

## INTRODUCCIÓN

Existen una gran cantidad y variedad de técnicas de ensayo no destructivas, destinadas a determinar la presencia, locación y severidad de discontinuidades que de una -Forma u otra, puedan afectar la operabilidad de piezas y partes nuevas o ya en servicio. Entre las técnicas de ensayo no destructivas mas comunes, podemos mencionar Líquidos o Tintas Penetrantes, Radiografía o Gammagrafía, Partículas Magnéticas, Ultrasonido, Electromagnetismo, Corrientes Inducidas, etc. Algunas otras técnicas son un poco mas especializadas, por lo que su aplicación se encuentra, en cierta forma, limitada o restringida. Entre éste grupo podemos mencionar: Emisión Acústica, Termografía de Infrarrojo, etc.

Este Libro trata acerca de la técnica de Ultrasonido, como método de ensayo no destructivo; sus propiedades fundamentales, palpadores y generación, la propagación y sus características, métodos y técnicas, sistemas y equipos, calibración, tipología de las indicaciones y aplicaciones metalúrgicas.

### i.1. ANTECEDENTES.

A través de los siglos, el hombre ha intentado utilizar el sonido para evaluar la robustez y calidad de materiales, golpeando las piezas mediante algún instrumento como o desafilado, y escuchando las diferencias de tono, que puedan evidenciar la presencia de discontinuidades. Esta forma de ensayo se considera como la precursora de lo que conocemos hoy en día, como ultrasonido.

Las investigaciones sobre la utilización del sonido en la detección de defectos, tomaron muchos años; sin embargo, fue sólo en los años 30, cuando se presentó la posibilidad de usar la energía ultrasónica como método de ensayo no destructivo. Investigadores en Alemania, O. Muhihauser, A. Trost y R. Pohiman; y en Rusia, S. Sokoloff desarrollaron métodos de ensayo ultrasónico mediante los cuales podían ser

determinadas discontinuidades de gran tamaño. Estos métodos presentaron algunas limitaciones, la principal fue el hecho de que las superficies superior e inferior del material bajo ensayo debían ser accesibles. Fueron realizados muchos intentos para obtener un método de ensayo que requiriera acceso a una sola superficie, esto fue logrado a mediados del año 1.940. Al mismo tiempo, Fred A. Firestone, en la Universidad de Michigan Estados Unidos, inventó un instrumento que utilizaba pulsos de energía ultrasónica para obtener reflexiones de discontinuidades diminutas. Durante el mismo período, D. O. Sproule, en Inglaterra, desarrolló otros aparatos de ensayo. Estos primeros instrumentos fueron considerados, en su mayor parte, como equipos de ensayo en laboratorio y utilizados para investigación metalúrgica.

En años recientes, los avances en la instrumentación y la tecnología electrónica, han suplido las herramientas necesarias para hacer posible el desarrollo de la técnica ultrasónica, tal y como la conocemos hoy en día. El ultrasonido es un confiable y rápido instrumento de Aseguramiento y Control de Calidad.

### i.2. APLICACIÓN INDUSTRIAL.

De acuerdo con sus características básicas, el ensayo de ultrasonido puede ser utilizado en el examen de productos metálicos y no metálicos, tales como: soldaduras frías, fundiciones, planchas, tubos, plásticos, cerámicas, etc.

El ensayo de ultrasonido es aplicable en la detección de discontinuidades subsuperficiales, siendo una de las herramientas más efectivas existentes, para el Aseguramiento y Control de Calidad.

### i.3. FILOSOFÍA DEL ENSAYO.

Los Ensayos no Destructivos son, como su mismo nombre lo indica, ensayos que se realizan sin modificar las condiciones de servicio de las piezas en estudio,

asegurando al máximo las condiciones en máquinas, equipos, estructuras y herramientas. Para cumplir con éste objetivo, se hace necesaria la utilización de patrones de calibración y estándares de referencia con los cuales comparar los resultados obtenidos.

#### i.4. PERSONAL.

Es necesario que el personal responsable de llevar a cabo los ensayos, esté entrenado y altamente calificado, comprendiendo a cabalidad todo lo concerniente a equipos, técnicas, materiales y procedimientos de ensayo, de acuerdo a los siguientes niveles de calificación:

Nivel 1. El personal con calificación "Nivel I" debe estar preparado para realizar, según instrucciones escritas, calibración de equipos, ensayos y evaluación de resultados.

Nivel 2. El personal con calificación "Nivel II" debe estar preparado para realizar; calibración de equipos, interpretar y evaluar resultados con respecto a códigos y especificaciones. Debe estar en capacidad de preparar instrucciones escritas y reportar resultados de ensayo.

Nivel 3. El personal con calificación "Nivel III" debe ser responsable de establecer técnicas, interpretar códigos y designar el método de ensayo junto con la técnica a ser usada. Debe tener una gran experiencia práctica en ésta técnica y estar familiarizado con otras técnicas de Ensayo no Destructivo.

#### i .5. CRITERIOS DE ENSAYO.

Existen criterios que indican que, de acuerdo con los procesos de fabricación, se puede clasificar las fallas o defectos que pudieran presentarse en piezas de ensayo.

Esto significa que cada unidad debe ser ensayada individualmente, antes de ser ensamblada, así como se debe ensayar el conjunto completo de acuerdo con los requerimientos de la especificación. Esto implica que debe ser seleccionado el proceso de ensayo, y a su vez, generarse procedimientos de prueba desde el mas bajo nivel del proceso de fabricación, con el fin de obtener la mayor calidad al mas bajo costo.

#### i.6. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.

Los procedimientos de inspección deben generarse a partir un análisis del objeto a ensayar, de la revisión de la documentación técnica, de experiencia adquirida en ensayos a objetos similares y de información concerniente a discontinuidades que pudieran presentarse en éste o que hayan sido observadas en objetos semejantes. Es responsabilidad del personal que ejecuta los ensayos, que los procedimientos sean adecuados.

#### i.7. OBJETIVO DEL ENSAYO.

El objetivo del ensayo de ultrasonido es asegurar la calidad de la pieza. Para la consecución de éste objetivo se deben tomar en cuenta tres factores que son:

- Obtener una imagen visual relativa a determinar la presencia, locación y severidad de las discontinuidades presentes en la pieza bajo ensayo.
- Revelar la naturaleza de las discontinuidades sin perjudicar el material.
- Diferenciar las discontinuidades aceptables de las que no lo son, de acuerdo con criterios de aceptabilidad o especificaciones estandarizadas; por ejemplo: "Tamaño Crítico de Defecto".

## PROPIEDADES FUNDAMENTALES DEL SONIDO

Ningún ensayo está totalmente efectuado sin antes realizar un análisis de resultados. La ejecución de los procedimientos de ensayo y el análisis de resultados, requiere del conocimiento de la pieza en todo lo concerniente a material, dimensiones, forma y proceso de fabricación.

## CAPITULO 1

# PROPIEDADES FUNDAMENTALES DEL SONIDO

Ultrasonido, es el nombre dado al estudio y aplicación de ondas sonoras con frecuencias superiores a las percibidas por el oído humano. Las ondas sonoras pueden ser divididas en tres grandes grupos; Infrasonica, donde el rango de frecuencias es menor a 16 ciclos por segundo ( $f < 16 \text{ Hz}$ ) Sónica» donde las frecuencias se encuentran entre 16 y 20.000 ciclos por segundo ( $16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$ ) y Ultrasónica, donde las frecuencias son mayores a 20,000 ciclos por segundo ( $f > 20 \text{ kHz}$ ) Sin embargo, la frecuencia mas alta lograda hasta el presente, es del orden de 1,000.000.000 ciclos por segundo (1.000 MHz) . El rango de frecuencias usado en ultrasonido abarca desde los 200.000 hasta los 25.000.000 de? ciclos por segundo (200 kHz hasta 25 MHz)

El ultrasonido, como método de ensayo no destructivo, es el uso de ondas ultrasónicas para evaluar materiales sin modificar sus condiciones de servicio. El ensayo de ultrasonido puede ser usado para medir el espesor de materiales, o para examinar la estructura interna de piezas por posibles discontinuidades.

### 1.1. EL SONIDO.

El sonido se define como la vibración mecánica de partículas en un medio. Cuando una onda sonora se transmite a través de un medio; las partículas vibran alrededor de un punto fijo, a la misma frecuencia que la onda sonora. Las partículas no se trasladan con la onda, sólo reaccionan ante la energía de la misma; esto implica que la energía de la onda es la que se transmite a través del

material, por medio de sus partículas,

En la Figura 1.1, tenemos un diapasón que es golpeado con un martillo. Por efecto del golpe se producirá un sonido, el cual escucharemos. Ahora, si observamos el diapasón en el momento de ser golpeado, veremos que, debido al impacto, comenzará a moverse atrás y adelante un movimiento alternativo. Por medio de un golpe, hemos transmitido energía al diapasón; ésta energía es transmitida, por acción del movimiento, a la capa de aire que se encuentra alrededor del diapasón, la que se comprimirá, ésta a su vez comprimirá a la capa inmediata, ésta comprimirá la siguiente y así sucesivamente. De la misma forma, con la transmisión de la vibración se crearán zonas de compresión y zonas de expansión. El resultado final, lo escucharemos; tal y como se muestra en la Figura.

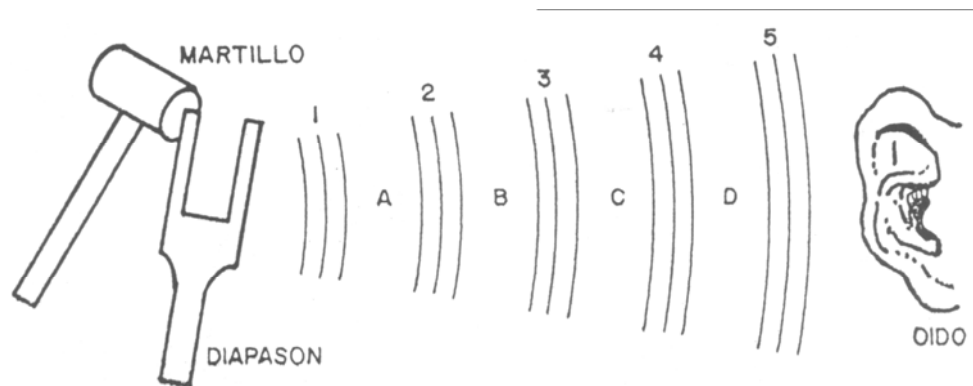


Figura 1.1. Sonido producido por un diapasón,

Las áreas identificadas con los números "1", "3", "4" y "5", representan las zonas de compresión onda, y las identificadas con las letras "A", "B", "C", "D", representan las zonas de expansión de la onda, producto la vibración del diapasón. Entonces; el sonido será, la transmisión de una onda mecánica a través de un medio; la vibración mecánica de partícula en un medio. Para nuestros propósitos debemos comprender y recordar que la vibración es:

## PROPIEDADES FUNDAMENTALES DEL SONIDO

- Un movimiento alternativo.
- Energía en movimiento.

Sabemos que el sonido se transmite a través del aire y que puede ser reflejado en forma de ecos. Además, el sonido puede ser transmitido a través del agua, e igualmente reflejado, éste es el principio del sonar; "la detección de objetos bajo el agua". De la misma manera, el sonido puede ser transmitido a través de elementos sólidos. Los ensayos ultrasónicos utilizan tanto la transmisión del sonido a través de líquidos, como la transmisión del sonido a través de sólidos.

### 1.2. CUALIDADES DEL SONIDO.

El sonido tiene tres cualidades importantes, que son:

- Intensidad.
- Tono.
- Timbre.

#### 1.2.1. Intensidad.

La intensidad es la cualidad por la que percibimos un sonido fuerte o débil. El sonido será más intenso, cuanto mayor sea la energía de vibración de las partículas, y como se puede demostrar que dicha energía es proporcional al cuadrado de la amplitud; entonces, la intensidad de una onda sonora dependerá de la amplitud de la misma.

#### 1.2.2 Tono.

El tono de un sonido, es la cualidad que nos lo hace percibir como agudo o grave, y depende de la cantidad de veces en un período de tiempo, en el cual se repite la vibración, o sea, la frecuencia.

### 1.2.2. Timbre.

El timbre de un sonido, es la cualidad que nos permite distinguir un mismo tono, pero producido por dos instrumentos diferentes. Esto nos indica que el timbre de un sonido depende del medio que lo produzca.

### 1.3. CARACTERÍSTICAS DE UNA ONDA SONORA.

Cuando hablamos de sonido, hablamos de vibración, un movimiento atrás y adelante; alternativo, o sea, se produce infinidad de veces pero de una forma ordenada. Cuando una partícula parte de un punto "O" y se desplaza hasta una posición máxima "+"; luego, se devuelve al punto "O", pero continúa su movimiento hacia atrás y logra otra posición de desplazamiento máximo "-"; y regresa al punto "O", ha realizado un ciclo (ver Figura 1.2). El concepto de ciclo está relacionado directamente con el período y la frecuencia.

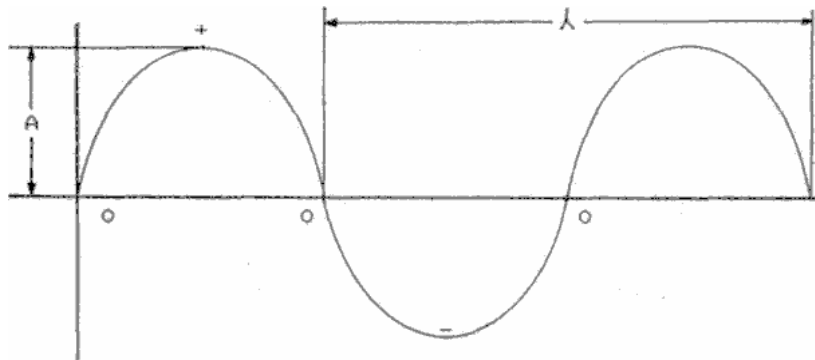


Figura 1.2. Relación entre amplitud y longitud de onda.

Una onda sonora está definida por cuatro características principales;

- Período.
- Frecuencia.
- Amplitud.

- Longitud de Onda.

### 1.3.1. Período.

El período T, es el tiempo que toma una partícula en realizar un ciclo completo.

### 1.3.2. Frecuencia.

La frecuencia, f, es el número de oscilaciones de una partícula por segundo. Dentro de una misma onda, la frecuencia es la misma para todas las partículas, y es idéntica a la frecuencia del generador. La unidad Internacional de frecuencia es el Hertzio, donde:

1 HERTZIO = 1 Hz = 1 Ciclo por Segundo.

1.000 HERTZIOS = 1 kHz = 1.000 Ciclos por segundo.

1,000.000 HERTZIOS = 1 MHz = 1.000.000 Ciclos por segundo.

Como podemos ver, el período y la frecuencia están relacionados, pues;

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

Donde;

T : Período.

f : Frecuencia.

### 1.3.3. Amplitud.

La amplitud,  $A$ , es el máximo desplazamiento que realiza la partícula sometida a vibración, partiendo desde su posición "O".

### 1.3.4. Longitud de Onda.

La longitud de onda,  $\lambda$  es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia. El período y la longitud de onda están relacionados, pues el período es el tiempo que toma una partícula en recorrer una longitud de onda. Para todos los tipos de onda se cumple la siguiente relación;

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (1.2)$$

Donde;

$\lambda$  : Longitud de onda.

$v$  : velocidad acústica.

$f$  : Frecuencia

## 1.4. VELOCIDAD ACÚSTICA.

La velocidad, acústica es la distancia recorrida por las ondas en un medio en una unidad de tiempo; en otras palabras, es la velocidad de propagación del sonido en el medio.

La velocidad acústica longitudinal es diferente para cada medio, pero es directamente proporcional a su densidad y al Módulo de Elasticidad, e inversamente proporcional al Coeficiente de Poisson.

La velocidad acústica transversal, también es diferente para cada medio, y es la raíz cuadrada del producto del Módulo de Rigidez entre la densidad del material. Puede obtenerse, también, mediante el Coeficiente de Poisson y el Módulo de Elasticidad.

La velocidad de las ondas superficiales, puede ser calculada por medio de relaciones entre los mismos factores característicos del material.

La velocidad acústica es una característica del material y, en general, es constante para cada material dado, para cualquier frecuencia y cualquier longitud de onda. Sin embargo, esto no es rigurosamente exacto, pues dicha velocidad depende, especialmente en los gases y líquidos, de la presión, de la temperatura y de otros parámetros. Ahora bien, en muchos materiales sólidos, tales como los metales, ésta influencia se puede despreciar. Por ello, se puede tomar ésta velocidad, aproximadamente, como una constante del material, condición muy útil en los ensayos por ultrasonido.

### 1.3. PRESIÓN ACÚSTICA.

En los puntos de gran densidad de partículas, la presión es también mayor que la presión normal, mientras que en las zonas dilatadas es menor. Un medidor microscópico de presión, colocado en el campo de la onda elástica, indicaría alternativamente presiones altas y bajas, según una secuencia periódica. Esta presión alterna es la presión acústica. Ocurre no sólo en los gases, sino también en los líquidos y en los sólidos. La desviación máxima en relación con la presión normal (sin la presencia de onda acústica alguna), se denomina "amplitud de la presión acústica", y está íntimamente relacionada con la amplitud de oscilación.

#### 1.4. VELOCIDAD INSTANTÁNEA DE VIBRACIÓN.

La velocidad instantánea de vibración es propia de la partícula en su movimiento oscilatorio. Cuando se refiere a su amplitud o valor máximo, se designa "v".

## CAPITULO 2

### **PALPADORES Y GENERACIÓN DEL ULTRASONIDO**

El empleo del ultrasonido como método de ensayo no destructivo, envuelve la aplicación de técnicas especializadas y la utilización de diversos tipos de generadores y receptores. En el Capítulo 1, fueron presentadas las propiedades fundamentales del sonido. En éste Capítulo, se presentan los tipos básicos de palpadores y el principio físico de generación de las ondas.

#### 2.1. GENERACIÓN DEL ULTRASONIDO.

La aplicación del ultrasonido como método de ensayo no destructivo, envuelve la utilización de mecanismos que generen y reciban las señales ultrasónicas; los palpadores. Un palpador, es un mecanismo que convierte energía de una -forma a otra; por ejemplo: la energía eléctrica puede ser convertida en energía mecánica y la energía mecánica puede ser convertida en energía eléctrica. La conversión de energía se realiza en ultrasonido, partiendo de dos fenómenos físicos:

- Efecto Piezoeléctrico.
- Efecto Magnetostrictivo.

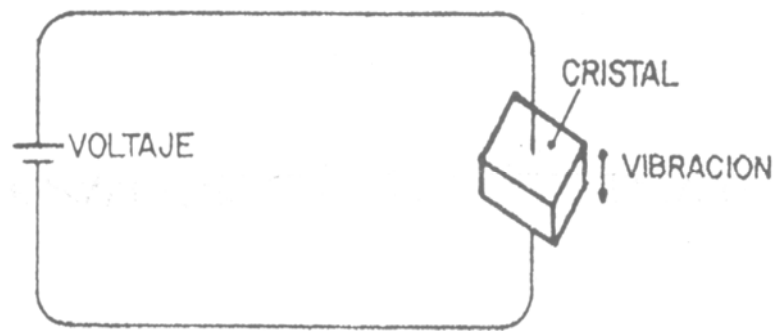


Figura 2.1. Principio básico del Funcionamiento de los palpadores ultrasónicos.

### 2.1.1. Efecto Piezoeléctrico.

El tipo de cristal más comúnmente usado en ensayos no destructivos, se denomina: cristal piezoeléctrico. Un material piezoeléctrico, convierte deformaciones mecánicas causadas por efecto de presión externa, en cargas eléctricas. Este fenómeno fue descubierto por los Esposos Pierre y Marie Curie en 1880, y se denomina Efecto Piezoeléctrico Directo.

El efecto inverso fue descubierto por Fritz Albert Lippman en 1881. Lippman, predijo que aplicando cargas eléctricas a un cristal piezoeléctrico, podrían producirse deformaciones mecánicas, y por consiguiente: vibraciones; éste efecto es conocido con el nombre de Efecto Piezoeléctrico Recíproco.

La función de un palpador de cristal, es convertir en señales eléctricas las deformaciones aplicadas y viceversa. La combinación de estos dos efectos hace posible los sistemas ultrasónicos.

Las propiedades físicas de un cristal de cuarzo natural varían de acuerdo con las direcciones en las cuales sea cortado. Se desenvolverá mecánica, óptica o eléctricamente favorable, según su dirección de corte principal. Cada cristal tiene tres ejes imaginarios; según y como sea cortado, serán su comportamiento y

Características físicas,

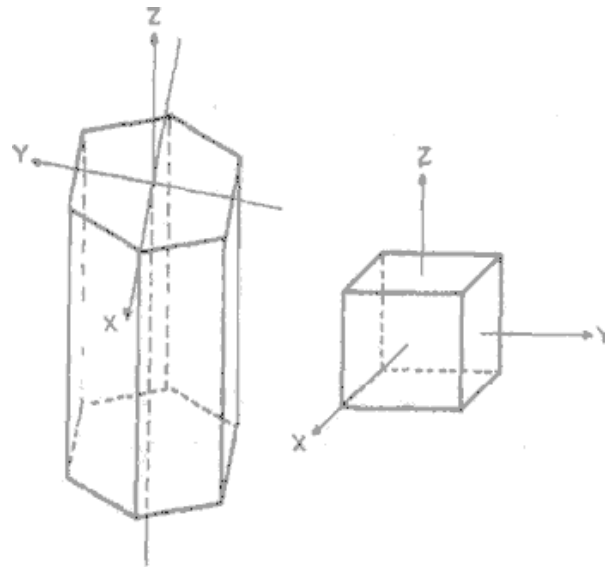


Figura 2.2. Orientación típica de los ejes en un cristal de cuarzo natural

En la Figura 2.2 se observa la dirección de corte de un cristal de cuarzo mas conveniente para las aplicaciones ultrasónicas. Al aplicar presión mecánica perpendicular mente al eje de las abcisas, se obtendrá variaciones sumamente rápidas en el espesor, generándose sedales eléctricas; y si por el contrario se aplican cargas eléctricas a las caras perpendiculares al eje X del cristal, se producirán variaciones del espesor. Si las cargas eléctricas son alternativas, el cristal vibrará a una frecuencia definida por la relación existente. entre su espesor y la longitud de onda,

### 2.1.2. Efecto Magnetoestrictivo.

Por definición, los materiales magnetoestrictivos deforman mecánicamente cuando se les aplica voltaje. Los materiales que exhiben ésta facultad se denominan férroeléctricos; y están compuestos por un gran número de moléculas que para cumplir con el efecto magnetoestrictivo, deben ser polarizadas como se muestra en la Figura 2.3.

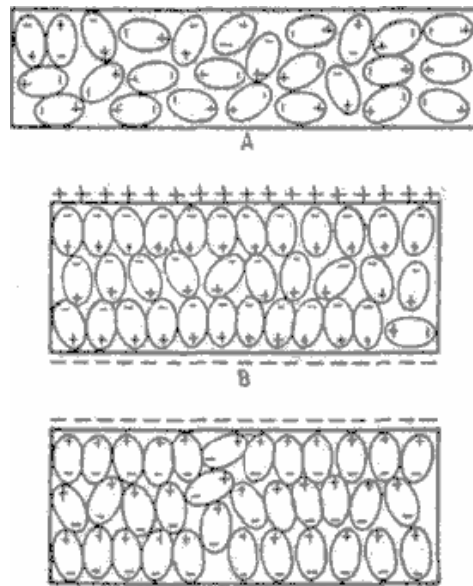


Figura 2.3. Orientación de las moléculas en un material magnetostrictivo.

Cuando no existe un gradiente eléctrico en el material ferroeléctrico, las moléculas estarán orientadas al azar (A). Al aplicar voltaje, las moléculas tienden a alinearse en la dirección del campo; en éste momento se produce un aumento del espesor como el voltaje se aplica de forma alterna, al bajar a cero volverá a su espesor normal (A), aumentará el espesor polarizándose las moléculas de forma opuesta (C), volverá a cero, y así sucesivamente se producirán las vibraciones.

Los materiales ferroeléctricos, por propiedades, no pueden producir altas frecuencias, es por esto que con cierta metodología, es posible cambiar su comportamiento hacia la piezoelectricidad. El método es el siguiente; el material es calentado por encima de su punto de Curie (la temperatura por encima de la cual una estructura pierde sus propiedades ferroeléctricas), a la vez que se le aplica voltaje lateralmente (aproximadamente 1.000 voltios por milímetro de espesor), el cual será mantenido hasta el enfriamiento. El material ha sido polarizado, por lo que exhibirá propiedades piezoeléctricas.

## 2.1.3. Construcción de Cristales.

La eficiencia máxima de un cristal, se logra cuando la frecuencia de la excitación eléctrica coincide con la frecuencia característica del oscilador. Si "T" es el espesor del cristal, y V velocidad acústica del mismo, la frecuencia fundamental será dada por;

$$f = \frac{V}{2T} \quad (2.1)$$

Independientemente del material de fabricación del cristal piezoeléctrico, éste debe ser maquinado en cuanto a forma y espesor. La forma viene dada por el tipo de palpador, y el espesor por la frecuencia de trabajo según la siguiente ecuación;

$$T = \frac{\lambda}{2} \quad (2.2)$$

Donde:

T : Espesor del cristal.

$\lambda$  : Longitud de onda.

Cumpliendo ésta relación se obtendrá la eficiencia máxima del cristal. Entre los materiales de fabricación de cristales piezoeléctricos mas comunes, se encuentran: el Cuarzo, el Sulfato de Litio y las Cerámicas Polarizadas (Titanato de Bario y Metaniobato de Plomo). Sin embargo, para usos especiales se emplean; Sal de Rochelle o Tartrato Sódico Potásico (KDP) , Fosfato Monoamónico (ADP) Tartrato Dipotásico (DKT), Tartrato de Etilendiamina (EDT), así como la Turmalina. En la tabla 2.1, se muestran algunas características físicas de los materiales piezoeléctricos.

Tabla 2.1.- Propiedades Físicas de los materiales Piezoeléctricos

<b>Material</b>	<b>Densidad(<math>10^3</math>) Kg. / cm<sup>3</sup></b>	<b>Velocidad Acústica (cm / seg.)</b>	<b>Impedancia Acústica Kg. / seg. cm<sup>2</sup></b>
Cuarzo	2,65	57,60	152,64
Sulfato de Litio	2,06	47,20	97,23
Titanato de bario	5,07	44,00	223,08
Metaniobiato de Plomo	5,80	28,00	162,40

#### 2.1.3.1. Cuarzo.

El Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), es el mas antiguo de todos y se obtiene a partir de cristales naturales. Es transparente y muy duro. Posee una temperatura crítica de 576 °C, que corresponde al punto de Curie, lo que lo hace adecuado para ensayos a altas temperaturas. El coeficiente de amortiguación interna es prácticamente, igual a la unidad. Su frecuencia fundamental característica es de 2,80 MHz, para espesores de 1 mm.

El cuarzo presenta como ventajas su estabilidad térmica y eléctrica, insolubilidad en muchos líquidos, dureza elevada y resistencia al desgaste, homogeneidad excelente y resistencia al envejecimiento. Como limitaciones, un módulo piezoeléctrico bajo, lo que le califica como mal emisor. No es adecuado para la generación de impulsos cortos.

#### 2.1.3.2. Sulfato de Litio.

El Sulfato de Litio ( $\text{SO}_4\text{Li}$ ), mas propiamente sulfato de litio hidratado, se obtiene por cristalización, y se debe proteger de la humedad. El sulfato de litio hidratado, es el mas sensible a la temperatura, ya que pierde su agua de cristalización a 75 °C, descomponiéndose en polvo de sulfato de litio y en agua. Debido a su coeficiente de

amortiguación interna, es bastante adecuado para generar impulsos cortos. Su Frecuencia fundamental característica es de 2,36 MHz , para espesores de 1 mm.

Sus ventajas principales residen en, proporcionar una amortiguación acústica óptima, mejorando el poder de resolución, módulo piezoeléctrico medio y constante de presión piezoeléctrica elevada, lo que le califica como el mejor receptor. Sin embargo, su uso está restringido a temperaturas inferiores a 75 °C.

### 2.1.3.3. Titanato de Bario.

El Titanato de Bario ( $\text{TiO}_3\text{Ba}$ ), se obtiene por sinterización, ya que por cristalización no se pueden obtener cristales grandes. Se deben, pues, polarizar durante su proceso de fabricación. Posee una temperatura crítica entre 115 y 150 °C, que corresponde al punto de Curie. El coeficiente de amortiguación interna es, prácticamente, igual a la unidad. Su frecuencia fundamental característica es de 2,2 MHz, para espesores de 1 mm.

El titanato de bario, como material cerámico polarizado, posee un módulo piezoeléctrico elevado, lo que le califica como el mejor emisor, pero a efectos de acoplamiento y amortiguación, es el peor debido a su impedancia acústica elevada. Debido a su resistencia mecánica baja y a su frecuencia característica fundamental, relativamente, baja, su empleo está restringido a frecuencias por debajo de 15 MHz. Otra limitación, es la interacción que se produce entre varios modos de vibración.

### 2.1.3.4. Metaniobato de Plomo.

El Metaniobato de Plomo ( $\text{Nb}_2\text{O}_6\text{Pb}$ ), se obtiene por sinterización, ya que por cristalización no se pueden obtener cristales grandes. Se deben, pues, polarizar durante su proceso de fabricación. Posee una temperatura crítica de 550 °C, que corresponde al punto de Curie, lo que lo hace adecuado para ensayos a altas temperaturas. El coeficiente de amortiguación interna es de 1,3, por lo que es el

mejor material para generar impulsos cortos en el método de pulso—eco, pues no precisa de amortiguación artificial, lo cual beneficia su sensibilidad. Su frecuencia fundamental característica es de 1,4 MHz, para espesores de 1 mm, lo que limita su empleo a frecuencias muy altas.

El metaniobato de plomo, como material cerámico polarizado, posee un módulo piezoeléctrico elevado, lo que le califica como buen emisor. Al igual que el cuarzo, presenta estabilidad térmica, siendo indicado para ensayos a temperatura; posee elevado coeficiente de amortiguación interna, lo que le califica como el mejor material para generar impulsos cortos. Su frecuencia característica fundamental es la mas baja de los cuatro, lo que, unido a su baja resistencia mecánica, limita su empleo a frecuencias altas. Otra limitación, es la interacción que se produce entre varios modos de vibración.

## 2.2. EL HAZ ULTRASÓNICO.

En el ensayo de ultrasonido, la anchura del haz sonoro es, generalmente, considerado constante en toda su longitud. En realidad, el haz no es totalmente recto. Si medimos la intensidad del haz sonoro a varias distancias del palpador, veremos que es posible distinguir tres zonas diferentes, tal y como se muestra en la Figura 2.4. Estas zonas son conocidas como; Zona Muerta, Zona de Campo Cercano o Zona de Fresnel, y Zona de Campo Lejano o Zona de Fraunhofer .

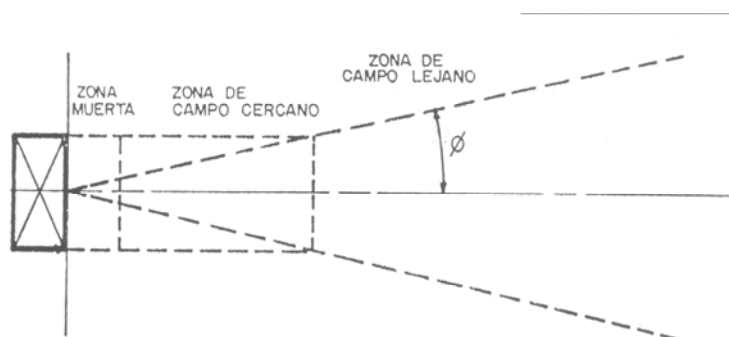


Figura 2.4. Diagrama del haz ultrasónico mostrando las diferentes zonas de intensidad.

### 2.2.1. Zona Muerta.

La zona muerta se debe a la interferencia producida por las vibraciones del cristal; y su presencia en el haz, está determinada por el tiempo de oscilación, o sea, el tiempo requerido por el cristal para generar el pulso de vibración.

### 2.2.2. Zona de Campo Cercano.

El efecto producido por la zona de campo cercano o Zona de Fresnel (ver Figura 2.4), de un haz ultrasónico es, a veces, ignorado o desconocido, teniendo una gran importancia para la validez de los resultados. La energía es irradiada en todas la direcciones, a partir del punto de origen, y la presión acústica varía presentándose con máximos y mínimos; sin embargo, el haz tendría una forma totalmente esferoidal, de no ser por la existencia de los lóbulos laterales o secundarios, que no son mas que zonas de fluctuación de la intensidad, producidas por efecto de los bordes del cristal, según el principio de Huygens (ver Figura 2.5).

