción del transductor dual o de doble elemento.

Las partes que componen un transductor son las siguientes (Fig. 4-6).

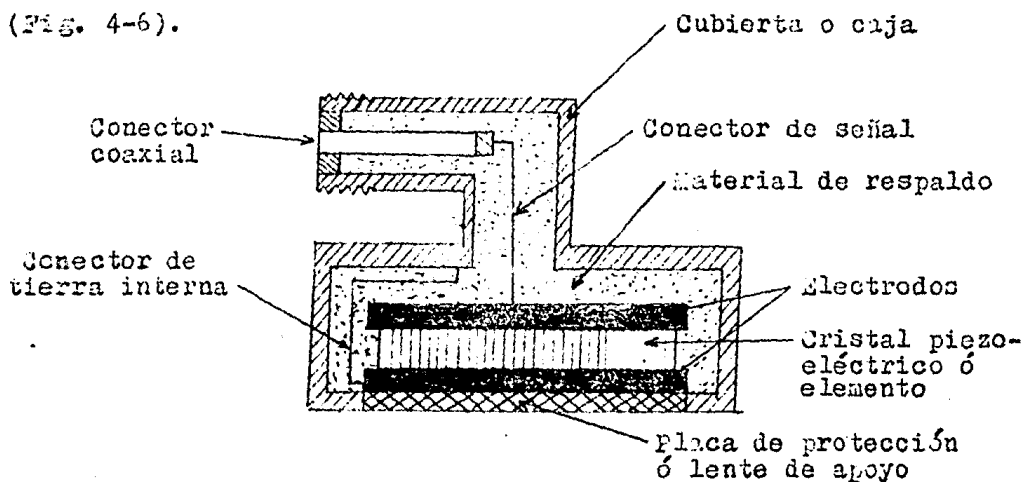


Fig. 4-6. Partes componentes de un transductor.

El cristal piezo-eléctrico, visto en el inciso A Capit. IV, puede ser de cuarzo, sulfato de litio ó cerámica polarizada.

La caja o cubierta, es la unidad donde está alojado el sistema del transductor, generalmente construido de acero inoxidable y tomado como conector de tierra interna.

Electrodos, generalmente contruidos de plata, por su buena conductividad eléctrica, conectados, uno al conector de tierra interna y el otro al conector de señal, que al aplicárselas una corriente eléctrica provocan la excitación del cristal, pa-

ra que lleve a cabo su función.

Material de respaldo, para este material se usa una pieza especial, debidamente colocada, que sirve para amortiguar al cristal cuando está vibrando. Este elemento de amortiguación tiene dos tareas: Primero, debe amortiguar de tal modo las oscilaciones de inercia del cristal piezo-eléctrico, para que la sensibilidad y el poder resolutivo cumplan las exigencias deseadas, y segundo, debe atenuar los impulsos que entran al cristal en el mismo palpador, y que la caja o cubierta no refleje ningún impulso molesto que pueda volver al cristal. Para poder cumplir los dos objetivos, el material de respaldo ha de oponer una gran resistencia al sonido y a la vez, debe ejercer una fuerte atenuación sobre el sonido.

Placa de protección o lente de apoyo, generalmente se construye de óxido de aluminio, sirve para proteger al cristal de cualquier daño.

La Fig. 4-7, muestra los elementos que componen a un transductor dual o de doble elemento.

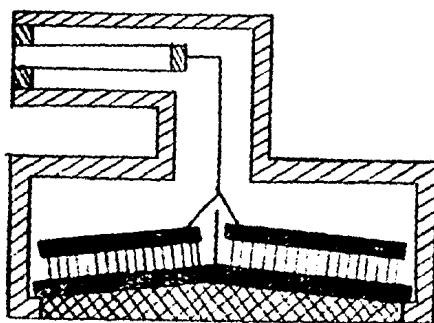
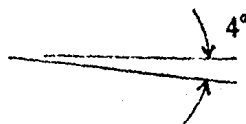


Fig. 4-7. Transductor dual.



### C) Características de la unidad buscadora.

Las características de un transductor, se describen fundamentalmente por los siguientes términos:

- a) Sensibilidad
- b) Resolución

La sensibilidad de un transductor es la habilidad de detectar ecos procedentes de discontinuidades pequeñas. La sensibilidad del transductor se mide por la amplitud de su respuesta a una discontinuidad artificial en un block standard de referencia. La sensibilidad precisa de un transductor, es característica única de un transductor específico, pues transductores del mismo tamaño, frecuencia y material procedentes del mismo fabricante, no siempre producen indicaciones idénticas en una pantalla osciloscópica dada. La sensibilidad de un transductor se califica, por su capacidad de detectar un agujero de fondo plano, de dimensiones dadas, a una profundidad en un block de referencia standard.

#### Resolución.-

El poder resolutivo de un transductor, se refiere a su capacidad de separar los ecos procedentes de dos blancos situados próximamente en profundidad, por ejemplo; el eco procedente de la superficie frontal y el procedente de una pequeña discontinuidad que se encuentra cerca de la superficie.

Estos dos términos se derivan de fenómenos de efectos laterales o secundarios del haz de sonido, si una sección transver-

sal es formada a través de la zona cercana, existirán anillos de energía ultrasónica que convergan hacia el eje del rayo central. Si la sección transversal está hecha para incluir una área seccional transversal más grande, los anillos de energía serán notados, la intensidad de los cuales es mucho menor que los "anillos del efecto de fresnel". Estos efectos laterales se originan en el filo (orilla) de el transductor, y son principalmente, el resultado del efecto del filo del cristal, (Fig. 4-8).

Estos efectos son de interés para un inspector porque, aún cuando de un modo igual, esten abajo de la intensidad comparados con el rayo central, contienen suficiente energía para efectos adversos en una prueba en ciertos casos.

Los efectos de este efecto, son concernientes principalmente para pruebas de inmersión. Ya que ellos se propagan en ángulos divergentes al rayo principal, el tiempo transcurrido de el sonido viajando para y desde la superficie frontal, será más grande que la que viaja por el rayo principal, porque la distancia es más grande. Esto extenderá el periodo de tiempo (distancia) que ocupa la señal de la superficie frontal sobre el tubo de rayos catódicos, por lo tanto, reduce la resolución del sistema para defectos o discontinuidades en la superficie cercana.

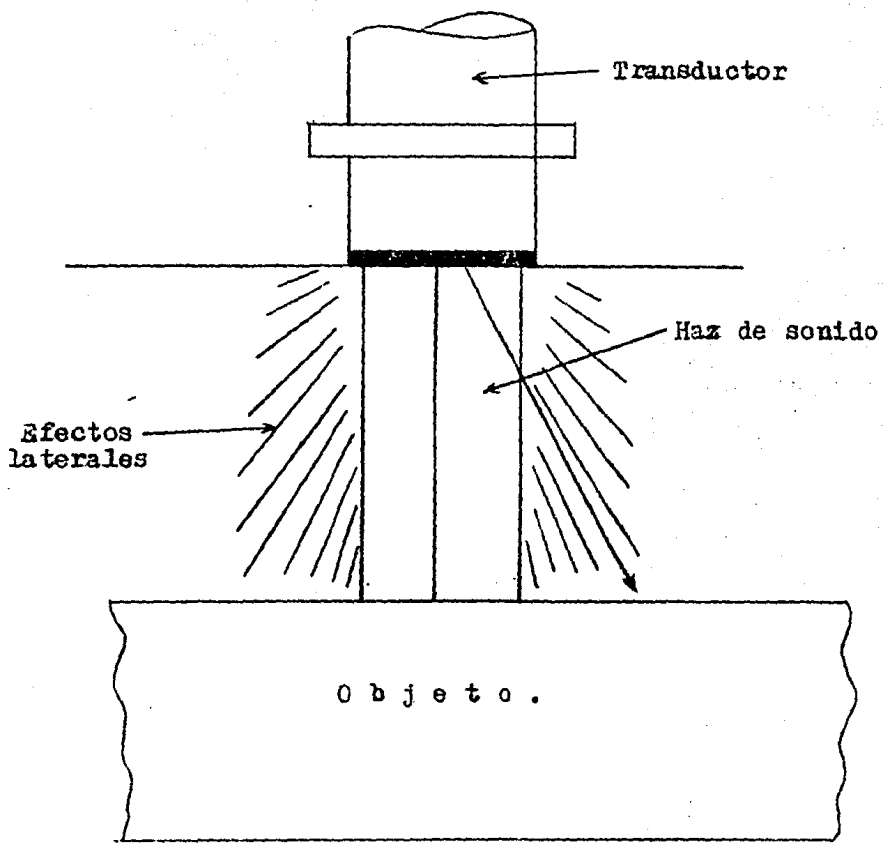


Fig. 4-8 Efectos laterales del haz de sonido.



#### D) Tipos de transductores.

Los transductores se construyen en una variedad ilimitada de tamaños y formas, desde extremadamente pequeños, hasta de 6 pulgadas de largo, como los transductores tipo brocha.

Las variadas formas son el resultado de mucha experiencia y de las necesidades de las diversas aplicaciones especiales.

Los transductores son clasificados como:

- a) Banda ancha
- b) Banda angosta

Los transductores de banda ancha altamente amortiguados operan sobre un amplio rango de frecuencias y por lo tanto, responden a frecuencias que van por debajo de sus valores normales. Esto los hace útiles para la inspección de materiales que, tienen gran absorción acústica o efectos dispersantes (difusores) o cuando la prueba es requerida con alta resolución, es altamente importante.

Son generalmente usados para calibración de espesores en alta resolución de materiales delgados, cuando se utilizan las técnicas de prueba de contacto o de línea de retardo. Los transductores de banda ancha permiten máxima resolución al detectar fallas cerca de la superficie frontal o trasera de los materiales probados. Los transductores de banda ancha altamente amortiguados, exhiben características de gran pulso amortiguado, que son esenciales para la calibración de espesores sin errores y para la detección de fallas en alta resolución.

Los transductores de banda angosta moderadamente amortiguados permiten máxima penetración en el material y sensibilidad. Se recomienda en la mayoría de las aplicaciones de fallas, y son ideales cuando se conocen las especificaciones de la frecuencia requerida. Dado que la sensibilidad en un transductor de banda ancha es limitada, en un transductor de banda angosta, presenta mayor salida a la frecuencia central.

Los transductores de banda angosta generalmente contienen redes de sintonizado, como una parte integral del conjunto transductor. Esto optimiza las características transductoras de frecuencia del detector de fallas y maximiza la sensibilidad en los transductores de banda ancha. Los transductores de banda angosta se sintonizan dentro de 10% de la frecuencia normal.

Otra clasificación que se puede hacer y quizá la más conveniente, es según el método de inspección a usarse, ya que basándose en esto se manufacturan una línea completa de transductores de alto funcionamiento y alta tecnología para amplio rango de aplicaciones de prueba.

Todo tipo de transductor básico es manufacturado con una variedad de estilos de conectores, cajas, configuración de lentes, frecuencias y tamaños de elementos. También se puede diseñar todo tipo de transductores especiales que se requieran.

Transductores de contacto simple (haz recto), diseñados para medición de espesores y detección de fallas en placas, barras, forjas, fundiciones y extrucciones.

Son aplicados directamente a la cara de la superficie de los objetos de prueba, los transductores de diámetros pequeños, pueden usarse para pruebas de materiales levemente curvadas.

Estos transductores se diseñan para rangos de frecuencias de 0.5 a 15 MHz. pueden ser banda ancha o banda angosta y con un diámetro del elemento (cristal) desde 0.250 hasta 1.125 pulgadas, Fig. 4-9.

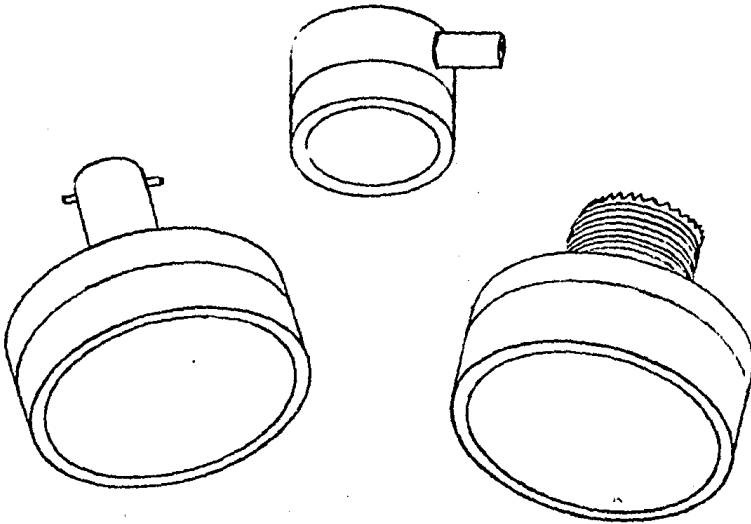


Fig. 4-9 Transductores de contacto (haz recto).

Transductores de contacto con línea de retardo, ofrece alta resolución en la calibración de espesores de láminas delgadas o tubos. Extremos de retardo reemplazables para aislar la cara del transductor contra el desgaste y pruebas en superficies a altas temperaturas y pueden ser contorneadas para adaptarse en superficies curvas.

Estos transductores se diseñan para rangos de frecuencias de 1.0 a 10.0 MHz., y se usan en contacto con la cara de la pieza para detección de fallas y evaluación de defectos. La línea de retardo de 1 pulgada (25.4 mm.) protege al transductor de daños y permite hasta 500 °F (260 °C) en forma continua y 800 °F (427 °C) en forma intermitente. De otro modo, estos transductores ofrecen todas las ventajas superiores en comparación con los transductores de contacto, como es alta resolución, alta penetración y alta sensibilidad.

El diámetro de elemento (cristal) se diseña desde 0.250 hasta 0.750 pulgadas, (Fig. 4-10).

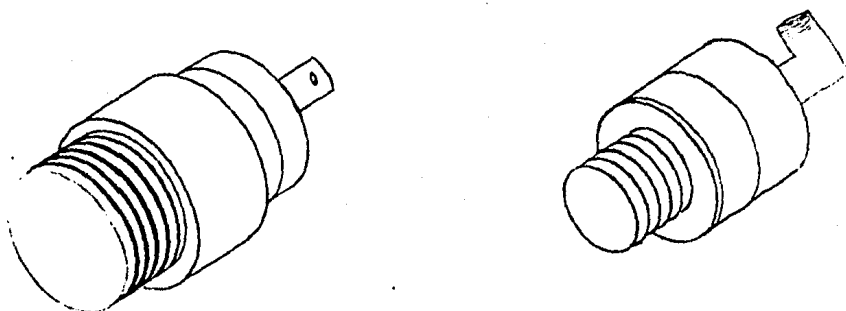


Fig. 4-10 Transductores de contacto con líneas de retardo.

Transductor de contacto elemento dual (lanzar y recibir), transductor para medición de espesores y detectar fallas y corrosión en materiales, especialmente donde en la superficie cercana de contacto está la resolución deseada. El punto focal es muy próximo a la superficie frontal, haciendo esto ideal para superficies con hoyos y pruebas de corrosión, inspección de soldaduras, de latón y evaluación de laminaciones. Este efecto focal de el transductor dual con hechura ideal para tubos y otras superficies curvadas.

Estos transductores se diseñan de banda ancha y banda angosta con rango de frecuencias de 2.25 a 5 MHz., y tolerancia de 10 % con un diámetro de elemento (cristal) de 0.250 y 0.500 pulgadas y una altura de 0.625 y 2.500 pulgadas, (Fig. 4-11).

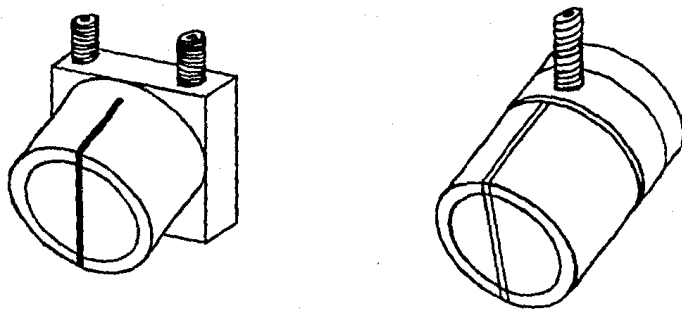


Fig. 4-11 Transductor de contacto, elemento dual.

Transductores de haz en ángulo (ondas de corte), son usados para pruebas en láminas, placa, tubos, soldaduras y, otras partes donde el contacto directo sobre la falla es impráctico.

Porque la dirección del haz de sonido está lejos de la normal de incidencia a la superficie de entrada, los transductores de haz en ángulo, pueden detectar fallas que no reflejan señales significativas durante las pruebas con haz recto.

Se diseñan únicamente de banda angosta con un rango de frecuencia desde 0.5 a 10.0 MHz.

Estos transductores emplean zapatas angulares renovibles que se ensamblan para permitir un fácil intercambio de las zapatas angulares clasificadas.