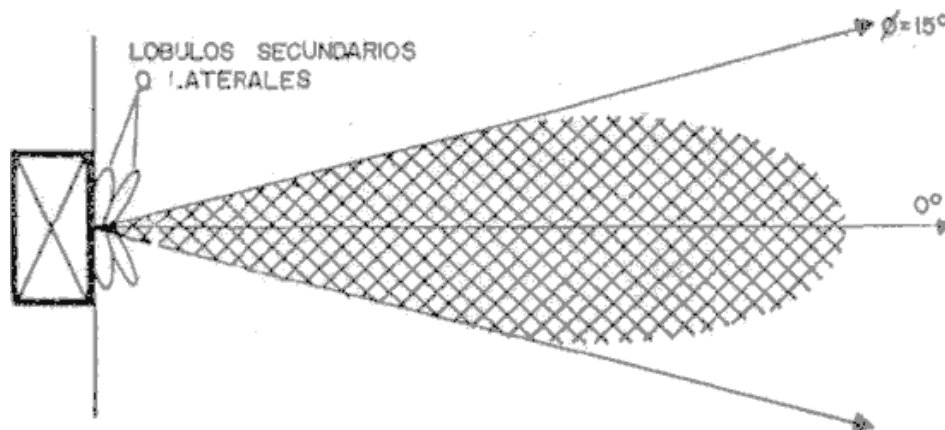


Figura 2.5. Geometría del haz para un palpador con un ángulo de divergencia de  $15^\circ$

La presencia de los lóbulos laterales causa que, para efecto de cálculos, el diámetro del cristal se vea reducido. La reducción se relaciona directamente con diámetro y viene dada por la ecuación;

$$D_{ef} = \sqrt{\frac{4NV}{f}} \quad (2.3)$$

Donde:

$D_{ef}$  : Diámetro efectivo.

N: Longitud de campo cercano.

Para efectos prácticos, el diámetro efectivo del cristal se considera como;

$$D_{ef} = 0,97 D \quad (2.4)$$

Donde;

$D_{ef}$  : Diámetro efectivo del cristal

D: Diámetro nominal del cristal.

La longitud de la Zona de Fresnel, varía de acuerdo con la longitud de onda y las dimensiones del cristal. Para palpadores con cristales circulares, la longitud de campo cercano viene dada por la siguiente ecuación:

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4\lambda} = \frac{0,94D^2 f}{4V} \quad (2.5)$$

Para palpadores con cristales de forma rectangular, donde la diferencia entre los lados no supera el 12 %, la longitud de la zona de campo cercano, será:

$$N = 1,3 \frac{A_{ef}^2 f}{V} \quad (2.6)$$

Donde:

Aef : La mitad de la longitud efectiva del lado mas largo.

En la zona de campo cercano, por efecto de las fluctuaciones de la intensidad, es sumamente difícil lograr la detección de discontinuidades, pues se producirán indicaciones múltiples, y la amplitud de las mismas tendrá grandes variaciones de acuerdo a la distancia desde la superficie reflectora, a la cara del palpador.

### 2.2.3. Zona de Campo Lejano.

Inmediatamente después de la zona de interferencia, o zona de campo cercano, comienza la zona de campo lejano, o Zona de Fraunhofer. En ésta zona, la intensidad o la presión sonora se estabiliza, teniendo mayor magnitud alrededor del eje imaginario del haz (ver Figura 2.4), y va disminuyendo hacia los límites del mismo. De la misma forma, con aumentos de la distancia, desde el límite entre las zonas de campo cercano y lejano, la presión disminuirá exponencialmente por efecto de varios factores productores de pérdidas (ver Figura 2.6). Uno de éstos factores se denomina: divergencia del haz.

La divergencia del haz, se produce por lo que conocemos como el "Factor de Difracción de Fraunhofer", El área cubierta por el haz sonoro, en la zona de campo lejano, aumentará con la distancia, lo que se traducirá como dispersión de la presión acústica. La divergencia haz, o el ángulo de divergencia del haz (ver Figuras 2.5), se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{sen}(\theta) = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (2.8)$$

$$\text{sen}(\theta) = 1,22 \frac{V}{D f} \quad (2.9)$$

Donde;

$\theta$  = La mitad del ángulo de divergencia.

Como se puede observar, el ángulo de divergencia del haz, depende del diámetro del palpador y de la longitud de onda, o lo que es lo mismo, del diámetro y la frecuencia del palpador, y de la velocidad acústica del medio transmisor.

En la zona de campo lejano, la presión acústica sufre disminuciones continuas a lo largo del recorrido del haz ultrasónico, éstas disminuciones pueden ser expresadas de la siguiente manera;

$$P = 2P_0 2 \text{sen} \left[ \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{D^2}{\lambda} + S^2} - S \right] \quad (2.10)$$

Donde;

P : Presión acústica inicial.

Po : Presión acústica atenuada.

D : Diámetro del cristal,

S: Camino sónico.

En ésta expresión, solamente se toma en cuenta los palpadores con cristales circulares, podemos reenumerarla para cubrir todo tipo de palpadores, así:

$$P = P_0 \pi \frac{N}{S} \quad (2.11)$$

$$P = P_0 \frac{S}{\pi \lambda} \quad (2.12)$$

Donde:

S : Superficie del cristal

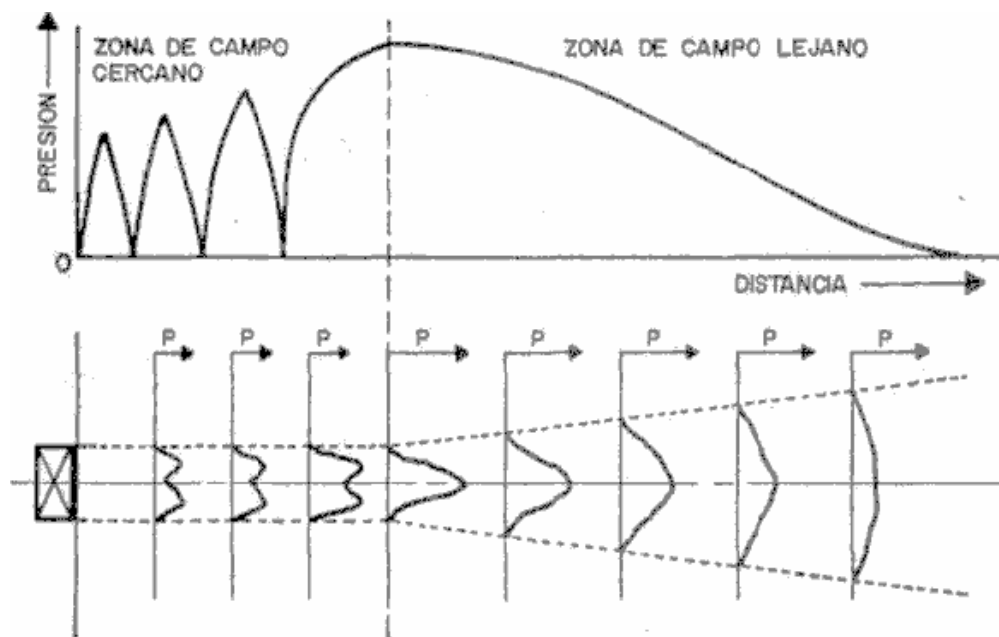


Figura 2.6. Distribución de la presión acústica a lo largo del recorrido del haz.

### 2.3. ATENUACIÓN.

Hasta ahora hemos supuesto un material ideal, en el que la presión acústica se atenúa sólo en virtud de la divergencia de la onda. Según esto, en una onda plana, la presión acústica no se atenúa a lo largo de su propagación, y en una onda esférica, o también en el campo lejano del haz ultrasónico de un palpador, disminuye

inversamente con la distancia a la fuente, desde el punto de vista práctico, para los equipos de presentación A-scan; o dicho de otra manera, en los equipos de presentación con pantalla osciloscópica (en el Capítulo 5 ampliaremos la información al respecto), las variaciones de la presión acústica, causadas por efecto de factores de atenuación, puede ser medida directamente de la pantalla mediante la altura de los ecos de indicación, de la siguiente manera;

$$\alpha S = 20 \text{Log} \left| \frac{P_0}{P} \right| \quad (2.13)$$

$$\alpha S = 20 \text{Log} \left| \frac{H_n}{H_{n+1}} \right| \quad (2.14)$$

Donde:

$\alpha$ : Coeficiente de atenuación

$H_N$ : Altura de eco.

$H_{N+1}$ ; Altura del eco siguiente.

Sin embargo, los materiales sólidos dan lugar a un efecto, mas o menos pronunciado, de atenuación que se traduce en una debilitación del haz ultrasónico, debido a dos causas; la absorción y la dispersión, constituyendo, ambas, la atenuación (denominada también amortiguación o extinción.

### 2.3.1. Absorción.

La absorción, es causada por la conversión de energía mecánica en calor. En materiales que se encuentran a temperaturas superiores al cero absoluto, la vibración de las partículas producirá calor. Con la propagación de la onda en el material, se producirá la vibración de partículas que, excitarán a las siguientes y así sucesivamente; la transmisión de las oscilaciones en el medio producirá éstos

aumentas de temperatura. El efecto de la temperatura, combinada con la estructura policristalina de los materiales, y la orientación al azar de los granos, atenuará la señal ultrasónica.

Se puede explicar la absorción, de forma elemental, como un efecto de frenado de la oscilación de las partículas, lo cual explicaría también por qué una oscilación rápida pierde mas energía que una oscilación lenta. La absorción aumenta, generalmente, con la frecuencia, pero en menor grado que la dispersión.

En conclusión, la absorción pura debilita la energía transmitida o la amplitud del eco, tanto de la discontinuidad como de la pared de Fondo. Para contrarrestar éste efecto, hay que incrementar la amplificación o, también, recurrir al empleo de frecuencias mas bajas.

### 2.3.2. Dispersión.

La dispersión, se produce por la no homogeneidad del material bajo prueba; o sea, la presencia de pequeñas heterogeneidades, que actúan como focos dispersores. Por todas éstas razones, es posible que se produzcan sedales pequeñas, numerosas, que puedan "camuflajear" las indicaciones de discontinuidades reales. Estas pequeñas heterogeneidades, pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- Inclusiones, tales como las inclusiones no metálicas en los aceros, o poros.
- Heterogeneidades genuinas o también naturales, tal como la porosidad en materiales sinterizados.
- Constituyentes precipitados de naturaleza distinta, tal como el grafito en las fundiciones grises.

- Fases en la estructura cristalina de los metales, con diferentes estructuras y composición.
- Aunque la estructura cristalina esté constituida por una sola fase, sí los granos están orientados al azar y poseen distintas propiedades elásticas en diferentes direcciones, constituirán una heterogeneidad para el haz ultrasónico. Esta característica se conoce con el nombre de anisotropía.
- En un material con un tamaño de grano basto, comparado con la longitud de onda, la dispersión se producirá de acuerdo con las siguientes consideraciones de tipo geométrico-óptico; En un límite de grano oblicuo, la onda se desdoblará en varios tipos de ondas reflejadas y transmitidas. Este proceso se repetirá para cada onda en el siguiente límite de grano, de manera que el haz ultrasónico, original, se dividirá constante y sucesivamente en ondas parciales.
- Normalmente, con el margen de frecuencia utilizado en los ensayos no destructivos de materiales, el tamaño de grano es menor que la longitud de onda. Bajo éstas condiciones, se produce la dispersión no por desdoblamiento de tipo geométrico, como el descrito, sino al igual que la luz de un faro se dispersa en las gotas pequeñas de agua de la niebla.

Concluyendo, la dispersión, es mucho mas perturbadora, ya que, en el método de pulso-eco, no sólo reduce la amplitud del eco de la discontinuidad y la del eco de fondo, sino que; además, produce numerosos ecos parásitos con diferentes recorridos, llamados "grama o ruido de la señal", en los que los ecos verdaderos pueden quedar enmascarados. Estas indicaciones -falsas no se pueden contrarrestar aumentando la amplificación, ya que el efecto se incrementaría simultáneamente.

## 2.3.3. Ley de la Atenuación.

Además de estos factores causantes de pérdidas de energía, existen otros tales como; pérdidas de energía en el medio acoplante, dispersión debida a la rugosidad superficial y pérdidas por divergencia del haz,. Todos estos factores, productores de pérdidas, son agrupados como factores de atenuación. La Ley de variación de la Presión Acústica de una onda plana, que decrece exclusivamente por efecto de la atenuación, es una función de carácter exponencial, dada por la siguiente fórmula:

$$P = P_0 e^{-\alpha S} \quad (2.15)$$

$$\alpha S = \text{Ln} \left| \frac{P_0}{P} \right| \quad (\text{Neper}) \quad (2.16)$$

Donde:

1 NEPER = 8,68 DECIBELES

Por definición matemática;

$\text{Ln } x = 2,303 \log x$

$$\alpha S = 20 \text{Log} \left( \frac{P_0}{P} \right) \quad (\text{en dB}) \quad (2.13)$$

## 2.4. PALPADORES

Los palpadores, constituyen básicas del sistema ultrasónico y se parte integrante del mismo, ya que, características y cualidades del haz una de las unidades deben considerar como de ellos dependen las ultrasónico.

Un palpador, es un mecanismo que convierte energía eléctrica en energía mecánica, y energía mecánica en energía eléctrica. Anteriormente se han analizado las características de los cristales, que constituyen los componentes o elementos claves del palpador. Si importante es el diseño del cristal, no lo es menos el del resto de los elementos que integran el palpador, para modificar las características emisoras y receptoras del cristal, en orden a lograr un rendimiento y eficacia máximos para unas características y cualidades deseadas del haz ultrasónico. Así como el diseco del oscilador se apoya en estudios teóricos, el del palpador responde, mas bien, a resultados de carácter empírico.

Se dispone de una diversidad de tipos de palpadores, en los que se apoyan, primordial mente, el gran número de técnicas operatorias actualmente aplicables. En éste orden de ideas, se pueden clasificar los palpadores en dos grandes grupos; Palpadores de contacto directo, y Palpadores de inmersión.

### 2.4.1. Palpadores de Contacto Directo.

Los palpadores de contacto directo, como su mismo nombre lo indica, se aplican directamente a la superficie de la muestra, con cierta presión, interponiendo en la mayor parte de los ensayos, un medio de acoplamiento. En el Capítulo 3, se profundizará en cuanto a los tipos de materiales de acople, su efecto y selección, Según la dirección de propagación del haz, con relación a la superficie de la muestra, éstos palpadores de contacto se clasifican, a su vez, en; Palpadores de incidencia normal, y Palpadores angulares.

#### 2.4.1.1. Palpadores de Incidencia Normal

Se emplean en los equipos que operan por los métodos de pulso-eco y de resonancia, y se aplican a problemas de defectología, metrología y caracterización. La mayor parte de éstos palpadores llevan incorporados osciladores diseñados para emitir ondas longitudinales.

Según el número de cristales que llevan incorporados, se consideran los siguientes tipos; Palpadores de cristal único, y Palpadores "Emisor-Receptor". Además, hay que considerar aquellos disecados para ensayas a temperaturas elevadas.

#### 2.4.1.1.1. Palpadores de Cristal Único.

En la Figura 2.7, se observa un corte esquemático de la constitución de un palpador de éste tipo. Además del cristal piezoeléctrico, consta de la cubierta o montura metálica, que protege el conjunto, el amortiguador del cristal, los electrodos y conductores eléctricos, el conector coaxial y la zapata de plástico.

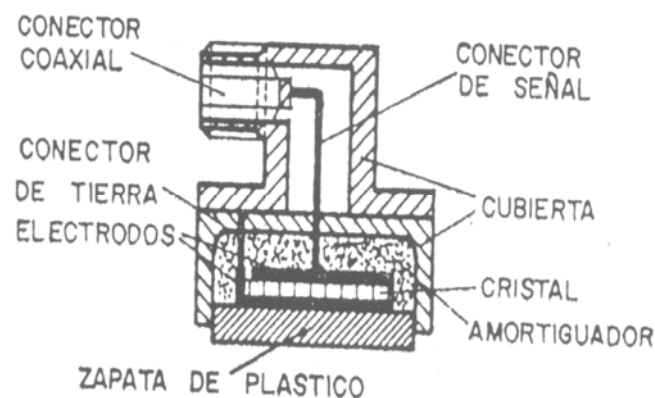


Figura 2.7. Corte de un palpador normal.

El amortiguador del cristal, es un elemento indispensable en los palpadores empleados en los equipos que operan por el método de pulso-eco, Su finalidad se concreta en:

1. Reducir el tiempo de oscilación del cristal,
2. Absorber las ondas que pudieran interferir en la señal de la pantalla,
3. Soportar, mecánicamente, el cristal piezoeléctrico.

La duración del impulso eléctrico influye decisivamente en la anchura de la zona muerta y en el poder de resolución. Un palpador insuficientemente amortiguado puede impedir la detección de discontinuidades situadas cerca de la superficie de exploración y, a la vez, dificultar la detección de discontinuidades próximas entre sí. Para que el cristal no oscile libremente, es necesario que el amortiguador tenga una impedancia acústica elevada, lo que podría lograrse con materiales duros como los metales o la porcelana. Sin embargo, el amortiguador debe presentar, además, un elevado coeficiente de atenuación, para que sea capaz de absorber las ondas radiadas en sentido contrario, ya que, si se transmitiesen libremente, darían lugar a una amplia zona de perturbaciones a continuación de la señal inicial, con el consiguiente ensanchamiento de la zona muerta. Se precisa, pues, encontrar una solución de compromiso, de manera que se logre una impedancia acústica elevada, junto a un coeficiente de atenuación, también, alto. Para ello, se recurre a materiales compuestos basados en resinas sintéticas endurecibles a los que se incorporan sustancias pulverulentas, tales como dióxido de manganeso, minio, limaduras metálicas, etc. Estas adiciones contribuyen, por su mayor densidad, a elevar la impedancia acústica de la resina, si bien el coeficiente de atenuación resultante, puede no ser suficiente. Para aumentarlo, se recurre a mecanizar la superficie libre del amortiguador en forma de dientes de sierra.

Si la unión entre el cristal piezoeléctrico y el amortiguador no está bien realizada, puede reducir, considerablemente, el efecto de éste. Para lograr rendimientos mayores, la capa de adhesivo debe ser lo mas fina posible o, mejor aún, eliminarse totalmente vulcanizando o colando la mezcla amortiguadora, directamente sobre la superficie del cristal. El amortiguador, tal como se ha descrito, reduce, fundamental mente, las oscilaciones del cristal en el sentido del espesor, Pero, de hecho, también se producen oscilaciones radiales que se deben suprimir, en particular si se trata de cristales de titanato de bario. Esto se puede lograr aplicando el amortiguador de manera que los bordes del cristal queden introducidos en él, o bien, cuando se emplean cristales gruesos (frecuencias de 1 MHz o menos),

mecanizando ranuras cruzadas en el cristal que luego se rellenan con material amortiguador.

Si el amortiguamiento producido es bajo, el impulso ultrasónico es largo y, en consecuencia, el espectro de frecuencia es de banda estrecha, estando situado cerca de la frecuencia de resonancia del cristal. Si por el contrario, el amortiguamiento es alto, los impulsos obtenidos serán cortos y el espectro de frecuencia será de banda ancha. Estos impulsos cortos, ofrecen un gran poder de resolución, permitiendo obtener medidas muy precisas de tiempos de recorrido (ver Figura 2.8).

El contacto eléctrico se realiza, en el cuarzo y en los cristales cerámicos, mediante una suspensión de plata conductora extendida sobre las caras del cristal, que se seca a uno 500 °C y soldándose, a continuación, los electrodos con soldadura de plata. En el caso del sulfato de litio, la metalización de las caras del cristal se puede hacer por evaporación de plata al vacío, o pintando las superficies con suspensión de plata conductora de secado. Los electrodos se adhieren mediante un cemento El titanato de bario requiere, como el sulfato cuidados especiales para evitar que, por elevada temperatura, se despolarice y pierda su características piezoeléctricas.

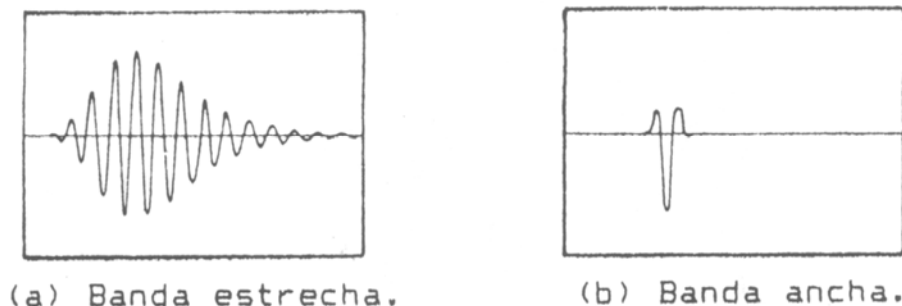


Figura 2.8: Espectros de -Frecuencia del impulso ultrasónico.

En los palpadores de contacto directo, se hace indispensable proteger el cristal contra el desgaste, por medio de películas o suelas protectoras. A éste fin, se utilizan películas finas de plástico, cuya resistencia al desgaste se incrementa por adición de polvo de sustancias duras, como corindón o carborundum, que se pegan al cristal mediante una capa fina de adhesivo. También se emplean láminas de plástico o de caucho blando, de 0,2 a 0,3 mm de espesor, fáciles de intercambiar cuando se deterioran. En éste caso, el espacio entre el cristal y la suela protectora, se debe llenar de acoplante. Sin embargo, actualmente, se tiende a cubrir el cristal con láminas muy finas de cuarzo o zafiro, muy resistentes al desgaste, químicamente inertes, y con una influencia despreciable sobre la sensibilidad del palpador.

### 2.4.1.1.2. Palpadores "Emisor-Receptor

Hemos visto los problemas que plantea la zona muerta, en cuanto a que impide, o dificulta, la detección de discontinuidades próximas a la superficie de exploración. Así, por ejemplo, en palpadores sin suela protectora, la zona muerta oscila entre 4 y 5 mm (en acero), por lo que no será posible examinar muestras de ese espesor o menor. Con la zapata protectora, la zona muerta puede rebasar, dependiendo de la frecuencia, los 10 mm, por lo que las limitaciones son mayores. Para evitar éstos inconvenientes, se han diseñado los palpadores tipo "E-R", cuyo esquema aparece en la Figura 2.9. Constan de dos cristales perfectamente aislados eléctrica y acústicamente por medio de una lámina de corcho o policloruro de vinilo. Uno de los cristales actúa como emisor y el otro como receptor. Ambos cristales se montan, con una cierta inclinación, sobre una columna de plástico que produce cierto efecto focalizador, de forma que concentra el haz ultrasónico, para conseguir máxima sensibilidad en las proximidades de la superficie.

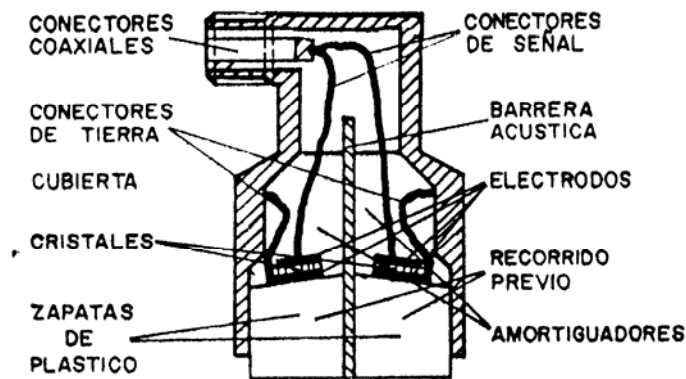


Figura 2.9. Corte de un palpador "E-R".

Mediante éste artificio se consigue que, por efecto del trayecto previo en plástico, la indicación de la señal de emisión quede muy separada de la indicación del eco de la discontinuidad. La nueva posición cero de la escala de distancias, queda señalada por la indicación, muy débil, procedente del eco de la superficie de la muestra.

La columna de plástico se construye a partir de un material de bajo coeficiente de atenuación, con una impedancia acústica tal, que produzca una buena transmisión en la muestra a través del medio de acoplamiento correspondiente. Si la diferencia de impedancia es muy elevada, se producirá una reflexión fuerte en la superficie, con la consiguiente pérdida de energía y reforzamiento de la indicación del eco de la interfase o superficie de exploración. En la Figura 2.10, se representa la sensibilidad de un palpador "E-R" en función de la distancia o profundidad de la discontinuidad. Se comprueba que la altura de la indicación del eco, decrece rápidamente a ambos lados de la distancia óptima, que, para éste palpador, se sitúa hacia los 12 mm. La posición de la zona de máxima sensibilidad es función , primordialmente, de la inclinación de los cristales y de la frecuencia.

Mediante éste tipo de palpador, y con equipos adecuados, se pueden medir espesores y detectar discontinuidades a partir de una profundidad equivalente a una longitud de onda.

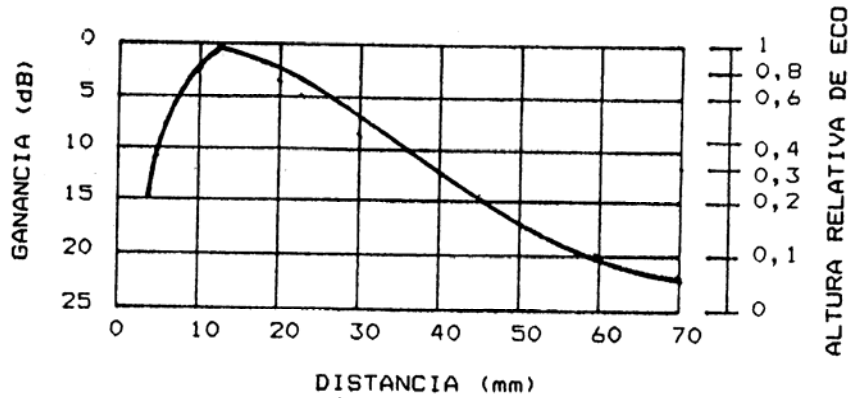


Figura 2.10. Curva de sensibilidad de "E-R" con profundidad de foco de 15 mm

Otra de las ventajas que ofrece este tipo de palpador, es la posibilidad de utilizar los cristales mas adecuados? es decir, se puede usar titanato de bario como emisor, y sulfato de litio como receptor. Esta solución exigiría, a cambio» que las conexiones de ambos cristales no fuesen intercambiables, con objeto de evitar la posibilidad de error al conectar el palpador, Como los palpadores "E-R" se encuentran focalizados, presentan cierta longitud o intervalo de trabajo "TB", así como la distancia óptima, o lo que podríamos llamar distancia focal "F" (ver Figura 2.11).

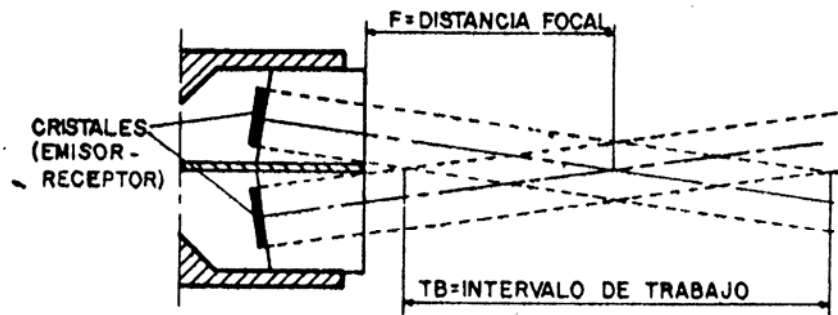


Figura 2.11. Zona de trabajo de un palpador "E-R"

En la Figura distancia focal 2.11, se presenta, esquemáticamente, la distancia focal y el intervalo de trabajo. Con aumentos del ángulo de inclinación de los cristales, la distancia focal disminuirá, por lo que la capacidad de defectos cercanos a la

superficie será mayor, pero disminuirán; tanto el intervalo de trabajo, como la profundidad máxima de exploración.

#### 2.4.1.1.3. Palpadores para Altas Temperaturas.

Los palpadores convencionales no se pueden emplear a temperaturas fuera del intervalo comprendido entre  $-20$  y  $80$  °C, debido a que los adhesivos convencionales, empleados para unir el cristal al amortiguador, se pueden dañar y anular su efecto.

El propio cristal se puede afectar con la temperatura, especialmente si es de sulfato de litio o de titanato de bario, con puntos de Curie de  $75$  y  $115$  °C, respectivamente.

Para ensayos a temperaturas elevadas, es preciso utilizar cuarzo o metaniobato de plomo, cuyos puntos de Curie están por encima de los  $500$  °C. Como amortiguador y adhesivo, se utilizan resinas de moldeo, capaces de soportar temperaturas hasta  $350$  °C. A temperaturas superiores, resulta muy difícil conseguir una amortiguación adecuada, por lo que es preciso interponer, entre el palpador y la muestra de ensayo, un adaptador que ser refrigerado.

#### 2.4.1.2. Palpadores Angulares.

En el Capítulo 3, se estudiarán las Leyes que rigen la reflexión y refracción de las ondas ultrasónicas al incidir, angularmente, en una superficie límite entre dos medios.

Los palpadores angulares, de contacto directo, consisten, en esencia, en un oscilador de ondas longitudinales aplicado a una de las caras de un prisma de plástico (generalmente de perspex), ver Figura 2.12, tallado con un ángulo de incidencia adecuado al ángulo de refracción, o de penetración, que se desea para un material dado de la muestra de ensayo.

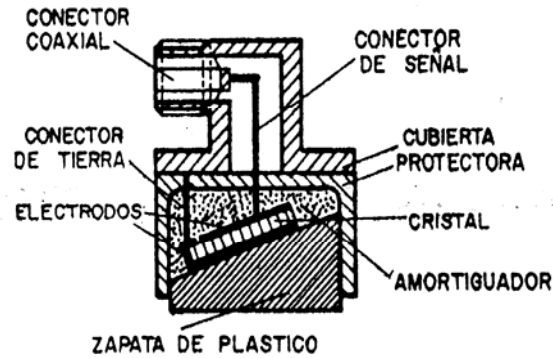


Figura 2.12. Corte de un palpador angular

#### 2.4.1.2.1. Elementos del Palpador.

Los elementos componentes de los palpadores angulares se pueden observar en la Figura 2.12, así; el cristal piezoeléctrico se monta sobre un prisma de plástico por intermedio de una capa muy fina de adhesivo. La sustancia amortiguadora se utiliza, en éstos palpadores, para evitar que las reflexiones internas en el prisma vuelvan al cristal. Suele consistir, en resinas o caucho vulcanizado a los que se añaden cargas apropiadas (dióxido de manganeso, corcho, limaduras metálicas, etc.), para elevar su coeficiente de atenuación. Además, se suele recurrir a mecanizar en diente de sierra, la superficie del prisma, en contacto con el amortiguador, lo que contribuye a la dispersión de las ondas reflejadas. En ensayos con altos niveles de ganancia, las perturbaciones provocadas por éstas reflexiones pueden no llegar a eliminarse totalmente, especialmente cuando existan ondas que vuelvan directamente al cristal, como consecuencia de la rugosidad superficial de la superficie de exploración.

El conjunto va montado en un protector metálico, provisto de la correspondiente conexión coaxial.

#### 2.4.1.2-2. Dimensionado del Prisma.

Las dimensiones del prisma vendrán dadas, en principio, en función del ángulo de incidencia. Cuanto mayor sea el ángulo de incidencia, mayor deberá ser la longitud del prisma y su anchura, a fin de que la sección del haz ultrasónico quede inscrita en la cara de contacto del prisma con la muestra. También, la altura del prisma aumenta por razones puramente geométricas, al tener que mantener constante la superficie donde va adosado el cristal oscilador.

La longitud teórica del prisma, se puede reducir, determinando la distribución de la presión acústica en la cara de contacto del prisma. Otra deducción de interés, es la observada en relación a las presiones acústicas. Hay que tener presente que los materiales empleados en los prismas son bastante absorbentes frente, por ejemplo, a los materiales metálicos, por lo que éste fenómeno es más acusado que en éstos.

En consecuencia, el punto de la cara activa del prisma, donde la presión acústica es máxima, se debe considerar como el punto de salida del haz ultrasónico. Este punto se debe determinar cuidadosamente para poder deducir, por ejemplo, la posición de una discontinuidad ya que, a partir de ese punto, se toman las distancias de recorrido del impulso ultrasónico; pero, además, se utiliza para determinar el ángulo real de refracción del palpador .

Se deduce, pues, la necesidad de llegar a una solución de compromiso en la elección del material del prisma y de la frecuencia idónea para la finalidad del ensayo.

#### 2.4.1.2.3. Materiales de los Prismas.

Anteriormente, se ha mencionado el perspex (metacrilato de metilo), como material de los prismas. De hecho, es el más utilizado y permite construir prismas que, para piezas de aluminio, tienen una eficacia de hasta el 60 %., debido a la pequeña

diferencia de impedancias acústicas entre ambos medios. Por ésta razón, sería preferible utilizar prismas de plomo para los ensayos en muestras de acero, pero la capa líquida necesaria para asegurar el contacto acústico, entre la muestra y el palpador, hace que esta ventaja se anule prácticamente. Se han intentado otras soluciones, como mezclas de plástico con cargas metálicas o láminas alternadas de resina epoxi y metales. Sin embargo, éstas posibles mejoras no han encontrado, hasta el momento, aplicación práctica, por problemas de costos o de uniformidad en la fabricación de palpadores con estos prismas.

Con resultados similares al perspex, se puede utilizar el transpex (poliestireno) ambos materiales dan resultados satisfactorios en aluminio y acero. Sin embargo, si se trata de ensayos en muestras de cobre o de fundición gris, no es posible cubrir, con los plásticos citados, la gama de ángulos de refracción hasta 90°. En el Capítulo 3, estudiaremos los modos de propagación de ondas ultrasónicas.

Los palpadores angulares, de contacto directo, se emplean, preferencialmente, en los equipos pulso - eco y, ocasionalmente, por transmisión y se aplican, casi exclusivamente, a problemas de defectología.

### 2.4.1.3. Palpadores de Ondas de Superficie,

Para generar ondas de superficie se recurre, principalmente, a palpadores angulares de contacto, cuyo ángulo de incidencia se calcula de forma que sea ligeramente mayor que el ángulo límite de las ondas transversales en el material del objeto bajo ensayo (ver Apartado 3.3.3.2., capítulo 3).

Las características de diseño descritas en el apartado anterior sobre palpadores angulares de ondas transversales, son válidas en toda su extensión para palpadores angulares de ondas de superficie.

También se pueden generar con un palpador de contacto, de incidencia normal. Con cristal de Cuarzo de corte en el eje Y, empleando un líquido como medio de acoplamiento, o por contacto sobre una generatriz de una muestra cilíndrica (contacto rectilíneo) Con oscilador de ondas longitudinales, pero sin medio de acoplamiento, si bien ambos procedimientos son poco empleados en la práctica.

En los ensayos por contacto directo, la gama de frecuencias se encuentra limitada por razones de espesor y fragilidad de los cristales piezoeléctricos. Comúnmente se trabaja con frecuencias entre 2 y 5 MHz, pero pueden alcanzarse frecuencias de hasta 10 MHz.

### 2.4.2. Palpadores para inmersión.

Los ensayos por inmersión, bien sumergiendo la muestra en un tanque, o mediante el empleo de palpadores de inmersión local, son particularmente indicados cuando se precisa realizar exploraciones de gran volumen y extensión, examinar lotes de gran número de muestras o muestras de formas relativamente complejas.

Como la transmisión del ultrasonido, desde el palpador a la muestra, se efectúa a través de una columna de líquido, es decir, sin contacto directo, presión ni rozamiento entre el palpador y la muestra, esto permite;

1. Eliminar los riesgos de rotura y desgaste del cristal oscilador, por lo que no se precisa de una zapata protectora
2. Emplear frecuencias más elevadas (cristales con espesores más finos) que las comúnmente utilizadas con palpadores de contacto directo. Ya que el riesgo de rotura es mínimo.

3. Propagar el haz ultrasónico en la muestra, con el ángulo de penetración deseado, bien con ondas longitudinales o transversales, mediante la variación en la inclinación del palpador , respecto a la superficie de la muestra.
4. Aumentar la velocidad del ensayo, al no haber contacto o rozamiento, por lo que los ensayos por inmersión están especialmente indicados para ensayos automáticos o semiautomáticos.

Los palpadores de inmersión, se emplean en los equipos que operan por los métodos de pulso eco, transmisión y resonancia, y se aplican, preferentemente, a problemas de defectología y metrología. Ahora bien, dada su posibilidad de operar a frecuencias mucho mas elevadas que los palpadores de contacto, su aplicación a problemas de caracterización es también muy indicada.

No cabe hacer la distinción entre palpadores de incidencia normal y de incidencia angular, ya que ambas se logran, naturalmente, con un mismo palpador de inmersión (ver Figura 2.13).

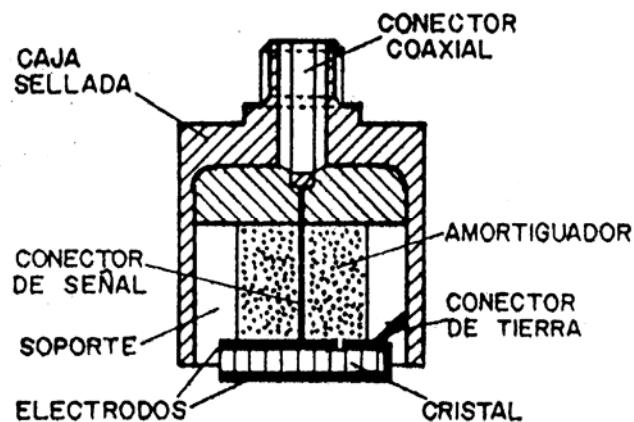


Figura 2.13. Corte de un palpador utilizado para ensayo con el método de inmersión.

Con ángulos de incidencia ligeramente superiores a los ángulos límites de las ondas transversales, se obtienen ondas de superficie, las cuales sufren una atenuación fuerte, sí la muestra está sumergida. Igualmente, se pueden obtener ondas de Lamb, las cuales sufren también una atenuación fuerte, pero, en ambos casos, esto se puede subsanar utilizando palpadores de inmersión local, dispuestos de manera que, el liquido de acoplamiento no se extienda sobre la superficie de exploración. El diseño de un palpador de inmersión, es similar al de un palpador de contacto directo de incidencia normal. Ahora bien, una de las cualidades que se cuidan es su total estanqueidad. No precisan de suela protectora, pero, dado que se diseñan generalmente para frecuencias elevadas (de hasta 25 MHz) , suelen acompañarse de una funda protectora, de la que se prescinde en el momento de su aplicación.

En el Apéndice B, se dan algunas características, en cuanto a nomenclatura se refiere, de los palpadores ultrasónicos fabricados por la Compañía KRAUTKRAMER.

### 2.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS PALPADORES.

En el diseño de palpadores ultrasónicos, deben ser contempladas dos características básicas: resolución y sensibilidad.

#### 2.5.1. Resolución.

La resolución, o el poder de resolución es la habilidad que presentan para separar o identificar las señales de indicación de varios reflectores diferentes y cercanos, en lo que a profundidad se refiere.

#### 2.5.2. Sensibilidad.

La sensibilidad de un palpador, es la habilidad para Detectar .discontinuidades del menor tamaño posible, podemos referirnos, entonces, al Tamaño Crítico de un

Defecto", característica que debe ser suministrada por el fabricante como dato de calibración.

Estas dos características, están referidas directamente a otros dos parámetros, .. que son: factor de calidad y Ancho de banda. Estos parámetros están relacionados de la siguiente manera;

$$Q = \frac{f_c}{f_2 - f_1} \quad (2.17)$$

Donde:

Q =Factor de calidad del elemento

$f_c$  = Frecuencia de control del elemento

$f_1$  = La frecuencia por debajo de  $f_c$  en la cual la amplitud del sonido cae hasta un 70%. de la amplitud en  $f_c$ .

$f_2$  = La frecuencia por arriba de  $f_c$  en la cual la amplitud del sonido cae hasta un 70%. de la amplitud en  $f_c$ .

$f_2 - f_1$  = Ancho de banda

Esta fórmula, es una aproximación, pues se deriva de la base de que la lamina piezoeléctrica oscila tal como una masa suspendida por un resorte. En el caso de palpadores con gran amortiguación, la aproximación es mayor.

Con incrementos de "Q", la sensibilidad será mayor y la resolución disminuirá . Los elementos piezoeléctricos antes de ser montados en el palpador, tienen un coeficiente "Q" superior a 25,000. Los palpadores usados en ultrasonido, tienen un coeficiente "Q" que varía en un rango de 1 a 10.

## 2.6. SELECCIÓN DE PALPADORES.

Sin tener en cuenta los palpadores especiales, utilizados en ensayos específicos, tales como: palpadores focalizados, palpadores con oscilación libre del cristal, palpadores súperamortiguados, palpadores puntuales, palpadores periscópicos, etc. Existe un gran número de palpadores, los cuales conviene saber elegir para una aplicación determinada. Una primera elección se realiza a la hora de hacer distinción entre palpadores para detectar reflectores, y palpadores que determinen con precisión la profundidad y tamaño de éste posible defecto.

La detección de reflectores, los cuales pueden ocupar diferentes posiciones y tener varias formas, requiere que el haz sonoro del palpador cubra la máxima superficie de la pieza examinada, por lo que son aconsejables palpadores de relativamente baja frecuencia, que poseen una divergencia angular bastante grande. Estos palpadores, por el contrario, nos proporcionan una baja sensibilidad, por lo cual los reflectores, que se encontrarán, tendrán un tamaño relativamente grande. Si elegimos un haz sonoro estrecho con alta intensidad, podremos detectar reflectores muy pequeños en la pieza, por lo que se corre el riesgo de "saltar" algún defecto.

Una vez detectado un reflector en el material, el siguiente paso es determinar su posición exacta, así como su tamaño. Para esto conviene elegir un palpador cuyo haz sufra la máxima distorsión al llegar a éste reflector, y que el haz incida sobre el reflector lo más perpendicularmente posible, con la finalidad de que nos refleje la mayor cantidad de sonido hacia el palpador.

Consecuentemente y según lo expuesto anteriormente, un palpador que sea el apropiado para detectar discontinuidades o reflectores, no tiene porque serlo para determinar la posición y el tamaño del reflector. Lo contrario puede también suceder.

Para el examen de materiales, cuya estructura metalográfica sea calificada como grano fino, se ha encontrado que las frecuencias de ensayo más apropiadas son

las comprendidas entre 2 y 5 MHz, teniendo una razonable sensibilidad, junto con un buen poder resolutivo a grandes distancias. Para el acero, las longitudes de onda van de 1 a 3 milímetros, por lo que, en condiciones favorables (teóricamente), se pueden detectar discontinuidades de 0,9 mm y mayores, tamaños que generalmente empiezan a ser tratados como defectos.

En materiales con estructuras bastas (grano grueso), conviene utilizar frecuencias bajas o muy bajas, del orden de 0,5 a 2 MHz, pudiéndose incluso evaluar materiales con un coeficiente de atenuación alto, tal y como pueden ser fundiciones, plásticos, etc.

Las frecuencias comprendidas entre 5 y 10 MHz, proporcionan haces de muy alta sensibilidad, pudiéndose detectar reflectores extremadamente pequeños, por lo que deben ser utilizadas en materiales cuya estructura metalográfica tenga un tamaño de grano sumamente fino.

Hay que tener en cuenta que, con el aumento de la frecuencia, y por consiguiente, disminución de la longitud de onda, la profundidad de penetración del haz disminuye, por lo que en caso de desear detectar reflectores a gran distancia conviene utilizar frecuencias mas bajas, o un palpador de mayor diámetro, cuya divergencia angular sea menor y, por tanto, tener mayor penetración.

Si los posibles reflectores se encuentran a poca distancia, es recomendable utilizar palpadores cuyo campo cercano sea corto, por lo que entre palpadores que trabajen a una misma frecuencia, conviene utilizar el de menor diámetro.

El poder de resolución y la sensibilidad, dependen en gran medida de la frecuencia utilizada (a mayor frecuencia, mayor poder de resolución), pero también hay que tener en cuenta el tipo de cristal que se emplea. Generalmente, se pueden utilizar los palpadores de titanato de bario, que junto con un buen poder resolutivo poseen una sensibilidad muy aceptable. Si se desea una gran sensibilidad se pueden

## **PALPADORES Y GENERACIÓN DEL ULTRASONIDO**

utilizar palpadores con cristales especiales, que pueden ser de sulfato de litio o metaborato de plomo.

## CAPITULO 3

### PROPAGACION DE ONDAS Y SUS CARACTERISTICAS EN MEDIOS DIFERENTES.

La verificación de materiales por ultrasonido, utiliza la propagación del sonido, tanto en sólidos como en líquidos, para realizar un control no destructivo. El ultrasonido no se diferencia en nada esencial del sonido audible e incluso sus características son perfectamente comparables con las de cualquier onda mecánica.

Una onda mecánica, se transmite por la oscilación de las partículas del medio a través del cual se propaga. Todo cuerpo o materia que se encuentra en equilibrio elástico, con todas sus partículas equilibradas por fuerzas elásticas, entrará en vibración cuando una fuerza exterior rompa el equilibrio en que se encuentran sus partículas.

Al aplicar una fuerza exterior, las partículas superficiales transmitirán la energía recibida a las partículas vecinas; éstas, a su vez, a las partículas siguientes, y así sucesivamente, produciéndose la propagación de la energía exterior a través de todas las partículas del medio. En otras palabras, las partículas no viajan a través del material desde el origen o la fuente sonora, solamente transmiten la energía producida, que es la que causa la vibración de las partículas; progresivamente avanzará a través del material.

### 3.1. MODOS DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS.

Las ondas ultrasónicas pueden ser propagadas de diversos modos, los modos de propagación mas comunes son; Ondas Longitudinales o de Compresión, Ondas Transversales o de Cizalladura, Ondas Superficiales o de Rayleigh y otros varios modos agrupados bajo la denominación de Ondas de Lamb

#### 3.1.1. Ondas Longitudinales o de Compresión.

El sonido que nosotros percibimos es propagado mediante ondas longitudinales, que están formadas por zonas donde, en unas la distancia entre las partículas es mínima, en otras la distancia aumenta. Recordemos el ejemplo presentado en la Figura 1.1? las áreas en que la distancia es menor, representan las zonas de compresión y las áreas donde la distancia es mayor, representan las zonas de descompresión (ver Figura 3.1a). En éste modo de onda, las partículas vibran paralelamente a la dirección de propagación, razón por la cual se denominan ondas longitudinales, de presión o de compresión (ver Figura 3.1b)

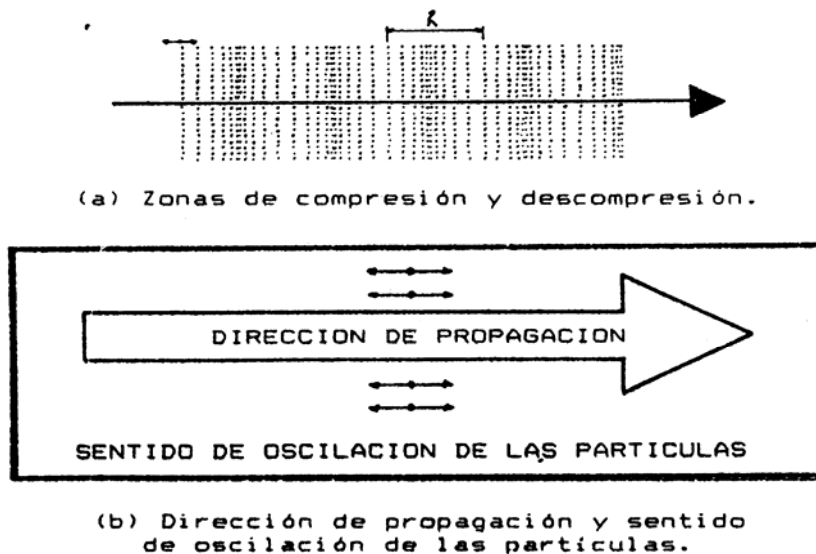


Figura 3.1.- Características de las ondas longitudinales

La propagación del sonido en ésta forma, es causada por el vínculo elástico existente entre las partículas, donde cada una de ellas al vibrar, empuja o hala las partículas adyacentes, éstas a su vez transmiten la energía a las partículas vecinas, y así sucesivamente.

Este modo de propagación de onda es el mas comúnmente usado en ensayos ultrasónicos, debido a que es el mas sencillo de generar y detectar. Casi toda la energía sonora utilizada, en ensayos ultrasónicos se origina en forma de ondas longitudinales que luego son convertidas a los otros modos. Las ondas de compresión son las únicas que pueden ser propagadas en materiales sólidos, líquidos y gaseosos.

La velocidad acústica de las ondas longitudinales, puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3.1)$$

Donde:

$V_L$ : Velocidad acústica de las ondas longitudinales.

E : Módulo de elasticidad.

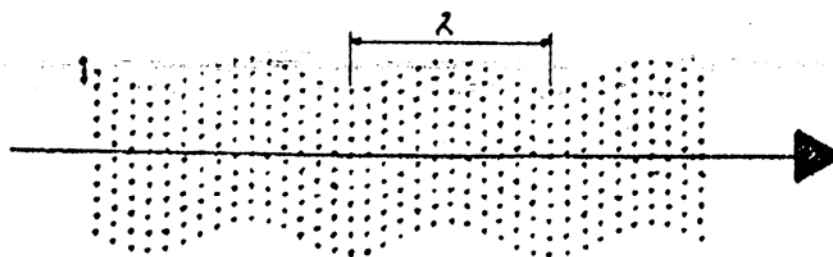
P : Coeficiente de Poisson.

$\rho$  : Densidad.

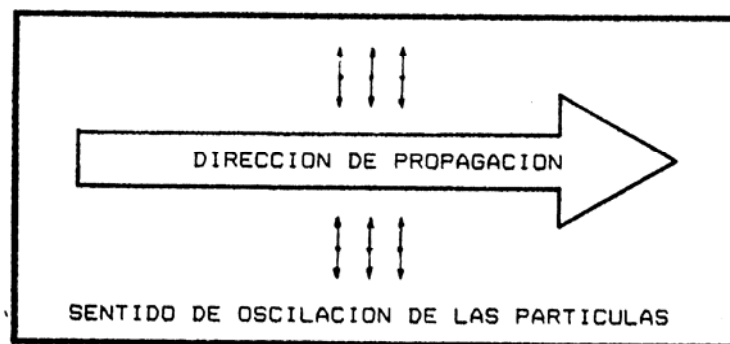
### 3.1.2. Ondas Transversales o de Cizalladura.

Las ondas de cizalladura, o de corte, deben su nombre a que el sentido de oscilación de las partículas es transversal a la dirección de propagación (ver Figura 3.2). Para que éstas ondas viajen a través del material, es necesario que las partículas exhiban suficiente atracción entre sí, con el fin de que pueda propagarse la onda.

Los gases y los líquidos son prácticamente incapaces de transmitir ondas transversales, ya que sus moléculas apenas ofrecen resistencia al deslizamiento transversal y, por tanto, no existirán vínculos elásticos que las ligen a su posición cero. Esta circunstancia coincide con la propiedad de tener un Módulo de Rigidez igual a cero, a excepción de los líquidos altamente viscosos, que poseen cierto "Módulo Complejo de Rigidez" y que, por consiguiente te, pueden propagar ondas transversales, aunque fuertemente amortiguadas. En los casos prácticos de ensayos de materiales, sólo pueden alcanzar distancias apreciables en los cuerpos sólidos. En otras palabras, las ondas transversales solamente pueden propagarse en sólidos.



(a) Propagación de las ondas.



(b) Dirección de propagación y sentido de oscilación de las partículas.

Figura. 3.2 Características de las ondas Transversales.

La velocidad de propagación de las ondas de corte, también puede ser calculada. Para tal fin, se aplica la siguiente ecuación:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (3.2)$$

Que puede resumirse en:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.3)$$

Donde;

$V_T$  ; Velocidad acústica de las ondas transversales.

G: Módulo de rigidez.

Es importante hacer notar, que las velocidades acústicas de las ondas longitudinales y transversales cumplen una relación constante y directa, y es;

$$V_T = \frac{5}{9} V_L \quad (3.4)$$

Por ésta razón, las ondas transversales tienen longitudes de onda menores que las de las ondas longitudinales, a una misma frecuencia. Esto implica que las ondas de corte poseen mayor sensibilidad a reflectores pequeños, y en consecuencia, es más fácil que se produzca la dispersión en el material.

### 3.1.3. Ondas de Superficie o de Rayleigh.

Las ondas de superficie se consideran como un tipo especial de ondas transversales, pueden ser comparadas con un cuerpo que flota en la superficie del agua, dado que viajan en la superficie del material y lo penetran solamente una profundidad equivalente a una longitud de onda.

La cantidad de energía que poseen las Ondas de Rayleigh, a una profundidad de una longitud de onda, es aproximadamente un venticincoavo ( $1/25$ ) de la energía en la superficie. Las ondas de Rayleigh difieren del oleaje pues, en las ondas que se generan en la superficie del agua la oscilación de la partículas es circular en las ondas superficiales es elíptica (ver Figura 3.3).

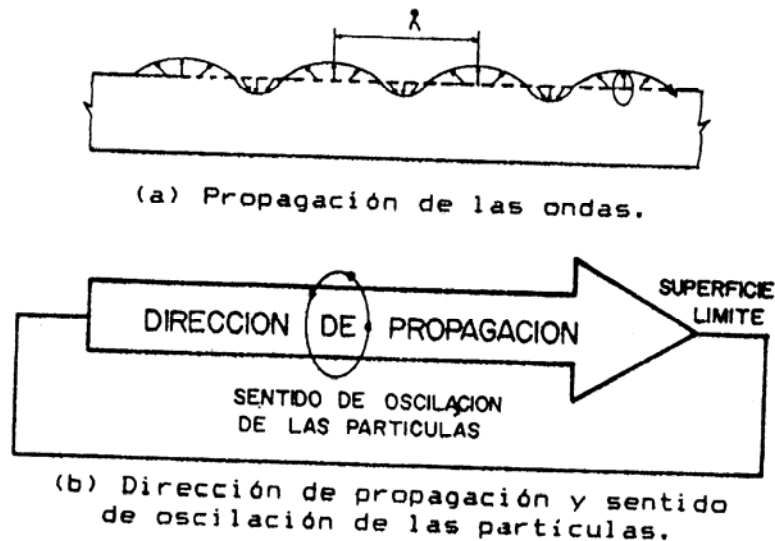


Figura 3.3. Características de superficie de las ondas

Su velocidad de propagación, como en el caso de las ondas longitudinales y transversales, es independiente de la frecuencia y, por tanto, es una constante del material, con el estado de tensiones de la superficie. Así por ejemplo las tensiones de tracción aumentan la velocidad, mientras que las de compresión la disminuyen. Sin embargo, la velocidad de las ondas de superficie puede ser calculada por medio de la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{0,87 + 1,12 \mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (3.5)$$

Donde

$V_s$ : Velocidad acústica de las ondas superficiales.

La velocidad acústica de las ondas de Rayleigh, cumple una relación directa con la velocidad de las ondas longitudinales, que es:

$$V_s = \frac{55}{108} V_l \quad (3.6)$$

Lo que es lo mismo que:

$$V_s = \frac{11}{12} V_t \quad (3.7)$$

Estas ondas fueron descritas por primera vez por Lord Rayleigh en 1,880, y son de gran interés en estudios sismológicos, pues los movimientos telúricos se generan y propagan con éste tipo de onda. Al igual que las ondas de corte, las ondas superficiales solamente pueden propagarse en sólidos.

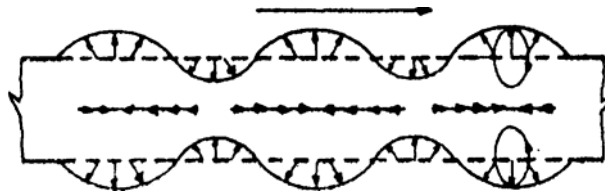
#### 3.1.4. Ondas de Lamb.

Cuando los ensayos ultrasónicos son llevados a cabo en materiales sumamente delgados, o sea, cuando el espesores del misma orden que la longitud de onda, se producen varios tipos de onda de chapa. Ocurren vibraciones complejas de las partículas, en todo el espesor del material que modifican las ondas de superficie. La velocidad de las ondas de Lamb depende no solamente de las características del material bajo ensayo, sino también del espesor, de la frecuencia de la onda y del tipo de onda.

En una chapa se puede producir, en primer lugar, una onda puramente transversal cuya dirección de propagación sea paralela a la superficie. En el caso especial de una chapa adherida a un cuerpo sólido diferente, como es un plaqueado o un recubrimiento superficial, esta onda puramente transversal, se denomina "onda de Love". Sin embargo, para el ensayo de materiales, éste tipo de onda no ha alcanzado gran importancia, en contraste con las ondas de Lamb. Estas ondas de Lamb presentan, siempre, componentes de la oscilación de partículas en ángulo recto a la superficie.

Las ondas de Lamb se propagan de varios modos, en cuanto al sentido de vibración de las partículas, pero se pueden agrupar en dos modos básicos

- Onda Simétrica o de Dilatación.
- Onda Asimétrica o de Flexión.



(a) Propagación de las ondas.



(b) Dirección de propagación y sentido de oscilación de las partículas.

Figura 3.4. Características de las ondas Lamb simétricas

En el caso de las ondas simétrica, las partículas de la zona media o fibra neutra, se comportan según oscilaciones puramente longitudinales y, en el caso de las ondas asimétricas según oscilaciones puramente transversales. Las otras partículas oscilan, en ambos tipos de onda, elípticamente. Para cada tipo existe un número arbitrario de armónicos, que se caracterizan por presentar mas de una fibra neutra.

En los casos anteriores se ha supuesto que la chapa es limitada en dos direcciones. Si además, está limitada en su ancho, se llega al caso de las barras, cuya sección puede ser circular o cuadrada. En éstas, se pueden propagar ondas del tipo de dilatación, conocidas como ondas de barra. Además, también se pueden propagar en éstos productos, una gran variedad de onda de flexión, de torsión y radiales junto con sus armónicos si bien, hasta ahora, se han encontrado serias dificultades en su aplicación en los ensayos de materiales.

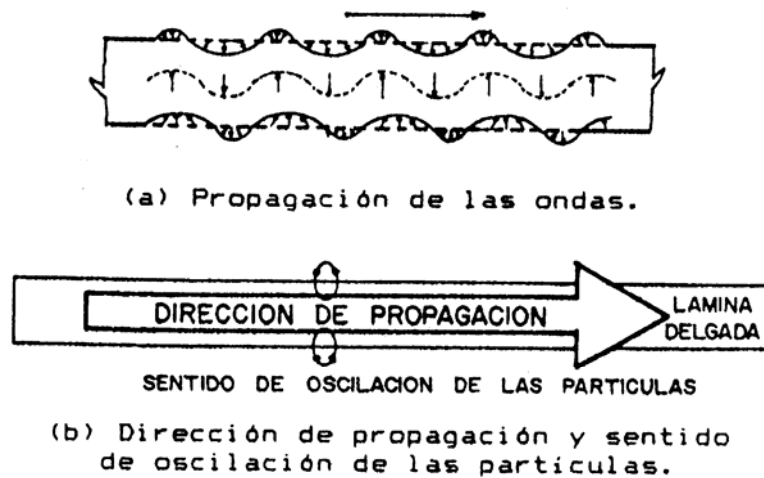


Figura 3.5. Características de las ondas de Lamb asimétricas

### 3.2. TRANSFERENCIA DE ENERGÍA DE UN MEDIO A OTRO.

La propagación de una onda se caracteriza por el transporte de energía y no de masa. La Ley de la energía nos dice que ésta no se crea ni se destruye, sólo se transforma. Esto implica que, cuando a un cuerpo o materia que se encuentra en estado de equilibrio elástico se le aplica una cierta cantidad de energía, las partículas superficiales transmitirán la energía recibida a las partículas vecinas y éstas, a su vez, a las siguientes, produciéndose así, la propagación de la energía exterior a través de todas las partículas del medio.

Entonces en la interfase entre dos materiales (en el caso de ultrasonido se deben tomar en cuenta las interfases sólido/ sólido y líquido /sólido), ocurrirá que la energía incidente sobre un cuerpo no será transmitida en su totalidad, sino que una cierta porción será reflejada por la superficie límite. Entonces, la energía incidente será igual a la suma de la energía transmitida mas la energía reflejada:

$$E_i = E_t + E_r \quad (3.8)$$

Donde:

$E_i$  : Energía incidente.

$E_t$  : Energía transmitida.

$E_r$  : Energía reflejada.

### 3.2.1. Impedancia Acústica.

La impedancia acústica se define como la resistencia que presenta un material a la vibración de sus partículas por efecto de una onda. Puede ser calculada mediante dos ecuaciones diferentes. La primera, la define como el producto de la densidad del material por su velocidad acústica, así :

$$Z = \rho \cdot v \quad (3.9)$$

Donde:

Z : Impedancia acústica.

V : velocidad acústica.

$\rho$  : Densidad.

La segunda, la define como la relación existente entre la presión acústica y la velocidad máxima de vibración, así ;

$$Z = \frac{P}{V} \quad (3.10)$$

Donde:

v : Velocidad instantánea de vibración de la partícula.

La impedancia acústica (también denominada impedancia de la onda acústica o impedancia acústica específica) es la resistencia que se opone a la vibración de la

onda. Si un medio posee una impedancia baja, sus elementos de masa vibrarán a gran velocidad, con sólo un pequeño cambio de presión acústica; es decir, el medio ofrecerá poca resistencia a las deformaciones elásticas causadas por la onda. Si, por el contrario, la impedancia es elevada, sus elementos de masa vibrarán lentamente, aunque la presión acústica sea elevada, ya que el medio ofrece gran resistencia a las deformaciones elásticas

### 3.2.2. Comportamiento de las Ondas Ultrasónicas en Superficies Límites

El análisis de una onda en un medio ilimitado, sólo es posible teóricamente, ya que, en la práctica, cualquier material presenta una superficie límite o contorno, con lo que la propagación de la onda se altera. Si el material está rodeado de un espacio vacío, no se puede transmitir ningún tipo de onda acústica, ya que ello requeriría la presencia de partículas de material. En un contorno libre de éste tipo, la onda retorna de algún modo. Si la superficie límite es suave, según un fenómeno de reflexión, si rugosa, según un fenómeno de dispersión. En éste último caso, las irregularidades de la superficie se deben medir en términos de longitud de onda.

Sabemos que el límite entre dos los materiales se denomina interfase, y que en la misma ocurre como se dijo anteriormente, la energía incidente es igual a la suma de las energías transmitida y reflejada, tal y como se muestra en la figura 3.6

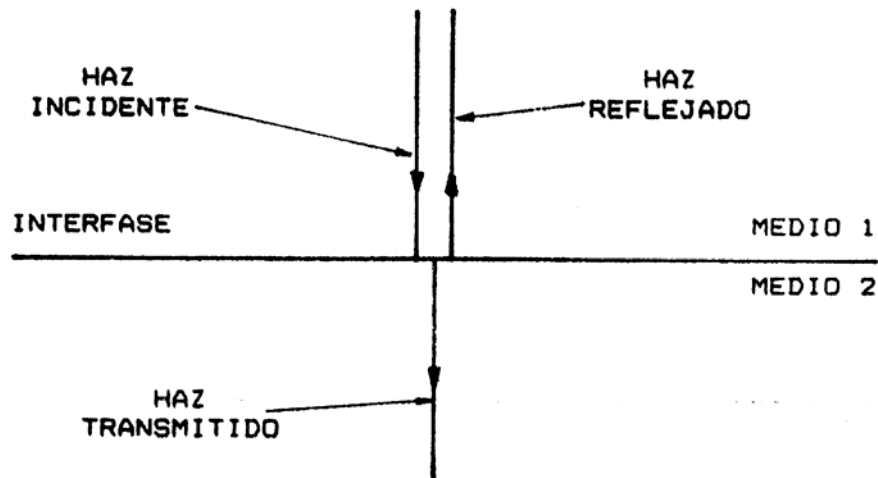


Figura 3.6. Diagrama ilustrativo de la transmisión y reflexión de un haz ultrasónico con incidencia normal

Las cantidades de energía transmitida y reflejada, pueden ser calculadas por medio de la intensidad del haz ultrasónico, y se denominan coeficientes de transmisión y reflexión,

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.11)$$

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.12)$$

Donde:

T : Coeficiente de transmisión de la intensidad del haz.

R : Coeficiente de reflexión de la intensidad del haz .

I : Intensidad del haz sonoro incidente.

$I_t$  : Intensidad del haz sonoro transmitido.

$I_r$  : Intensidad del haz sonoro reflejado.

$Z_1$  : Impedancia acústica del medio 1.

$Z_2$  : Impedancia acústica del medio 2,

El balance de energía, correspondiente al haz ultrasónico mostrado en la Figura 3.6, expresado en función de la intensidad, es:

$$I_i = I_R + I_T \quad (3.13)$$

La relación existente, entre los coeficientes de reflexión y transmisión de la energía o la intensidad, será:

$$R + T = 1 \quad (3.14)$$

De la misma forma, es posible obtener valores de transmisión y reflexión de la presión acústica, así:

$$T' = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

Donde:

$T'$  : Coeficiente de transmisión de la presión acústica.

$R'$  : Coeficiente de reflexión de la presión acústica.

$P_i$  : Presión acústica incidente.

$P_t$  : Presión acústica transmitida.

$P_r$  : Presión acústica reflejada.

El balance de la presión acústica, en contraste con el de la energía o el de la intensidad, será:

$$P_i + P_r = P_t \quad (3.17)$$

y de la misma forma, la relación entre los coeficientes de reflexión y transmisión de la presión acústica, será;

$$1+R' = T' \quad (3.18)$$

### 3. 3. INCIDENCIA ANGULAR.

Un haz sonoro puede ser proyectado, tanto transversalmente como oblicuamente, hacia la interfase o superficie límite entre dos materiales. Cuando la incidencia del haz es transversal a la superficie límite, se producen la transmisión y la reflexión, tal y como se observa en la Figura 3,6. Este caso se conoce como incidencia de haz normal.

Sin embargo, cuando la incidencia es oblicua (el ángulo de incidencia se encuentra entre cero y 90°), ocurren los fenómenos de reflexión y refracción, los cuales están definidos por la Ley de Snell.