Se diseñan transductores en miniatura, y con zapatas angulares renovibles, provistas de algunas características de funcionamiento. Este tamaño permite ser usado en áreas accesibles limitadas.

Estas zapatas se diseñan para ángulos efectivos de  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  y  $90^\circ$  en acero, también existen zapatas de materiales que resisten altas temperaturas, hasta para  $800^\circ\text{F}$  ( $427^\circ\text{C}$ ), generalmente se diseñan de plástico o lucita, (plexiglass), (Fig. 4-12).

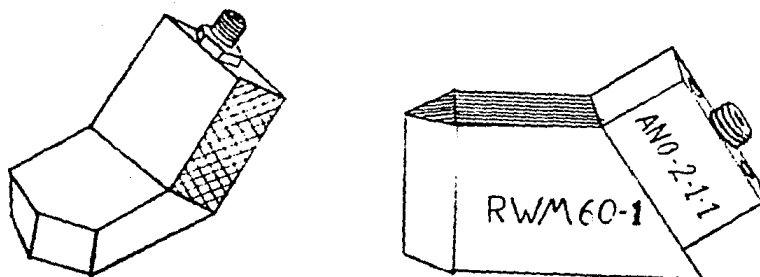


Fig. 4-12 Transductor de haz en ángulo.

Transductores de inmersión, se usan para medición de espesores y detección de fallas en objetos de forma irregular mientras que, están sumergidas en un líquido. Ya que son capaces de introducir ondas de sonido a cualquier ángulo deseado, los transductores de inmersión proveen de tremendas pruebas de flexibilidad para pruebas continuas en línea de conductos, tubos y barras regulares a altas velocidades de exploración. Estos transductores pueden ser usados con rotores mecánicos a altas velocidades y en sistemas manipulando material, también como en una amplia variedad de aplicaciones en laboratorio.

Los transductores de inmersión se diseñan desde 1 hasta 15 MHz. de frecuencia, pueden ser de banda ancha o banda angosta. Provistos de una gran variedad de lentes contorneadas que sirven para el enfoque del haz de sonido a una distancia determinada, (Fig. 4-13).

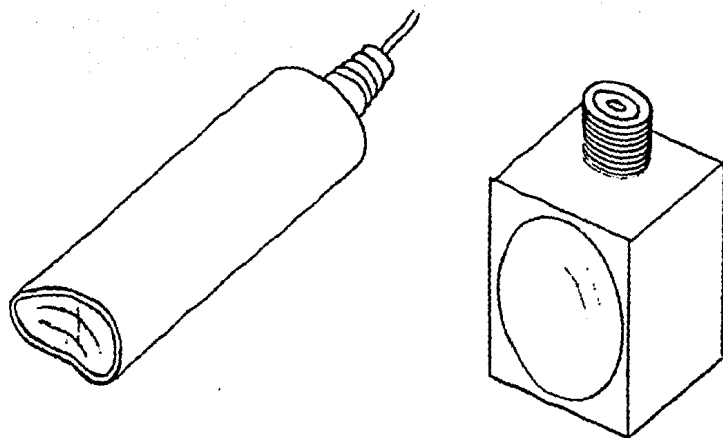


Fig. 4-13 Transductores de inmersión.

Otro tipo de transductor es el llamado transductor de brocha, es un transductor especial, compuesto de un mosaico de cristales pequeños, igualados cuidadosamente de manera que la intensidad del haz varíe muy poco, a través de la longitud total del transductor. Los transductores de este tipo proporcionan un haz largo, angosto y rectangular, apropiado para explorar grandes superficies, siendo su objeto el descubrir rápidamente las discontinuidades de la pieza bajo prueba.

Generalmente se usa para inspección de láminas o placas, (Fig. 4-14).



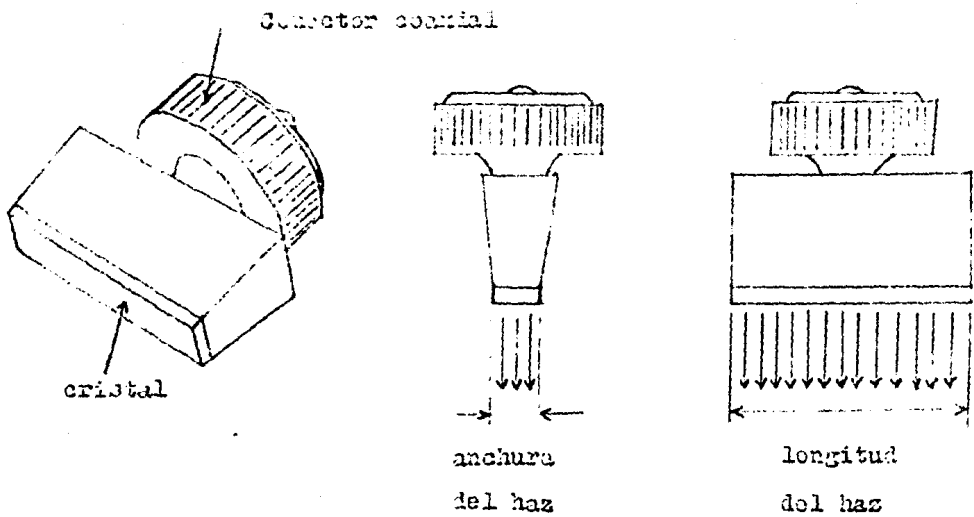


Figura 4.14. Transductor de brocha.

## C A P I T U L O V

### INSTRUMENTOS ULTRASONICOS.

Todos los instrumentos ultrasónicos de pulso-eco, están fabricados con circuitos electrónicos similares, y contienen las funciones básicas y comunes para todos los equipos fabricados.

La nomenclatura de las funciones realizadas de cada equipo, varían de un instrumento a otro, de acuerdo a su fabricante.

El diagrama de bloques de un instrumento de prueba ultrasónica pulso-eco, se muestra muy simplificado en el siguiente diagrama.

El generador de impulsos es el corazón de el sistema. En la prueba de contacto, el pulso es enviado desde la unidad de pulsos hacia la unidad receptora amplificadora y al mismo tiempo es enviada al transductor, así que el pulso principal y el pico de la superficie frontal ocurren al mismo tiempo.

En una prueba de inmersión, el pulso inicial y el pico de la superficie frontal son separados por la distancia del agua del transductor a la pieza de prueba.

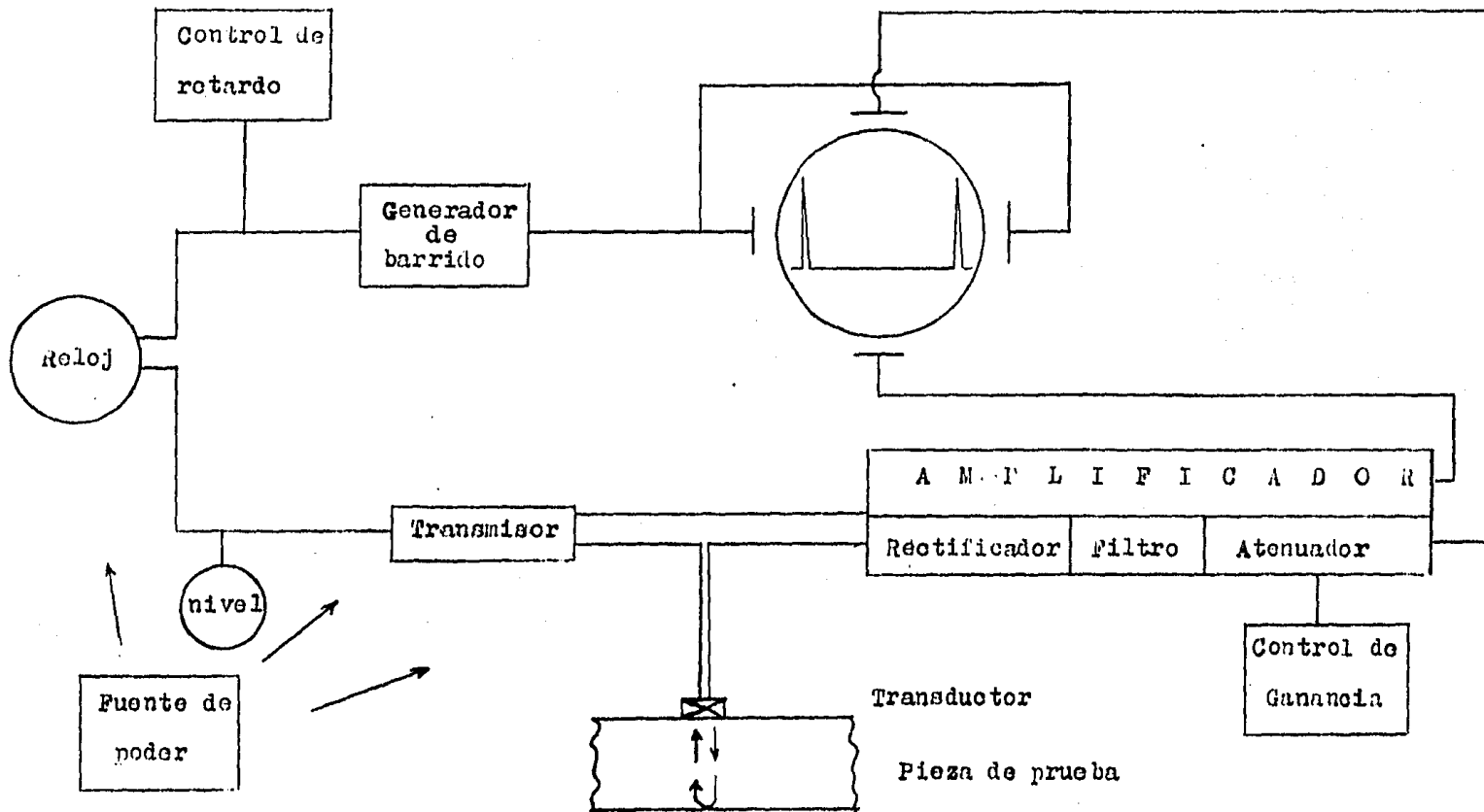


DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN INSTRUMENTO ULTRASONICO.

A).- Descripción del instrumento básico.

Todos los instrumentos ultrasónicos comprenden las siguientes secciones:

a).- Fuente de poder. Los circuitos que suministran el voltaje necesario para el funcionamiento del instrumento, constituyen la fuente de poder abastecida por la red de servicio o en algunos equipos, por una batería contenida en la unidad.

b).- Transductor. El transductor consiste del cristal y su soporte. El cristal convierte la energía eléctrica a energía ultrasónica e introduce vibraciones en la pieza sometida a prueba; también recibe las vibraciones reflejadas dentro de la pieza y las convierte en señales eléctricas, las cuales son amplificadas en la pantalla.

c).- Transmisor-receptor. El pulsor o generador de pulsos constituye la fuente de impulsos cortos de energía eléctrica, disparados por el reloj, los cuales son aplicados al transductor. Los impulsos de retorno procedentes de la pieza bajo prueba, son recibidos, amplificados y enviados a la unidad de presentación.

d).- Presentación. Generador de tiempo.

La presentación se obtiene mediante un osciloscopio con generador de barrido, un generador de marcadores y los controles necesarios, para obtener una imagen visual

de las señales recibidas del espécimen. El generador constituye la fuente de todas las señales de tiempo, para el pulsador y a veces se le denomina generador de repetición.

B).- Función de los controles externos del equipo.

Existen controles para las diversas funciones del equipo, tales como la fuente de poder, pulsador, receptor, generador de tiempo y presentación. La nomenclatura empleada en la siguiente descripción (Fig. 5-1), puede variar de una unidad a otra.

I.- Fuente de poder (1). Generalmente la fuente de poder, se controla mediante interruptores de encendido y apagado y fusibles. Después de encenderse la unidad, entran en función ciertos elementos del circuito durante el periodo de calentamiento del instrumento.

II.- Pulsor-receptor. El impulso de energía ultrasónica transmitida a la pieza, se ajusta mediante los controles (2) longitud de impulso (pulse length) y sintonización del impulso.

Para la prueba del transductor simple, los circuitos de transmisión y recepción, se conectan a un enchufe (T/R) para el mismo transductor y para la prueba de transductor doble, denominada de lanzamiento y recepción, se utiliza un enchufe (T) que sirve para conectar un transductor utilizado como transmisor y en un enchufe (T/R) utilizado para conectar el transductor de recepción. Existe un switch de prueba (3) para uno y otro tipo de prueba, que controla

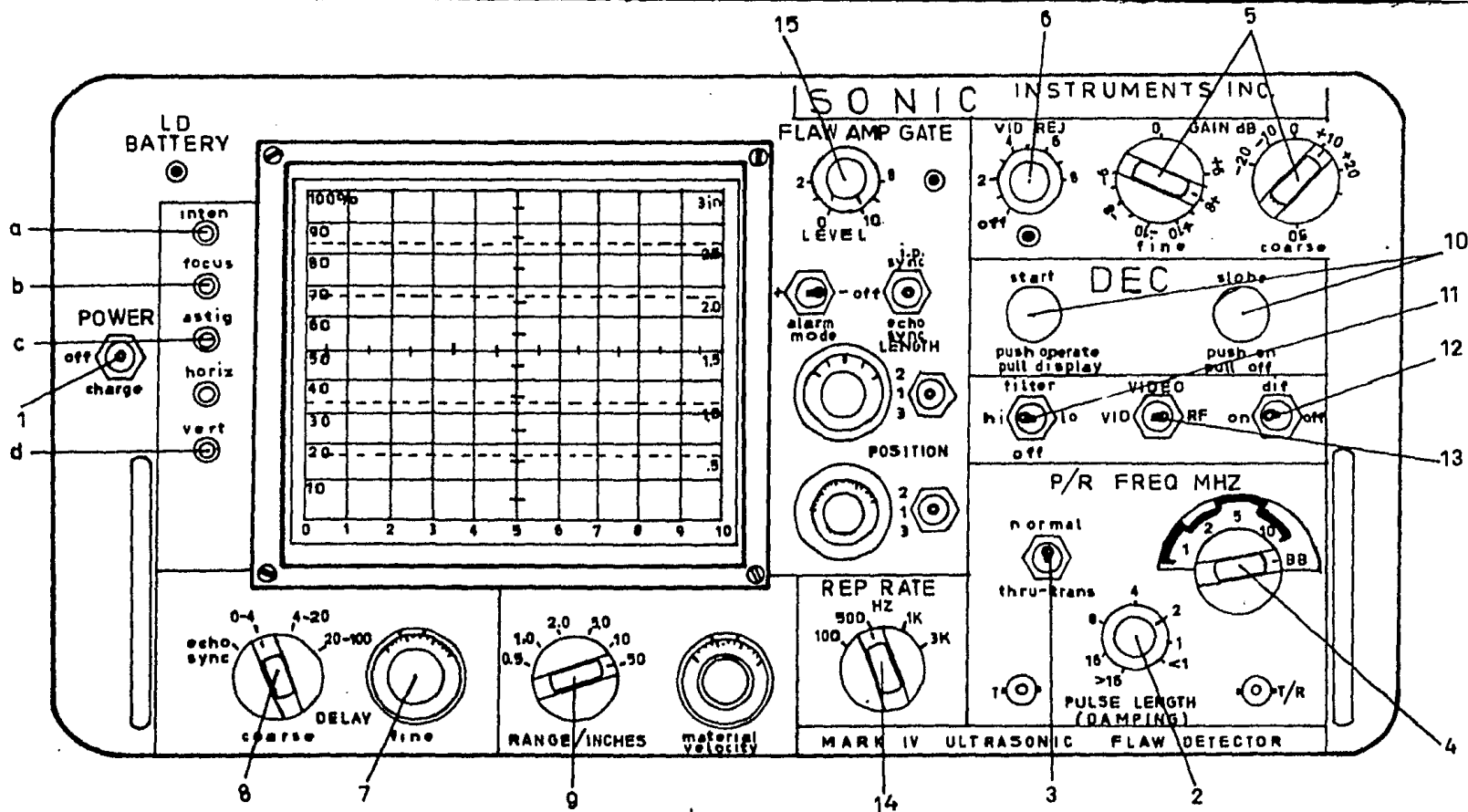


FIG. 5 1 Controles externos del equipo.

los enchufes T y T/R.

Existe también un selector para las frecuencias de operaciones (4) el cual, generalmente se rotula (frequency), frecuencia y que señala las frecuencias de que se dispone en megaciclos.

Los controles de ganancia (gain) (5), consisten de selectores de sensibilidad fina y gruesa, o de un control marcado (sensitivity) sensibilidad.

A fin de obtener una presentación clara, libre de "ruido" de bajo nivel, existe un control rotulado (Reject) ó (VIA REJ) de rechazo (6).

III.- Presentación. Generador de tiempo.