#### 3.3.1. Leyes de Reflexión y Refracción:

La Ley de Willebrord Snell of Leyden, también conocida como la Ley de la Óptica, se cumple en lo que respecta a la transmisión del sonido. La Ley de Snell establece que :

El seno del ángulo de incidencia es igual al seno del ángulo de reflexión, o sea;

$$\text{Sen}_i \alpha = \text{sen}_r \alpha$$

o bien

$$\alpha_i = \alpha_r$$

Donde;

$\alpha_i$  : Ángulo de incidencia,

$\alpha_r$  : Ángulo de reflexión.

La relación entre los senos de los ángulos de incidencia y refracción, es directamente proporcional a la relación entre las velocidades acústicas de los medios en interfase, según la ecuación:

$$\frac{\text{Sen}\alpha_i}{\text{Sen}\beta} = \frac{V_1}{V_2}$$

Donde:

$\alpha_i$  : Ángulo de refracción,

$V_1$  : Velocidad acústica del medio 1.

$V_2$  : Velocidad acústica del medio 2.

En la Figura 3.7 se presenta gráficamente el caso anterior, mostrando la dirección de los haces ultrasónicos con sus ángulos de inclinación, con respecto a la perpendicular al plano, según la ecuación 3.19.

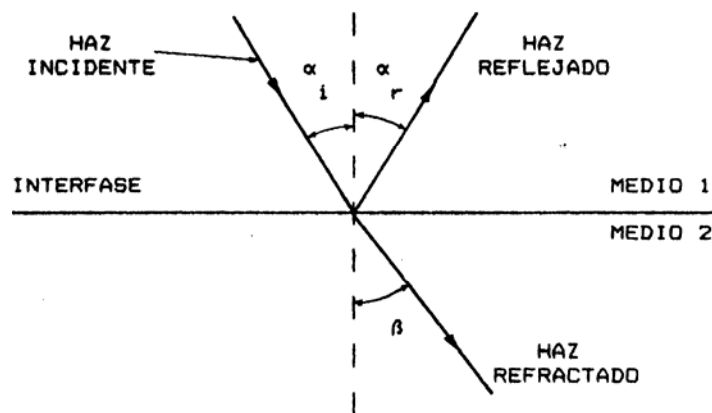


Figura 3.7. Representación gráfica de un haz con incidencia angular

Como podemos observar en la Figura, la relación entre el haz incidente y el haz reflejado es como se indicó anteriormente. Esto puede deducirse, según Ley de Snell1, de la siguiente manera;

$$\frac{\text{sen } \alpha_i}{V_1} = \frac{\text{sen } \alpha_r}{V_1}$$

$$V_i = V_1$$

$$\alpha_i = \alpha_r$$

### 3.3.2. Modos de Conversión.

Cuando la incidencia del haz ultrasónico es angular, además de producirse la reflexión y refracción del haz, se producen modificaciones en las características de la onda. Estas variaciones son conocidas como "Modos de Conversión", y significan que un haz longitudinal con incidencia angular, al hacer contacto con la superficie límite, producirá tres haces; un haz longitudinal reflejado, un haz longitudinal refractado y un haz transversal refractado. (ver Figura 3.8).

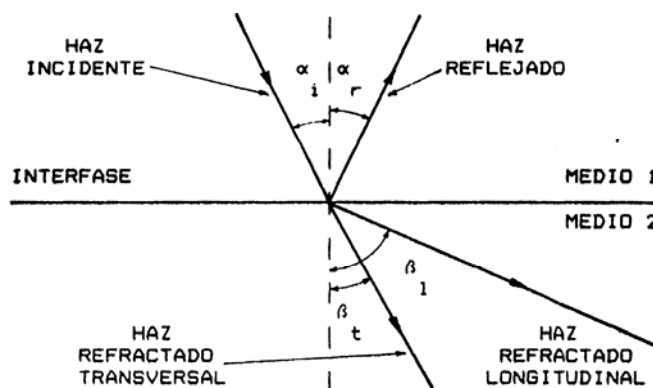


Figura 3.8. Modos de conversión.

Sin embargo, aplicando la Ley de Snell, podemos conocer con exactitud la dirección de los haces refractados (siempre y cuando la transmisión se realice entre dos medios diferentes), tanto del longitudinal como del transversal, por medio de la siguiente relación:

$$\frac{\text{sen } \alpha_i}{V_{L1}} = \frac{\text{sen } \alpha_r}{V_{L1}} = \frac{\text{sen } \beta_1}{V_{L2}} = \frac{\text{sen } \beta_t}{V_{t2}} \quad (3.20)$$

Donde:

$\alpha_i$ : Ángulo de incidencia.

$\alpha_r$ : Ángulo de reflexión.

$\beta_1$ : Ángulo de refracción de la onda longitudinal.

$\beta_t$ : Ángulo de refracción de la onda transversal.

$V_{L1}$ : Velocidad acústica de onda longitudinal del medio 1.

$V_{L2}$ : Velocidad acústica de onda longitudinal del medio 2.

$V_{t2}$ : Velocidad acústica de onda transversal del medio 2.

El haz incidente en el medio 1, alcanza la superficie límite con el medio 2 y se desdobla en una onda reflejada y dos ondas transmitidas, un haz refractado longitudinal y un haz refractado transversal. Suponiendo que el medio 2, posee un espesor específico "e", el resultado será una secuencia de reflexiones en ambas direcciones en el medio 2, de manera que, a cada lado, se produce una secuencia de ondas que abandonan el medio 2, superponiéndose. Si la onda incidente es de longitud ilimitada, las ondas individuales se debilitarán, dando lugar a interferencias.

La presión acústica global no puede ser calculada por adiciones sucesivas de la presión acústica de cada onda individual desdoblada. El cálculo de los

coeficientes de reflexión y transmisión de la presión acústica, según Bergmann, es el siguiente;

$$R' = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \operatorname{sen}^2 \frac{2 \cdot \pi \cdot e}{\lambda}}{1 + \frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \operatorname{sen}^2 \frac{2 \cdot \pi \cdot e}{\lambda}}} \quad (3.21)$$

$$T' = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \operatorname{sen}^2 \frac{2 \cdot \pi \cdot e}{\lambda}}} \quad (3.22)$$

Donde:

$e$  : Espesor del medio 2.

$m$  :  $Z_1 / Z_2$

### 3.3.3. Ángulos críticos.

Los ángulos críticos son aquellos que producen tanto la onda longitudinal refractada (primer ángulo crítico), como la onda transversal refractada (segundo ángulo crítico), en la superficie límite o interfase.

#### 3.3.3.1. Primer Ángulo Crítico.

En el caso presentado en 1 a Figura 3.8, podemos observar que en el medio 2 se encuentran dos haces ultrasónicos, uno longitudinal y otro transversal. En la realidad, es imprescindible que solamente un haz ultrasónico se propague en la pieza a ensayar, de manera de no crear confusión entre las sedales detectadas en la pantalla, por lo que debe buscarse la forma de eliminar uno de los dos haces.

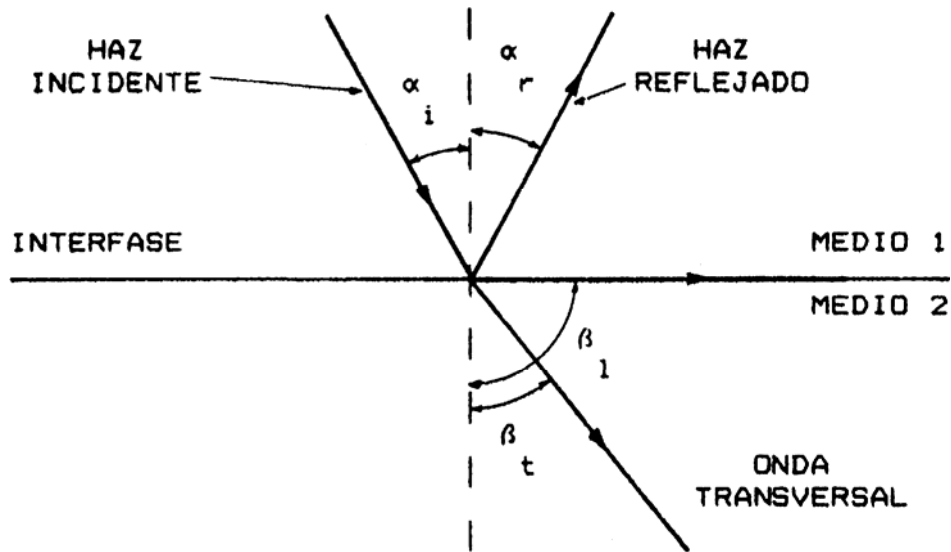


Figura 3.9. Primer ángulo crítico.

A medida que aumenta el valor del ángulo de incidencia ( $\alpha$  incidente), automáticamente aumentarán los valores de los ángulos de reflexión y refracción, según la Ley de Snell, hasta que el haz longitudinal ( $\beta$  longitudinal) se propague en la superficie límite. El ángulo de incidencia ( $\alpha$  incidente), para el cual se cumple que el ángulo de refracción del haz longitudinal ( $\beta$  longitudinal) sea igual a  $90^\circ$ , se conoce como Primer Ángulo Crítico.

### 3.3.3.2. Segundo Ángulo Crítico.

Con aumentos progresivos (el ángulo de incidencia por encima del primer ángulo crítico), llegaremos al caso en que el haz transversal se propague también en la superficie límite. Este ángulo es conocido como segundo ángulo crítico (ver Figura 3.10).

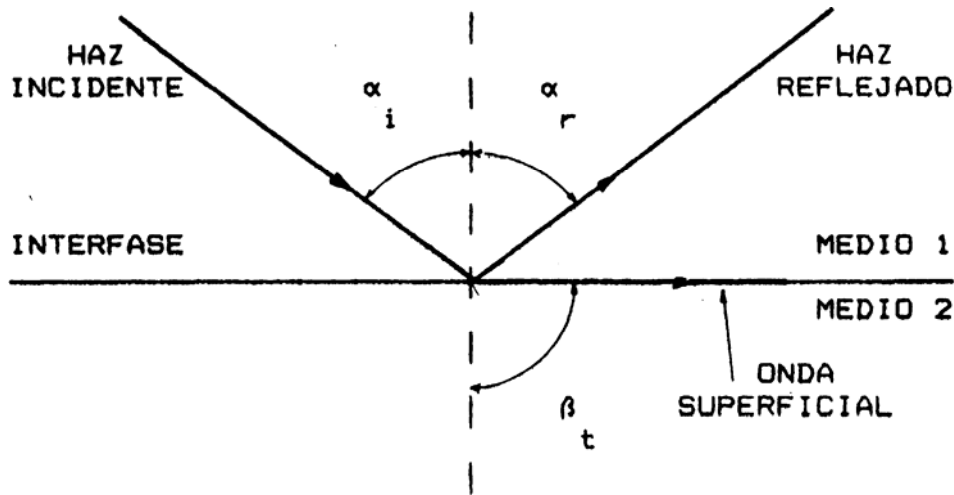


Figura 3.10. Segundo ángulo crítico.

Esta es la forma en que se desarrollan las ondas de superficie. Es de hacer notar que, para valores del ángulo de incidencia que se encuentren entre los dos ángulos críticos, solamente se transmitirán ondas transversales, lo que hace posible la eliminación de uno de los haces (longitudinal) en el segundo medio.

#### 3.3.4. Difracción.

Cuando hablamos de reflexión y refracción, asumimos que las ondas ultrasónicas viajan con trayectoria recta. Sin embargo, una propiedad importante que poseen las ondas, tanto sonoras como luminosas, es la habilidad o la tendencia a rodear (obviar) obstáculos con dimensiones comparables a la longitud de onda.

La difracción puede ocurrir, por ejemplo, cuando en el camino a recorrer por una onda, se encuentran inclusiones o poros muy pequeños; una porción de la energía tiende a rodear éste defecto, de forma que la señal de deflexión es sumamente pequeña y no se observa. Otro caso de difracción, es cuando ocurre el fenómeno en el que la onda pasa muy cerca de una superficie límite irregular la onda tiene la tendencia a bordear ésta interfase, y de ésta forma no se detecta ninguna señal.

### 3.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TRANSMISIÓN DEL ULTRASONIDO A TRAVÉS DE LA SUPERFICIE DE EXPLORACIÓN.

Entre los factores que influyen en la transmisión del ultrasonido, a través de la superficie de exploración, se pueden mencionar los siguientes;

- Medio de acoplamiento,
- Condición de la superficie y acabado superficial,
- Curvatura superficial,
- Frecuencia y diámetro del cristal.

#### 3.4.1. Efecto del Medio de Acoplamiento.

El propósito de la utilización de acoplantes en ultrasonido, es el de proveer una trayectoria con baja existencia a la transmisión del sonido, entre el palpador y la pieza de ensayo. El aire es un mal transmisor de la energía ultrasónica (altas frecuencias). Adicionalmente, su impedancia acústica es muy diferente a la de los materiales sólidos, por lo que, para frecuencias del orden de 200 kHz, estimando que el espesor de la película de aire fuera aproximadamente 0,00001 mm, se obtendría una transmisión en el aluminio del orden del 80 %. de la presión acústica incidente. Para este orden de frecuencias, la transmisión en el acero sería aún del orden del 30 %. de la presión acústica incidente. Pero para las frecuencias normales de ensayo (2 a 10 MHz), y espesores de película de aire del orden de 0,0001 mm, la transmisión, en ambos casos, sería nula. Tan sólo una pequeña capa de un material acústicamente transmisor, es suficiente para proporcionar una buena transmisión de la onda.

#### 3.4.1.1. Tipos de Acoplantes.

Algunos materiales acoplantes, son agua, multicelulosa, algunos tipos de aceites, glicerina, grasas en base a petróleo, grasas en base a silicona, pulpa de papel, mercurio, plastilina y muchas otras pastas. Las gomas suaves pueden transmitir el sonido y son denominadas: acoplantes secos. Otros métodos de acople, tales como la unión por presión de dos materiales sólidos, dan excelentes resultados: si aplicamos presión hasta 1.000 Psi (libras por pulgada cuadrada), aproximadamente, podemos lograr una excelente transmisión de la onda.

#### 3.4.1.2. Selección del Acoplante.

Los acoplantes son seleccionados de acuerdo con varios factores, que son;

- Costo,
- Disponibilidad,
- Viscosidad,
- Adherencia a la superficie,
- Reacciones químicas posibles,
- Requerimientos de limpieza después del ensayo.

##### 3.4.1.2.1. Acoplantes para Contacto Directo.

Adicionalmente, para ensayos por el método de contacto directo, la elección del agente acoplante depende también, de otras características de la pieza de ensayo, que son:

- Condición superficial,
- Temperatura superficial,
- Inclinación de la superficie.

Basándonos en los factores de selección expuestos, podemos clasificar, según sus características básicas, a los materiales acoplantes mencionados previamente.

El agua es el de menor precio y mayor disponibilidad de todos los acoplantes. Sin embargo, tiene una baja viscosidad, por lo que no es recomendable su uso en condiciones donde pueda escurrirse fácilmente, o cercano a conexiones eléctricas. Tiende a reaccionar desfavorablemente con muchos materiales metálicos.

Sin embargo, combinada con algunos otros productos, puede proporcionar buenos resultados.

Los medios de acoplamiento acústicamente conductores, generalmente empleados son: las grasas y los aceites minerales de diversos grados de viscosidad. Cuanto mayor es la rugosidad superficial, mayor debe ser la viscosidad del aceite. Aun así, debe prestarse cuidado a la aparición de sedales parásitas, debidas a la generación de ondas superficiales. Su viscosidad varía drásticamente con la temperatura, y algunos son inflamables. La atenuación producida por la grasas, especialmente las fabricadas en base a silicona, es, frecuentemente, muy alta, por lo que pierden efectividad como acoplantes.

La glicerina es acústicamente muy conductora, pero presenta el inconveniente de no mojar bien la superficie de las muestras,. Pese a ello, se aplica con mucha frecuencia, especialmente en superficies de acabado fino. Es el acoplante de mas fácil remoción, pero su viscosidad varía rápidamente con la temperatura .La pulpa de papel y 1 as pastas, en general, presentan propiedades deseables. Estas pueden ser mezcladas con casi todo el resto de los acoplantes y mantendrán una textura seca, son fáciles de remover, pero tienden a endurecer muy rápidamente.

El mercurio y las amalgamas son los mejores medios de transmisión acústica para su aplicación en muestras metálicas; si bien, son caros, peligrosos y de aplicación engorrosa, por lo que raramente se emplean.

Como la adherencia no es buena en superficies rugosas; al explorar paredes verticales y bóvedas, se recurre al empleo de una mezcla gelatinosa de grasa y petróleo, o bien, de una pasta de metilcelulosa y agua con la adición de glicerina, para evitar que se seque, y de fosfato trisódico, para reducir la acción corrosiva.

La plastilina impregnada en aceite es el acoplante con mejores características de adherencia, presentando además la ventaja de que, en superficies rugosas, elimina en gran parte las sedales parásitas. Para ensayos en caliente, se pueden emplear aceites de alto punto de ebullición, superior a 300 °C, o silicona, si bien ésta es cara. También, se puede realizar la exploración en caliente, acoplando al palpador, un adaptador de material plástico resistente a altas temperaturas y emplear agentes de contacto tales como grasas y siliconas especiales, con lo cual se puede realizar ensayos de muy corta duración hasta temperaturas de 550 C, teniendo la precaución de enfriar el palpador y el adaptador entre dos aplicaciones consecutivas

#### 3.4.1.2.2. Acoplantes para Inmersión,

En los ensayos de inmersión, el medio de acoplamiento es el propio líquido que rodea la muestra. Estos ensayos se realizan, bien sumergiendo la muestra, ensayo por inmersión en tanque; bien produciendo un flujo continuo sobre la misma, ensayo por inmersión local; de forma que entre el palpador y la muestra quede una película de líquido continua. Si se emplea agua como medio de transmisión, se añade a la misma un agente humectante, para evitar, además, la formación de burbujas, especialmente en la superficie del palpador, las cuales interferirían con la transmisión del haz ultrasónico, dan frecuencia, en vez de agua se emplea kerosén que evita la oxidación de la muestra de ensayo.

### 3.4.2, Efecto de la Condición y del Acabado Superficial.

Los efectos producidos por la condición de la superficie y el acabado superficial, pueden ser clasificados en dos grupos:

- Efecto de la condición superficial,
- Efecto del acabado superficial.

#### 3.4.2.1. Efecto de la Condición Superficial.

Entre los efectos debidos a la condición de la superficie de exploración, hay que distinguir, en primer lugar, los ocasionados por la cascarilla de óxido, o por los recubrimientos (resultado de procesos tales como tratamientos térmicos, termomecánicos y protectivos), cuya falta de adherencia puede dar lugar a una merma sensible la transmisión de la presión acústica incidente, debido al efecto de la película de aire interpuesta entre la cascarilla o el recubrimiento y el material base. Por ello, conviene preparar la superficie de exploración, bien con lija, desbaste, muela, o chorro de arena (sand blasting), etc;.

#### 3.4.2.2. Efecto del Acabado Superficial.

En cuanto a los efectos propios de la rugosidad superficial, se pueden concretar los siguientes:

- Disminución de la transmisión de la presión acústica,
- Aumento de la anchura de la zona muerta,
- Cambios en la dirección del haz ultrasónico y generación de ondas parásitas superficiales.

La disminución de la transmisión de la presión acústica, depende de la rugosidad media, del índice de refracción y de la frecuencia.

Supongamos el caso de una superficie metálica rugosa, tal como se muestra en la Figura 3.11, sobre la que incide un frente de ondas continuas, a través de un agente de contacto líquido. Estas se propagarán a distinta velocidad, según que encuentren un vale o una cresta de la superficie rugosa.

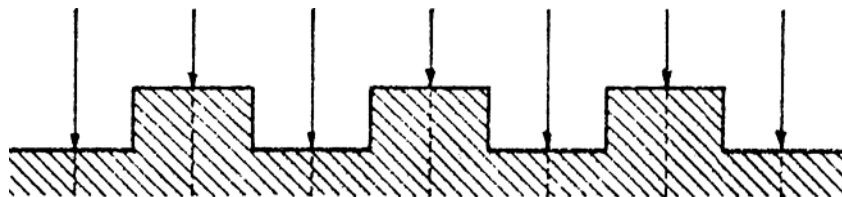


Figura 3.11. Efecto de la rugosidad superficial.

Supongamos que la diferencia de altura entre los valles y las crestas mostradas en la Figura 3.11, es del orden de la mitad de la longitud de onda ( $\lambda/2$ ). En los valles, la velocidad de propagación será más lenta que en las crestas, debido a la menor velocidad de propagación en el líquido que en el metal, por lo que las ondas, después de atravesar la capa rugosa, se encontrarán en distinta fase.

Cuando la diferencia entre el tiempo empleado por las ondas en recorrer un valle y una cresta sea igual a la mitad del período de oscilación, se producirá un fenómeno de interferencia en el plano de las ondas, una vez sobrepasada la superficie rugosa, dando una presión acústica resultante que puede llegar a anularse.

La rugosidad media para la cual se produce ésta interferencia, que anula la presión acústica de las ondas transmitidas, se denomina rugosidad crítica y viene dada por las expresiones:

$$R_c = \frac{\lambda_2 \cdot v_1}{2 (v_2 - v_1)} \quad (3.23)$$

$$R_c = \frac{\lambda_1 \cdot v_2}{2 (v_2 - v_1)} \quad (3.24)$$

Donde:

$R_c$  : Rugosidad critica.

$\lambda_1$  : Longitud de onda en el líquido.

$\lambda_2$  : Longitud de onda en el metal.

$v_1$  : velocidad de propagación del haz ultrasónico en el líquido,

$v_2$  : Velocidad de propagación del haz ultrasónico en el metal.

Se obtienen efectos similares, cuando la rugosidad media de la superficie alcanza valores iguales a los distintos múltiplos de la rugosidad crítica. Lo anteriormente expuesto corresponde al caso ideal de propagación de ondas continuas, y de un perfil de la rugosidad de la superficie en forma de onda cuadrada. Figura 3.11, lejos de los casos comúnmente encontrados en la práctica, en los que, si bien la presión acústica transmitida no llegará a anularse, experimentará, no obstante, una merma considerable, es decir, una disminución de su coeficiente de transmisión, específicamente en el caso de un mecanizado basto de la muestra.

El aumento de la anchura de la zona muerta se presenta, fundamentalmente, en los ensayos por inmersión de muestras con superficies rugosas, y es debido, principalmente, a tres factores;

- Incidencia angular de los rayos periféricos del haz sobre la superficie de la muestra, que se traduce en una conversión de las ondas longitudinales en ondas transversales y superficiales.
- Diferencia en el tiempo de recorrido en el agua a través de la distancia cresta-valle de la superficie rugosa.
- Reflexión de los lóbulos laterales del haz ultrasónico en las rugosidades de la superficie de exploración.

La reflexión de los lóbulos laterales, como consecuencia de la rugosidad superficial» produce, además, al dispersar las ondas, cambios en la direccionalidad del haz y generación de ondas parásitas superficiales, con la consiguiente aparición de interferencias que aumentan la anchura de la zona muerta. Así, por ejemplo, cuando la distancia entre crestas y valles de una superficie rugosa es superior a la décima parte de la longitud de onda, se puede producir una dispersión lateral que incrementa el riesgo de reflexiones laterales, dando lugar a indicaciones que pueden simular la presencia de discontinuidades.

#### 3.4.3. Efecto de la Curvatura Superficial.

La curvatura de la superficie de exploración, produce fenómenos de cambios en la divergencia del haz ultrasónico, bien aumentándola o disminuyéndola (focalización), y fenómenos de conversión de ondas que dan lugar a indicaciones falsas. Estos fenómenos dependen del sentido de la curvatura de la superficie de exploración y de que el ensayo se realice con incidencia normal o con incidencia angular.

#### 3.4.3.1. Incidencia Normal.

La curvatura de la superficie de exploración disminuye la sensibilidad, siendo, a éste respecto, las superficies convexas menos críticas que las cóncavas. En los ensayos por contacto, sobre una superficie convexa mediante un palpador plano, el área de contacto será muy reducida, lo que producirá un fuerte aumento del ángulo de divergencia del haz en el interior de la muestra y, en consecuencia, una disminución de la sensibilidad.

En una superficie de exploración cóncava, si el palpador es plano, la sensibilidad disminuirá fuertemente, ya que el centro del palpador no hará, nunca, contacto con la superficie de la muestra. Con radios de curvatura relativamente pequeños, será preciso recurrir a dispositivos especiales, tales como el constituido por un adaptador en combinación con un mosaico de cristales, conjunto que actúa como una lente convergente compensando así, el efecto de la curvatura.

#### 3.4.3.2. Incidencia Angular.

La incidencia angular de un haz ultrasónico sobre una superficie convexa, puede producir fenómenos de transformación de ondas que dan lugar a indicaciones falsas. Así, por ejemplo, en el ensayo circular por contacto sobre una superficie convexa, mediante un palpador angular de ondas transversales, adaptado totalmente a la curvatura, los rayos periféricos del haz, pueden formar ángulos de incidencia tales que propaguen, junto con las ondas transversales, ondas longitudinales y ondas superficiales, en cuyo caso se producirán indicaciones secundarias en la pantalla.

En superficies cóncavas, a fin de evitar estas ondas perturbadoras, es aconsejable, en el caso de superficies con radios de curvatura relativamente pequeños, no adaptar el palpador perfectamente a la misma, sino reducir la superficie de contacto, lo cual, si bien da lugar al aumento del ángulo de

divergencia del haz ultrasónico, evita, no obstante, las perturbaciones causadas por los rayos periféricos. También se puede adoptar la solución de focalizar el haz por medio de un mosaico de cristales.

#### 3.4.4. Efecto de la Frecuencia y del Diámetro del Cristal.

Cuanto mayor sea la longitud de onda, mayor será la rugosidad crítica, en consecuencia, se estará mas lejos de las condiciones que den lugar a fenómenos de interferencia y a mermas en la transmisión de la presión acústica, También, disminuirá la posibilidad de reflexión de los lóbulos laterales del haz ultrasónico en las rugosidades de la superficie de exploración. Por otra parte, al aumentar la divergencia del haz, con la disminución de la frecuencia, se aumenta el riesgo de conversión de ondas, debido a la incidencia angular de los rayos periféricos del haz sobre la superficie de la muestra. Además, el aumento de la divergencia del haz puede aumentar el efecto de la curvatura de la superficie de exploración. Ambos efectos se podrán compensar, en parte, con el empleo de palpadores de mayor diámetro y, en su caso, de doble cristal "E-R".

En consecuencia, cuanto mayor sea el grado de rugosidad superficial, será aconsejable reducir la frecuencia de ensayo, dentro del margen que permita alcanzar el nivel de sensibilidad y el poder de resolución requeridos, compensando, si es preciso, otros efectos desfavorables mediante el empleo de palpadores de mayor diámetro, o de doble cristal "E-R".

La frecuencia de excitación y el diámetro del cristal piezoeléctrico, están fuertemente ligados a la longitud del campo cercano, a la divergencia del haz ultrasónico, al poder de penetración, a la sensibilidad y al poder de resolución.

A aquellos parámetros, se añade ahora el de la transmisión del ultrasonido a través de la superficie de ensayo, favoreciendo, en general, la disminución de la frecuencia de excitación y el aumento del diámetro del cristal. Es, pues, un nuevo

parámetro que habrá que conjugar con los anteriores para la optimización de los ensayos.

## CAPITULO 4

# METODOS BÁSICOS Y TÉCNICAS APLICADAS

La aplicación de los Ensayos No Destructivos, en general, envuelve la selección y aplicación de métodos y técnicas específicas, acordes con los procedimientos de ensayo, elaborados conforme a criterios basados en el análisis de los factores involucrados en la evaluación. Cuando hablamos de ultrasonido, la preparación de los ensayos debe cumplir con el estudio del objeto a ensayar, en lo que respecta a material, dimensiones, forma, condición superficial, accesibilidad, estructura interna, etc.; así como con la selección del método de ensayo, contacto directo (pulso-eco o transmisión) o inmersión; y la técnica a emplear, haz normal o longitudinal, haz angular o transversal, haz superficial o de Rayleigh, u Ondas de Lamb.

En el Capítulo I, se presentaron las Propiedades Fundamentales del Ultrasonido; principios físicos, características y algunos conceptos básicos. En el Capítulo 2, aprendimos acerca de los Palpadores y la Generación del Ultrasonido; cristales piezoeléctricos, el haz ultrasónico y sus diferentes zonas, la atenuación y sus efectos, las características de los palpadores y su selección. En el Capítulo 3, Propagación de Ondas y sus Características en Medios Diferentes; conocimos como se transmiten y se propagan los diferentes tipos de ondas ultrasónicas, y el efecto de factores sobre la dificultad en la transmisión de las mismas.

En éste Capítulo, se hará una revisión profunda de los Métodos Básicos y las técnicas aplicadas en el ensayo por ultrasonido. Además serán presentados los sistemas de ensayo utilizados

Como fue mencionado previamente, existen dos métodos básicos en ultrasonido

- Método por Contacto Directo,
- Método por Inmersión.

#### 4.1. MÉTODO POR CONTACTO DIRECTO.

El método por contacto directo se basa en que el palpador y la pieza de ensayo se encuentran, como su mismo nombre lo indica, en contacto directo. Siempre, en la interfase entre el palpador y la superficie de la pieza se coloca algún material acoplante para garantizar la buena transmisión de la onda ultrasónica. Los acoplantes, su efecto, características y selección, fueron estudiados en el Capítulo 3, Apartado 3.4.1. Este método puede ser efectuado mediante tres técnicas, que son;

- Técnica de Haz Normal,
- Técnica de Haz Angular,
- Técnica de Haz Superficial.

##### 4.1.1. Técnica de Haz Normal

En la técnica de haz normal, la incidencia del haz ultrasónico es perpendicular a la superficie límite, o interfase palpador - superficie de ensayo. El tipo de onda transmitida (en las aplicaciones de ésta técnica), es del modo de onda longitudinal o de compresión, cuyas características fueron estudiadas en el Capítulo 3, Apartado 3.3.1.

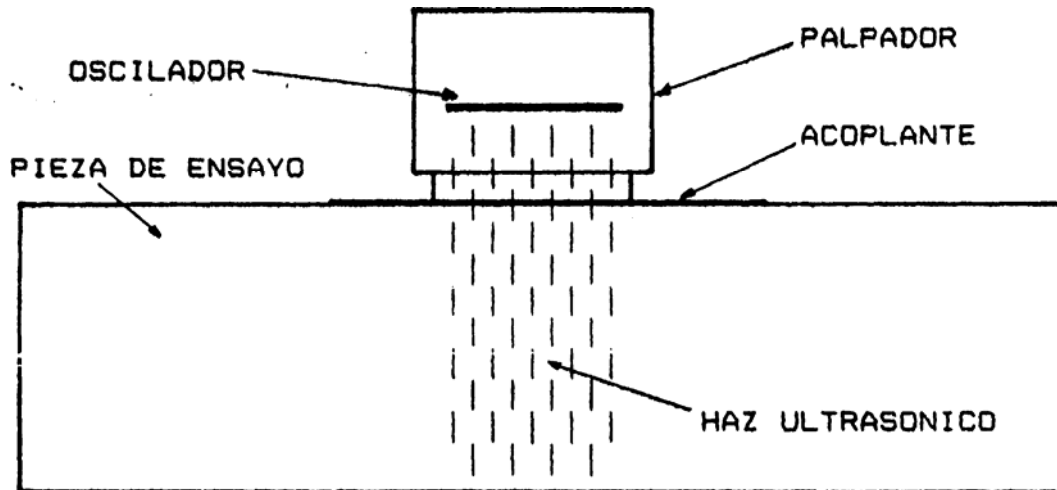


Figura 4.1. Técnica de haz normal.

En la Figura 4.1 se muestra un ejemplo típico de un ensayo ultrasónico utilizando la técnica de haz normal. El recorrido del haz, en éste caso, es en la dirección del espesor de la pieza, o sea, forma un ángulo de  $90^\circ$  con respecto al plano superficial; sin embargo, el ángulo de incidencia es igual a  $0^\circ$ .

Los palpadores utilizados, en el ensayo mostrado en la Figura 4.1, pueden ser de cristal único (Apartado 2.4.1.1.1) o Emisor-Receptor (Apartado 2.4.1.1.2), presentados en el Capítulo 2.

La velocidad de propagación de las ondas longitudinales, puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3.1)$$

Sin embargo en el Apéndice A, Tabla A-I se presentan valores de Impedancia Acústica, velocidad Transversal, velocidad longitudinal, Módulo de Elasticidad y Módulo de Rigidez, de diversos materiales.

## 4.1.2. Técnica de Haz Angular.

En la técnica de haz angular, la incidencia del haz, o el ángulo de incidencia del haz ultrasónico, está determinado por el ángulo de refracción del mismo en el material. En la superficie límite palpador-superficie de ensayo ocurre lo que se define como "modos de conversión" (ver Capítulo 3, Apartado 3.3.2), por lo que el valor del ángulo de refracción está determinado por los valores de los ángulos críticos; o sea, será mayor que el primer ángulo crítico y menor que el segundo, con el fin de transmitir, en el material bajo ensayo, únicamente ondas transversales o de cizalladura, así:

$$\alpha_{CL} < \alpha_i < \alpha_{C2} \quad (4.1)$$

Donde:

$\alpha_i$  ; Ángulo de incidencia.

$\alpha_{CL}$  ; Primer ángulo crítico.

$\alpha_{C2}$  ; Segundo ángulo crítico.

Si tanto el ángulo de incidencia como las velocidades, longitudinal para el material de la zapata y transversal para el material de la pieza bajo ensayo, son conocidos, se podrá calcular el ángulo de refracción del haz ultrasónico en la muestra de ensayo. Este cálculo se realiza mediante la Ley de Snell,

$$\frac{\text{Sen}\alpha_i}{V_{L1}} = \frac{\text{Sen}\alpha_{iT}}{V_{T2}} \quad (3.20)$$

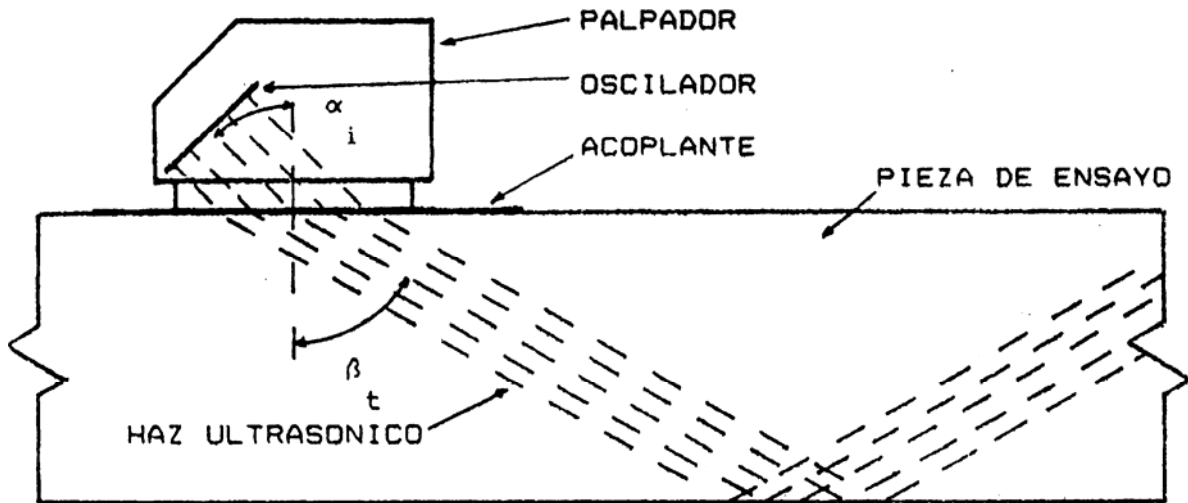


Figura 4.2. Técnica de haz angular.

El palpador utilizado en el ensayo mostrado en la Figura 4.3, es un palpador de haz angular (ver Capítulo 2, Apartado 2.4.1.2).

Los palpadores angulares disponibles en el mercado, están identificados según su frecuencia de excitación, material de fabricación del cristal piezoeléctrico, características dimensionales y ángulo de refracción en acero; sin embargo, mediante la utilización de la ecuación de la Ley de Snell, podemos conocer tanto el ángulo de incidencia, propio del palpador, como el ángulo de refracción para cualquier otro material.

En la Figura 4.3 se muestra la relación existente entre los ángulos de incidencia y refracción, para ondas longitudinales y transversales, en un ensayo por el método de contacto directo en una pieza de acero (interfase plástico-acero).

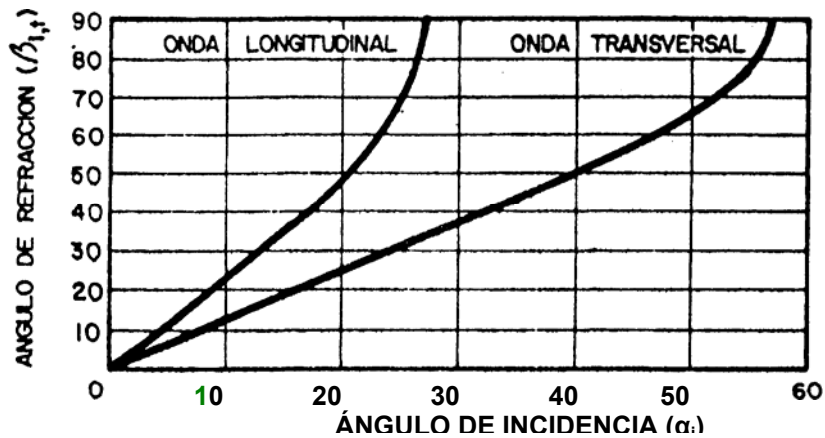


Figura 4.3. Relación entre los ángulos de incidencia y refracción para ondas longitudinales y transversales en una interfase plástico-acero.

La velocidad de propagación de las ondas transversales, puede ser calculada mediante la siguiente ecuación;

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (3.2)$$

que puede resumirse en:

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.3)$$

Sin embargo, en el Apéndice A, Tabla A-I se presentan valores de Densidad, Impedancia Acústica, velocidad Longitudinal, velocidad Transversal, Módulo de Elasticidad y Módulo de Rigidez, de diversos materiales.

## 4.1.3. Técnica de Haz Superficial.

En la técnica de haz superficial, el ángulo de incidencia es ligeramente mayor que el segundo ángulo crítico, por lo que las ondas transversales o de corte se convertirán en ondas superficiales o de Rayleigh, y viajarán a lo largo de la superficie de la pieza de ensayo. Las ondas de superficie, penetran el material bajo ensayo una profundidad equivalente a una longitud de onda (ver Figura 4.4),

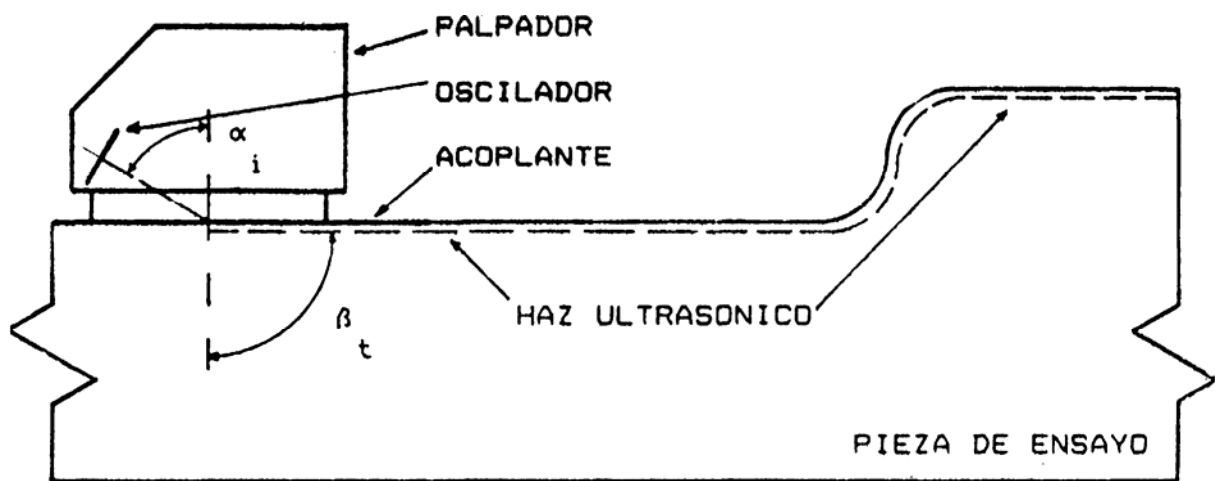


Figura 4.4. Técnica de haz superficial.

Debido a que las ondas superficiales penetran el material solamente una longitud de onda, su aplicación está limitada a la detección de discontinuidades ubicadas en la superficie, o cercanas a ella. Sin embargo, la rugosidad superficial puede crear sedales que interfieran con las ondas o, inclusive, impidan su transmisión. El mismo efecto puede tener el medio acoplante, por lo que se debe ser cuidadoso al momento de ser aplicado.

Al igual que con las ondas transversales, los ángulos de incidencia y refracción son calculados mediante la ecuación de la Ley de Snell, conociendo previamente

las velocidades tanto longitudinal de la zapata del palpador como la superficial del material bajo ensayo, así;

$$\frac{\text{sen } \alpha_i}{V_{L1}} = \frac{\text{sen } \beta_T}{V_{T2}} \quad (3.20)$$

La velocidad acústica de las ondas de superficie puede ser calculada mediante la ecuación 3.5, expresada en el Capítulo 3, y es;

$$v_s = \frac{0,87 + 1,12 \mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (3.5)$$

Sin embargo, en el Apéndice A, Tabla A-I se presentan valores de Densidad, Impedancia Acústica, velocidad Longitudinal, velocidad Transversal, Módulo de Elasticidad y Módulo de Rigidez, de diversos materiales.

#### 4.2. MÉTODO POR INMERSIÓN.

Los ensayos ultrasónicos por el método de inmersión son efectuados, por lo general, con sistemas automáticos, aunque pueden ser realizados mediante sistemas semiautomáticos. En fin, los sistemas de ensayo por inmersión, comúnmente utilizados, son:

- Sistema de Inmersión en Tanque,
- Sistema de Chorro de Agua,
- Sistema de Rueda.

#### 4.2.1. Sistema de Inmersión en Tanque.

En el sistema de inmersión en tanque, tanto el objeto a ensayar como el palpador están sumergidos en un tanque con material acoplante, este puede ser agua con algún agente humectante, el acoplante actúa como elemento transmisor (ver Figura 4.5).

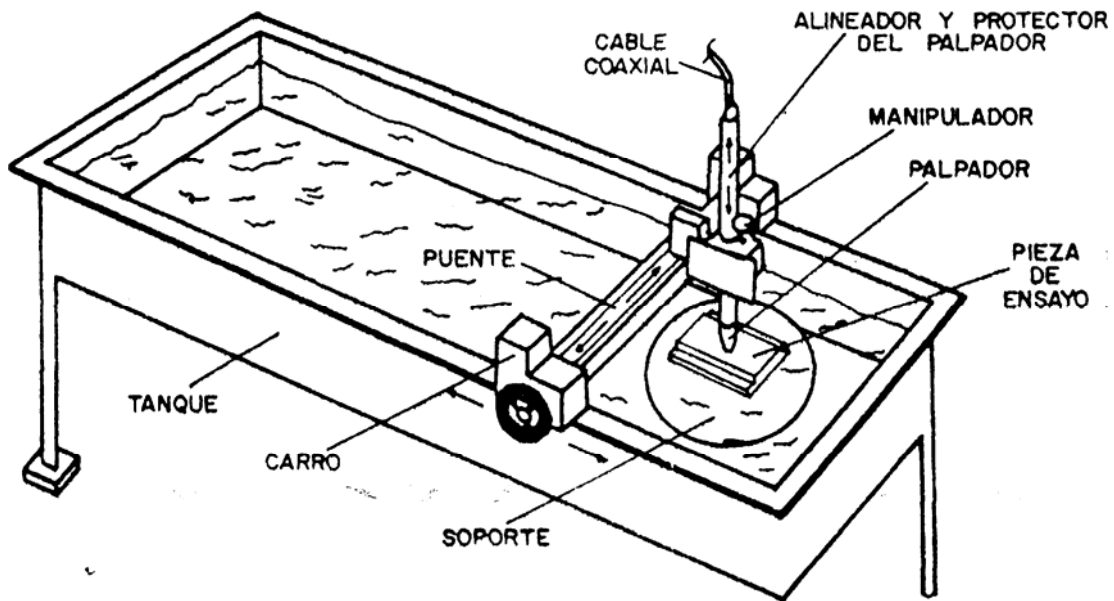


Figura 4.5. Método de ensayo por inmersión en el sistema de inmersión en tanque.

En el sistema de ensayo por inmersión en tanque, mostrado en la Figura 4.5 se pueden observar ciertos componentes característicos que son básicos, entre ellos se pueden mencionar:

- Alineador y Protector, con capacidad de desplazamiento vertical para proporcionar al palpador la ubicación exacta según la calibración del sistema de medición.
- Manipulador, con libertad para el movimiento transversal al eje del tanque, puede ser adaptado a sistemas automáticos,

- Carro, con desplazamiento en sentido longitudinal al eje del tanque, al igual que el manipulador también puede ser adaptado a sistemas automáticos,
- Puente, sirve de apoyo al manipulador, de forma que en los desplazamientos no se pierda la graduación proporcionada mediante el alineador al palpador,
- Soporte, para asegurar que la pieza de ensayo mantenga su posición,
- Tanque, para proporcionar la suficiente estanqueidad al agente acoplante entre el palpador y la pieza de ensayo,

El cable coaxial va conectada al sistema ultrasónico de medición que, con ayuda de otros sistemas anexos controla la automatización del sistema de ensayo por inmersión en tanque. El palpador utilizado en ensayos por el método de inmersión es similar al mostrado en la Figura 2.13 presentada en el Capítulo 2, Apartado 2.4.2.

#### 4.2.2. Sistema de Chorro de Agua.

Otra forma de ensayo por el método de inmersión es el sistema de chorro de agua, en éste sistema el haz ultrasónico se propaga a través de una columna de agua que fluye constantemente como medio acoplante para hacer el contacto con la superficie del objeto. Al igual que en el sistema de inmersión en tanque, el agua se mezcla con aditivos, cuyo objetivo es eliminar la formación de burbujas que puedan ocasionar interferencias en la transmisión del haz ultrasónico (ver Figura 4.6).

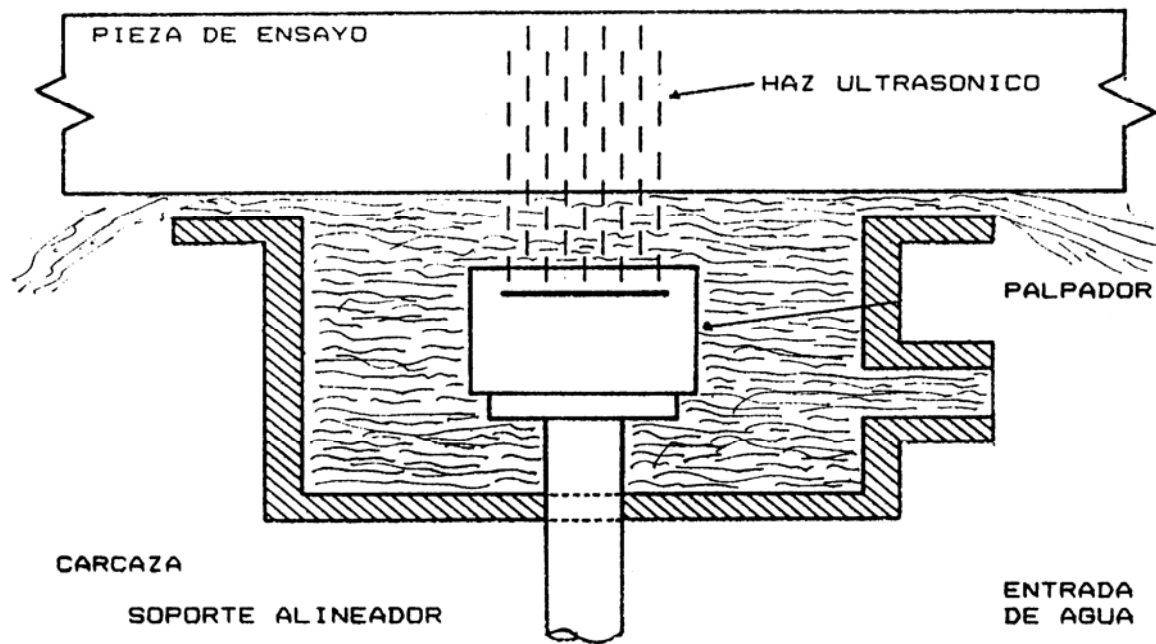


Figura 4.6.- Sistema de Chorro de Agua

El sistema de chorro de agua es utilizado en montajes automáticos de alta velocidad de ensayo. En éste sistema, se desplazan tanto el palpador (con sus accesorios) sobre la superficie de la pieza, como la misma pieza de ensayo. El palpador utilizado es, generalmente, focalizado mediante zapatas especiales con el fin de concentrar el haz ultrasónico y evitar la dispersión del mismo. El agua, que actúa como agente acoplante, fluye constantemente de forma que elimina los vacíos existentes entre el palpador y la pieza de otra forma, los vacíos (volúmenes de aire) interrumpirían la transmisión del ultrasonido.

#### 4.2.3. Sistema de Rueda.

El sistema de rueda es un tipo de ensayo por inmersión donde el haz ultrasónico es proyectado a través de agua que se encuentra encerrada por una tripa de caucho delgada. El palpador está fijado al eje de la rueda, mientras que ésta gira libremente. El sistema de rueda puede ser móvil, donde el equipo se desplazará

sobre una pieza estacionaria, o puede ser fijo, la pieza de ensayo se desplazará hasta ser cubierta por el sistema (ver Figura 4.7).

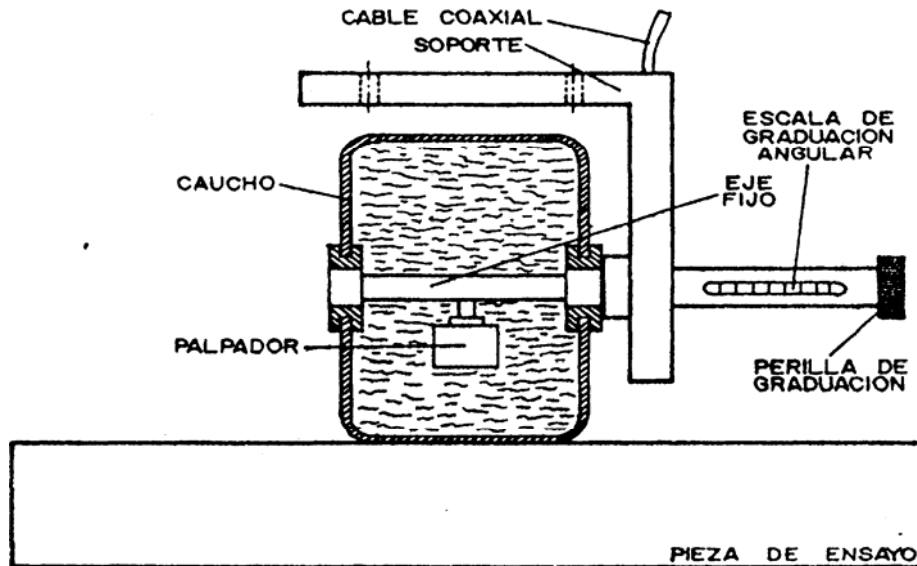


Figura 4.7. Sistema de rueda,

El sistema mostrado en la Figura 4.7 es utilizado en ensayos de alta velocidad, en piezas con grandes contornos superficiales. Una de las limitaciones del ensayo con el sistema de rueda, es que las condiciones y la calidad de la superficie de la pieza de ensayo deben ser buenas, pues de otra forma, el contacto entre el caucho y la superficie no sería total y habría pérdidas en la transmisión del haz. Generalmente, entre el caucho y la superficie de la pieza de ensayo se coloca aceite para evitar burbujas de aire que puedan interferir con la transmisión adecuada del sonido.

Este sistema de ensayo es considerado una mezcla de los dos métodos conocidos. Contacto Directo e Inmersión, Esto se debe a que las condiciones de acople, entre la tripa de caucho y la pieza de ensayo, son similares a las condiciones del ensayo por contacto directo; por otra parte, el palpador se encuentra sumergido en agua, lo que le da características de sistema de ensayo por el método de inmersión.

Los sistemas de ensayo por el método de inmersión son utilizados comúnmente en chequeos de producción en serie, donde los ensayos son llevados a cabo automáticamente.

### 4.3. TÉCNICAS DE INMERSIÓN.

El ensayo por el método de inmersión contempla la aplicación de técnicas, al igual que el método por contacto directo, en lo que respecta a:

- Técnica de haz Normal,
- Técnica de Haz Angular.

Tanto la técnica de haz superficial como la de onda de chapa (onda de Lamb), no son posibles de ser efectuadas con el método de inmersión pues, siendo posible crear las ondas desde la superficie del palpador, su transmisión se anula por efecto de la baja resistencia que presenta el material acoplante a las ondas de corte o cizalladura.

#### 4.3.1. Técnica de Haz Normal.

La aplicación de la técnica de haz normal en el ensayo por el método de inmersión es similar a su aplicación en el método por contacto directo, la incidencia del haz ultrasónico es perpendicular a las superficies límites, palpador - acoplante y acoplante - pieza de ensayo. El tipo de onda transmitida es del modo de onda longitudinal o de compresión, cuyas características fueron estudiadas en el Capítulo 3, Apartado 3.3.1.

La diferencia básica entre ambas técnicas, es que en inmersión, la distancia entre las superficies del palpador y de la pieza de ensayo es considerablemente mayor, esto permite que las zonas muerta y de campo cercano (características del haz ultrasónico), se propaguen en el agua, o en cualquier otro elemento acoplante, y

sea mucho mas factible la detección de discontinuidades cercanas a la superficie superior de la pieza de ensayo (ver Figura 4.8), El palpador utilizado en el ensayo mostrado en la Figura 4.8 es similar al palpador que se presentó en la Figura 2.13, Capítulo 2.

La velocidad acústica de propagación de las ondas longitudinales, puede ser calculada mediante la siguiente ecuación;

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3.1)$$

Sin embargo, en el Apéndice A, Tabla A-I se presentan valores de Densidad» Impedancia Acústica, Velocidad Longitudinal, Velocidad Transversal, Módulo de Elasticidad y Módulo de Rigidez, de diversos materiales.

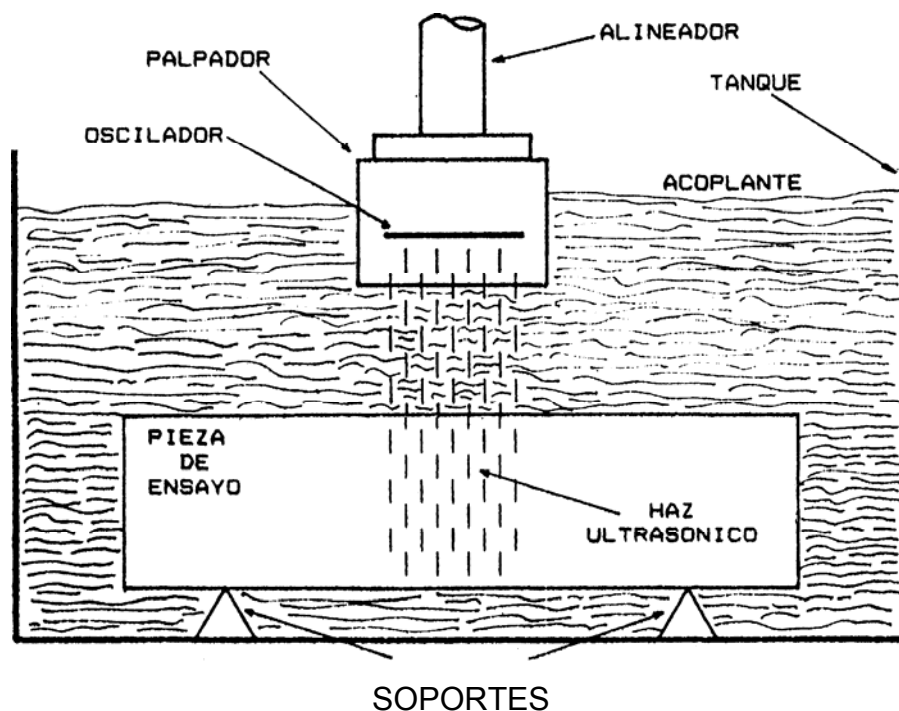


Figura 4.8. Técnica de haz normal.

Este ejemplo, dentro de la técnica de haz normal para ensayos por el método de inmersión, abarca la aplicación de todos los sistemas de ensayo, no obstante que éstos difieren entre sí, el principio de ensayo es el mismo, de inmersión.

#### 4.3.2. Técnica de Haz Angular.

En el ensayo por el método de inmersión utilizando la técnica de haz angular, el palpador se encuentra sumergido en un medio acoplante con el cual la transmisión de la onda ultrasónica longitudinal se realiza perpendicular a la interfase palpador-agua; sin embargo, la incidencia del haz ultrasónico, en la superficie de la pieza de ensayo, es oblicua, o sea, forma un ángulo con la perpendicular al plano de interfase agua-pieza de ensayo. El valor de éste ángulo está determinado, al igual que en el caso de contacto directo, por los ángulos críticos cumpliendo la relación 4.1 que dice:

$$\alpha_{CL} < \alpha_i < \alpha_{C2} \quad (4.1)$$

Donde:

$\alpha_i$  ; Ángulo de incidencia.

$\alpha_{CL}$  ; Primer ángulo crítico.

$\alpha_{C2}$  ; Segundo ángulo crítico

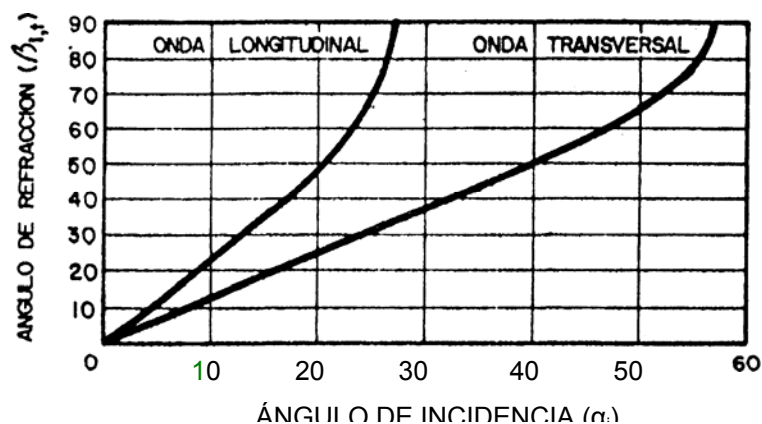


Figura 4.9. Relación entre los ángulos de incidencia y refracción para una interfase agua-acero.

En la Figura 4,9 se muestra la relación existente entre los ángulos de incidencia y refracción, para ondas longitudinales y transversales, en una interfase agua- acero. En el Apéndice A, Tabla A.2, se muestran los valores de los ángulos críticos para interfases agua-material bajo ensayo. La velocidad de propagación de las ondas transversales, puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$v_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (3.2)$$

que puede resumirse en

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.3)$$

Sin embargo, en el Apéndice A, Tabla A-1 se presentan valores de Densidad, Impedancia Acústica, velocidad Longitudinal, velocidad Transversal, Módulo de Elasticidad y Módulo de Rigidez, de diversos materiales.

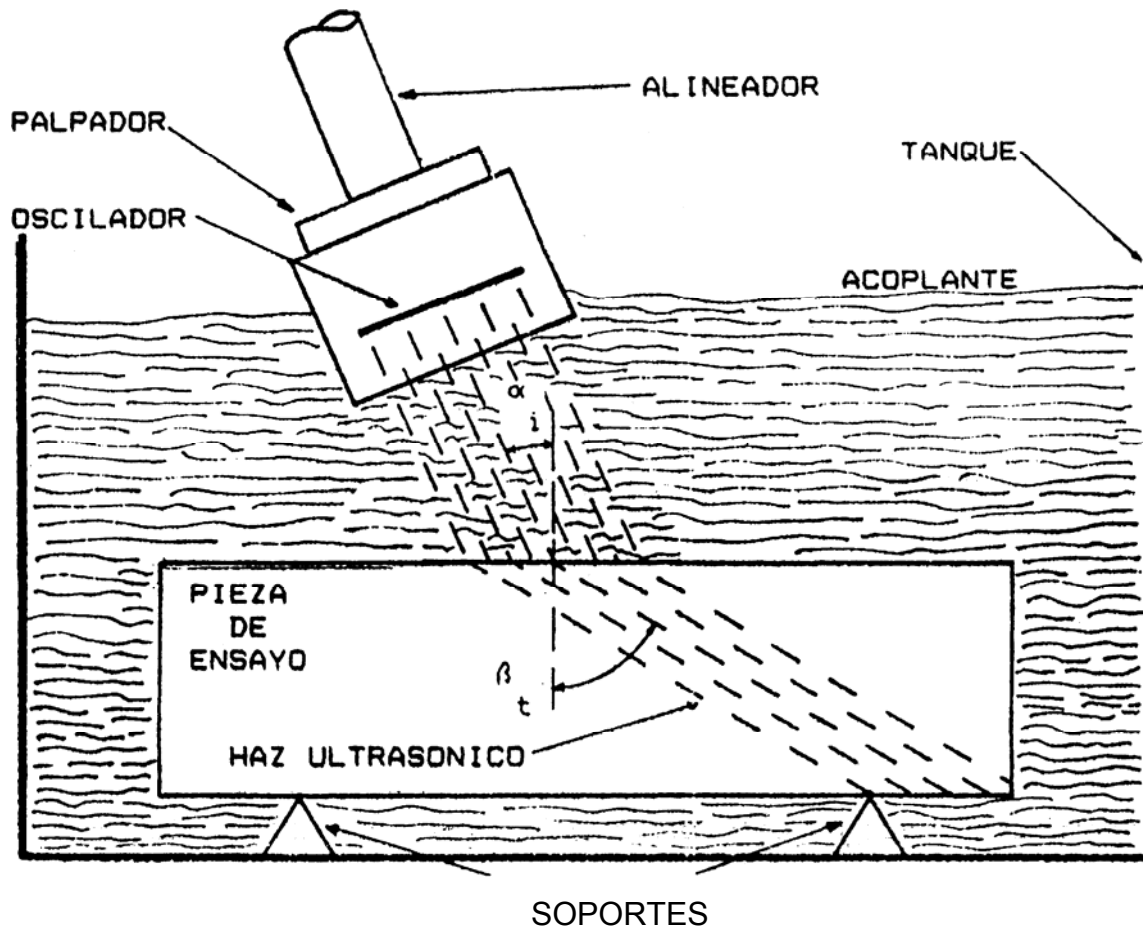


Figura 4.10. Técnica de haz angular.

En la Figura 4.10 se muestra un ejemplo donde, el ángulo de incidencia en agua está calculado para un ángulo de refracción en incidencia puede Capítulo 3. acero de  $45^\circ$ , ser efectuado el cálculo mediante la del ángulo de relación 3.20,

$$\frac{\text{Sen } \alpha_i}{V_{L1}} = \frac{\text{Sen } \beta_T}{V_{T2}} \quad (3.20)$$

En el ensayo por el método de inmersión, la gama de palpadores disminuye, pues un mismo palpador puede ser usado tanto en la técnica de haz normal como en la de haz angular. (ver figura 2.13, capítulo 2) Manipulando el sistema de ensayo puede fijarse el ángulo deseado para una incidencia angular,

#### 4.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES.

El ensayo de ultrasonido posee características peculiares que lo hacen versátil, y sumamente útil, en la determinación de la integridad estructural de los materiales; sin embargo, presenta ciertas ventajas y limitaciones, en cuanto a la técnica en sí y a los métodos utilizados, las cuales serán descritas a continuación.

##### 4.4.1. ventajas.

Entre las ventajas que presenta el ensayo de ultra-sonido, se encuentran;

- Alta sensibilidad para detectar defectos de poco tamaño.
- Gran poder de penetración que permite la examinación de materiales con grandes espesores.
- Exactitud en la determinación de la posición y el tamaño del defecto.
- Rapidez de la respuesta, lo que permite la automatización de los ensayos.
- Accesibilidad a una sola superficie del objeto bajo ensayo.

Por todas estas razones podemos decir que el ensayo ultrasónico es uno de los métodos de ensayo no destructivo que puede ser seleccionado dependiendo de los requerimientos del ensayo a ser realizado.

Sin embargo, cada método(Método de Contacto Directo y Método de Inmersión), posee ventajas sobre el otro, que son;

#### 4.4.1.1. Ventajas del Método de Contacto Directo.

Una de las principales ventajas del ensayo por el método de contacto directo es la flexibilidad en la ubicación del equipo, lo que se traduce en portabilidad. Otras ventajas del método de contacto directo son;

- El requerimiento mínimo de accesorios de instrumentación.
- La posibilidad de usar ondas superficiales.
- Gran poder de penetración.
- La posibilidad de ensayar piezas de gran tamaño.

#### 4.4.1.2. Ventajas del Método de Inmersión.

Las principales ventajas del método de inmersión son;

- El uso de frecuencias de ensayo sumamente altas, lo que permite; detección de efectos muy pequeños y altas velocidades de ensayo.
- La angulación del palpador se hace muy fácilmente,
- Se posibilita el estudio de piezas con irregularidades superficiales.
- Buena resolución superficial.

#### 4.4.2. Limitaciones.

Como todos los métodos de ensayo no destructivo, el ultrasonido tiene ciertas limitaciones en lo que a las condiciones de la pieza de ensayo se refiere. Estas limitaciones, son:

- Geometría desfavorable del objeto bajo ensayo.
- Estructura interna desfavorable.

En piezas de ensayo con formas irregulares, tales como; dimensiones, contornos, formas complejas y orientación de las discontinuidades; se pueden presentar pérdidas parciales o totales de las indicaciones de defectos o pared posterior.

Por otra parte, la dispersión producida por los bordes de grano, cuando la pieza de ensayo presenta una microestructura con gran tamaño de grano, puede significar en pérdidas parciales significativas de la señal ultrasónica.