Después de efectuados los ajustes iniciales, raramente es necesario ajustar éstos controles.

Los controles de la presentación y sus funciones son:

- (a) Intensidad (inten). Varía la brillantez de la señal.
- (b) Enfoque (focus). Ajusta el enfoque de la traza en la pantalla del osciloscopio.
- (c) Astigmatismo (Astig). Corrige la distorsión ó astigmatismo causado por el cambio de tiempo de transmisión del haz electrónico a través de la pantalla del osciloscopio.
- (d) Vertical (Vert). Controla la posición vertical de la presentación, sobre la pantalla del osciloscopio.

Corriente e iluminación de la escala, este es un control de doble función. Da corriente al aparato y permite ajustar la iluminación a las reticulaciones de la pantalla, mediante una rotulación hacia la derecha. Los controles del generador de tiempo generalmente consisten del retardo de barrido (sweep delay) y el barrido (sweep) que permiten el ajuste fino (7) y grueso (8) de la velocidad con que son generados los impulsos. El control de retardo (delay), se usa también para colocar el impulso inicial en el lado izquierdo de la pantalla de presentación y, los múltiples de los reflejos a la derecha de la pantalla.

IV. Otros controles que no siempre existen, puesto que son considerados de refinamiento son:

- (9) Controles de selección del rango en el barrido horizontal desde 5/15 a 250 Pulg. en acero.
- (10) (JEC) Switches de control de operación dual (empujar-jalar) inclinación y exposición de la estructura en el circuito de corrección eco-distancia.
- (11) Switch, filtro (filter), provee dos grados de filtración y resolución de la exposición vertical del tubo de rayos catódicos.
- (12) Switch diferencial (dif). Agudiza el video para mejorar la lectura de espesores.
- (13) Switch de frecuencia regulada o video (RF-Video)



procesa la exposición del video o amplifica la señal RF, en el tubo de rayos catódicos.

(14) Switch de velocidad de repetición (REP Rate), es fácilmente ajustable desde 100 Hz a 3 KHz.

(15) Sistema de alarma controlada. Las unidades de alarma controlada, permiten utilizar alarmas automáticas al descubrirse las discontinuidades. Esto se logra estableciendo áreas específicas controladas dentro de la muestra. Las señales que aparecen dentro de éstas áreas, pueden ser seguidas automáticamente para operar alarmas visibles o audibles.

Esta clase de alarmas generalmente tiene 3 controles.

a). Arranque o retardo. Este control se utiliza para ajustar la posición del borde delantero de la compuerta en la pantalla del osciloscopio.

b). Longitud o anchura. El control de longitud o anchura de la compuerta, se emplea para ajustar la longitud de la compuerta o la posición del borde trasero de la misma.

c). Nivel de alarma o sensibilidad. Este control se emplea para el ajuste del umbral de la compuerta vertical, para encender las luces de señal, o para activar un relevador de alarma.

V. Osciloscopio. Esta parte fundamental del equipo, el osciloscopio indica manifestaciones ultrasónicas en un tubo de rayos catódicos, en forma similar a las imágenes

del tubo de rayos catódicos de un televisor.

Este tubo electrónico se diseña en varios tamaños y formas, están hechos especialmente de vidrio soplado, construido por una pantalla forrada de un compuesto de fósforo, el compuesto de fósforo varía en composición para producir luz y brillo, cuando es bombardeado por electrones a alta velocidad, dirigidos a la pantalla por el cañón de electrones en la base del tubo.

La pantalla del osciloscopio contiene una escala de graduación para una mejor interpretación y calibración de los resultados obtenidos en una inspección de ultrasonido.

c). Equipo complementario.

Como complemento del equipo, sólo para el método de inmersión es necesario el uso de un tanque de inmersión, que pueda ser de forma y tamaño apropiado, para contener la pieza bajo prueba.

Es importante el uso de un puente manipulador y controles, que están destinados a explorar la pieza sometida a prueba mediante un transductor sumergido. El manipulador está montado sobre un mecanismo de movimiento transversal, que permite el movimiento lateral del manipulador de un lado a otro, (fig.5-2).

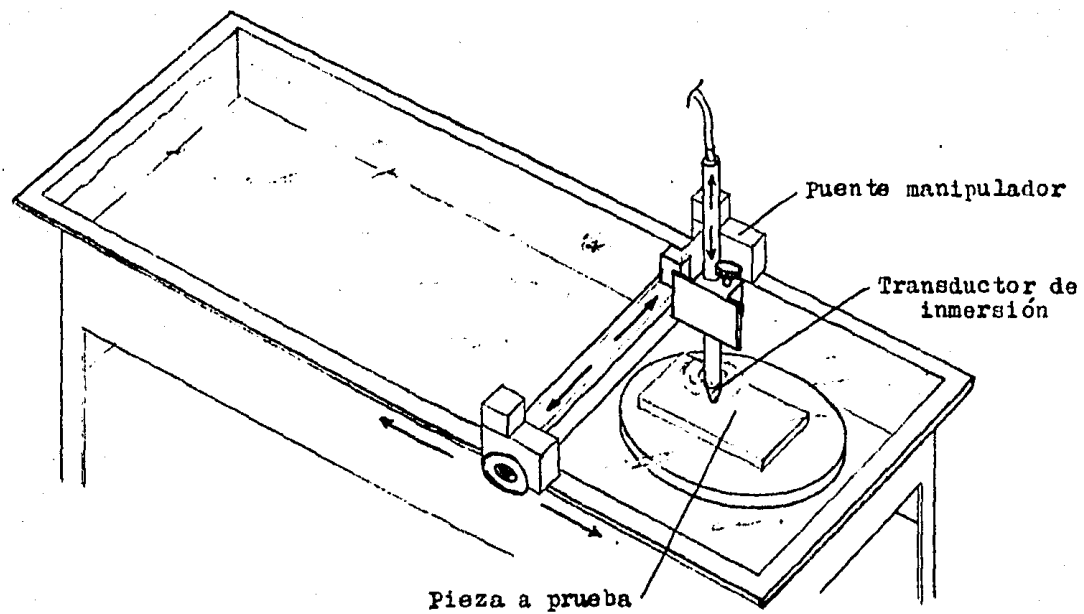


Fig. 5-2 Tanque de inmersión

## C A P I T U L O   V I

### MÉTODOS DE INSPECCION ULTRASONICA.

Las técnicas de inspección con ultrasonido se realizan con uno de los tres métodos básicos que son:

- 1.- Prueba de contacto.
- 2.- Prueba de inmersión.
- 3.- Prueba de resonancia.

En la prueba de contacto, el transductor es usado en contacto directo con la pieza a inspeccionar, con únicamente una pequeña película de líquido de acople. Sobre algunas unidades de contacto, se montan sobre la cara del transductor cuñas de plástico, placas de desgaste ó membranas de desgaste.

En la prueba de inmersión, se usan transductores impermeables a determinada distancia de la pieza a inspeccionar y transmitiendo ultrasonido al material a través de una columna de agua.

En la prueba de resonancia, el transductor también es usado en contacto directo con la pieza a inspeccionar, con una pequeña película de líquido de acople, pero con la diferencia de que el transductor está diseñado con dos cristales piezoeléctricos, donde uno es emisor y el otro receptor.

## 1.- Método de contacto.

El método de contacto, está dividido en tres técnicas, las cuales son determinadas por el método de la onda del haz de sonido deseado.

- a) La técnica de haz recto. Para transmitir ondas longitudinales en la pieza de prueba.
- b) La técnica de haz en ángulo. Para transmitir ondas de corte (transversales) en la pieza de prueba.
- c) La técnica de ondas de superficie, Para producir ondas superficiales, Rayleigh o Lamb.

Los transductores usados en estas técnicas, son mantenidos en contacto directo con la pieza de prueba, usando una película de líquido de acople. El acoplante seleccionado debe ser alto en viscosidad para que permanezca sobre la superficie de prueba durante la realización de la inspección.

### a) La técnica de haz recto.

La técnica de haz recto es realizada por la proyección del haz de sonido hacia la pieza de prueba (perpendicular a la superficie de prueba) para obtener reflexiones de pulsoeco, desde la superficie posterior o desde las discontinuidades intermedias. Esta técnica también es usada para pruebas de transmisión a través del material, usando dos transductores, donde las discontinuidades internas interrumpen el haz de sonido, causando una reducción en la recepción de la señal.

a.1.) técnica pulso-eco. Las reflexiones del eco son producidas con transductores de haz recto simple o doble.

Con el transductor simple, el transductor actúa como transmisor y receptor, proyectando un haz de ondas longitudinales hacia la pieza y recibiendo ecos reflejados, desde la superficie posterior o desde, alguna discontinuidad en la trayectoria del haz. (Fig. 6-1).

El transductor de elemento doble es útil, cuando la superficie de prueba es áspera o cuando la forma de la pieza es irregular y la superficie posterior no es paralela con la superficie frontal. un transductor transmite y el otro recibe, (Fig. 6-2). En este caso, la unidad receptora está recibiendo los ecos, de la superficie posterior y de la discontinuidad, aún cuando la unidad transmisora no está directamente al otro lado de la reflectora.

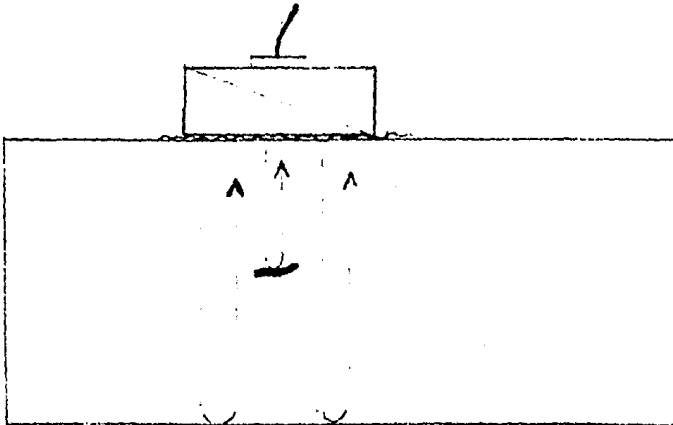


Fig. 6-1 Técnica pulso-eco, transductor simple.

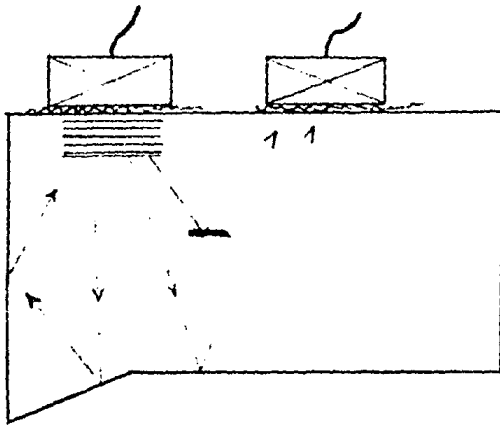


Fig. 6-2 técnica pulso-eco, transductor doble.

a.2.) Técnica de transmisión a través, se usan dos transductores en esta técnica, uno en cada lado de la pieza de prueba, (Fig. 6-3). Una unidad actúa como transmisora y otra como receptora. La unidad transmisora proyecta un haz de sonido hacia el material; el haz viaja a través del material a la superficie opuesta, y el sonido es recogido en la superficie opuesta por la unidad receptora. Alguna discontinuidad en la trayectoria del haz de sonido causa una reducción en la cantidad de energía sónica alcanzada por la unidad receptora.

Para mejores resultados en esta técnica, la unidad transmisora escogida, es la mejor generadora de energía acústica, y la unidad receptora escogida, es la mejor receptora de energía acústica.

Por ejemplo, el transductor de titanato de bario se usa como transmisor con uno de sulfato de litio como receptor.



fig. 6-3 técnica de transmisión a través.

b) Técnica de haz en ángulo.

La técnica de haz en ángulo es usada, para transmitir ondas de sonido hacia el material de prueba, a un determinado ángulo de la superficie de prueba. Según el ángulo seleccionado, el modo de onda producido en el material de prueba puede ser longitudinal y de corte ó solamente de corte, o modos de onda de superficie. Generalmente se usan transductores de ondas de corte en la prueba de haz en ángulo.

La fig. 6-4, nos muestra un transductor de haz en ángulo explorando material de placa y tubo.

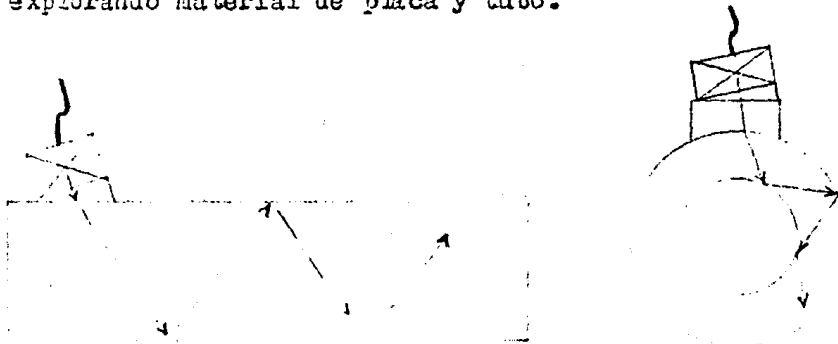


fig. 6-4 transductor de haz en ángulo.



Para evitar confusión de efectos, en la zona muerta y en la zona cercana encontrados en transductores de haz recto, se experimentó con zapatas de materiales con una impedancia acústica baja. Colocando un transductor de haz recto en una zapata con un determinado ángulo de inclinación, se descubrió que podría generar ondas de corte, al pasar el haz de un medio sólido a otro, dependiendo de las propiedades de los dos medios. Por tal motivo, se empezaron a diseñar y a usar transductores longitudinales con zapatas especiales de lucita, por su baja impedancia acústica, y por otras características que favorecen al diseño de las zapatas.

En esta técnica, el haz entra por la superficie de prueba con un ángulo agudo de incidencia y se propaga por reflexiones sucesivas en zig-zag, desde la superficie de la pieza hasta que es interrumpido por una discontinuidad o frontera, donde el haz invierte su dirección y es reflejado al transductor.

La técnica de haz en ángulo, se usa para pruebas de soldadura, tuberías, materiales en lámina y placa, y para piezas de forma irregular, donde el transductor de haz recto es imposible que haga contacto con toda la superficie. Los transductores de haz en ángulo se identifican por la nomenclatura impresa en la caja o zapata, en la que muestra la dirección del haz de sonido por una flecha e indicando el ángulo de refracción en acero para ondas de corte.

c) Técnicas de ondas de superficie.

En la técnica de ondas de superficie, se requiere el uso de transductores y zapatas especiales de haz en ángulo que proyecten el haz de sonido a un ángulo que va a ser igual al segundo ángulo crítico\*, (figura 6.5).

Las ondas cizallantes se desplazan por la superficie, dando lugar a una tercera forma ondular conocida como ondas Rayleigh o superficiales.

Esta técnica se usa para detectar discontinuidades en la superficie o justo debajo de ella en la pieza, si existen grietas o discontinuidades serán reflejadas por señales, en la pantalla del osciloscopio. Estas ondas son reflejadas por aristas agudas; sin embargo, si las aristas de un cuerpo se redondean es posible conseguir que se propaguen a lo largo del perímetro.

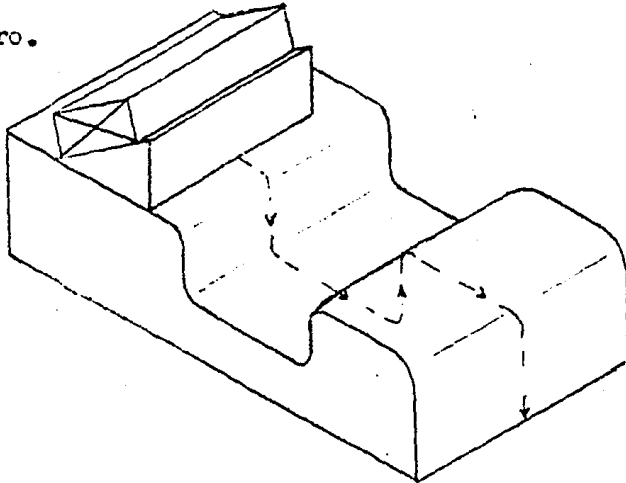


fig. 6.5 técnica de ondas de superficie.

\* (ver capítulo II.)

Las ondas Rayleigh son absorbidas totalmente, colocando un dedo sobre la trayectoria del haz en la superficie o por la presencia de agua, grasa o suciedad.

En base a las ondas superficiales de Lamb, se desarrolla una teoría, la teoría de las ondas Lamb. Estas se producen cuando un objeto, cuyo espesor es comparable a la magnitud de una longitud de onda, es atravesado por ondas ultrasónicas. Pueden ser generadas en láminas muy delgadas de metal, usando ondas longitudinales de determinada velocidad y frecuencia y con un cierto ángulo de incidencia.