##### 4.4.2.1. Limitaciones del Método de Contacto Directo.

La principal limitación que presenta el método de contacto directo, es que la superficie de contacto palpador - pieza de ensayo debe ser uniforme, con el fin de poder mantener un buen contacto acústico entre ambos. Otras limitaciones que presenta éste método son:

- La dificultad que se presenta de mantener un acoplamiento uniforme entre el palpador y la superficie de ensayo, contribuye con pérdidas de la sensibilidad del sistema y la no uniformidad de los resultados.
- El uso de acoplantes pesados y de difícil remoción.

- La presencia de las zonas muerta y de campo cercano, que limita la detección de discontinuidades cercanas a la superficie.
- El uso de gran variedad de palpadores debido a la gama de ángulos aplicables en el ensayo.
- El método de contacto directo no puede ser adaptado a sistemas automáticos.

#### 4.4.2.2. Limitaciones del Método de Inmersión.

El método de ensayo por inmersión presenta también ciertas limitaciones o desventajas, que son:

- El gran número de accesorios que son requeridos.
- En la interfase agua-pieza de ensayo, se refleja gran cantidad de la energía ultrasónica, por efecto de la diferencia notable entre las impedancias acústicas de ambos medios, lo que reduce la amplitud de la señal de indicación.
- Debido a las dimensiones del tanque se imposibilita el ensayo a piezas de gran tamaño.

## CAPITULO 5

### SISTEMAS DE ENSAYO. EQUIPOS E INSTRUMENTOS

En el Capítulo 2, Palpadores y Generación de Ultrasonido, se dijo que el efecto piezoeléctrico se basa en que un cristal, que actúa bajo los efectos piezoeléctrico y magnetostrictivo, está en capacidad de convertir deformaciones mecánicas en cargas eléctricas, y cargas eléctricas en energía mecánica. Esta es la base de la generación y detección de los palpadores ultrasónicos. Ahora bien, un ensayo puede ser efectuado partiendo de varios sistemas, entre los cuales se encuentran; Resonancia, Transmisión, y Pulso-Eco.

Los equipos ultrasónicos en general operan en base a amplitud contra tiempo; es decir, la amplitud de la señal contra el tiempo que toma en ser detectada. La amplitud de la señal puede ser controlada o ajustada mediante artificios electrónicos. El tiempo puede ser traducido a distancia mediante cálculos, utilizando, para cada material, las velocidades de propagación de las ondas.

#### 5.1. SISTEMAS DE ENSAYO

Los sistemas de ensayo ultrasónicos son:

- Resonancia,
- Transmisión, y
- Pulso-Eco.

Los sistemas de resonancia y pulso-eco operan por reflexión del haz ultrasónico, mientras que el sistema de transmisión opera bajo el principio de transparencia o sombra. Por esta razón, las magnitudes características a medir mediante la aplicación de éstos sistemas son;

- Frecuencia de resonancia,
- Intensidad acústica,
- Tiempo de recorrido del ultrasonido.

#### 5.1.1. Resonancia .

El sistema de resonancia se basa en que cada espesor tiene una frecuencia fundamental de resonancia. Cuando se aplica esa frecuencia en forma de haz continuo de sonido a la pieza de ensayo, se crean ondas estacionarias dentro de la pieza. Estas ondas estacionarias causan un incremento en la amplitud de la señal de recepción.

Si en una muestra de superficies paralelas, de determinado espesor "e", se propaga un haz ultrasónico de excitación continua y de amplio espectro de frecuencias, las correspondientes oscilaciones cuya semilongitud de onda sea un submúltiplo del espesor de la muestra, se reforzarán por superponerse en fase, debilitándose las restantes, dando lugar a un fenómeno de resonancia, es decir, a la formación de ondas estacionarias. En consecuencia, las oscilaciones características se podrán definir por el número de semilongitudes de onda contenidas en el espesor de la muestra; por ejemplo, la oscilación característica fundamental o primera, como la correspondiente a una semilongitud de onda por espesor (ver Figura 5.1a) y la oscilación característica de orden "n", como la correspondiente a "n" semilongitudes de onda (por ejemplo, de orden 2, 3 y 4, Figuras 5.1 b, 5.1c y 5.1d, respectivamente) .

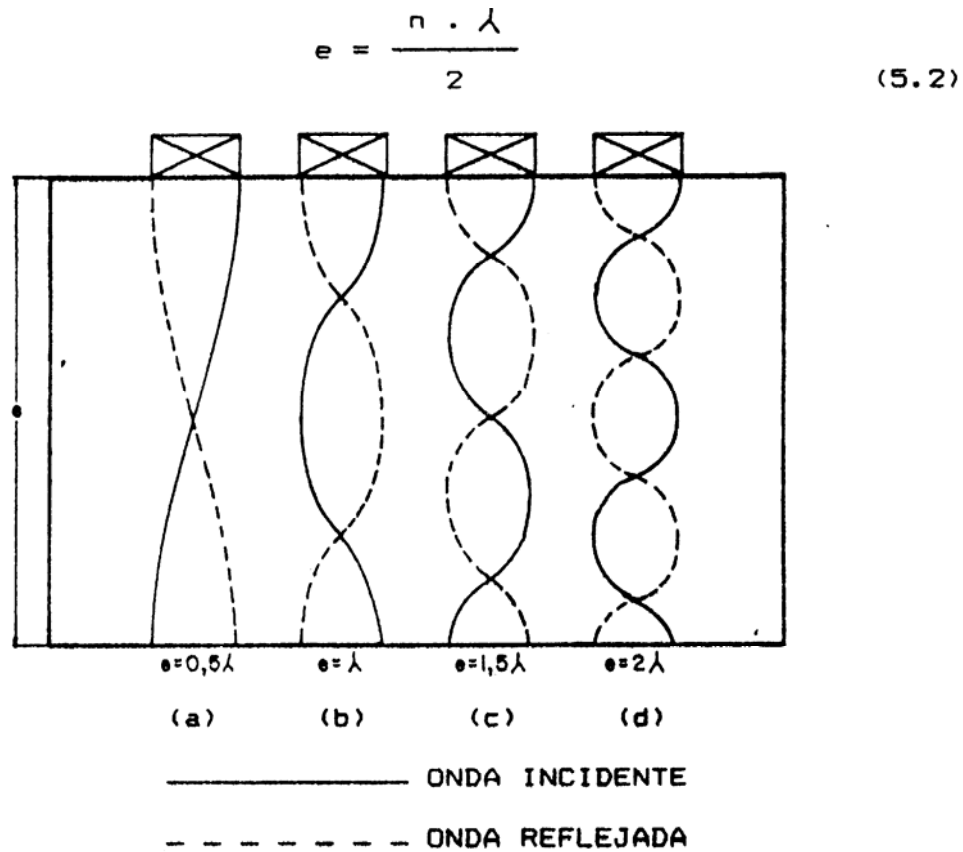


Figura 5.1. Sistema de resonancia.

Mediante un control de generación, es posible variar la frecuencia del oscilador dentro de un rango de selección de frecuencias. Con variaciones de la frecuencia, la longitud de onda también variará. A una frecuencia dada, una gran cantidad de puntos de resonancia pueden ocurrir, según la siguiente ecuación;

$$f_n = \frac{n \cdot v}{2 \cdot e} \quad (5.1)$$

Donde:

$F_N$  : Frecuencia de resonancia.

$n$  : 1, 2, 3, 4, ,,etc.

$v$  : velocidad acústica longitudinal.

$e$  : Espesor del material.

En otras palabras, la resonancia ocurre cuando el espesor del material es igual a un número entero en el que se repite la mitad de la longitud de onda.

Con éste método se pueden medir, por ejemplo, espesores en muestras de acero de 0,1 a 80 mm con un error del 1 al 3 %

Por su propio fundamento, no resulta adecuado para la detección de discontinuidades, sí bien se puede llegar a detectar discontinuidades tales como laminaciones en chapas. Tampoco resulta adecuado para la medida de pérdida de espesores por corrosión o deterioro por agentes ambientales, salvo en el caso de corrosión por ataque uniforme o desgaste uniforme, ya que las picaduras y cavidades debidas a corrosión o cavitación, alteran la condición requerida de la superficie reflectante de la pieza, siendo en cambio perfectamente idóneos para éste fin, los métodos de pulso-eco.

#### 5.1.2. Transmisión.

En el sistema de ensayo por transmisión, se requiere la utilización de dos palpadores o dos cristales, donde un cristal actúa solamente como emisor y el otro como receptor, Tanto la emisión, como la recepción pueden ser continuas; así como pueden ser usados, al igual que en el sistema de pulso-eco, pulsos ultrasónicos de corta duración, Los palpadores deben ser alineados de forma tal, que la emisión

ultrasonica se transmite a través del material y sea entonces detectada por el palpador receptor.

Estos métodos están basados en el efecto de sombra que un obstáculo, discontinuidad en el seno de una muestra, produce al ser interpuesto por un haz ultrasónico.

En principio, los equipos diseñados para operar según los métodos de transparencia o de sombra, realizan sólo la medida de la intensidad acústica, si bien aquellos que miden conjuntamente la intensidad acústica y el tiempo de recorrido son perfectamente adaptables a éste fin.

#### 5.1.2.1. Intensidad Acústica.

Este método, el mas antiguo de todos los métodos de ensayo de materiales por ultrasonido, mide la intensidad acústica de un haz ultrasónico, de excitación continua, que atraviesa el material. En realidad, no es la intensidad acústica lo que se mide, sino la amplitud de la presión acústica cuando se utiliza un receptor piezoeléctrico. Si las características del equipo y del amplificador son lineales, la indicación será proporcional a la raíz cuadrada de la intensidad. No obstante, se sigue manteniendo la designación de método de intensidad, ya que no siempre se utilizan receptores piezoeléctricos y, además, porque algunos equipos realizan electrónicamente la raíz cuadrada de la señal, manteniéndose así, proporcional a la intensidad acústica. En realidad, se ha venido manteniendo desde antes la designación de intensidad por su analogía con la radiología industrial (ver Figura 5.2).

Por su propia naturaleza, se utiliza principalmente por transmisión, es decir, con dos palpadores, uno de los cuales actúa como emisor y el otro, coaxialmente alineado al lado opuesto de la muestra, como receptor. En la Figura 5.2 se presenta el esquema de un equipo basado en éste principio. Calibrado el equipo en una zona

libre de discontinuidades y considerando la intensidad (o la presión acústica) recibida como 100 %. (Figura 5.2a), sí el haz es interceptado por una discontinuidad, la intensidad (o la presión acústica) disminuirá proporcionalmente a la superficie del obstáculo (Figura 5.2b).

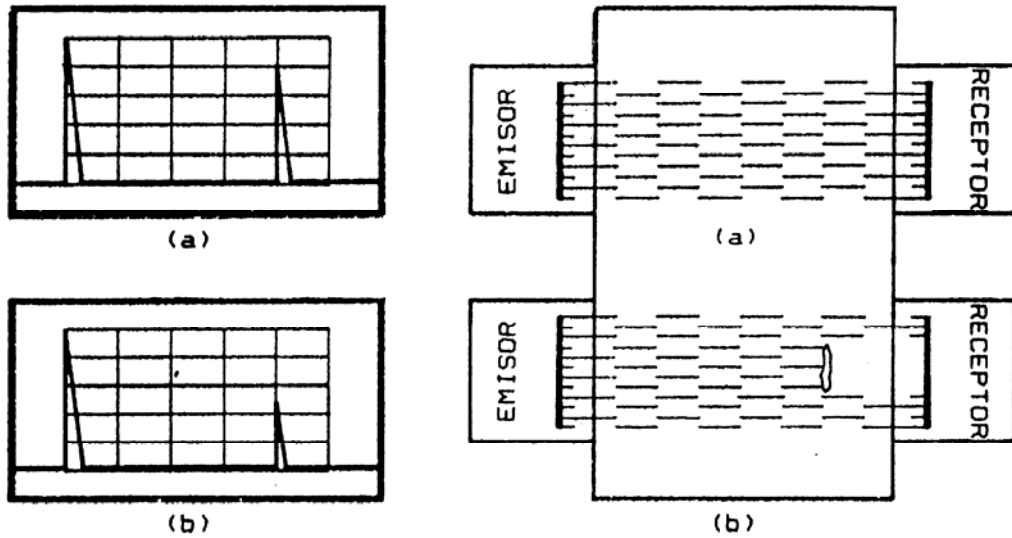


Figura 5.2. Medida de la intensidad acústica por transmisión.

Si la muestra es accesible por una sola cara, se puede adoptar la disposición de la Figura 5.3, en donde se aprovecha la reflexión del haz ultrasónico en la cara opuesta de la pieza bajo ensayo.

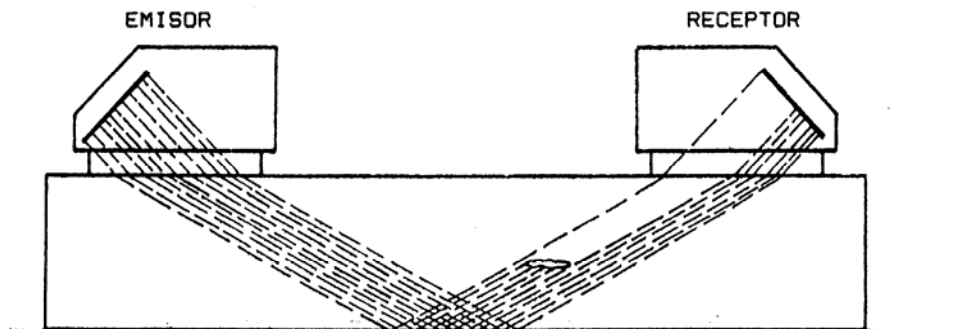


Figura 5.3.- Medida de la intensidad acústica por Reflexión.

La medida de la intensidad acústica se puede realizar también por conducción, método aplicable a productos de geometría compleja o pared delgada. Las ondas ultrasónicas se transmiten entre palpadores en forma de ondas arbitrarias y cuya trayectoria es, prácticamente, imposible de precisar.

La medida de la intensidad acústica por transparencia o sombra, presenta la desventaja de no proporcionar información acerca de la posición de las discontinuidades. Además, existe la posibilidad de que pequeñas variaciones del espesor de la muestra modifiquen la distribución del campo de ondas estacionarias, pudiéndose alcanzar estados de resonancia o anti-resonancia que originan grandes errores en la lectura de la intensidad acústica. En algunos equipos, éste inconveniente se remedia por modulación rápida de la frecuencia, con sistemas similares a los empleados en los equipos de resonancia.

#### 5.1.2.2. Intensidad Acústica y Tiempo de Recorrido.

Los equipos de medida de intensidad acústica y tiempo de recorrido, están concebidos propiamente para ser aplicados por el método de pulso-eco. No obstante, se pueden adaptar para operar por transparencia, disponiendo los palpadores de emisión y recepción separados, bien por transmisión, por reflexión o por conducción.

#### 5.1.3. Pulso-Eco,

Los sistemas de ensayo por pulso-eco, como su mismo nombre lo indica, son; la emisión de pulsos ultrasónicos de corta duración, pero a una frecuencia definida. Están basados en el efecto del eco que un reflector produce al ser encontrado por un haz ultrasónico. En estos métodos, el oscilador receptor, separado o formando una unidad con el emisor, recoge el eco del reflector transformándolo en la indicación correspondiente, por lo que opera siempre por reflexión.

Dentro de éstos métodos cabe distinguir los que miden solamente el tiempo de recorrido del haz ultrasónico, limitados a aplicaciones concretas de metrología, de los que miden la intensidad acústica y el tiempo de recorrido conjuntamente, para aplicaciones mas extendidas en los campos de la defectología, caracterización, e, igualmente, metrología.

Así como los métodos de transparencia o sombra admiten el sistema de excitación continua, la formación de ondas estacionarias y la superposición continua de señales impedirían, en el presente caso, la medida del tiempo de recorrido y la consiguiente obtención de indicaciones propias. Se hace preciso recurrir, pues, al sistema de excitación por impulsos, de ahí la denominación de pulso - eco de éstos métodos.

#### 5.1.3.1. Tiempo de Recorrido.

Los equipos diseñados solamente para medir el tiempo que tarda el impulso acústico en recorrer un espesor dado de material, resultan de la simplificación de los que miden la intensidad y el tiempo de recorrido. En aquel caso, se omite la medida de la intensidad acústica y la indicación del tiempo de recorrido se suele representar, traducida directamente a espesor de material, por un indicador de sistema digital. Algunos equipos, en lugar de medir el espesor, determinan la velocidad acústica aunque son menos utilizados.

En la actualidad, éstos equipos para medición de espesores por ultrasonido han adquirido un gran desarrollo, y su aplicación se ha extendido a numerosas industrias, especialmente a aquellas que, debido a problemas de corrosión, requieren un control de mantenimiento periódico de sus instalaciones en cuanto a posibles mermas de espesor en tuberías, recipientes, etc. Hoy día, se dispone de equipos prácticamente de bolsillo, cuyo manejo es elemental y que permiten medir espesores desde 2 hasta 300 mm.

Para evitar problemas de pérdida de la indicación por efecto de mal acoplamiento, o excesiva atenuación del material, éstos equipos disponen de un amplificador de ganancia automática que controla el nivel de señal. Precisamente, el desarrollo de éste tipo de amplificadores ha permitido impulsar la utilización de éstos equipos. Las señales que no alcanzan un determinado nivel, no se amplifican y el equipo no proporciona indicación. De igual modo, toda señal que rebasa el umbral mínimo, se amplifica hasta alcanzar un valor prefijado y constante, por lo que los errores posibles por altura de señal quedan muy reducidos. Los palpadores utilizados son de doble cristal, uno emisor y el otro receptor, separados, tal como fueron descritos en el Capítulo 2, Apartado 2.4.1.1.2.

#### 5. 1.3. 2. Intensidad Acústica y Tiempo de Recorrido

Los equipos de pulso-eco de medida de la intensidad acústica y el tiempo de recorrido, emiten impulsos acústicos cortos, a intervalos constantes, de manera que se obtiene una respuesta periódica función del tiempo de recorrido del impulso acústico desde el oscilador emisor al cristal piezoeléctrico receptor, al igual que en el caso descrito anteriormente. El impulso acústico recibido, procedente de su reflexión en una discontinuidad o en una superficie límite de la muestra, se transforma en una señal o impulso eléctrico, que se visualiza según una indicación en la pantalla cuya altura es proporcional a la presión acústica del eco.

En la Figura 5.4 se reproducen los oscilogramas que se obtienen para los diversos ejemplos mostrados de detección de discontinuidades. Se comprueba como, además de detectar pequeñas discontinuidades, se puede determinar su posición, lo cual representa un avance decisivo para la mayoría de las aplicaciones.

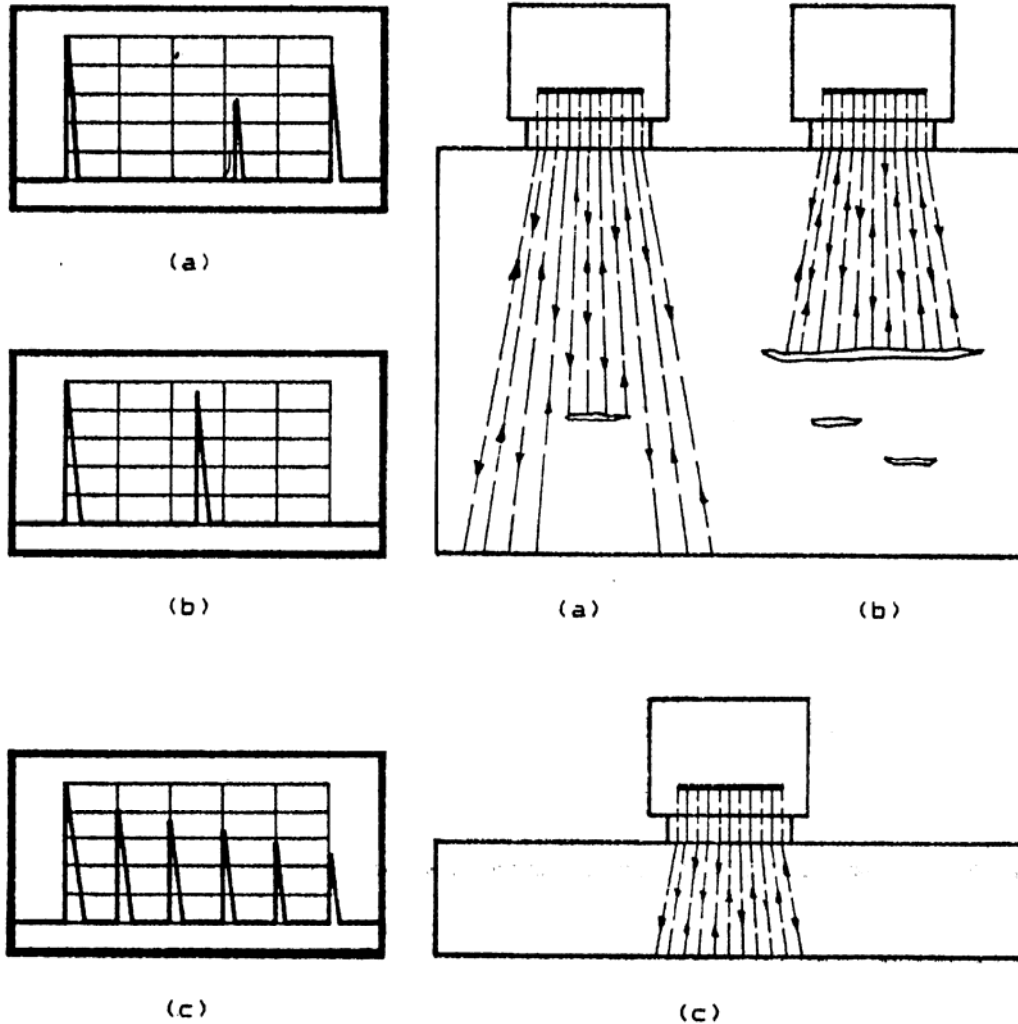


Figura 5.4. Sistema pulso-eco.

En la Figura 5.4 se presentan los oscilogramas correspondientes a las posiciones presentadas de los palpadores, supongamos que, en primer lugar, el equipo se encuentra calibrado para la distancia presentada en las Figura 5.4a y 5.4b.

Partiendo de ésta suposición, veremos que si las discontinuidades presentes en la pieza de ensayo son pequeñas comparadas con la sección del haz ultrasónico, se obtiene, simultáneamente con la indicación de su eco, la del eco de fondo de la muestra (Figura 5.4a), a una distancia del origen en la base de tiempo, proporcional a la distancia real si la base de tiempo es lineal, tal como ocurre en la mayoría de los equipos, Si la discontinuidad presenta una superficie capaz de interceptar todo el

haz, no se obtendrá indicación de eco de fondo ni de otras discontinuidades mas alejadas, que se encuentren ocultas detrás de ésta (Figura 5.4b).

La desaparición de la indicación del eco de fondo proporciona, pues, una información adicional acerca del tamaño del reflector. Si la muestra tiene sus superficies paralelas, pueden aparecer en la pantalla varias indicaciones de los sucesivos ecos de fondo, siempre que el rango de espesor que puede abarcar la pantalla sea lo suficientemente grande como para que cubra la distancia correspondiente a varias veces el espesor. En éste caso se obtiene un oscilograma de ecos múltiples, como el de la Figura 5.4c. La sucesión de indicaciones de los ecos de fondo, se produce como consecuencia de las reflexiones sucesivas del impulso acústico en las superficies paralelas de la muestra, perdiendo, en cada recorrido de ida y vuelta, una parte de su energía por atenuación y, otra parte por reflexión de los ecos de indicación, por lo que cada indicación de los sucesivos ecos de fondo pierde altura en relación con la que le precede. La pendiente de la curva que forman los picos de las indicaciones de los sucesivos ecos de fondo, permite la medida del coeficiente de atenuación del material. Sí y solamente si, la base de tiempo es lineal, las indicaciones de los sucesivos ecos de fondo aparecen a distancias iguales.

Fue indicado anteriormente que los equipos de medida. de la intensidad acústica y del tiempo de recorrido están especialmente diseñados para los métodos de pulso - eco, lo que no les impide operar según los métodos de transparencia o sombra. Pero además, se pueden utilizar en ensayos en los que sólo interese una de las dos magnitudes mencionadas. Su versatilidad es, pues, una de sus principales ventajas.

## 5.2.- PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

Existen tres tipos de presentación visual de resultados que operan en base a la amplitud y/o el tiempo que tarda un pulso ultrasónico en ser reflejado, mostrando la solidez o calidad de los materiales. Estos tipos de presentación son conocidos como:

- Presentación A-scan,
- Presentación B-scan,
- Presentación C-scan.

El tipo de presentación mas común, que utiliza una pantalla de tubo de rayo catódico "CRT" (cathode ray tube), se conoce como A-scan, Los equipos ultrasónicos utilizados en aplicaciones médicas utilizan la presentación B-scan, y gran parte, aunque no todos, los equipos que operan bajo la técnica de inmersión utilizan la presentación C-scan.

Sin embargo, para conocer mejor estos tres tipos de presentación de resultados, mostraremos las presentaciones en pantalla de ensayos ultrasónicos efectuados en la pieza mostrada a continuación en la Figura 5.5

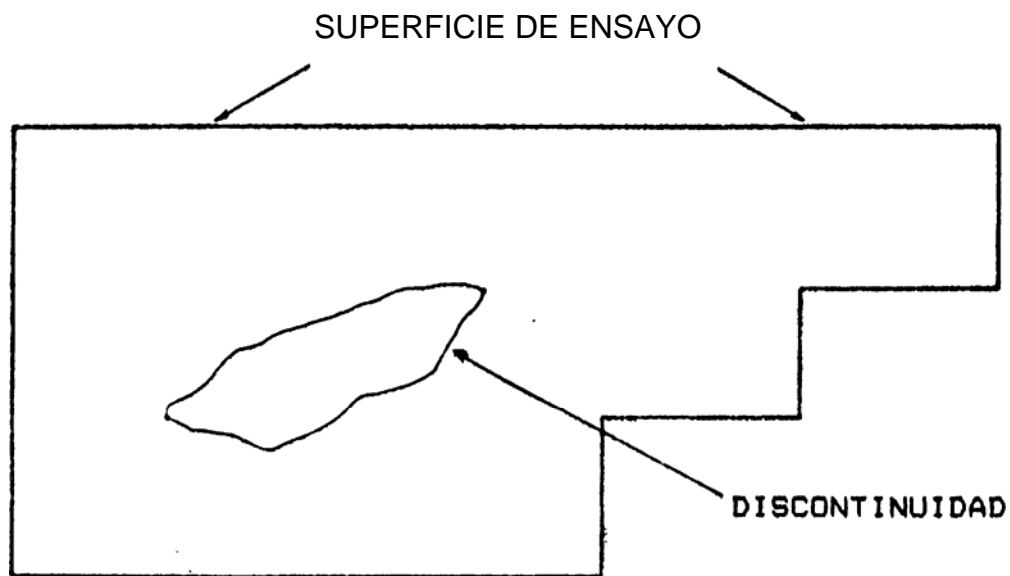


Figura: 5.5. Pieza de ensayo.

5.2.1. Presentación A-scan.

En la presentación A-scan, el tubo de rayo catódico "CRT" (Cathode Ray Tube) está compuesto de una cantidad de "Píxel" alineados, que son cubiertos por el bombardeo de electrones, de izquierda a derecha, desde la línea de puntos superior a la inferior, a una velocidad constante.

En este tipo de presentación, la altura de los ecos de indicación o "picos" representa la intensidad del haz ultrasónico reflejado. Igualmente, la línea base de tiempo, como su mismo nombre lo indica, proporciona el tiempo que tarda el haz ultrasónico en ser reflejado, por lo que para un valor de velocidad conocido es posible calibrar la pantalla en términos de distancia o profundidad de penetración. En otras palabras, la línea base horizontal indica el tiempo o la distancia de recorrido, mientras que verticalmente se observa la amplitud de la señal (ver Figura 5.6).

En el ejemplo mostrado en la Figura, se observan tres picos o ecos «de indicación que corresponden; el número (1) al eco inicial, el número (2) al eco de discontinuidad y el número (3) al eco de pared posterior, de la pieza mostrada en la Figura

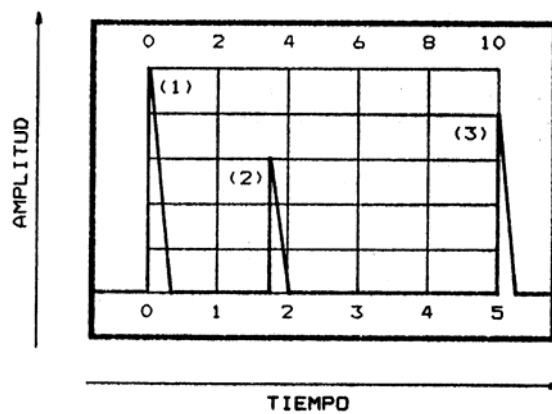


Figura 5.6. Presentación A Scan

Mediante la presentación A-scan se puede determinar las dimensiones de discontinuidad, la profundidad o la distancia desde la superficie, sea la de contacto o la posterior, a la discontinuidad, la divergencia del haz ultrasónico y otros factores. Las indicaciones de los ecos que se producen por un voltaje alterno, se representan, en general, rectificadas, es decir, con deflexión de la base de tiempo en un sólo sentido. Hay equipos, sin embargo, que permiten visualizar también las formas de la indicación del eco sin rectificar. Lo usual es la representación rectificada puesto que da lugar a un oscilograma simple y con mas brillo. Sin embargo, en ciertos ensayos, interesa la representación no rectificada, con el fin de reducir al mínimo la distorsión de las indicaciones y mantener la linealidad del amplificador en su valor máximo.

#### 5.2.2.- Presentación B-scan.

En el tipo de presentación B-scan se muestra el recorrido superficial en la pieza de ensayo, contra el tiempo o la profundidad de reflexión del haz ultrasónico, donde el brillo de la señal es proporcional a su amplitud (ver Figura 5.7)

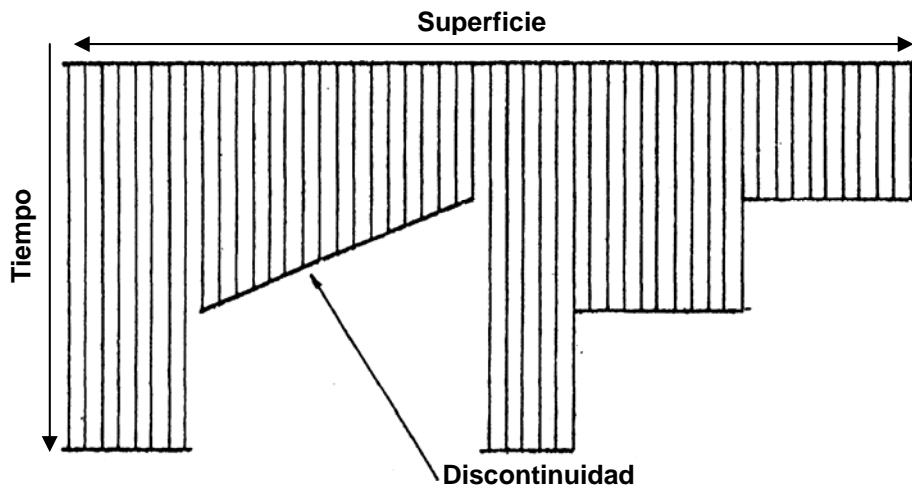


Figura 5.7. Presentación B-Scan

Por medio de los equipos que operan con presentación B-scan, podemos obtener una vista del objeto perpendicular a la superficie de la pieza de ensayo; de forma tal que cualquier discontinuidad presente en el material, creará una indicación de superficie límite.

En estos equipos, la imagen es retenida en el CRT mediante un recubrimiento o capa de fósforo, lo que permite fotografiar la pantalla para obtener un record permanente.

### 5.2.3. Presentación C-scan

En la presentación C-scan, se obtiene una imagen superficial del objeto, de manera que cualquier discontinuidad presente en la zona de interés ocasionará una indicación, o la ausencia de ésta, como se observa en la Figura 5.8.