Hay dos clases de ondas Lamb, simétricas y asimétricas. Cada una se propaga con una velocidad que depende del espesor de la lámina y de la frecuencia.

La habilidad de las ondas Lamb, de fluir a través de láminas delgadas, las hace aplicables para una gran variedad de problemas que requiere la detección de discontinuidades por debajo de la superficie.

## 2.- Método de inmersión.

En el método de la prueba de inmersión existen tres técnicas básicas;

- a. técnica de inmersión. Cuando el transductor y la pieza a inspeccionar están sumergidas en agua.
- b. técnica de chorro o burbuja. Cuando el haz de sonido se transmite a través de una columna de agua, que está fluyendo.

c. Técnica del transductor de rueda. Donde el transductor es montado en el eje de una llanta llena de líquido, que rueda sobre la superficie de prueba.

En estas tres técnicas, se requiere el uso de transductores de enfoque que concentran el haz de sonido.

a) Técnica de inmersión.

En esta técnica, el haz de sonido es dirigido a través de agua, hacia el material de prueba, usando una técnica de haz recto para generar ondas longitudinales o una de las muchas técnicas de haz en ángulo para la generación de ondas de corte, (Fig. 6-6).

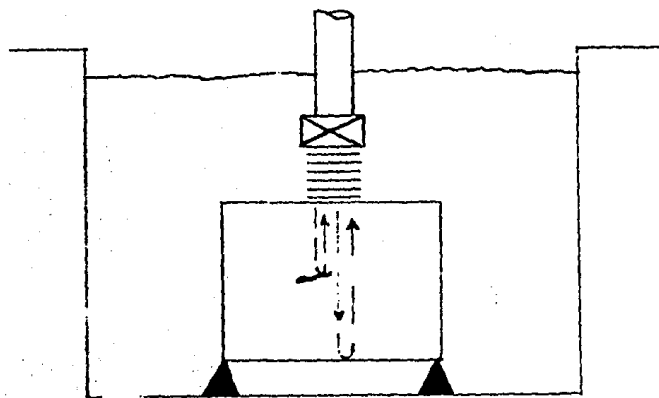


Fig. 6-6 Técnica de inmersión.

En muchas operaciones automáticas de barrido, son usados haces enfocados para detectar discontinuidades en la superficie

cercana o para definir pequeñas discontinuidades con la concentración del haz de sonido.

Los transductores usados en esta prueba, son unidades de haz recto, que lleva a cabo los dos tipos de pruebas, de haz recto y haz angular, a través de la manipulación y control de la dirección del haz de sonido.

La distancia de la trayectoria del agua, debe ser considerada en la prueba de inmersión, esta es la distancia entre la cara de el transductor y la superficie de prueba, la distancia es generalmente ajustada a la distancia requerida para mandar el haz de sonido a través del agua, siendo grande la distancia requerida para que el sonido viaje a través de la pieza de prueba. Cuando propiamente termina, la segunda reflexión de la superficie no aparecerá en la pantalla del osciloscopio, entre el primer frente y la primer reflexión de la superficie posterior.

En agua, la velocidad del sonido es casi  $1/4$  que la velocidad en aluminio o acero; por lo tanto, una pulgada de trayectoria de agua aparecerá en la pantalla del osciloscopio como igual a 4 pulgadas de trayectoria de metal en acero. Una regla del dedo pulgar determinando la distancia de agua, es  $1/4$  parte del espesor, por medida  $1/4$  de pulgada.

#### b) Técnica de chorro o burbuja.

Esta técnica es esencialmente una variación del método de inmersión, donde el haz de sonido es proyectado a través de una columna de agua hacia la pieza de prueba.

Esta técnica generalmente, se usa con un sistema automático para altas velocidades en exploración de placas, láminas, tiras, formas cilíndricas y otras partes de formas regulares.

El haz de sonido es proyectado hacia el material, a través de una columna de agua fluyendo, y estando en dirección normal (perpendicular) a la superficie de prueba para ondas longitudinales, o es ajustado a un ángulo de la superficie para producir ondas de corte, (fig. 6-7).

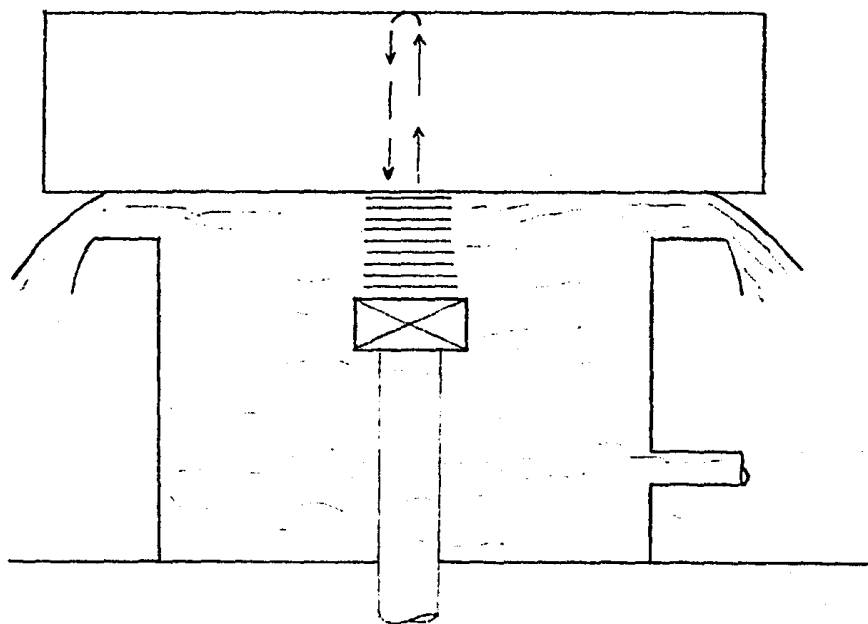


Fig. 6-7 Técnica de chorro o burbuja.

c) Técnica del transductor de rueda.

Esta técnica es un aspecto del método de inmersión en el que el haz de sonido, es proyectado a través de una llanta llena de agua hacia la pieza a prueba. El transductor montado en el eje de la rueda, es mantenida en una posición fija, mientras que la rueda y la llanta rotan libremente, (Fig. 6-8). La rueda puede estar montada sobre un aparato móvil, que corre a través del material, o puede estar montado sobre una instalación estacionaria, donde el material es movido.

La posición y ángulo del transductor montado en el eje de la llanta, puede estar construido para proyectar haces rectos, como lo muestra la figura 6-8, o para proyectar haces en ángulo como lo muestra la figura 6-9.

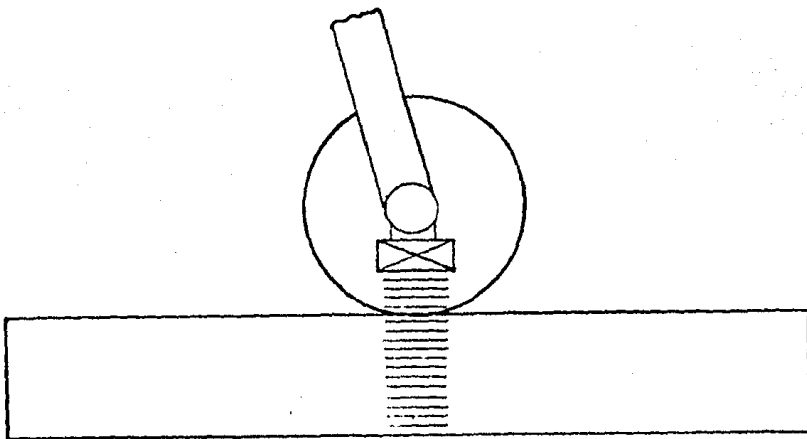
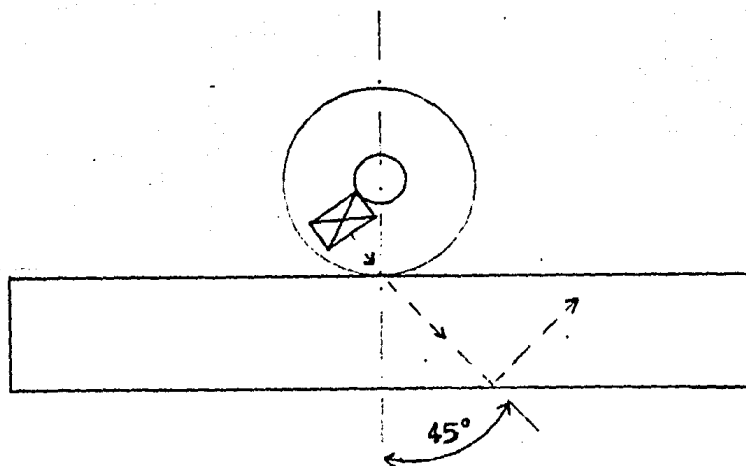
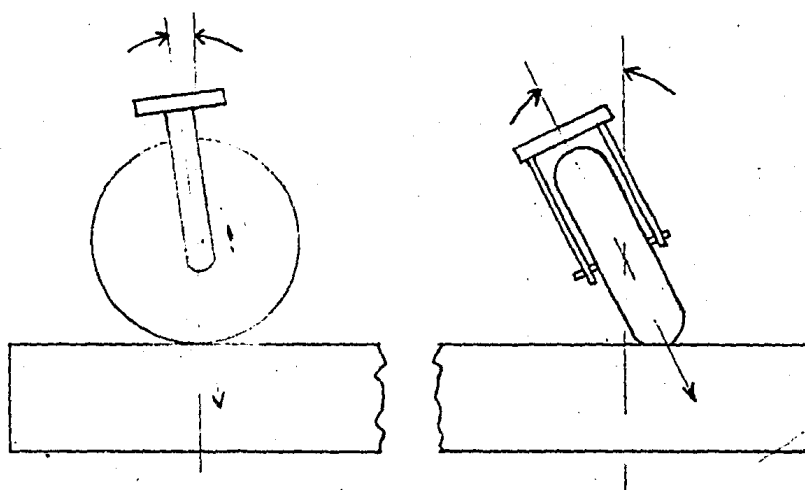


Fig. 6-8. Técnica del transductor de rueda.



a). Propagación de sonido hacia el material a  $45^\circ$ .



b). El ángulo de propagación puede ser variado por el ajuste de la posición, del yugo montado en la llanta

Fig. 6.9 haz en ángulo en la técnica del transductor de rueda.



### 3) Prueba de resonancia.

La técnica de resonancia se usa principalmente para la medición de espesores de materiales con dos lados planos (lisos) y paralelos, pero también es usado para detectar discontinuidades en algún plano de la superficie de prueba.

Como cada espesor de un material dado, tiene una característica resonante o frecuencia resonante, cuando esta frecuencia (o sus múltiplos) son aplicados, como un haz continuo de energía sónica a la pieza de prueba, las ondas rectas causan una sobre-tensión en el aumento en la amplitud de las indicaciones recibidas.

Cuando se chequea el espesor del material, un haz continuo de ondas longitudinales son transmitidas hacia la pieza de prueba; la longitud de onda es variada a causa del transductor que vibra sobre un rango de frecuencia, ocurre la resonancia y las ondas rectas son introducidas al material. Un patrón de ondas rectas, son mostradas en la figura 5.10 para varias frecuencias.

Como vemos en la figura 5.10, cuando la frecuencia es incrementada, la longitud de onda decrece.

Puesto que la longitud de onda y la frecuencia están re-

lacionales, para el espesor del material, la frecuencia resonante es determinada por la ecuación:

$$F = \frac{V}{2t}$$

Donde:

F = Frecuencia de resonancia.

V = Velocidad de ondas longitudinales en materiales dados.

t = espesor del material.

Con instrumentos, haciendo uso de una pantalla (CRT) osciloscópica, la frecuencia fundamental y sus armónicas aparecen en la pantalla como puntos. La frecuencia resonante es siempre la diferencia entre cualquiera de las dos armónicas adyacentes o puntos. En más instrumentos, la medición actual de espesores es una lectura directa desde, una escala sobre la pantalla CRT, un metro, o una escala sobre una señal en la pantalla estroboscópica. Actualmente existen instrumentos que nos dan una lectura digital, del espesor que se está checando, otros instrumentos requieren el uso de tablas o cartas para computar los espesores. El uso de estas cartas o tablas, determinan la diferencia de la frecuencia entre cualquiera de las dos armónicas adyacentes; la frecuencia es localizada sobre la carta o tabla, y el espesor correspondiente es leído. Se usa también una constante K, (tabla 6-1), para la conversión entre espesor-frecuencia, dividiendo la frecuencia entre la constante K para obtener el espesor del material en pulgadas.

El factor K de tablas, es determinado por la división de la velocidad de las ondas longitudinales de cada tipo de material, en millones de pulgadas, por segundo, por 2.

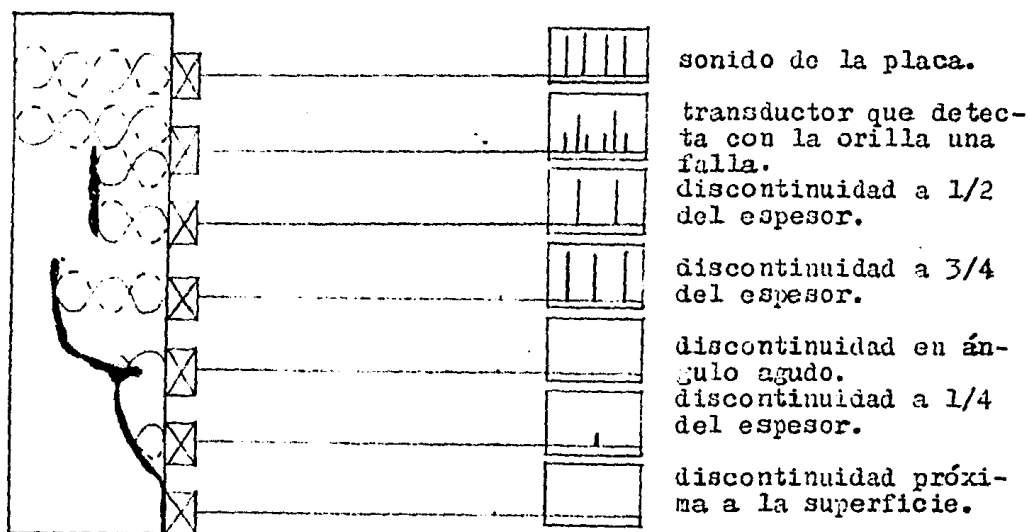


Fig. 6-10 Resonancia obtenida de una placa con varios tipos de discontinuidades.

T A B L A 6 - 1

Constanta K, para la prueba de resonancia.

Material	Constante K ( $1 \times 10^6$ pul/seg)	Material	Constante K ( $1 \times 10^6$ pul/seg)
Acero	0.115-0.118	Molibdeno	0.124
Acero fund.	0.110-0.116	Monel	0.106-0.108
Acero inox.	0.112-0.114	Niquel	0.113-0.115
Agua (dulce)	0.028 Aprox.	Cro	0.064
Aluminio	0.121-0.131	Petróleo	0.026 Aprox.
Al. Oxido de	0.188-0.193	Plástico	0.0525
Berilio	0.252	Plata	0.071
Bronce (P-5%)	0.0695	Plata-Tungsteno	0.075 Aprox.
Caucho	0.0205	Plomo	0.047-0.049
Cobre	0.092-0.093	Poliestileno	0.036
Corcho	0.010	Teflón	0.024-0.033
Cuarzo	0.114	Titanio	0.121-0.126
Estaino	0.065	Tungsteno	0.102
fenolia lam.	0.052	Uranio	0.066-0.070
Hielo	0.078	Vidrio placa	0.114
Hierro fund.	0.087-0.110	Vidrio Pyrex	0.111
Latón	0.086-0.092	Zinc	0.082
Magnesio	0.114-0.116	Zirconio	0.093-0.102

## C A P I T U L O   V I I

### C A L I B R A C I O N   D E L   E Q U I P O .

En la inspección ultrasónica, todas las discontinuidades son comparadas con discontinuidades contenidas en uno o varios blocks patrón o de referencia. La necesidad de utilizar estos patrones, surge al tener que normalizar los equipos de ultrasonido, y poder hacer posible la evaluación de las discontinuidades encontradas en la pieza que se esté inspeccionando. Además, estos blocks patrón nos permiten verificar, si la combinación instrumento-transductor, está operando adecuadamente, y establece también un nivel de sensibilidad o ganancia para el cual podemos detectar todas las discontinuidades iguales o mayores al tamaño que hemos especificado.

El proceso de evaluación de una discontinuidad, se lleva a cabo, comparando aquella discontinuidad que se encuentra en la pieza inspeccionada con otra, de dimensiones y profundidad determinada que se encuentra en un block patrón.

Los blocks patrón son fabricados con piezas cuidadosamente seleccionadas e inspeccionadas ultrasónicamente y por rayos X, de manera que cumplan con normas predeterminadas de atenuación de sonido, tamaño de grano y tratamiento térmico. En estos blocks, las discontinuidades se representan como agujeros cuidadosamente barrenados, y los blocks no presentan otra discon

tinuidad que no sea aquella hecha intencionalmente.

A) Tipos de blocks de calibración.

Existen una gran variedad de blocks patrón o de referencia, para la calibración del equipo, para cubrir todos los métodos existentes en la prueba ultrasónica.

Estos blocks son los siguientes:

--- Blocks patrón Area-Amplitud.

Los blocks Alcoa serie "A", comprenden de ocho blocks de sección cuadrada ó circular de  $3\text{-}3/4$  pulg. de longitud por  $1\text{-}15/16$  pulg. de lado ó diámetro.

En el centro de una de las caras se barrena un agujero de fondo plano, (Fig. 7-1).

Los diámetros de los agujeros, van desde  $1/64$  pulg. en el block No. 1, hasta  $8/64$  pulg. ( $1/8$ ), en el block No. 8 como lo muestra la figura 7-1, la numeración de los blocks está referida al diámetro del agujero, por ejemplo: El block patrón No. 3, tiene un diámetro el agujero de  $3/64$  pulg.

Estos blocks proveen de un medio, para verificar la linealidad de los métodos de ensayo, o sea, confirmar que la amplitud (altura) de la indicación en la pantalla del osciloscopio, aumente en proporción al aumento de tamaño de la discontinuidad.

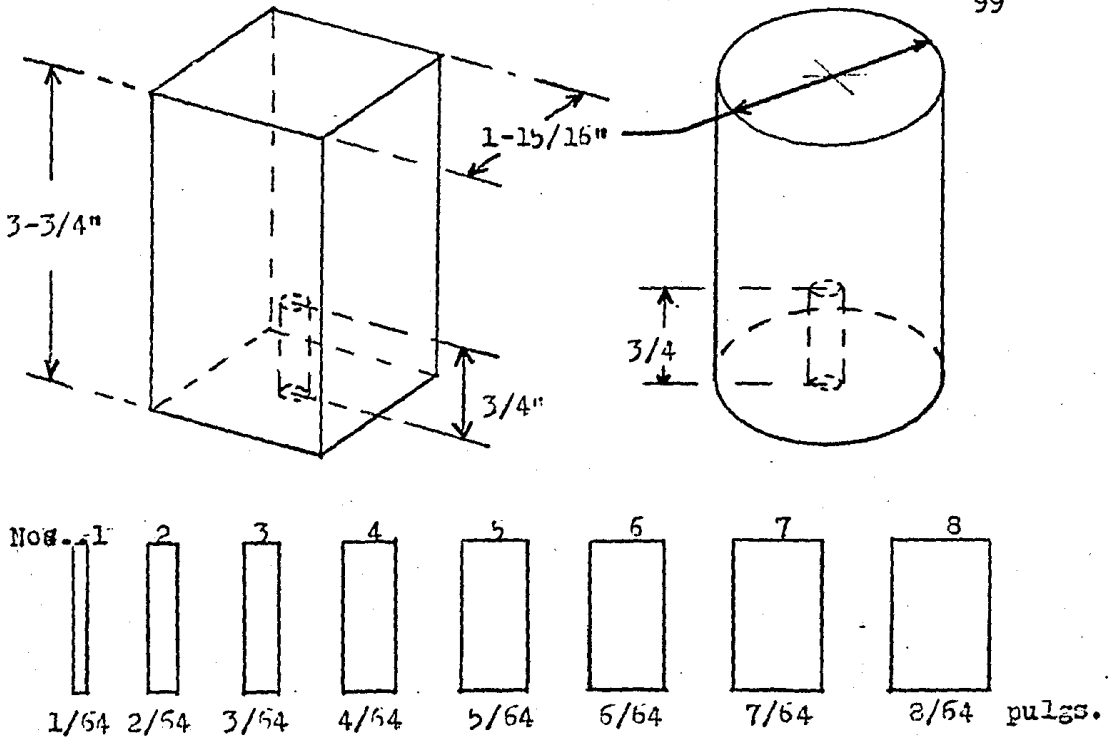


fig. 7-1. Blocks Alcoa serie "A"

--- blocks Patrón distancia-amplitud.

Los blocks Alcoa serie "B", consisten de 19 blocks de sección circular con un diámetro de 2 pulg., y con agujeros de fondo plano de  $3/4$  pulg. y del mismo diámetro todos, taladrados en el centro de una de las caras, (fig. 7-2).

Los blocks varían en longitud, para obtener distancias que van desde  $1/16$  pulg. hasta  $5-3/4$  pulg. de la superficie de ensayo al fondo plano del agujero, este juego contiene agujeros de  $3/64$ ,  $5/64$  y  $8/64$  ( $1/8$ ) pulg.

Los blocks distancia-amplitud nos sirven de referencia para evaluar el tamaño de la discontinuidad a diferentes profundida-

des en el material inspeccionado. También nos sirve como referencia para normalizar la ganancia o sensibilidad del sistema, de manera que se obtengan indicaciones leíbles en la pantalla del osciloscopio, para todas las discontinuidades de un tamaño dado ó mayores, pero no aparecerán en la pantalla indicaciones de discontinuidades de menor tamaño.

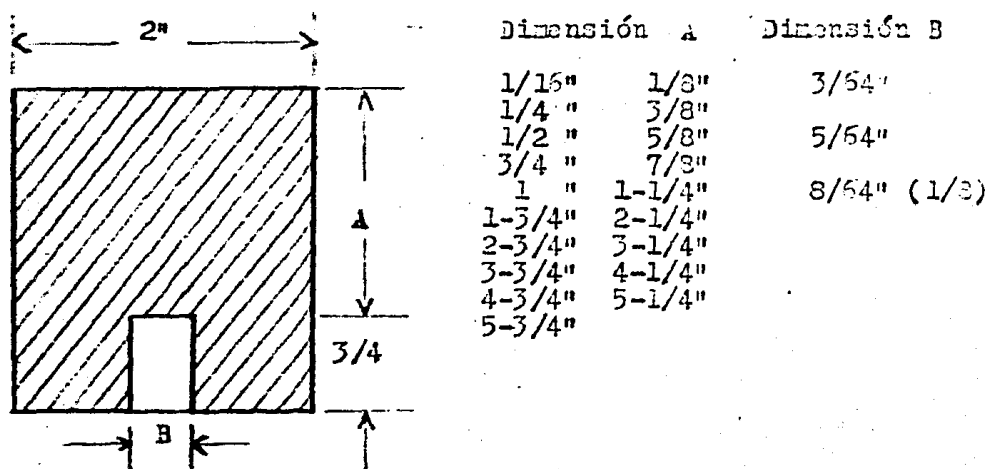


Fig. 7-2 Blocks Alcoa serie "B".

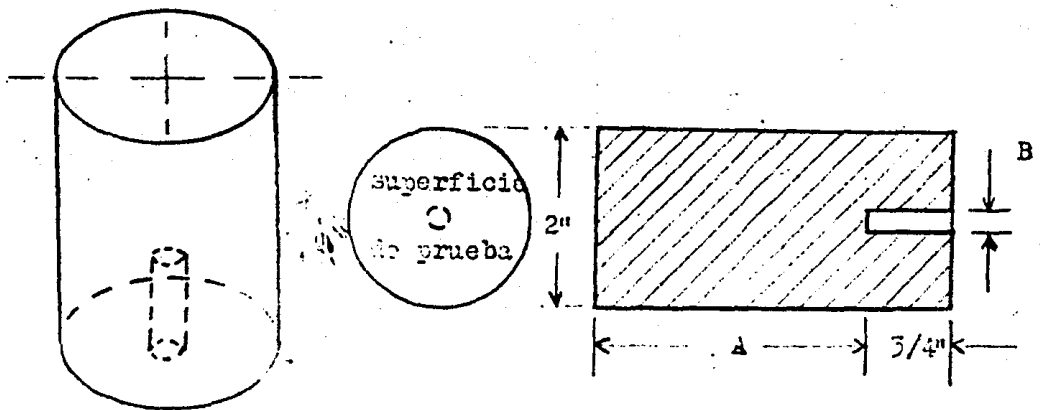
#### — Juego básico de Blocks patrón ASTM.

El juego básico de blocks patrón ASTM, consiste de 10 blocks de 2 pulg. con agujeros de 3/4 pulg. de profundidad, y de fondo plano en un extremo. Un block tiene un agujero de fondo plano de 3/4 pulg. de diámetro y una distancia a la superficie de 3 pulg. Los otros blocks tienen un agujero de fondo plano de 5/64 pulg., y distancias a la superficie de 1/8, 1/4, 1/2, 3/4, 1-1/2, 3 y 6 pulg. respectivamente, y los dos blocks restantes,



tienen un agujero de fondo plano de  $3/64$  ( $1/8$ ) pulg. y una distancia a la superficie de 3 y 6 pulg. respectivamente, (Fig. 7-3).

Este juego de blocks es una combinación de los juegos Alcoa series "A" y "B", ya que los blocks con distancias del agujero de fondo plano a la superficie de 3 pulg., o sea, los Nos. 3, 5, y 8 dan la relación área-amplitud, y los 7 blocks con agujero de fondo plano de  $3/64$  pulg. y longitud variable dan la relación distancia-amplitud.



Distancia A (pulg)	1/3	1/4	1/2	3/4	1-1/2	3	3	3	6	6
Distancia B (pulg) Diámetro del agujero de fondo plano. (x 1/64 pulg.)	5	5	5	5	5	3	5	8	5	8

Fig. 7-3. Blocks de referencia ASTM.

Es importante que el material del block patrón sea el mismo o similar al de la pieza inspeccionada. El contenido de aleaciones, tratamientos térmicos, grado de trabajo, en caliente o frío, etc..., afectan las propiedades acústicas del material. En el caso de que no se tengan blocks patrones del mismo material que el que se está inspeccionando, entonces, deberá utilizarse uno con atenuación del sonido, velocidad e impedancia acústica similar al material inspeccionado.

Además de estos juegos de blocks, existe una gran variedad de blocks patrón especiales, los cuales se describen a continuación:

--- tipo DC (tipo AWS).- (fig. 7-4) Se usa para la calibración de la distancia para ondas de corte. Contiene un radio de 1 pulg. sobrepuesto a un medio círculo con radio de 2 pulg. y a  $150^\circ$ .

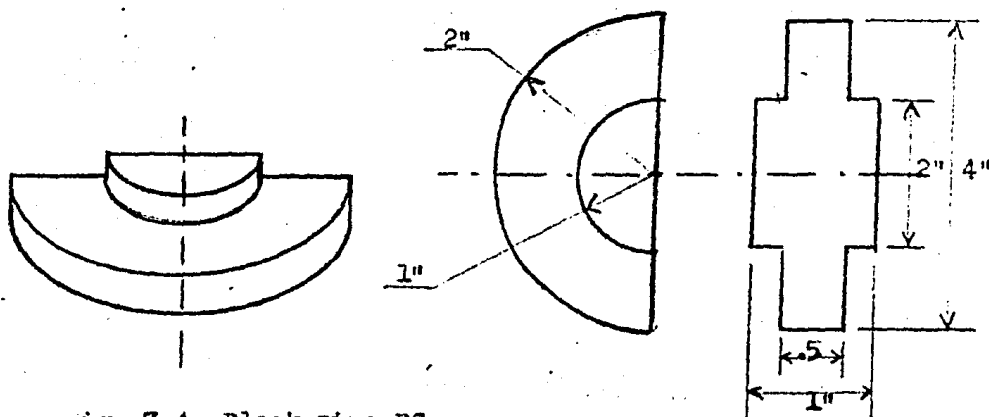


Fig. 7-4 Block tipo DC.

--- Tipo SC (tipo AWS).- (Fig. 7-5) se usa para la calibración de la sensibilidad, para ondas de corte. Este block contiene dos agujeros de fondo plano de 0.062 pulg. de diámetro. La distancia desde la superficie de enfrente a el centro del agujero es de 0.178 y 0.521 pulgs.

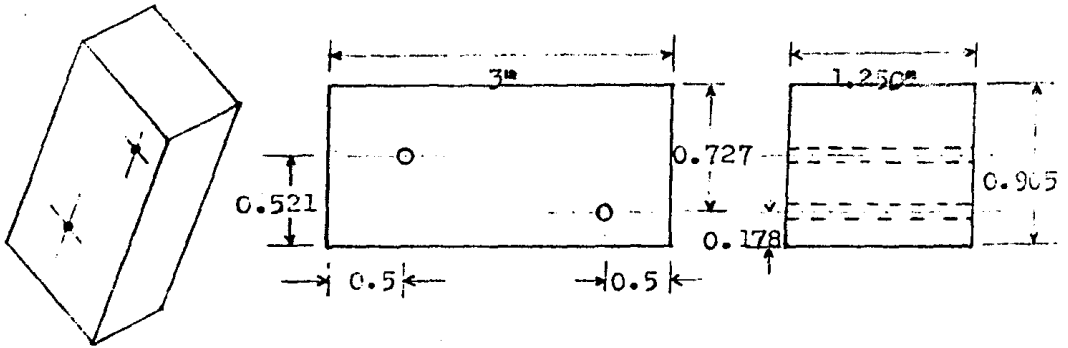


Fig. 7-5 Block tipo SC.

--- Block de resolución AWS.- Se usa para verificar la capacidad de resolución de transductores de haz en ángulo. Este block contiene tres juegos de tres agujeros de 0.062 pulg. de diámetro, que atraviesan el block, y nos sirven para ángulos de 45°, 60° y 70°.

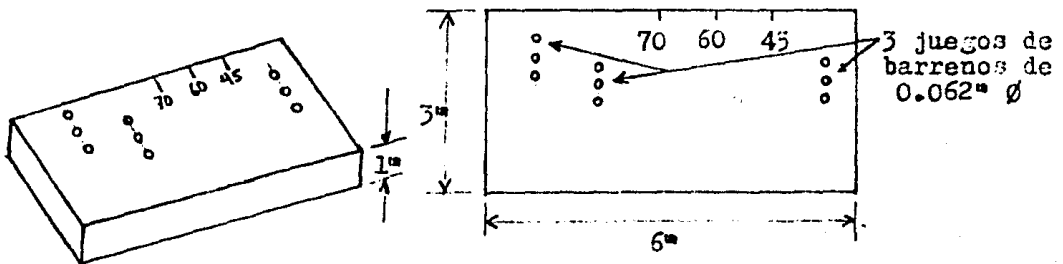


Fig. 7-6. Block de resolución AWS.

--- Block para ondas superficiales IOW.- (Fig. 7-7). Se usa para la medición de ondas superficiales en el uso de transductores de haz en ángulo, y para medición de transductores de ángulo.

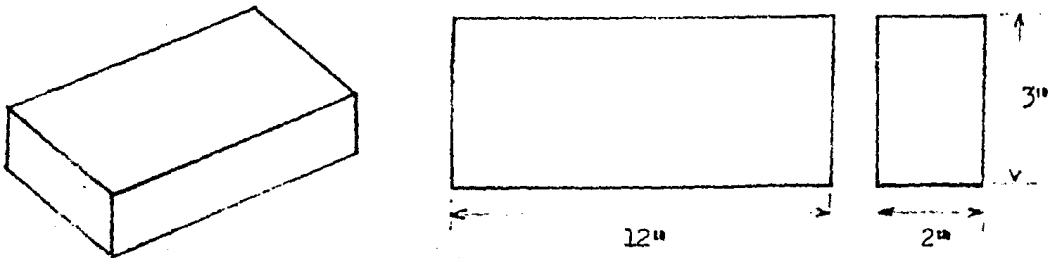


Fig. 7-7 Block para ondas superficiales IOW.

--- Block tipo DSC.- (tipo A/S). (Fig. 7-8). Se usa para la calibración de distancia y sensibilidad, para ondas de corte. Este block contiene un radio de 1 pulg., opuesto a un radio de 3 pulg. El radio de 3 pulg. incluye una ranura sobre el radio a una profundidad de 0.575 y 0.632 pulgs. de ancho. También contiene un punto de referencia  $0^\circ$ , para verificar el punto de salida sobre la zapata, y un agujero barrenado que atraviesa la pieza, con un diámetro de 0.125 pulg. y marcas que corresponden a  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $70^\circ$ , para medir el ángulo de refracción.