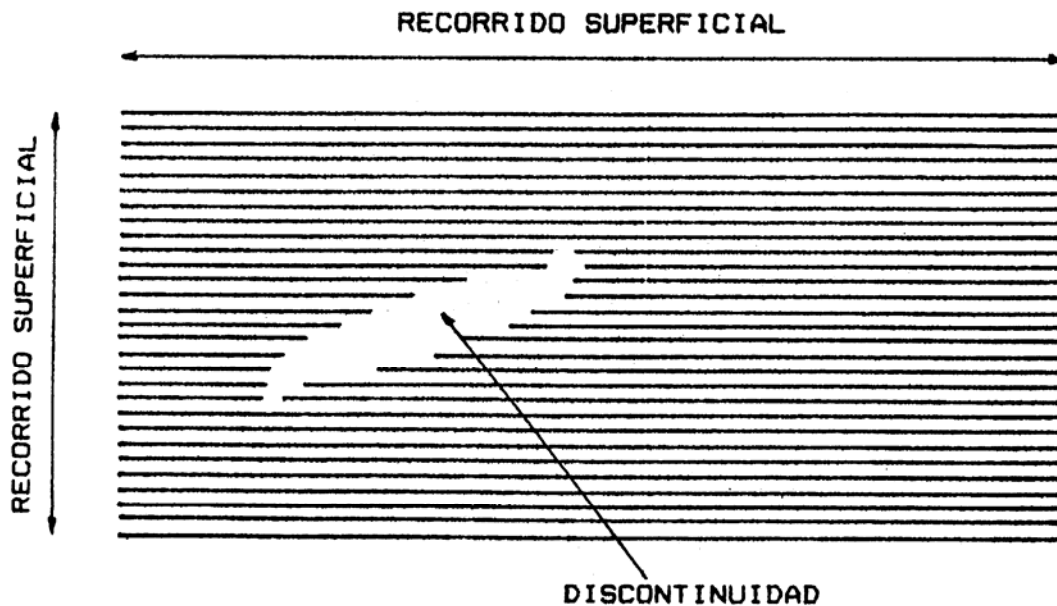


Figura 5.8. Presentación C - scan

Las posiciones horizontal y vertical del palpador son controladas por el sistema de ensayo, y los ecos de indicación de las discontinuidades son clasificados mediante un control de intensidad. Esto se debe a que los equipos que utilizan la presentación C-scan son, en su totalidad, automáticos, que operan bajo la técnica de inmersión. Por ésta razón, se hace necesario el uso de "puertas" o "ventanas de observación" que bloqueen la recepción de cualquier señal de indicación que se encuentre fuera de la zona o la profundidad de interés.

La presentación de resultados de los equipos C-scan se realiza por un graficados en papel, e indica la ubicación superficial de la discontinuidad, sin proporcionar información acerca de su forma, orientación y profundidad. En otras palabras, un registro de resultados C-scan es similar a una película radiográfica, pues proyecta a un plano las discontinuidades internas.

#### 5.2.4. Comparación Entre los Tipos de Presentación.

Al comparar los resultado obtenidos con los tres tipos de presentación, A-scan B-scan y C-scan, en la pieza mostrada en la presentación A – scan, , es preciso hacer notar que mediante los equipos con presentación A-scan no es posible la obtención de un registro de resultados instantáneo; pues, al desplazar el palpador, la imagen en pantalla variará inmediatamente.

La presentación mostrada en la presentación A-scan corresponde a una sola posición del palpador sobre la pieza de ensayo (extremo izquierdo de la discontinuidad); al desplazar el palpador hacia la derecha, el eco de indicación de reflexión de la pared posterior (3) desaparecerá y el eco de reflexión de la discontinuidad (2) aumentará su amplitud variando su posición en pantalla hasta que, con desplazamientos del palpador, aparezca de nuevo el eco de indicación de pared posterior (3) y desaparezca el eco de reflexión de discontinuidad, ambos paulatinamente variarán su amplitud.

En los equipos con presentación de resultados B-scan (ver Figura 5.7), el tipo de pantalla permite obtener un record permanente del ensayo, pues, como se dijo anteriormente, posee un recubrimiento especial de fósforo que permite mantener por cierto tiempo la imagen. Sin embargo, la información que podemos obtener acerca de la forma y contorno de las discontinuidades es muy poca, solamente podremos conocer su ubicación a lo largo de la superficie de la pieza y su profundidad.

En la Figura 5.8 se mostró la presentación C-scan del ensayo efectuado en la pieza de la Figura 5.5. Nótese que la resolución en la demarcación de la discontinuidad es muy buena; sin embargo, no es posible obtener información alguna sobre la forma, orientación y profundidad de la discontinuidad, que pueden ser obtenidas con un equipo con presentación A-scan.

### 5.3. EQUIPOS E INSTRUMENTOS.

Los equipos e instrumentos ultrasónicos, básicamente, están constituidos por sistemas de generación, sincronización, amplificación de señal y barrido que, en conjunto, hacen posible la detección de discontinuidades por emisión y recepción de pulsos o señales ultrasónicas. En la Figura 5.9 se presenta un diagrama de bloques, donde se muestra la "Forma como se generan y detectan las indicaciones ultrasónicas.

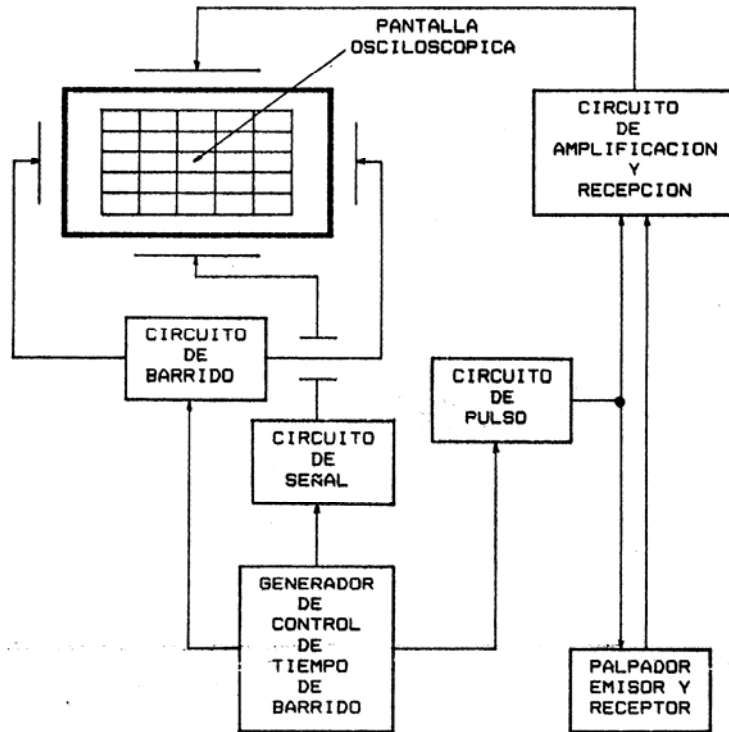


Figura 5.9. Diagrama de Bloques de un instrumento ultrasónico.

El generador de control de tiempo de barrido, controla la generación de tiempo de voltaje de deflexión horizontal de la pantalla de tubo de rayo catódico "CRT" (Cathode Ray Tube) y, simultáneamente, genera la señal de sincronización que "dispara" el impulso eléctrico de alta frecuencia. Constituye, por consiguiente, la base del sistema de sincronismo del equipo. El ritmo de generación de éstas señales es lo que se denomina frecuencia de repetición de impulsos y varía, en general, entre 50 y 3.500 Hz.

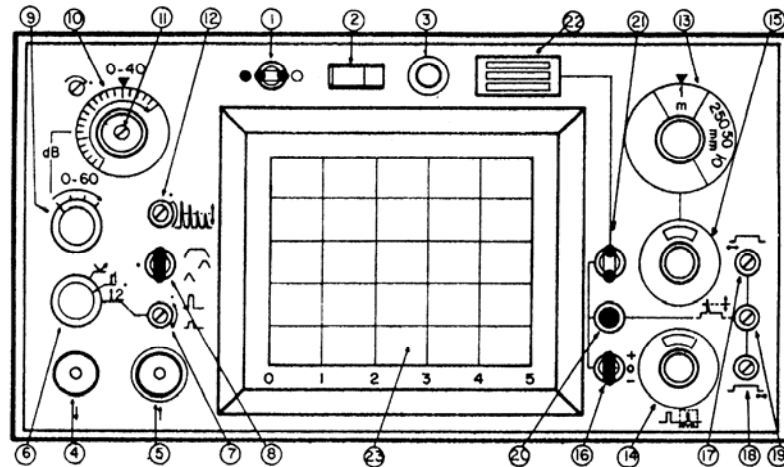
Cuando el generador de alta frecuencia recibe la señal de sincronización, produce un impulso eléctrico que se transmite al cristal, el cual oscila, emitiendo un impulso acústico. Simultáneamente, se inicia el barrido de la pantalla. La primera indicación es la denominada señal inicial o señal de emisión y se forma a la vez que el impulso eléctrico de alta frecuencia llega al cristal, es decir, constituye el origen de la base de tiempo de la escala.

El impulso acústico (ultrasónico) recorre el material, se refleja en la superficie opuesta de la muestra (método de pulso-eco) y llega al cristal el cual, a su vez, lo transforma en un impulso eléctrico de pequeño voltaje que, después de pasar por el amplificador, se aplica a las placas de deflexión vertical del tubo de rayos catódicos, lo que da lugar a la primera indicación de fondo.

Siendo el sistema de sincronización de generación de control de tiempo de barrido, uno de los mas importantes dentro de los sistemas que controlan las funciones de los equipos e instrumentos ultrasónicos, se deben citar sus funciones, que son:

- Generar el voltaje de deflexión horizontal,
- Generar la señal de sincronización para la emisión de impulsos eléctricos de alta frecuencia, y
- Controlar la luminosidad de la pantalla.

La función de todos y cada uno de éstos sistemas es bastante compleja,. por lo cual sería bastante "largo ' describir el proceso que hace posible et control ultrasónico de piezas. Sin embargo, los equipos ultrasónicos poseen una serie de controles de ajuste y calibración, que deben ser conocidos, tanto su función como su aplicación, para así ser manipulados. En la Figura 5.10 se muestra un equipo de detección ultrasónica de presentación A-scan con sus diferentes controles.



- (1) Interruptor de encendido.
- (2) Control de carga de baterías.
- (3) Focalizador (nitidez de la imagen).
- (4) Conector coaxial para palpador emisor.
- (5) Conector coaxial para palpador receptor.
- (6) Interruptor selector de conexión de palpadores.
- (7) Potenciómetro de graduación de amplificación vs resolución.
- (8) Interruptor selector de frecuencia.
- (9) Interruptor selector de amplificación (escala de 20 dB 60 dB máximo).
- (10) Interruptor selector de amplificación (escala de 2 dB 40 dB máximo).
- (11) Potenciómetro de amplificación (2 dB máximo).
- (12) Potenciómetro de graduación de atenuación de señal.
- (13) Interruptor de rango grueso (10 mm a 1 m).
- (14) Potenciómetro graduado de control de desplazamiento de rango.
- (15) Potenciómetro graduado de control de dilatación de escala horizontal.
- (16) Interruptor selector de ventana de alarma.
- (17) Potenciómetro de fijación de inicio de ventana.
- (18) Potenciómetro de fijación de final de ventana.
- (19) Potenciómetro de fijación de nivel umbral de ventana.
- (20) Señal de alarma luminosa.
- (21) Interruptor selector de señal de alarma.
- (22) Señal de alarma sonora.
- (23) Pantalla.

Figura 5.10. Controles de un equipo ultrasónico

En la Figura 5.10, se presenta una serie de controles que son comunes para todos los equipos ultrasónicos no importando la marca, no obstante presentan algunas variaciones que serán mencionadas posteriormente. Estos controles son clasificados como sistemas de control, de ajuste y de calibración.

Entre los sistemas de control del instrumento, se encuentran los siguientes:

- Sistema de alimentación.

- Sistema de pantalla.

El sistema de ajuste del equipo es:

- Sistema de conexión.

Los sistemas de calibración son controlados a través de la pantalla y son:

- Sistema de ganancia.
- Sistema de distancia / profundidad.
- Sistema de alarma.

A continuación veremos todos y cada uno de estos sistemas, su función y aplicaciones.

#### 5.3.1. Sistema de Alimentación.

El sistema de alimentación está compuesto por todo lo concerniente a conexiones eléctricas de alimentación de corriente al equipo. En otras palabras, está compuesto por; transformador de corriente alterna (110 - 115 o 220 - 230 voltios) o corriente continua (12 voltios), el cual a veces cumple la función de cargador de baterías, simultáneamente, baterías de plomo o alcalinas (níquel - cadmio); (1) interruptor de encendido / apagado on / off); y (2) control indicador de nivel de carga de baterías,

En éste sistema, la conexión a baterías debe efectuarse con sumo cuidado vigilando que los acumuladores utilizados sean los adecuados, pues de lo contrario existe el peligro de dañar el equipo. En la Figura 5.11 se muestra la diferencia existente, en cuanto a descarga se refiere, entre una batería normal (como la utilizada por un vehículo) y una batería especial

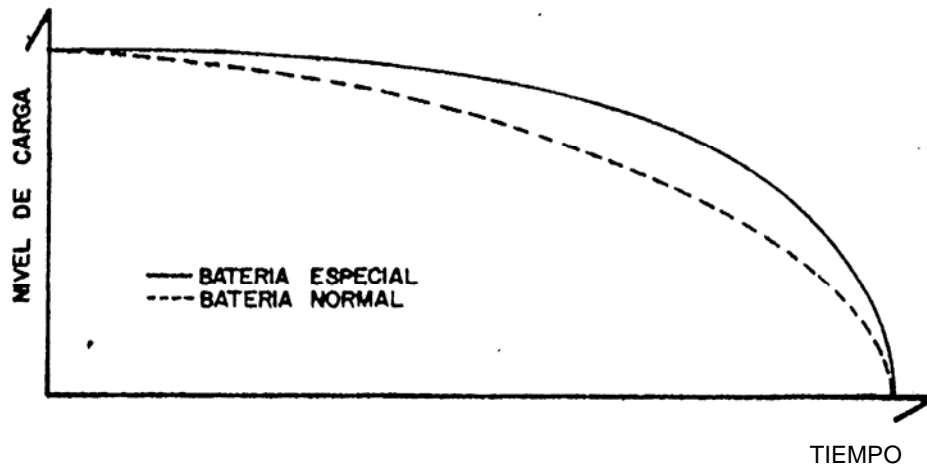


Figura 5.11 Curvas de descarga de baterías recargables.

Las baterías utilizadas en los equipos ultrasónicos pueden ser, como se dijo anteriormente, de plomo o alcalinas (níquel-cadmio); sin embargo, están caracterizadas por una condición de descarga donde mantienen el voltaje estable durante mas tiempo que las normales, de ésta forma la corriente (amperaje) no aumentará excesivamente.

Cuando la corriente se incrementa, automáticamente causa aumentos temperatura que pueden dañar las partes electrónicas del instrumento.

El control indicador de nivel de carga de las baterías (2), es generalmente analógico, con zonas delimitadas por colores, donde cada color indica una condición de nivel de carga,

### 5.3.2. Sistema de Pantalla.

El sistema de pantalla está compuesto por los controles que operan el foco o la nitidez de- la pantalla (3) y otros que dominan el tono, o la claridad u oscuridad, de la pantalla (algunos equipos presentan éste control) éstos son controles propios de un tubo de rayos catódicos, y la pantalla en sí (23).

Anteriormente se dijo que la pantalla de un equipo ultrasónico, es un tubo de rayos catódico (Cathode ray tube). En la Figura 5.12 se presenta un tubo con sus componentes.

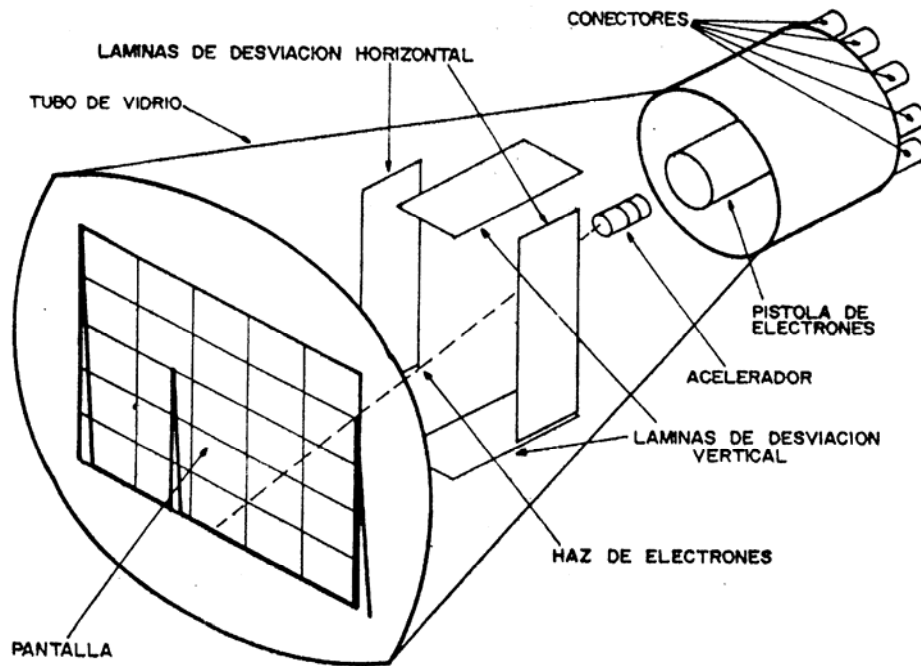


Figura 5.12. Tubo de Rayos catódicos

Una pantalla "CRT" de un equipo ultrasónico osciloscópico es similar a una pantalla de televisión. El tubo de rayos catódicos está fabricado en vidrio de alta resistencia y bajo espesor, y está recubierto en la pantalla por un compuesto de fósforo. Este recubrimiento varía en su composición para producir brillo, colores o permanencia de la imagen.

En la parte opuesta del tubo se encuentra la pistola, que produce un bombardeo de electrones, emitidos por el calentamiento de un filamento. Por efectos electromagnéticos, éstos electrones son acelerados y dirigidos en forma de un haz, cuando éste haz golpea la pantalla se produce la luz. La posición de los puntos de luminosidad varía de acuerdo con los cambios en las cargas eléctricas de las láminas de desviación o deflexión horizontales y verticales.

En los equipos ultrasónicos, la pantalla muestra una línea horizontal en su zona mas baja, ésta línea se denomina: línea base de tiempo. La línea base puede ser traducida a distancia, recordemos que anteriormente se mencionó que los equipos ultrasónicos operan en base a amplitud contra tiempo, o sea, la amplitud de los ecos de indicación contra el tiempo que tardan éstos ecos en ser detectados por el palpador; cuando la velocidad de propagación de la onda en el material de ensayo es conocida, es posible calibrar el eje horizontal de la pantalla en términos de distancia.

### 5.3.3. Sistema de Conexión.

Siempre, antes de encender el equipo es, práctica recomendada, efectuar las conexiones del o los palpadores a utilizar durante el ensayo. A tal fin, seleccionaremos el cable apropiado y lo ubicaremos en el o los conectores coaxiales de emisión (4) y recepción (5), cuando se trata de un palpador "S-E" o dos palpadores, según el sistema de transmisión; o el conector (4) cuando se trata de un palpador de cristal único.

Cuando se realiza un ensayo por el método de transmisión (ver Apartado 5.1.2), se utilizarán los dos conectores, en el conector (4) se colocará el cable del palpador emisor y en el (5) el del receptor; así como el interruptor selector (6), se ubicará en la posición superior (V). Los dos palpadores deben ser de la misma frecuencia. Como se dijo anteriormente, en ultrasonido se trabaja con frecuencias entre 0,5 y 25 MHz; operando el interruptor de tres posiciones de selección de frecuencia (8) según sea el caso. Igualmente, cuando se realizan mediciones de la intensidad acústica por reflexión, el ángulo de los palpadores debe ser igual.

La conexión y ajuste del equipo, cuando se trabaja con palpadores "Emisor-Receptor" (ver Capítulo 2, Apartado 2.4.1.1.2) es exactamente igual que la realizada por el método de transmisión.

Cuando se realiza un ensayo por el método de pulso eco (un solo palpador), la conexión y ajuste del equipo difiere del caso anterior. En éste caso, se utiliza únicamente el conector coaxial para palpador emisor (4), que cuando el interruptor selector de conexión de palpadores (6) se ubica en la posición intermedia ((I) o en la posición inferior ((2) y puede operar con palpadores piezoeléctricos de cristal único (emisor / receptor). La diferencia entre las dos posiciones del interruptor (6) radica en que, en la posición inferior ((2) existe la posibilidad de operar el potenciómetro de graduación de amplificación contra resolución (7), el cual su función será estudiada en el siguiente apartado. No obstante, normalmente se ubica el selector (6) en la posición intermedia.

Dependiendo del equipo, éste puede presentar un interruptor selector de frecuencia (B), como el mostrado en la Figura 5.10; donde la posición superior , significa la selección de un espectro de frecuencia de banda ancha, la posición intermedia espectro de banda estrecha , superior y la posición inferior espectro de frecuencia de banda estrecha inferior. En el Capítulo 2, se explicó que el espectro de frecuencia de un palpador ultrasónico depende, en parte, del nivel de amortiguación propio de cada palpador. En otros casos, el interruptor se limita simplemente a posiciones, donde la selección se realiza en base a valores de frecuencia expresados en MHz. Por ejemplo, un selector de cuatro posiciones posee: la primera posición, 0,5 a 2 MHz la segunda posición, 2 a 5 MHz la tercera posición, 5 a 10 MHz y la cuarta posición, 10 a 25 MHz.

#### 5.3.4.Sistema de Ganancia

El sistema de ganancia está compuesto por cinco controles que son: interruptor selector de amplificación (9), con tres pasos de 20 dB c/u y un máximo de 60 dB en total; interruptor selector de amplificación (10), con veinte pasos de 2 dB c/u y un máximo de 40 dB; potenciómetro de amplificación (11), con un máximo de 4 a 6 dB, dependiendo del equipo (marca y modelo); potenciómetro de graduación de

atenuación de señal (12) y potenciómetro de graduación de amplificación contra resolución (7)

Mediante los controles de amplificación (9), (10) y (11), es posible controlar la amplitud o altura de los ecos de indicación de superficies límites o discontinuidades» El objetivo de los mismos, es el de proporcionar un nivel de referencia, en cuanto a la amplitud se refiere, de los ecos recibidos por el palpador. En otras palabras, los controles de ganancia determinan la cantidad que serán amplificadas las señales de indicación recibidas por el palpador.

La verificación de las condiciones de operación del sistema de ganancia es muy sencilla. Si calibramos el equipo con un bloque patrón de una pulgada de espesor, a dos pulgadas de distancia en pantalla, obtendremos dos ecos de reflexión pared posterior ubicados el, primero en el medio de la pantalla y el segundo en el extremo derecho de la misma, tal y como puede observarse en la Figura 5.13. Si por medio de los controles de amplificación llevamos el primer eco de reflexión a un 80 % de altura de pantalla y luego reducimos 6 dB, veremos que la altura de ambos ecos se reduce a la mitad (el primer eco se reducirá a un 40 % de altura de pantalla). Al disminuir 6 dB mas ocurrirá, o deberá ocurrir, lo mismo, o sea, ambos ecos disminuirán su altura a la mitad de la condición anterior y así sucesivamente. De ésta forma se comprueba que la relación de control de ganancia sea lineal. El error permitido en la linealidad vertical es de un 12 %

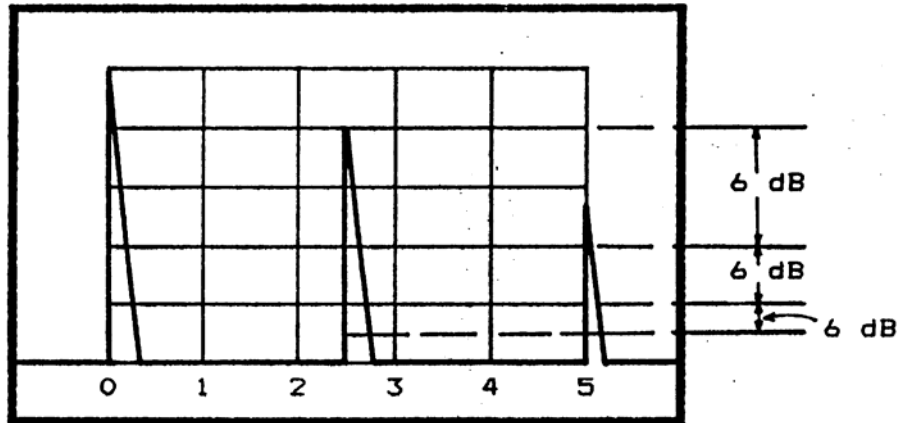


Figura 5.13.- Controles de Ganancia

Recordemos que en el Capítulo 2 estudiamos el efecto de la distancia en la disminución de la presión acústica (Ecuación 2.10) y así como el cálculo y la relación existente entre la diferencia de altura de ecos con la distancia y el coeficiente de atenuación (Ecuación 2.14). De la misma manera, entre el valor resultante de la división de la presión acústica inicial por la presión acústica en el punto de interés dentro, del camino sónico, y el coeficiente de atenuación, existe otra relación conocida como Ley de la Atenuación (Ecuaciones 2.15 y 2.16).

Los impulsos acústicos que llegan al cristal después de recorrer el material, generan impulsos eléctricos de voltajes del orden de 0,001 hasta un máximo de 1 voltio. Puesto que el tubo de rayos catódicos necesita voltajes de 100 Voltios para deflectar la base de tiempo, el amplificador deberá tener, en consecuencia, una ganancia de 10.000. Deberá ser de banda ancha con el fin de poder amplificar, con un mínimo de distorsión, los impulsos eléctricos cortos cuyo espectro de frecuencias es muy amplio. Por otra parte, la amplitud del ruido de fondo crece linealmente con la raíz cuadrada de la anchura de banda, con lo que una banda más estrecha permitirá mayores niveles de amplificación, conservando a la vez una buena relación señal / ruido. El aumento de la altura de la indicación del eco en función del voltaje de entrada al amplificador puede ser lineal, logarítmico o lineal a partir de un valor

determinado. En este último caso, mientras la señal de entrada no alcanza el umbral mínimo, no se amplificará, con lo cual no será visualizada y la imagen será mas clara por desaparición del ruido.

No todas las condiciones de operación de los equipos ultrasónicos en ensayos reales son ideales. Existen aplicaciones donde una serie de factores, inherentes al material de ensayo, crean indicaciones de baja amplitud que distorsionan o camuflajan las señales de indicación de las discontinuidades. En el Capítulo 2, estudiamos los factores que producen la atenuación, bien sea por efecto de la absorción o de la dispersión o por efecto de ambos factores del haz ultrasónico en el material, por ésta razón es necesario proporcionar una gran amplificación de la señal de recepción de manera que sea apreciada en pantalla; pero a la vez que amplificamos las señales de indicación relevantes, también amplificaremos las señales no relevantes. Estas indicaciones son conocidas con el nombre de ruido de la señal o grama (pasta).

Con el fin de minimizar el ruido en las señales ultrasónicas, los equipos están provistos de un potenciómetro de graduación de atenuación de señal (12), que no es mas que un dispositivo de graduación que atenúa las indicaciones electrónicamente» Operando los controles de amplitud o ganancia y atenuación puede llegarse a obtener una imagen ultrasónica mas limpia, minimizando el efecto del pasta en la imagen (ver Figura 5.14 ).

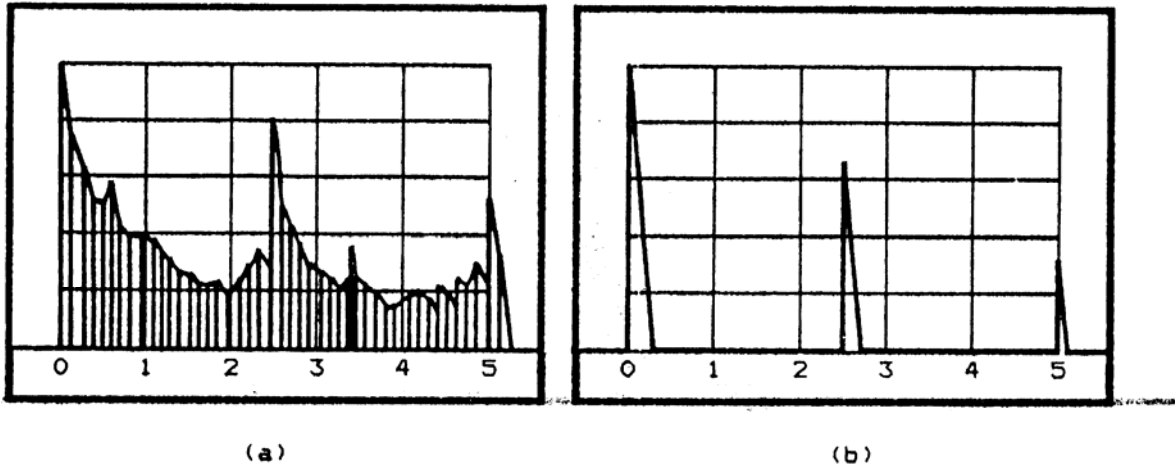


Figura 5.14.- Control de Atenuación.

En la figura 5.14, se presenta el caso anterior donde la presencia del pasto, impide observar con facilidad los ecos de indicación, debido a la gran amplificación suministrada al equipo. La Figura 5.14b, presenta la pantalla una vez operados los controles de atenuación y ganancia para mantener la altura de los ecos y presentar una imagen mas limpia, La resolución también juega un papel muy importante en cuanto a la limpieza y nitidez de la imagen. Por ésta razón, es necesario conocer la aplicación del potenciómetro de graduación de amplificación contra resolución (7). En el caso en que dos o mas indicaciones se presenten sumamente cercanas en la pantalla, puede ocurrir que los ecos no muestren la diferencia o la distancia existente entre las discontinuidades. En otras palabras, puede suceder que no se note la separación de las discontinuidades por efecto de la cercanía y la falta de separación e identificación de las sedales de indicación de varios reflectores cercanos, en lo que a profundidad se refiere (ver Figura 5.15).

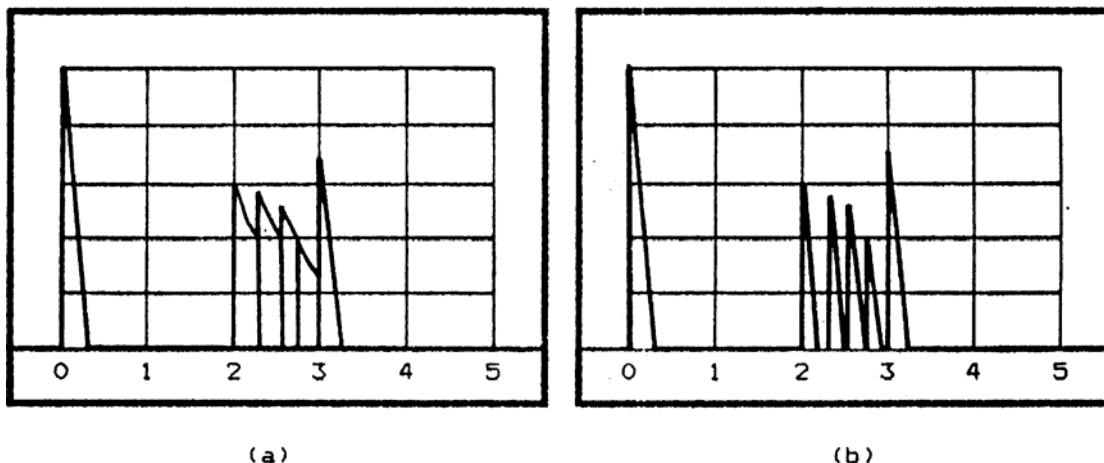


Figura 5.15. Resolución.

En la Figura 5.15 a, se muestra una imagen de pantalla donde se encuentran varios eco sumamente cercanos que se confunden en indicaciones de una misma discontinuidad. La Figura 5.15 b, presenta el mismo caso, pero con mayor resolución de forma que se aprecia la diferencia entre los ecos de indicación.

En algunos equipos, los controles del sistema de ganancia son sustituidos por controles de atenuación, tal es el caso de los equipos de Marca Magnaflux. No obstante, el efecto de ambos controles es el mismo, en lo que a la electrónica se refiere.

En el Capítulo 6, Calibración de los Sistemas Ultrasónicos, se explicará como se realiza el chequeo de la resolución de los palpadores ultrasónicos con los patrones de calibración y estándares de referencia que se encuentran en el mercado.

#### 5.3.5.- Sistema de Distancia / Profundidad.

Los controles, que comprenden el sistema de distancia/profundidad son; interruptor de rango grueso (13), el cual, en algunos equipos se presenta con cuatro posiciones respecto de la profundidad de penetración de calibración, la primera es 10 milímetros, la segunda es 50 milímetros, la tercera es 250 milímetros y la cuarta es

1.000 milímetros (1 metro), en otros equipos, es similar (con variaciones en el sistema de medición); potenciómetro graduado de control de rango (14), el cual funciona a 10 vueltas y está graduado de 1 a 1.000; y potenciómetro graduado de control de dilatación de escala horizontal (15), que funciona a 10 vueltas y está graduado de 1 a 1.000.

La función que cumple el interruptor de rango grueso (13), es la de seleccionar el rango mínimo de calibración de escala horizontal en pantalla. La pantalla de un equipo ultrasónico posee cinco divisiones grandes y entre dos divisiones grandes presenta diez divisiones pequeñas; es decir, en total tiene cincuenta divisiones pequeñas por lo que para el caso en cuestión podremos calibrar la pantalla del equipo a; 0,2 milímetros por división, 1 milímetro por división, 5 milímetros por división y 20 milímetros por división. Estos valores de calibración son los mínimos que pueden ser obtenidos (siempre y cuando las escalas del interruptor sean las indicadas anteriormente), si colocamos el interruptor de rango grueso en la posición correspondiente y el potenciómetro graduado de control de dilatación de escala horizontal (15) en 1. Las escalas mencionadas pueden ser dilatadas o ensanchadas mediante el potenciómetro graduado de control de escala horizontal (15).