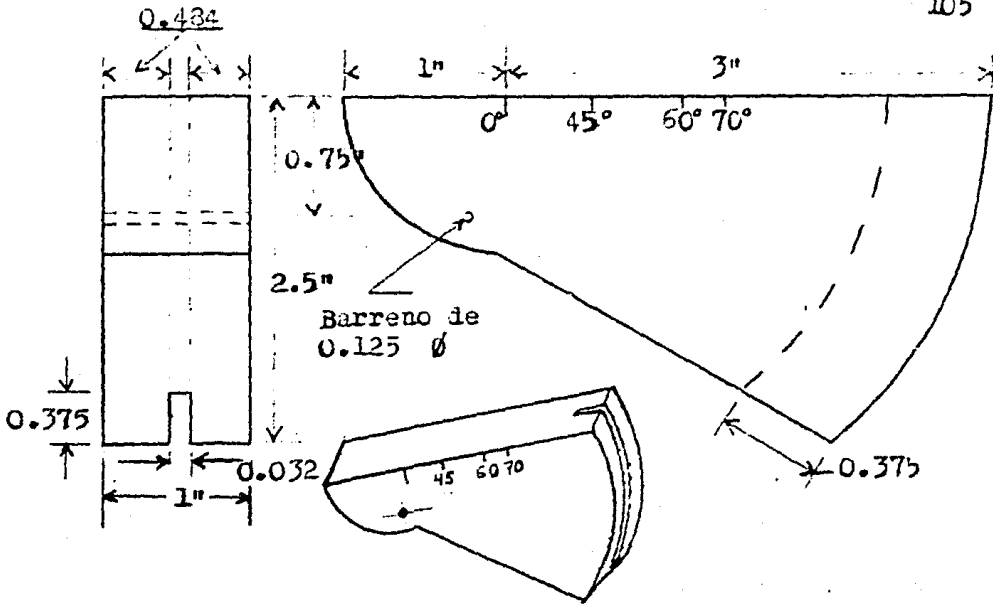


Fig. 7-8 Block tipo D3C.

-- Block de haz en ángulo.-- (tamaño miniatura) (Fig. 7-9),  
 Substituto del block D3C, para la calibración general del haz  
 en ángulo. Contiene un radio de 1 pulg. opuesto a un radio  
 de 2 pulg., y un agujero de fondo plano de 5/64 pulg. de diá-  
 metro y 0.750 pulg. de profundidad.

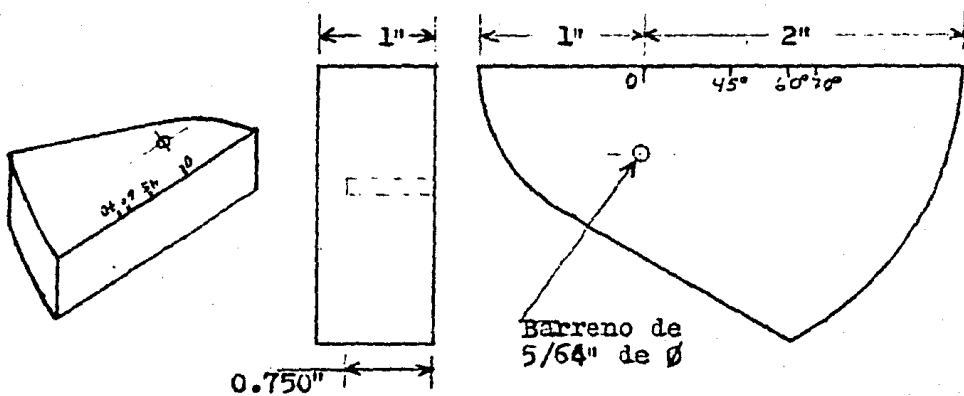


Fig. 7-9 Block de haz en ángulo.

--- Block de escalones.- (fig. 7-10) Se usa para la calibración de espesores y linealidad. Se diseña de 4 escalones, con espesores de 0.250, 0.500, 0.750 y 1.0 pulgs. ó de 5 escalones, con espesores de 0.100, 0.200, 0.300, 0.400 y 0.500 pulgs.

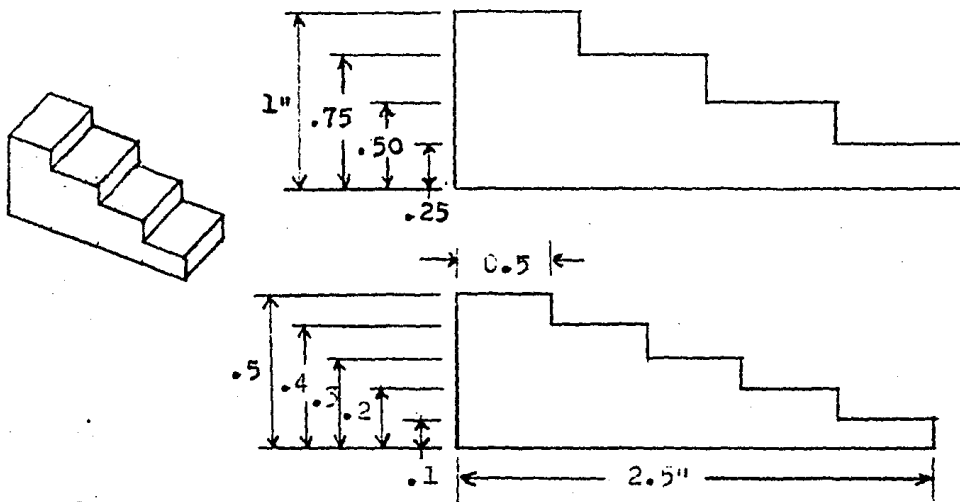


fig. 7-10 Block de escalones.

--- Block de prueba NAVSHIPS.- (fig. 7-11) Usado de acuerdo con especificaciones NAVSHIPS 0900-003-5010 Sección 6, para corrección de distancia-amplitud, niveles de sensibilidad e información sobre defectos a profundidad. Contiene seis agujero de fondo plano de 5/64 pulg. de diámetro a distancias desde 1/4 a 2-3/4 pulg.

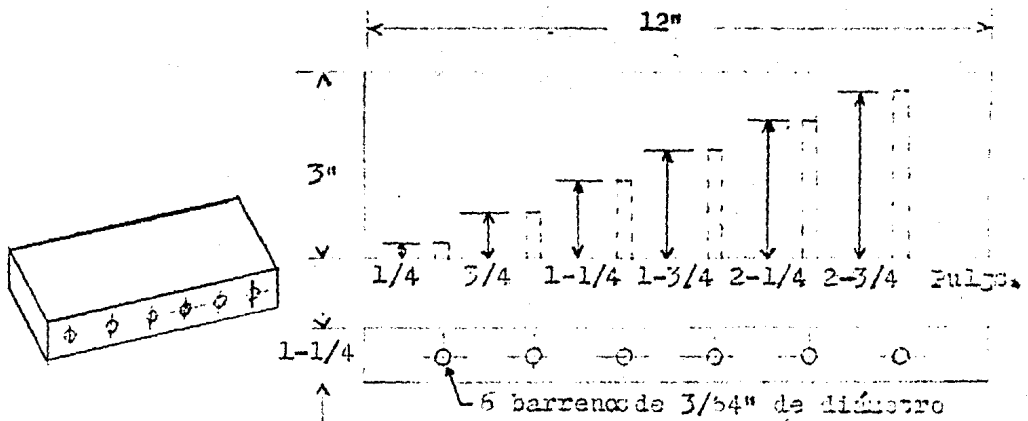


Fig. 7-11 Block de prueba NAVSHIP.

777 Block miniatura para resolución.- (Fig. 7-12) Se usa para chequear la capacidad de resolución y calibración a alta resolución en pruebas de equipo. Este block contiene cuatro ranuras de  $5/16$  pulg. de ancho y  $5/8$  pulg. de largo, para simular reflectores de placas planas en distancias de 0.015, 0.020, 0.025 y 0.030 pulg., y seis agujeros de fondo plano, tres de ellos con diámetros de  $3/64$  pulg. y los otros con  $1/64$  pulg. a distancias de 0.020, 0.025 y 0.030 pulg.,

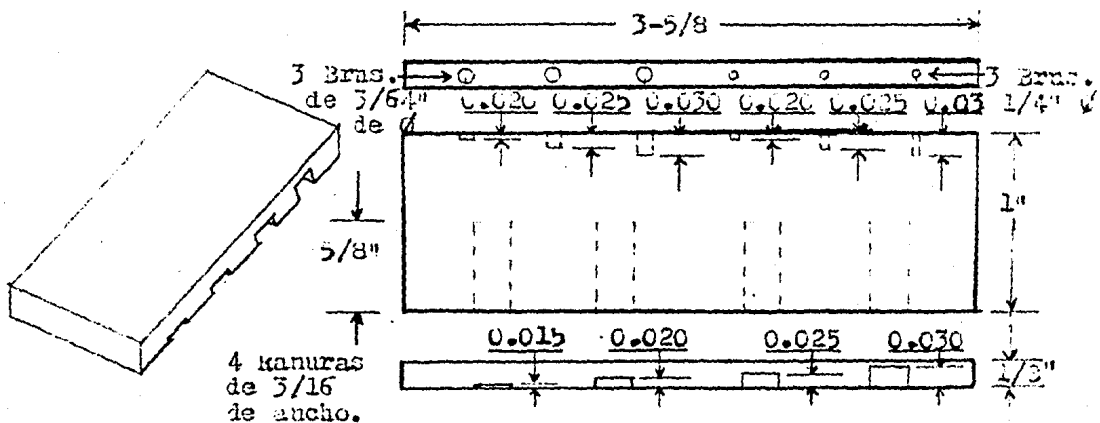


Fig. 7-12 block miniatura para resolución.

--- Placa de referencia ASME N-625.- (Fig. 7-13) Se usa para la calibración de la sensibilidad, para ondas longitudinales, de corte, y de superficie. Contiene seis agujeros de fondo plano: tres agujeros con diámetro de  $1/64$  pulg., y una profundidad cada una de 0.050, 0.250, y 0.500 pulg., y un agujero de  $1/16$  pulg. de diámetro, y profundidad de 1.500 pulg., otro de  $1/8$  pulg. de diámetro y 1.625 pulg. de profundidad y el último de  $1/4$  pulg. de diámetro y 1.750 pulg. de profundidad.

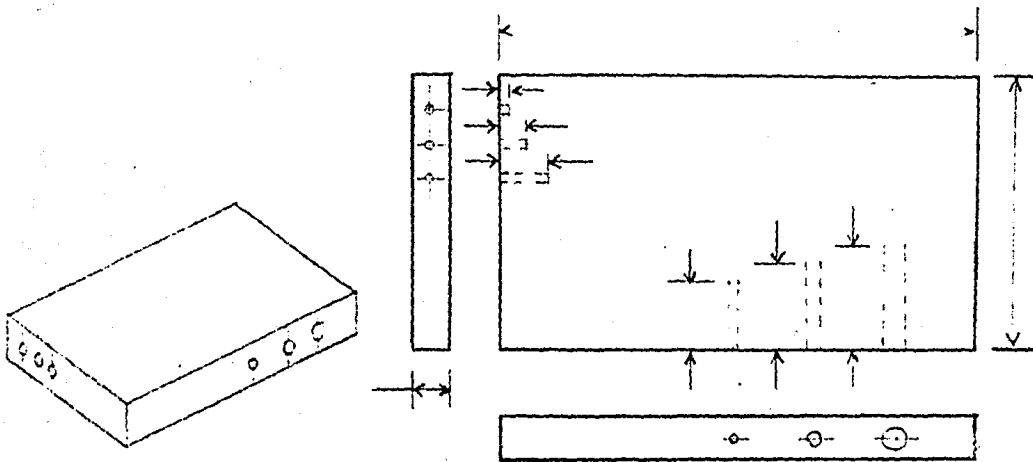


fig. 7-13 Placa de referencia ASME N-625.

--- block IIW tipo 1.- Se usa para la calibración de transductores longitudinales y angulares, y para la verificación del punto de salida del haz ultrasónico, en zapatas angulares y ángulo de refracción. También se puede usar, para checar resolución y sensibilidad, (Fig. 7-14).



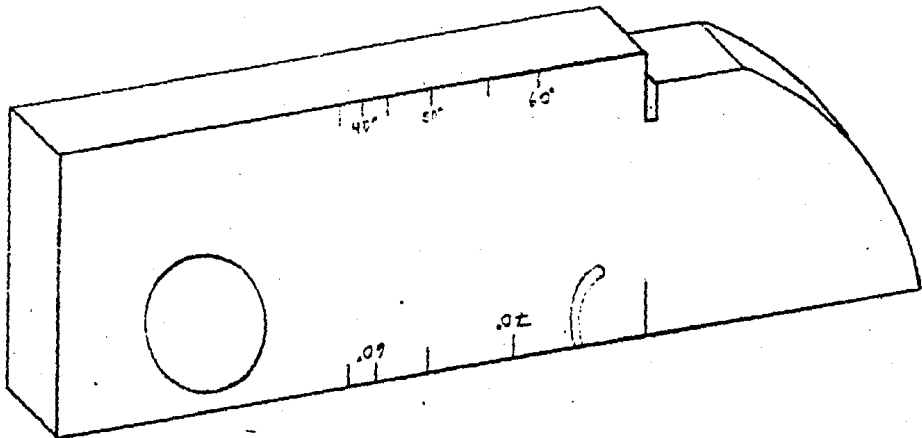
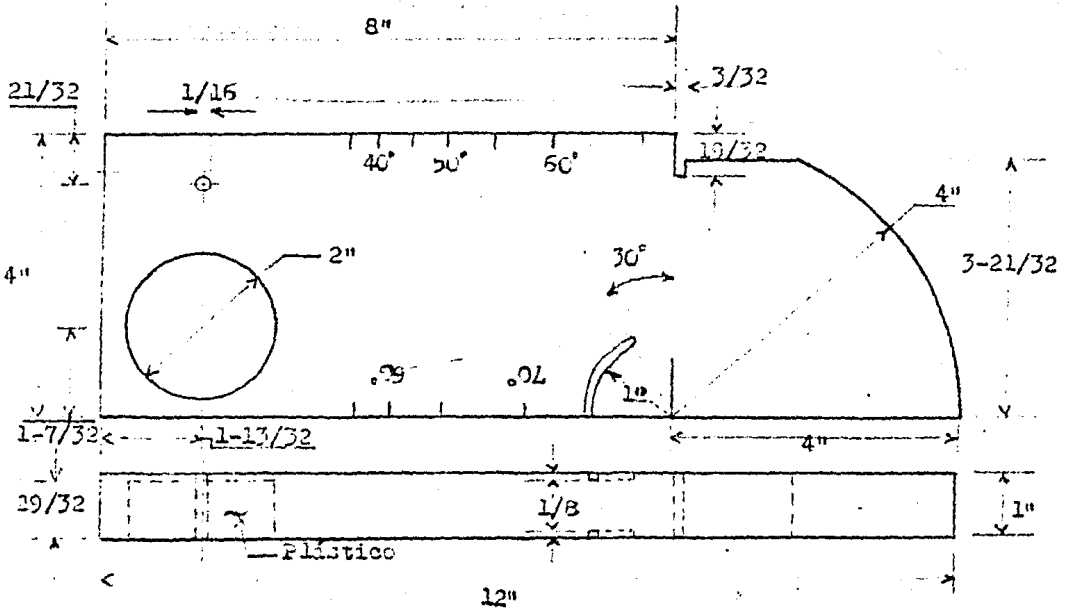


fig. 7-14 Block IIW tipo 1.

--- block IIW tipo 2. --- es una versión modificada del original IIW tipo 1. Incluye un radio de 2 pulg. a una profundidad de 0.250 pulg., la cara rectificada por fuera, y aumentada para estudios de resolución, (fig. 7-15)

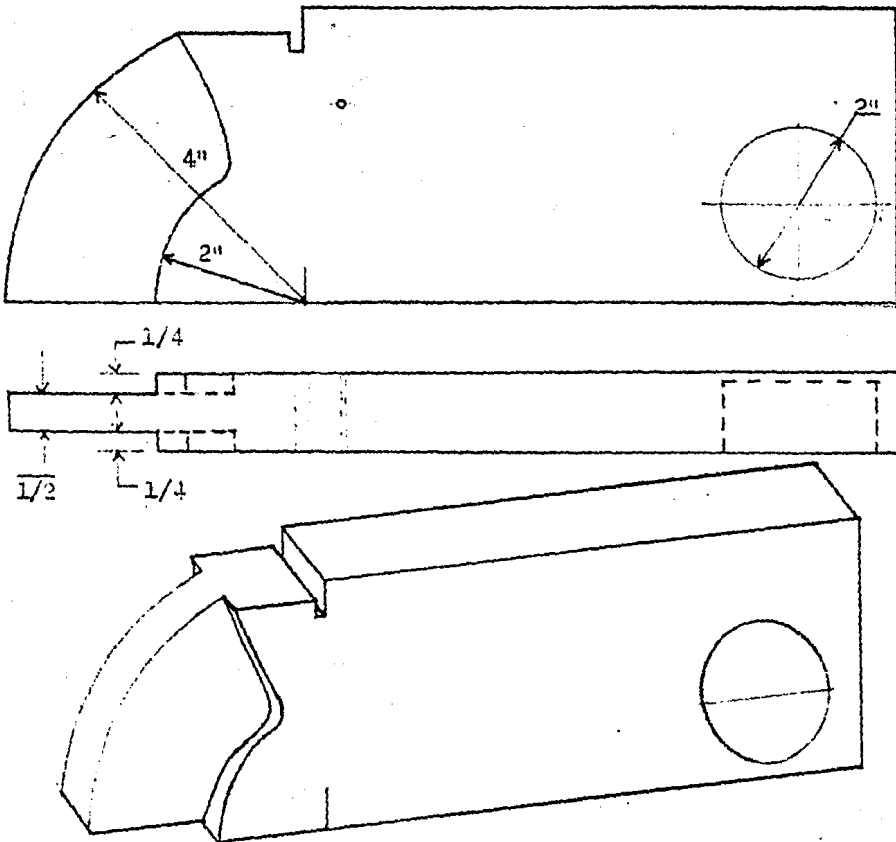


fig. 7-15 Block IIW tipo 2.

## B) PRECAUCIONES AL USAR LOS BLOCKS PATRÓN.

No existe una única solución, ni un block de referencia que sea apropiado para todas las inspecciones ultrasónicas. Por lo tanto, es muy importante, que aquellos que son responsables de establecer procedimientos y especificaciones de inspección ultrasónica, estén concientes de las ventajas y desventajas del método de calibración que han escogido.

A continuación se enumeran algunas precauciones a considerar cuando se utilizan blocks patrón.

1.- Usar el block de referencia apropiado. Toda inspección ultrasónica debe basarse en un block de referencia apropiado, si no los resultados no pueden ser confiables, y el procedimiento e interpretación serán erróneos.

2.- Hacer coincidir las características de atenuación-reflexión. Debido a las variables normales en las características de atenuación del material, no pueden fabricarse cantidades de blocks de referencia, con características de respuesta ultrasónica semejantes. Sin embargo, se pueden fabricar pequeñas cantidades de blocks, con características coincidentes. Por lo tanto, cuando dos o más equipos estén efectuando la misma inspección, todos deberán tener blocks, que tengan las mismas características de respuesta ultrasónica, o hay que compensar las variaciones.

3.- Ser cuidadoso al evaluar el tamaño de una discontinuidad. Aquellas especificaciones que exigen evaluaciones críticas del tamaño, y de la distancia, basadas en los métodos de los blocks de referencia, deberán tener una base en ensayos destructivos. Estos valores base deberán probar, que la combinación del tamaño del haz, frecuencia y atenuación son correctos para cada aplicación específica.

Una simple comparación de la amplitud de la señal de un defecto, a la amplitud de la señal del block de referencia, puede no ser suficiente.

4.- Hacer uso de los blocks patrones con frecuencia. El procedimiento de inspección, requiere una revisión periódica de la calibración del aparato con los blocks patrones, para asegurar una continuidad confiable en la inspección.

## CAPITULO VIII

### INTERPRETACION DE RESULTADOS.

Existen tres tipos de presentaciones visuales, que nos permiten determinar el estado o "calidad" de un material ensayado, estas son las presentaciones A, B y C.

La presentación A, es una presentación de tiempo contra amplitud, (fig. 8-1), la cual revela la existencia de discontinuidades, utilizando señales sobre la pantalla de rayos catódicos. A partir de la posición de la señal y de su amplitud, puede encontrarse la profundidad relativa de la discontinuidad en el material y estimar su tamaño.

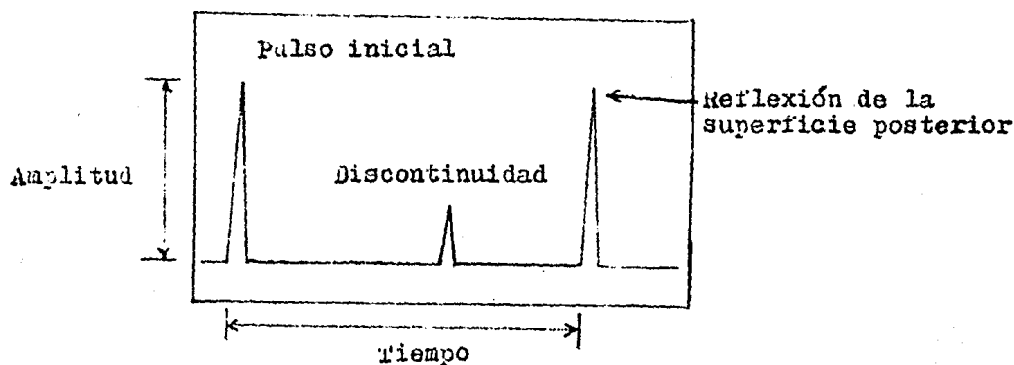


Fig. 8-1, Presentación A.

La presentación B, se utiliza más ampliamente en la medicina, y es muy poco utilizada en ensayos ultrasónicos. Sin embargo, al utilizar esta presentación se caracteriza principalmen

te, al dar una vista en sección del material ensayado, (fig,8-2).

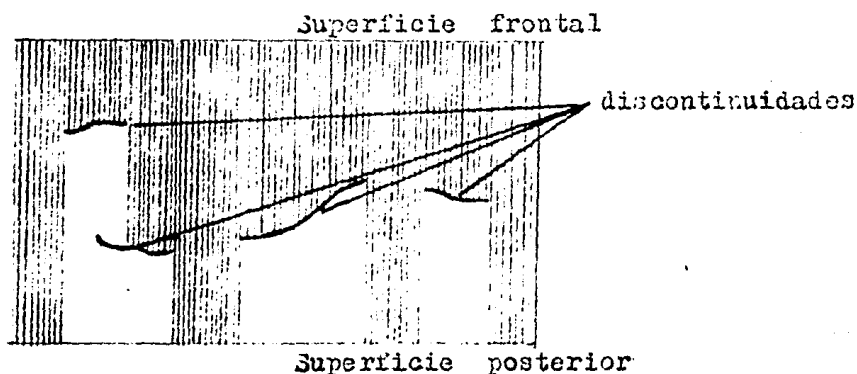


Figura 8-2 Presentación B.

Esta presentación nos muestra la reflexión de las superficies superior e inferior del material a prueba, y la discontinuidad. La presentación B, generalmente es vista en la pantalla del tubo de rayos catódicos, o es registrada en un papel. Esta presentación nos muestra tanto la longitud, como la profundidad de la discontinuidad.

La presentación C, (fig,8-3), es una vista de planta, similar a lo que vemos en una radiografía. Proyecta todos los detalles internos de un material en un plano. Si existe una discontinuidad, esta es obtenida y registrada, casi siempre en un papel registrador, aunque muy pocas veces se utiliza una pantalla de tubo de rayos catódicos.

En esta presentación, los reflejos de la superficie superior e inferior de la pieza, no son utilizados, solo se utiliza la reflexión de la discontinuidad. Este tipo de presentación generalmente es usado en trabajos de laboratorio.

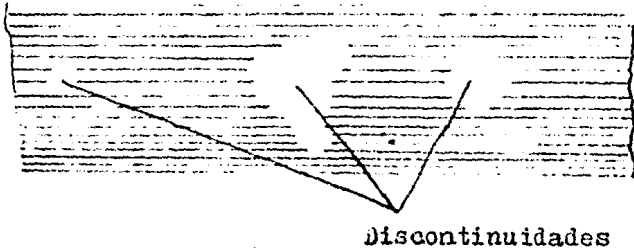
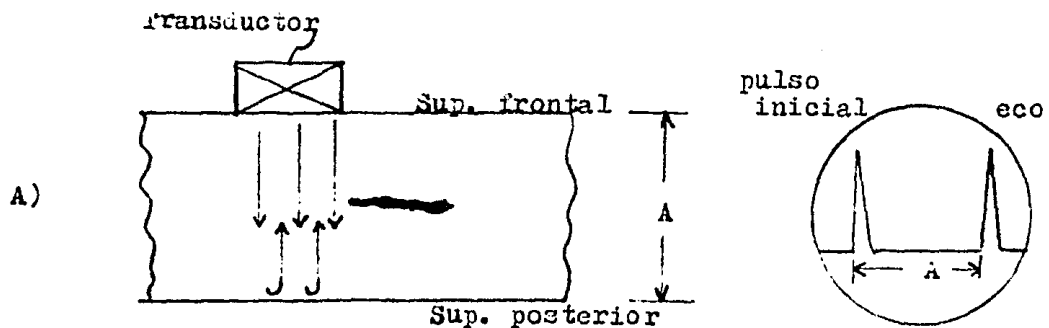


Fig. 8-3 Presentación C.

El tipo de presentación A, es el que generalmente se usa, en pruebas no destructivas, por tal motivo nos basaremos en este tipo de presentación para su interpretación.

La distancia desde el punto donde aparece el pulso inicial, a la discontinuidad y a la reflexión de la cara posterior, es proporcional al tiempo transcurrido, para que el pulso viaje a través del material y la reflexión regrese. Como sabemos, la velocidad de la onda en un material es constante, el tiempo transcurrido nos dará la medida del espesor del material.

En la figura 8-4, podemos ver lo que sucede cuando una onda ultrasónica pasa a través de un material, que contiene una discontinuidad, observaremos también su presentación correspondiente en la pantalla del equipo.



A. Espesor de la pieza

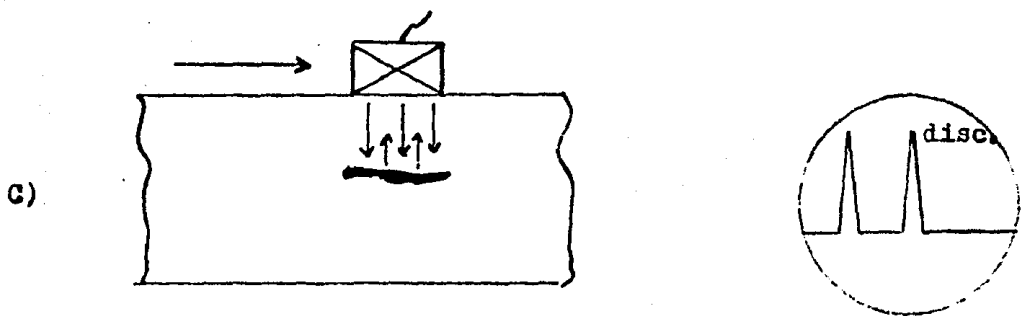
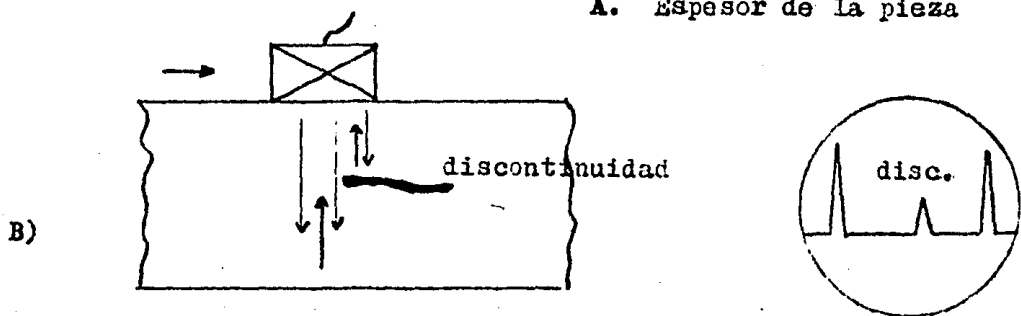


figura 8-4



En el inciso A, de la figura 8-4, podemos observar la primera indicación (pulso inicial), apareciendo a la izquierda de la pantalla, y la reflexión de la cara posterior aparece a la derecha, la discontinuidad no aparece porque el haz de sonido no llega a detectarlo.

En el inciso B de la misma figura, vemos que el haz de sonido detecta una pequeña parte de la discontinuidad, eso ocasiona que en la pantalla, nos dé una indicación de la discontinuidad que se localizará entre la señal del pulso inicial y la reflexión de la cara posterior.

Y por último en el inciso C, observamos que el haz de sonido lo absorbe por completo la discontinuidad, esto nos ocasiona que la señal (eco) de la discontinuidad, se incremente ( amplitud del eco), y la señal de la reflexión posterior disminuya o desaparezca cuando es absorbida por completo la energía del haz, por dicha discontinuidad.

La presentación A, se lee de izquierda a derecha con el primer pulso(pulso inicial), seguido por el eco de la discontinuidad y por último el reflejo de la cara posterior y sus múltiplos.

La altura de los picos o reflexiones verticales de barrido, representa la amplitud de la reflexión de las ondas (ecos), provenientes del material a ser ensayados. Por lo que podemos determinar el tamaño de una discontinuidad, comparando la altura del pico de la misma con la de uno, de una discontinuidad conocida en

un material semejante.

Es muy importante indicar, que el pulso inicial puede bloquear, parcialmente u oscurecer las reflexiones de la discontinuidad, que se encuentran directamente debajo del transductor, esto significa que durante parte del pulso inicial, el transductor está todavía transmitiendo y no puede recibir reflejos hasta tanto no termine su función de transmisor. Esto dá origen a una apreciable "zona muerta", en la superficie frontal del material, en el cual las discontinuidades no pueden ser observadas o detectadas.

Existen factores que influyen en la propagación de las ondas como son:

a) La condición superficial de la pieza, que influye grandemente en la transmisión y recepción de las ondas ultrasónicas, puesto que las superficies rugosas causan diversos factores no deseados, entre ellos:

1. Pérdida de la señal de reflexión y de las que correspondan a discontinuidades.

2. Mayor tamaño del pulso inicial, con la pérdida consecuente de resolución y distorsión de la dirección de la onda.

3. Generación de ondas superficiales inconvenientes.

b) La forma de las superficies frontal y posterior, (fig. 8-5), ya que la forma ideal que debe tener la pieza en sus superficies sean paralelas, de tal manera que la energía transmitida, en el

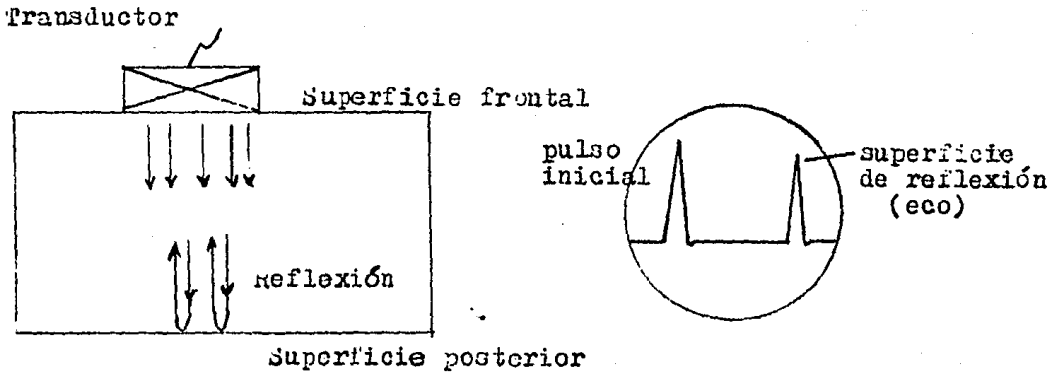


Figura 8-5.

caso de usar el sistema pulso-eco, se refleja directamente hacia el transductor, y así la propagación es directa existiendo menor atenuación.

Si las superficies no son paralelas (fig. 8-6), la energía reflejada se aleja del transductor, en forma similar a la luz incidiendo en un espejo bajo cierto ángulo, y en algunos casos habrá pérdida total de la señal reflejada al incrementar el ángulo de incidencia.

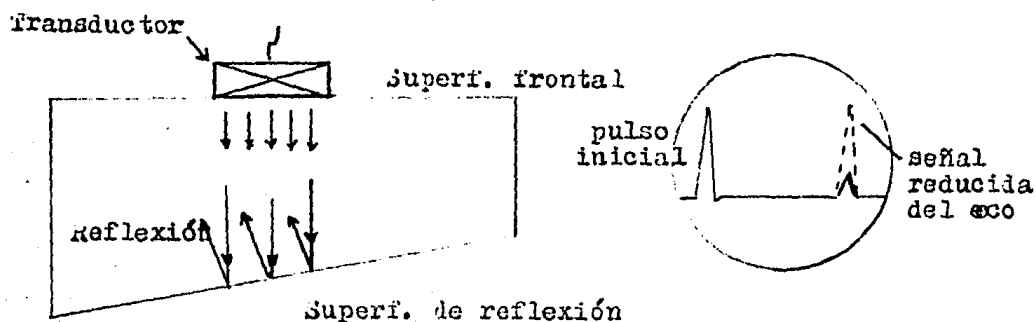


Figura 8-6

Las superficies angulares o contorneadas, pueden crear indicaciones confundibles con las señales producidas por discontinuidades reales. Estas indicaciones son el resultado de la reflexión de las ondas por los bordes de la pieza y su regreso al transductor, en un tiempo equivalente al empleado por las ondas para viajar desde una verdadera discontinuidad hasta el transductor.

Cuando se ensaya objetos de gran longitud, pueden producirse también señales falsas en la pantalla (fig.8-7), que no son mas que el resultado del choque del haz con los lados de la muestra, creando reflexiones adicionales por conversión.

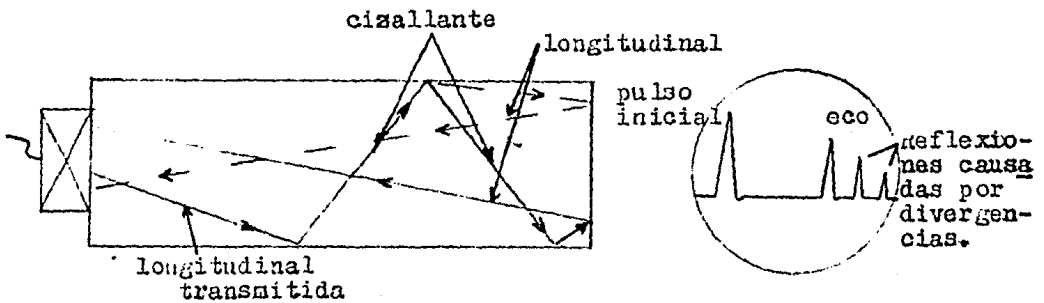


Figura 3-7.

c) La estructura granular de los metales, es de gran influencia en sus propiedades acústicas. Una pieza forjada de acero aleado, tiene una estructura de grano muy fino y absorbe muy poco el ultrasonido. Una pieza fundida, por otro lado, tiene estructura muy gruesa y ofrece muchas dificultades para la realización del ensayo.

La figura 8-8, presenta las posibles señales obtenidas en la pantalla, al realizar ensayos en materiales de grano grueso y grano fino.

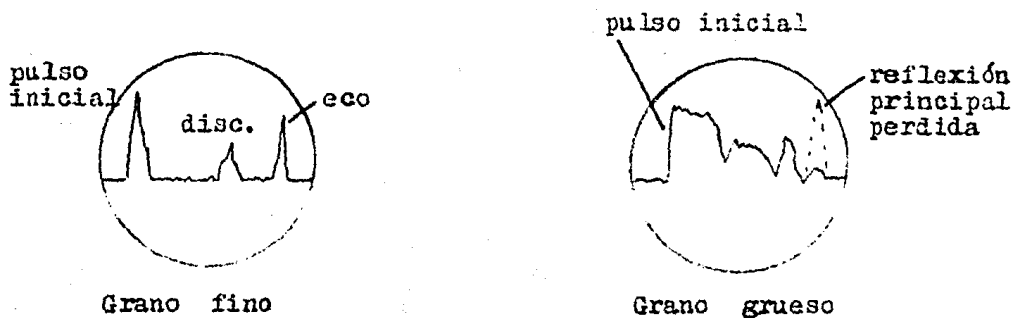


Figura 8-8.

Nótose que la estructura de grano grueso aparece con una serie de reflexiones irregulares llamada " ruido ". La presentación del material de grano fino, es más " limpia " distinguiéndose claramente las señales principales.

Los materiales con excesiva porosidad fina, ofrecen las mismas dificultades para el ensayo que los de grano grueso. En este caso, tiende a aparecer una cantidad grande de discontinuidades de amplitudes distintas, y la señal principal de reflexión disminuye o desaparece, ( fig 8-9 ).

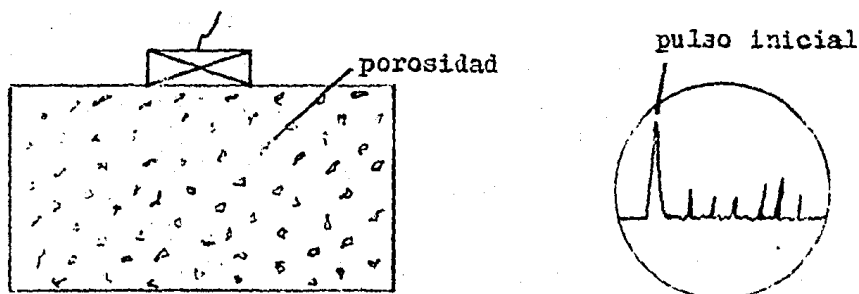


Figura 8-9

d) La orientación de una discontinuidad con respecto a la superficie de ensayo, puede causar variaciones en el tamaño y la profundidad a la que puedan aparecer las señales. Cuando una discontinuidad no es perpendicular a la onda incidente, ella refleja las ondas formando un ángulo, que de ser muy grande no permitirá que ninguna onda regrese al transductor. El resultado, en todo caso, es una reducción de la amplitud de la señal.

Si en un cilindro que contenga una discontinuidad fina, tipo grieta, se transmiten ondas ultrasónicas, los resultados variarán de acuerdo a la posición del transductor, (fig 8-10),

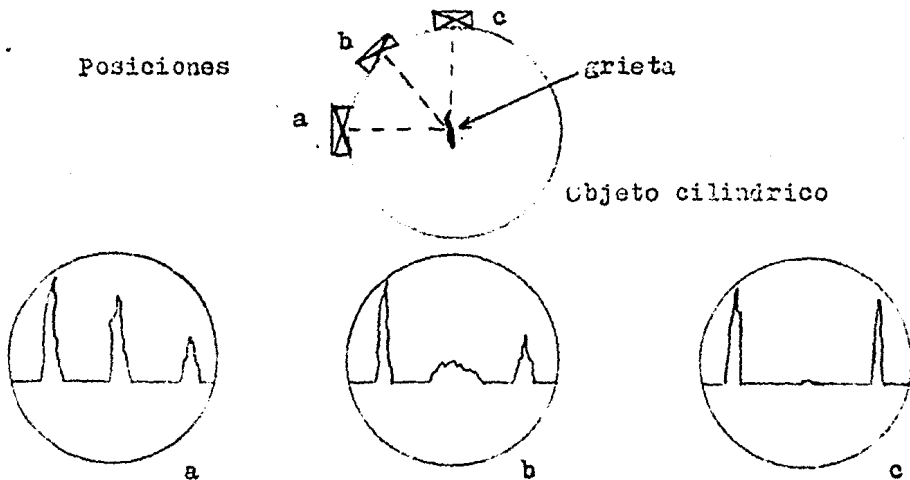


Figura 8-10.

En la posición a de la figura 8-10, se obtiene un máximo en la amplitud de la señal, ya que las ondas inciden perpendicularmente en la discontinuidad; habrá indicación definida y una

reducción en la reflexión principal. Si movemos el transductor para la posición b, decrecerá la amplitud de la discontinuidad tendiendo a incrementarse la señal de la reflexión, ya que una mayor cantidad de las ondas evade la discontinuidad y logra alcanzar la pared posterior. En la posición c la señal es mínima para la discontinuidad y máxima para la reflexión principal. Es de notar, además que la señal de la discontinuidad en b no solo ha decrecido sino que es más ancha.

e) Las variaciones en impedancias, también afectan la amplitud de una señal dada por una discontinuidad. Una grieta, un hueco o una laminación actúan como borde del material y la relación de impedancias en la interface es muy alta por lo que normalmente se obtienen excelentes respuestas. La escoria, tiene una impedancia más próxima a la del material con lo que parte de la energía se transmite a través de una inclusión perdiéndose amplitud en la señal. Podemos decir que para un tamaño de discontinuidad dado, las inclusiones no metálicas dan indicaciones menos amplias que las obtenidas con grietas o agujeros.

f) El efecto de la distancia a la discontinuidad es también muy importante. Ya que una discontinuidad a 5 pulgadas de la superficie de prueba dará una señal doble en amplitud con respecto a la misma, situada a 17 pulgadas.



## R E C O M E N D A C I O N .

Se concluye, por su importancia, sea estudiada la inclusión del ensayo en los programas de ingeniería.

Debido a la gran importancia que tiene la calidad de los productos manufacturados metálicos y algunos no metálicos, así como el uso de ultrasonido en la calibración de espesores en recipientes y tubería que trabaja a presión, para prevenir accidentes.

Es recomendable el uso de la inspección con ultrasonido, debido a que es una prueba altamente confiable, fácil de realizar, económica y tiene una gran variedad de aplicaciones, tanto en la industria manufacturera de piezas metálicas, para asegurar la sanidad interna de sus productos, así como también, en los programas de mantenimiento preventivo, ya sea inspección de fracturas en flechas, hélices y cigüeñales, etc., es también usada, en la calibración de espesores en recipientes a presión o inspección de corrosión en tuberías.

Para esto es necesario tener los conocimientos básicos de lo que es la prueba ultrasónica, su alcance, su capacidad y sus ventajas que nos brinda, para poder

tener un buen desarrollo de esta técnica.

Es tal el desarrollo que ha alcanzado la inspección ultrasónica, que se le ha encontrado uso en la medicina, para detectar tumores y diagnosticar embarazos, en este medio se le conoce como ultrasonografía.

## Bibliografía:

- 1.- Robert C. Mc. Master., Handboock, Nondestructive Testing,  
A. S. T. M. Vol. II.
- 2.- General Dinamics., Nondestructive Testing, Ultrasonics.
- 3.- Richard L. Little., La tecnología en el trabajo de los me-  
tales.
- 4.- Dr. J. y H. Krautkrämer., Cursillo de introducción a los  
métodos de control por ultraso-  
nido.
- 5.- A. L. Smith., Ultrasonic Testing, Fundamentals.
- 6.- Creole Petroleum Corporation., Manual de inspección ultra-  
sónica.
- 7.- Sonic Instruments Incorporated., Manual de operación y ser-  
vicio del aparato ultrasónico  
modelo F T S Mark IV.
- 8.- Sonic Instruments Incorporated., Folletos:
  - No. 400 -- Mark IV Ultrasonic Flaw Detector.
  - No. 900 -- Ultrasonic Transducers & Accessories.
  - No. 910 -- Ultrasonic Transducers.
  - No. 2000 -- Sistemas Sonic para pruebas ultrasónicas.

## A P E N D I C E .

## GLOSARIO DE TERMINOS DE ULTRASONIDO.

- Acoplante.**- Una sustancia usada entre la superficie de la unidad buscadora y la superficie de contacto de la pieza bajo prueba, para permitir o mejorar la transmisión de la energía ultrasónica.
- Amortiguamiento.**- Limita la duración de la vibración en la unidad buscadora en modo eléctrico o mecánico.
- Amplitud.**- Altura vertical del pulso de una señal, usualmente base a pico, cuando es indicado con la representación A-Scan, (barrido tipo A).
- Angulo crítico.**- El ángulo incidente del haz de sonido después del cual existe un modo de vibración específico refractado no muy grande.
- Atenuación.**- Pérdida de la energía por la distancia.
- Barrido.**- Movimiento relativo de la unidad buscadora sobre la superficie de prueba.
- Barrido A.**- (A-Scan) Un método de presentación en la pantalla, utilizando una línea base horizontal que indica distancia o tiempo, y una deflección vertical de la línea base la cual indica amplitud.
- Barrido B.**- (B-Scan) Una forma de presentación la cual provee una vista de corte seccional de la pieza bajo prueba.

**Barrido C.- (C-Scan)** Una forma de presentación la cual provee una vista plana del material y las discontinuidades que existen.

**Block de referencia.-** Un block usado para establecer una escala de medición, una forma de producir reflexiones de características conocidas.

**Campo cercano.-** La región del haz ultrasónico adyacente a el transductor y que tiene contornos complejos del haz; también es conocido como zona de Fresnell.

**Campo lejano.-** La zona del haz donde reflectores iguales, dan exponencialmente decrecimientos de amplitud incrementando la distancia.

**Campo muerto.-** Distancia del material de la superficie de prueba a la más cercana profundidad inspeccionable.

**Colimador.-** Un dispositivo para controlar la dirección y el tamaño del haz ultrasónico.

**Compuerta.-** Un sistema electrónico para monitorear un segmento seleccionado de la distancia de la línea base.

**Cristal.-** Un elemento piezoeléctrico en una unidad buscadora.

**Decibel.- (Db.)** Expresión logarítmica de un ratio de dos amplitudes o intensidades.

**Eco.-** Indicación de energía reflejada.

**Esparcimiento del haz.-** La divergencia del haz de sonido cuando viaja a través del material.

Frecuencia.- (Pulso repetición) El número de pulsos por segundo.

Frecuencia.- (Inspección) Frecuencia efectiva de la onda ultrasónica del sistema usado para inspeccionar el material..

Frecuencia.- (Fundamental) En pruebas de resonancia, la frecuencia a la cual la longitud de onda es dos veces el espesor del material examinado.

Haz en ángulo.- Una onda que viaja en ángulo, medida de la superficie normal de prueba a la línea de centro del haz.

Haz enfocado.- Energía convergente del haz de sonido a una distancia específica.

Haz recto.- Un pulso de onda en vibración que enfoca su dirección normal a la superficie de prueba.

Impedancia.- Una cantidad matemática usada en computación de características de reflexión en fronteras; producto de la velocidad de onda y la densidad del material.

Interface.- La frontera entre dos materiales.

Linealidad:

Amplitud.- La característica de un sistema de inspección ultrasónico indicando su habilidad para responder en una manera proporcional a un rango de eco amplitudes producidas por reflectores especificados.

Distancia.- Las características de un sistema de inspección ultrasónica que indica su habilidad para responder en una manera proporcional a un rango de eco señales, producidas por reflectores variables en tiempo, usualmente una serie de múltiples reflexiones posteriores.

- Longitud de pulso.- Una medida de la duración de un viaje de la onda, expresada en tiempo o número de ciclos.
- Método pulso-eco.- Un método de inspección en el cual la presencia y posición de un reflector es indicada por la amplitud del eco y el tiempo.
- Método de resonancia.- Una técnica que varía la frecuencia de ondas ultrasónicas continuas para excitar una amplitud máxima de vibraciones en un cuerpo, generalmente para medición de espesores.
- Modo de vibración.- Tipo de movimiento de la onda, por ejemplo: longitudinal, transversal, etc....
- Onda de corte.- Movimiento de la onda en la que el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de la propagación.
- Ondas Lamb.- Un tipo de ondas que se propaga en el espesor de una placa delgada, y que puede ser solamente generada en valores particulares del ángulo de incidencia, frecuencia y espesor de la placa. La velocidad de la onda depende del modo y del producto del espesor de la placa y la frecuencia.
- Onda longitudinal.- Esas ondas en las cuales el movimiento de las partículas del material es esencialmente en la misma dirección que la propagación de la onda.
- Ondas Rayleigh.- Una onda de superficie en la cual el movimiento de las partículas es elíptico y la penetración efectiva es menor que una longitud de onda.
- Penetración.- La profundidad máxima en un material del cual

Las indicaciones pueden ser medidas.

Pérdida de señal.- La fuga de señal (acústica o eléctrica) a través de una barrera deseada.

Prueba de inmersión.- Un método de inspección donde la unidad buscadora, y el material están sumergidos en agua.

Pulso.- Una onda corta de vibraciones mecánicas.

Pulso inicial.- Respuesta de la unidad de exhibición al pulso transmitido.

Rango.- La longitud máxima del paso ultrasónico que puede ser mostrado en la pantalla.

Reflexiones múltiples.- Ecos sucesivos de energía ultrasónica entre dos superficies.

Reflexión posterior.- Indicación del eco de la frontera del material bajo prueba.

Refracción.- El cambio angular en la dirección del haz ultrasónico como si pasara oblicuamente de un medio a otro, en el cual las ondas tienen diferente velocidad.

Resolución.- La habilidad del equipo ultrasónico para dar simultáneamente indicaciones separadas de discontinuidades que tengan el mismo rango cercanamente y la misma posición lateral respecto al eje del haz.

Sensibilidad.- La habilidad de un sistema ultrasónico para detectar defectos muy pequeños.

Superficie de prueba.- La superficie de un pieza a través de la cual entra la energía ultrasónica o deja el espécimen.

Transductor.- Un ensamble electro-acústico para convertir energía eléctrica en mecánica y viceversa.



**Transductor dual.**- Una unidad buscadora conteniendo dos elementos, uno transmisor y otro receptor.

**Transmisión a través.**- Un procedimiento de prueba en el cual las vibraciones ultrasónicas son emitidas por una unidad buscadora y recibidas por otra en la superficie opuesta del material examinado.

**Ultrasónico.**- Perteneciente a vibraciones mecánicas que tengan una frecuencia mayor de 20 000 Hz. aproximadamente.

**Unidad buscadora.**- Un ensamble de uno o más transductores.

**Unidad buscadora de rueda.**- Un dispositivo ultrasónico que acopla el haz hacia el espécimen a través del área de contacto de la rueda que contiene un líquido de acople.

**Zapata.**- Un dispositivo usado para dirigir energía ultrasónica dentro del material en ángulo.