La relación de dilatación es de 1 a 4; por lo que al colocar el interruptor selector de rango grueso (13) en la cuarta posición (1 metro) y el potenciómetro de dilatación (15) en el máximo (1.000), la pantalla estará calibrada para medir una profundidad máxima de 5 metros. De la misma forma ocurrirá con el resto de las posiciones del interruptor (13) así; en la primera posición la distancia de calibración de la pantalla estará comprendida entre 10 y 50 milímetros, ambos inclusive; en la segunda, de 50 a 250 milímetros; en la tercera, de 250 a 1.250 milímetros y en la cuarta, de 1 a 5 metros (ver Figura 5.16).

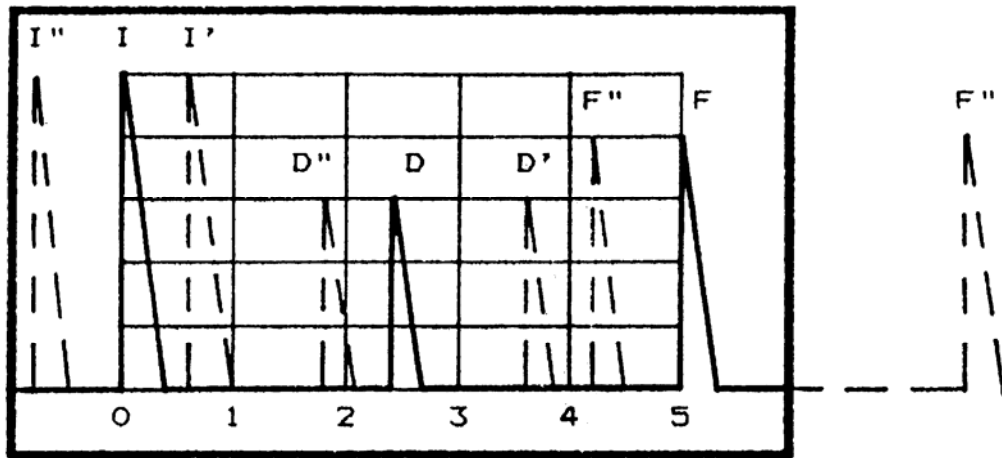


Figura 5.16 Efecto producido por el control de dilatación.

Igualmente, la calibración de la pantalla variará como sigue en la primera posición, de 0,2 a 1 milímetro por división; en la segunda posición, de 1 a 5 milímetros por división; en la tercera, de 5 a 25 milímetros por división y en la cuarta, de 20 a 100 milímetros por división. En la Figura 5.16 se muestran inicialmente tres ecos que corresponden: el primero al eco inicial (I), el segundo al eco de indicación de discontinuidad (D) y el tercero al eco de indicación de pared posterior o de fondo (F).

Si aumentamos el valor de graduación del potenciómetro de dilatación de escala horizontal (15), los ecos se desplazarán hacia la derecha de la pantalla hasta adoptar las posiciones indicadas como (I'), (D') y (F'); por supuesto, el eco de indicación de fondo (F), al ser desplazado hacia la derecha, desaparecerá de la pantalla; con este procedimiento hemos disminuido la distancia de calibración de la pantalla. Sin embargo, hemos dilatado la imagen, o sea, aumentado la distancia entre los ecos. Si por el contrario, giramos el potenciómetro (15), partiendo de las posiciones iniciales (I), (D) y (F), y disminuimos el valor de graduación; obtendremos tres nuevas posiciones (I''), (D'') y (F'') desplazadas hacia la izquierda y disminuidas las distancias entre ecos. Sin embargo, mediante este procedimiento. La distancia de

calibración, de la pantalla ha sido aumentada, pero hemos disminuido la distancia entre ecos. El eco inicial desaparecerá por efecto del desplazamiento de la imagen.

El potenciómetro graduado de control de desplazamiento de rango (14), cumple la función de desplazar la imagen presentada en pantalla sin modificar la distancia entre los ecos. Es decir, ubica los ecos en la posición variar la profundidad de calibración de la deseada pantalla sin (ver Figura 5.17). En la Figura 5.17 se muestran inicialmente tres ecos que corresponden: el primero al eco inicial (A), el segundo al eco de indicación de discontinuidad (B y el tercero al eco de indicación de pared posterior (O.)

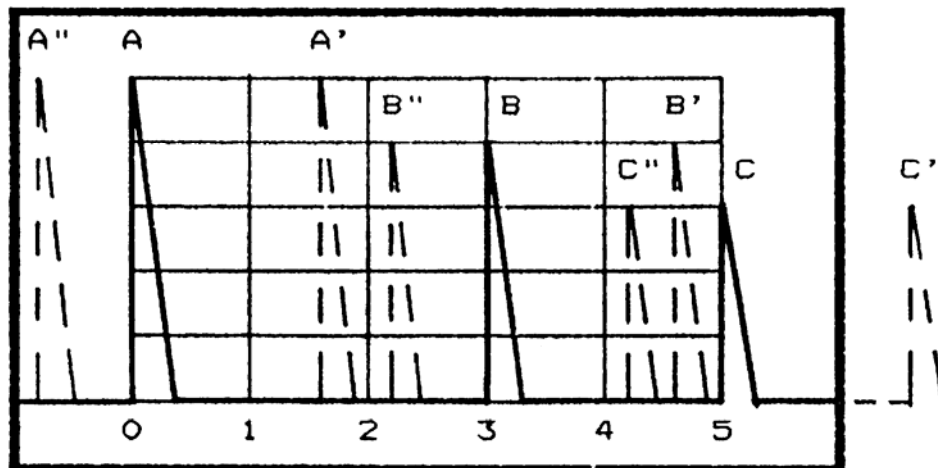


Figura 5.17.- Desplazamiento de la imagen

Aumentando el valor de graduación del potenciómetro graduado de control de desplazamiento de rango (14), observamos que la imagen se ha desplazado hacia la derecha, manteniendo la distancia entre los ecos, hasta llegar a las posiciones (A ), (B ) y (C) al igual que en el caso anterior, el eco de indicación de pared posterior (o ha sido desplazado fuera de la pantalla (C) y no se observará. Si por el contrario giramos el potenciómetro (14), partiendo de las posiciones iniciales (A), (B) y (C), en dirección contraria al sentido de giro de las agujas del reloj, desplazaremos la imagen

hacia la izquierda, o sea, adoptaremos las posiciones (A), (B") y (C), donde el eco inicial (A) se perderá -fuera de la pantalla.

Siempre, el potenciómetro graduado de control de desplazamiento de rango (14), cumple la función de desplazar la imagen a la derecha o a la izquierda manteniendo la calibración en distancia mientras que el potenciómetro graduado de control de escala horizontal (15), cumple la función de ajustar la distancia de calibración de la pantalla.

Los equipos actuales permiten variar la velocidad de barrido, de manera que se cubre, sin solución de continuidad, una gama de espesores de acero desde 10 milímetros hasta 10 metros. Se dispone, además, de mandos que permiten el centrado de la imagen en sentido horizontal y, en algunos casos, en sentido vertical. Ambos actúan variando el voltaje estático de las láminas de desviación o placas deflectoras del tubo de rayos catódicos sin modificar la velocidad de barrido.

#### 5.3.6.- Sistema de Alarma.

El sistema de alarma está compuesto por los siguientes controles; interruptor selector de ventana de alarma (16), potenciómetro de fijación de inicio de ventana (17), potenciómetro de fijación de final de ventana (18), potenciómetro de fijación de nivel umbral de ventana (19), señal de alarma luminosa (20), interruptor selector de señal de alarma (21) y señal de alarma sonora (22).

El sistema de alarma consiste en que una vez calibrado el instrumento ultrasónico, tanto en distancia como en amplitud, se procederá a ubicar la altura de eco crítica (según el tamaño crítico de defecto"), la cual debe ser tomada en cuenta por indicación de una posible discontinuidad; o en caso contrario, cuando no se detecte señal de una superficie límite, como puede ser la pared posterior del objeto bajo ensayo, por efecto de alguna discontinuidad que interrumpa el paso del haz ultrasónico hasta la misma. El interruptor selector de ventana de alarma (16) posee

tres posiciones que son; superior (+), que se utiliza cuando se desea resaltar algún eco de discontinuidad que supere cierto nivel; media (0) , fuera de servicio; e inferior (-), se utiliza cuando se desea mantener un eco en pantalla, la alarma entrará en acción cuando éste desaparezca. En cualquiera de las dos posiciones de funcionamiento de la ventana (+ ó -) se observará la misma en la pantalla, tal y como se muestra en la Figura 5.18. La ventana puede abarcar toda la longitud de la pantalla, así como puede también ser ubicada en una zona específica de la misma, manipulando los potenciómetros (17) y (18), que sirven para seleccionar tanto el inicio como el final de la ventana. El potenciómetro (19) sirve para fijar una altura de eco, que una vez superada accionará la alarma del equipo como dispositivo de precaución (ver Figura )

En la Figura se observa que entre las divisiones 1 y 4,3 se encuentra ubicada la ventana de alarma. Al comienzo de la ventana se encuentra una flecha doble identificada como (17), que indica la función del potenciómetro de fijación de inicio de ventana; así mismo, a la derecha de la pantalla se encuentra otra flecha doble identificada como (18), indicando la función del potenciómetro de fijación de final de ventana. Al 50 % de altura de pantalla se encuentra una línea punteada que simula el nivel umbral de i a ventana con una flecha doble que indica que éste nivel puede ser ajustado en altura mediante el potenciómetro de nivel umbral de ventana (19).

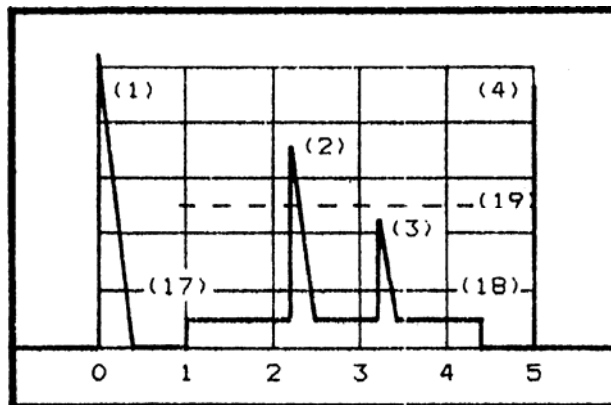


Figura 5.18 Sistema de alarma.

El funcionamiento de la ventana en la posición (+) del interruptor selector (16) es como sigue; cuando los controles (17), (18) y (19) han sido operados como se muestra en la Figura 5.18, cualquier eco que sobrepase el nivel umbral, tal y como puede ser el eco identificado con el número (2), activará las señales de alarma. Si un eco se encuentra por debajo del nivel umbral, por ejemplo el eco identificado como (3), la alarma no se disparará por efecto de la graduación del nivel umbral.

Cuando se selecciona en el interruptor selector la posición (-) mientras no se encuentre un eco que sobrepase la altura de éste nivel umbral, no se activará la señal de alarma. Si por alguna razón este eco disminuye su altura lo suficiente como para que esté por debajo del nivel umbral o desaparece, inmediatamente se disparará la señal de alarma.

El interruptor selector de señal de alarma (21), tiene dos posiciones: la superior activa tanto la señal de alarma luminosa (20) como la señal de alarma sonora (21), y la inferior activa solamente la señal de alarma luminosa. El funcionamiento, tanto del interruptor como de las señales de alarma está bajo dominio del interruptor selector de ventana de alarma (16); es decir, cuando el interruptor (16) se encuentra en la posición (O), el sistema completo se encontrará fuera de funcionamiento.

Recordemos que cuando hablamos de los equipos ultrasónicos por el sistema de pulso - eco, que operan bajo el principio de medición del tiempo de recorrido como magnitud única, se hizo mención del nivel umbral, pues, el requisito exigido para que se obtenga señal de respuesta alguna es que dicho nivel umbral sea superado. El principio de operación de ambos equipos, por ejemplo, un medidor de espesores por ultrasonido, digital, opera bajo el principio expuesto anteriormente, mientras que un detector de fallas por ultrasonido, osciloscópico, posee su sistema de alarma. La diferencia básica entre ambos aparte de ser uno de ellos digital y el otro osciloscópico es que en el equipo digital, la variación del nivel umbral significa alterar la calibración

electrónicamente fijada, mientras que en el osciloscópio puede ser alterada o anulada, como se explicó con anterioridad.

**CAPITULO 6**

**CALIBRACIÓN DE  
LOS SISTEMAS  
ULTRASÓNICOS**

Para la ejecución de la calibración de los sistemas ultrasónicos, se utilizan bloques o trozos metálicos con discontinuidades artificiales, que son usados para dos propósitos. Uno de los cuales se refiere a la determinación de las características de operación del instrumento y del palpador; la otra a establecer y reproducir los ecos de indicación de respuesta del instrumento durante los ensayos en piezas o muestras.

Cuando los bloques son utilizados para determinar las características de operación de un equipo ultrasónico, o para establecer una reproducción de las condiciones de ensayo, son llamados "Bloques de Calibración". Cuando éstos son usados para comparar la altura de un eco de discontinuidad o la ubicación de la discontinuidad en la pieza de ensayo, con respecto a una discontinuidad artificial creada en el bloque especial, son llamados "Bloques de Referencia". En algunos casos, los mismos bloques pueden ser usados para propósitos específicos de calibración o como referencia.

**6.1. BLOQUES NORMALIZADOS DE REFERENCIA**

En el ensayo de ultrasonido, todas las indicaciones de discontinuidades son comparadas con las recibidas de un bloque normalizado de referencia. Estos son utilizados para estandarizar los equipos ultrasónicos en ensayos a piezas en general.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

La estandarización se realiza por dos razones, que son:

- Chequear que el conjunto equipo-palpador trabaje como se requiere
- Seleccionar el nivel de sensibilidad o ganancia requerida para detectar las discontinuidades según sus dimensiones en la pieza de ensayo.

La evaluación de las discontinuidades se efectúa por comparación de sus indicaciones con las recibidas de una discontinuidad artificial de dimensiones conocidas, a la misma profundidad y en un bloque normalizado de referencia del mismo material.

La razón por la cual los bloques estándares son hechos del mismo material es que es necesario reproducir las mismas condiciones de atenuación del sonido, tamaño de grano, tratamiento térmico, configuración y características generales presentes en el material de la pieza de ensayo.

Entre los bloques normalizados de referencia mas comúnmente usados, se encuentran cuatro tipos, que son:

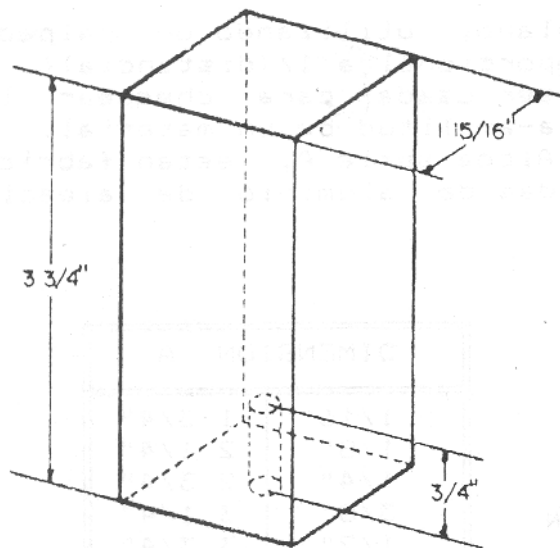
- Alcoa Serie A, que es un set de bloques área-amplitud
- Alcoa serie B, set de bloques distancia-amplitud, también son conocidos como Hitt
- Serie ASTM E-127 (American Society for Testing Materials), set de bloques área-amplitud y distancia-amplitud
- Bloques I.I.W. (International Institute of Welding), Bloque V-1, Bloque V-2 y Bloque de Calibración en Resolución.

Por último, existen algunos otros bloques, conocidos como bloques especiales, que son diseñados para el estudio y la calibración de los equipos y sistemas, según la aplicación específica.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

### 6.1.1. Set de Bloques ALCOA Serie A.

El set de bloques Alcoa serie A, set de bloques de calibración área-amplitud, consta de ocho bloques de superficie cuadrada de lado igual a  $1 \frac{15}{16}$  pulgadas y con una longitud de  $3 \frac{3}{4}$  pulgadas. A  $\frac{3}{4}$  de pulgada de profundidad, desde la superficie posterior, se encuentra una superficie de fondo plano "FBH" (flat bottom hole), taladrado en el centro del bloque. Los diámetros de los agujeros de fondo plano van desde  $\frac{1}{64}$  de pulgada, en el bloque N° 1, hasta  $\frac{1}{8}$  de pulgada ( $\frac{8}{64}$  de pulgada), en el N° 8. El set de bloques Alcoa serie A, está fabricado en base a barras forjadas de aluminio de aleación ligera 7075-T6 (ver Figura 6.1).



N° del Bloque	φ del FBH
1	$\frac{1}{64}$ "
2	$\frac{1}{32}$ "
3	$\frac{3}{64}$ "
4	$\frac{1}{16}$ "
5	$\frac{5}{64}$ "
6	$\frac{3}{32}$ "
7	$\frac{7}{64}$ "
8	$\frac{1}{8}$ "

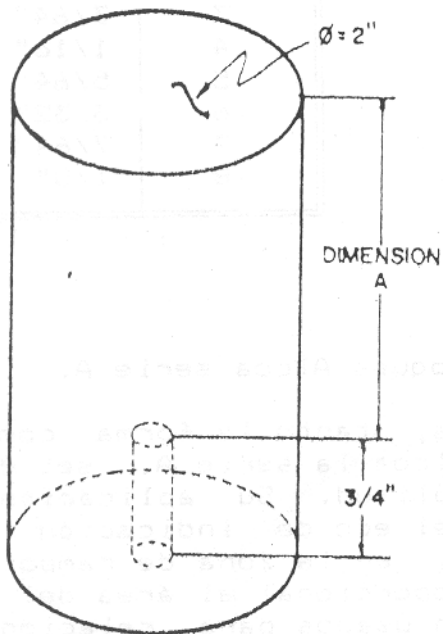
Figura 6.1. Set de bloques Alcoa serie A

En la Figura 6.1 vemos, tanto la forma como las dimensiones de los bloques ALCOA serie A, set de bloques de calibración área-amplitud. Su aplicación esta basada en que la amplitud del eco de indicación de un agujero de fondo plano "FBH", en la zona de campo lejano del haz de un palpador, es proporcional al área del mismo. Entonces, éstos bloques son usados para relacionar la amplitud de la señal con el área de la discontinuidad, asumiendo siempre que no existan pérdidas causadas por rugosidad superficial.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

### 6.1.2. Set de bloques ALCOA Serie B.

El set de bloques Alcoa serie B, o Hitt, set de bloques de calibración distancia-amplitud, consta de diecinueve bloques de 2 pulgadas de diámetro, con agujeros cilíndricos de fondo plano, todos del mismo diámetro. Sin embargo, pueden ser obtenidos en el mercado, tres juegos con tres diámetros de agujeros de fondo plano diferentes ( $3/64$  de pulgada,  $5/64$  de pulgada y  $1/8$  de pulgada). La profundidad de los agujeros de fondo plano es  $3/4$  de pulgada desde la superficie posterior. Las distancias, desde la superficie superior o de prueba del bloque hasta los agujeros de fondo plano, varían desde  $1/16$  de pulgada, hasta  $5\ 3/4$  pulgadas (ver Figura 6.2).



Dimensión A	
1/16"	1 3/4"
1/8"	2 1/4"
1/4"	2 3/4"
3/8"	3 1/4"
1/2"	3 3/4"
5/8"	4 1/4"
3/4"	4 3/4"
7/8"	5 1/4"
1"	5 3/4"
1 1/4"	
φ del FBH	
3/64"	1/8"
5/64"	

Figura 6.2. Set de bloques Alcoa serie B

En la Figura 6.2 se muestra un juego de bloques de la serie Alcoa B, set de bloques de calibración distancia-amplitud. Por teoría de la onda ultrasónica podemos saber que la disminución de la amplitud del eco, para una superficie de agujero de fondo plano, utilizando un palpador con cristal circular, es proporcional a  $1/(\text{distancia})^2$ . La serie de bloques B puede ser usada para chequear las características en distancia-

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

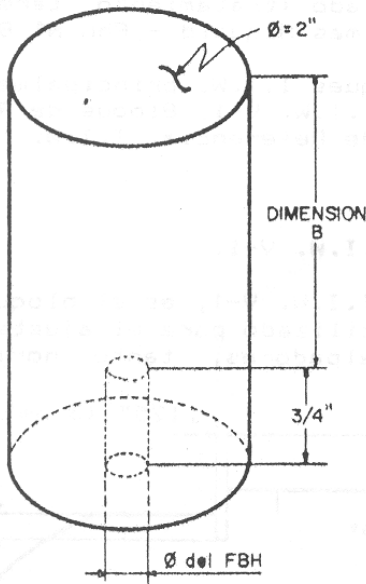
amplitud de un material. Al igual que el set de bloques Alcoa serie A, están fabricados en base a barras forjadas de aluminio de aleación ligera, 7075-T6.

Cada bloque se encuentra identificado por un código numérico que consta de cinco dígitos. El primer dígito identifica el diámetro del agujero de fondo plano, y los cuatro dígitos restantes se refieren a la distancia existente desde la superficie de prueba hasta el agujero de fondo plano. Por ejemplo: un bloque Alcoa serie B identificado con el código 3-0075, tiene un diámetro de agujero de fondo plano de  $3/64$  de pulgada y una distancia desde la superficie hasta el agujero de fondo plano igual a  $0,75$  o  $3/4$  de pulgada.

### 6.1.3. Set de Bloques ASTM E-127.

El set de bloques ASTM E-127 es una combinación de bloques de calibración área-amplitud y distancia-amplitud. Consta de diez bloques de 2 pulgadas de diámetro que tienen taladrado en el centro de un extremo, el orificio de fondo plano a  $3/4$  de pulgada de profundidad desde la superficie posterior. El primer bloque tiene un FBH de  $3/64$  de pulgada de diámetro, a una distancia de 3 pulgadas de la superficie de prueba. Los siete bloques siguientes tienen un diámetro de agujero de fondo plano de  $5/64$  de pulgada de diámetro, con distancias de:  $1/8$  de pulgada,  $1/4$  de pulgada,  $1/2$  de pulgada,  $3/4$  de pulgada,  $1\ 1/2$  pulgadas, 3 pulgadas y 6 pulgadas. Los dos bloques restantes tienen un agujero de fondo plano de  $1/8$  de pulgada de diámetro, con distancias de 3 pulgadas y 6 pulgadas. Al igual que los sets de bloques de calibración Alcoa series A y B, están fabricados en base a barras forjadas de aluminio de aleación ligera 7075-T6. El set de bloques de calibración ASTM E-127, también puede ser obtenido en acero o algunas aleaciones férreas (ver Figura 6.3).

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS



Dimensión B	Ø del FBH
3"	3/64"
1/8"	5/64"
1/4"	
1/2"	
3/4"	
7/8"	
1 1/2"	
3"	
6"	1/8"
3"	
6"	

Figura 6.3. Set de Bloques ASTM E-127

Los tres bloques con distancia de 3 pulgadas y diámetros de agujero de fondo plano de 3/64 de pulgada, 5/64 de pulgada y 1/6 de pulgada (8/64 de pulgada), conforman un set de bloques área-amplitud. De la misma forma, los dos bloques con distancia de 6 pulgadas y diámetros de agujero de fondo plano de 5/64 de pulgada y 1/8 de pulgada, forman otro set de bloques área-amplitud. Los siete bloques con diámetro de agujero de fondo plano de 5/64 de pulgada forman parte de un set distancia-amplitud.

El set de bloques de calibración ASTM E-127 es, simplemente, una mezcla de los bloques de calibración Alcoa series A y B, donde se ha disminuido la cantidad de bloques para simplificar la cantidad de piezas. Sin embargo, su aplicación está restringida debido al mismo factor.

### 6.1.4. Bloques de Referencia I.I.W.

Los Bloques Normalizados de Referencia I.I.W. (International Institute of Welding) son usados para la calibración tanto en distancia como en sensibilidad, según el Código de Soldadura Estructural para Acero (Structural Welding Code-Steel) de la

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

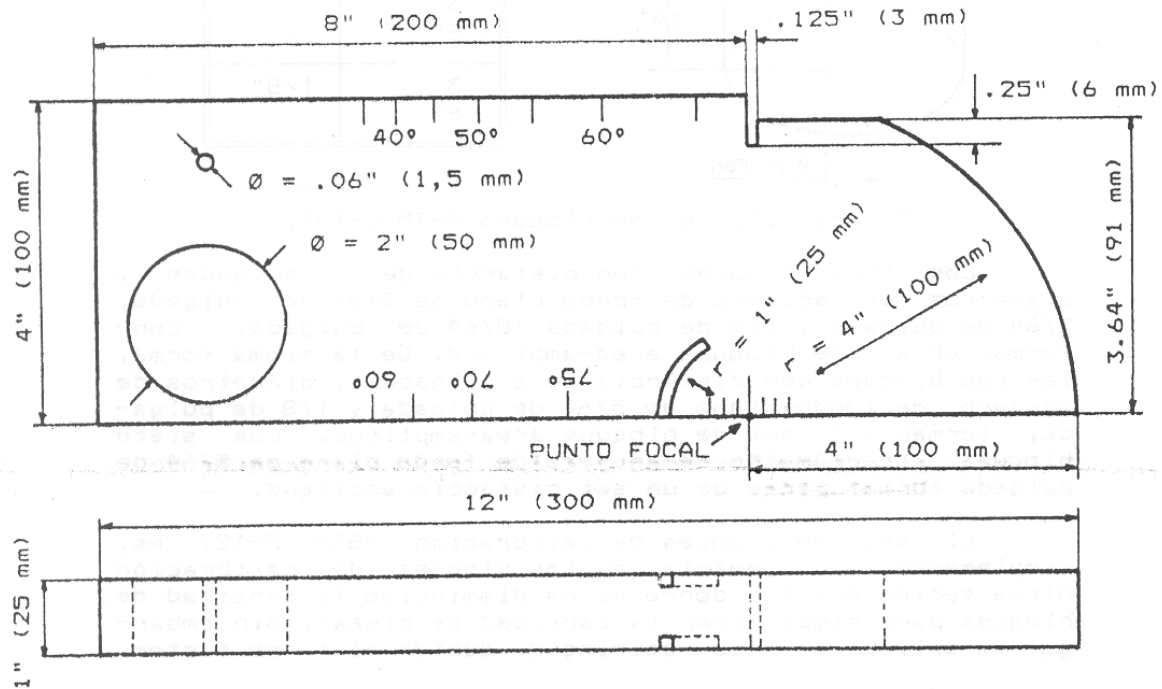
A.W.S. (American Welding Society). Son muy útiles en el chequeo del funcionamiento, tanto de palpadores normales como de palpadores angulares, así como para evaluar la operabilidad de los equipos e instrumentos. El material de fabricación de estos bloques es especificado por el I.I.W., siendo un acero bajo en contenido de carbono y normalizado (tratamiento térmico) con un tamaño de grano según normas Mcquaid -Ehn N° 8.

Existen tres tipos de bloques I.I.W. principalmente, que son: Bloque de Referencia I.I.W. V-1, Bloque de Referencia I.I.W. V-2, y Bloque de Referencia I.I.W. para Calibración en Resolución.

### 6.1.4.1. Bloque de Referencia I.I.W. V-1.

El bloque de referencia I.I.W. V-1, es el bloque de calibración por excelencia, utilizado para el ajuste en distancia y sensibilidad de palpadores, tanto normales como angulares. Puede ser obtenido en dos tipos y en dimensiones tanto inglesas (pulgadas) como internacionales (Sistema Métrico Decimal). Su versión Tipo 2, donde la única variación es en el radio de una pulgada cercano al punto focal, el cual es sustituido por una ranura a cada lado del espesor en el propio punto focal. En la Figura 6.4 se muestra tanto la forma como las dimensiones del bloque I.I.W. V-1, Tipo 1, en pulgadas.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS



6.1.4.2. Bloque de Referencia I.I.W. V-2.

Adicionalmente al bloque I.I.W. V-1, existe un bloque normalizado de referencia que se utiliza para la calibración de palpadores angulares, en cuanto a la base de tiempo se refiere, que es también conocido con el nombre de bloque miniatura. Este bloque está basado en los mismos conceptos de diseño que el bloque I.I.W. V-1, pero es mas pequeño y mas liviano.

El bloque miniatura, al igual que el bloque I.I.W. V-1, puede ser usado para la calibración de palpadores tanto normales como angulares, de acuerdo a calibración en distancia (ver Figura 6.5).

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

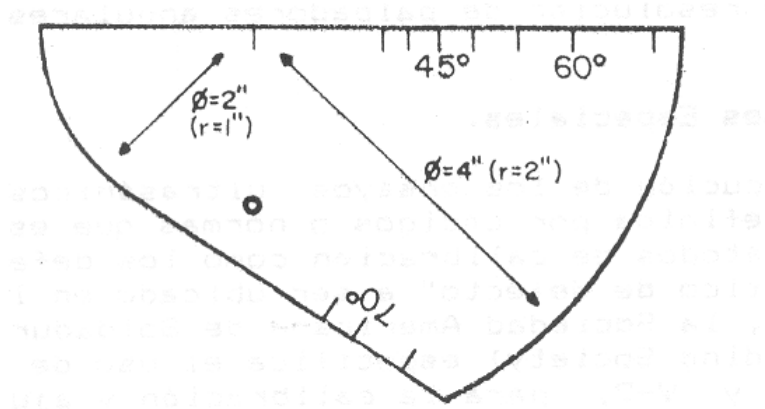


Figura 6.5. Bloque Miniatura

En la Figura 6.5 se muestra la forma y dimensiones del bloque miniatura. Además, éste bloque puede ser obtenido con espesores de media o una pulgada.

### 6.1.4.3. Bloque de Referencia I.I.W. para Calibración en Resolución.

Este bloque es utilizado para la calibración en resolución de palpadores angulares con 45°, 60° y 70° de ángulo de refracción en acero. En la Figura 6.6 se muestra el bloque con su forma, dimensiones y ubicación de los agujeros utilizados para el chequeo.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

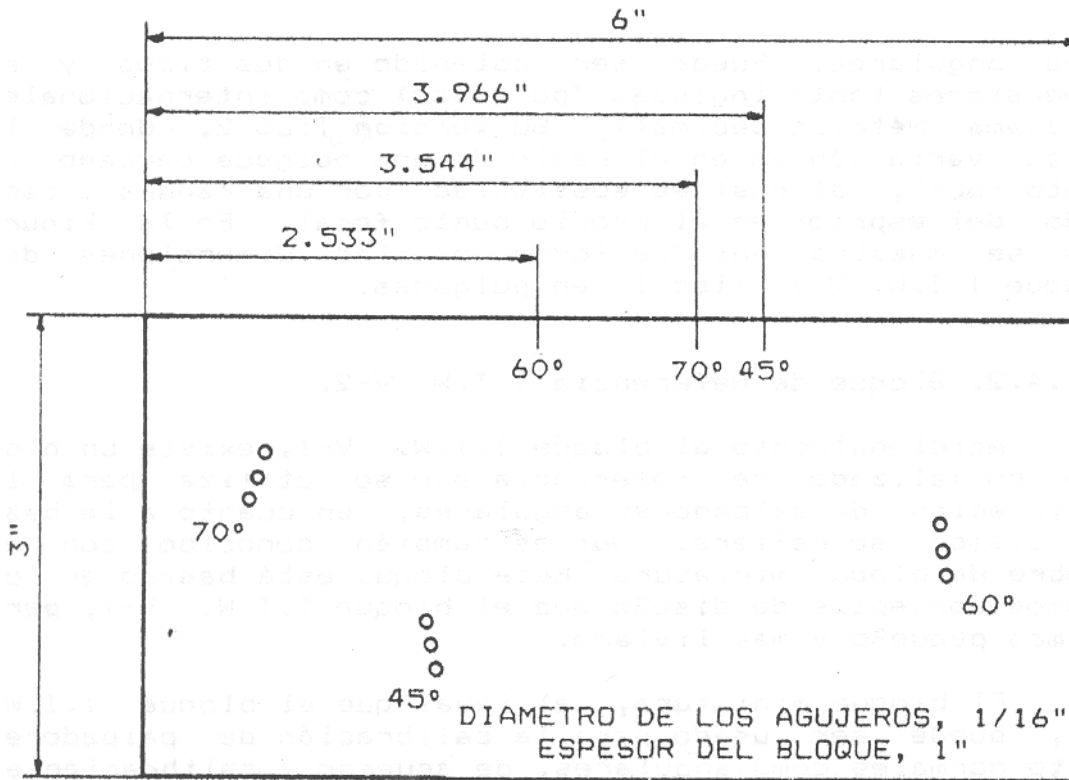


Figura 6.6. Bloque de referencia I.I.W. para calibración en resolución de palpadores angulares

### 6.1.5. Bloques Especiales

La ejecución de los ensayos ultrasónicos, generalmente está definida por códigos o normas que estandarizan, tanto los métodos de calibración como los defectos o el "tamaño crítico de defecto" a ser ubicado en la pieza de ensayo. Así, la Sociedad Americana de Soldadura (A.W.S. - American Welding Society) especifica el uso de los bloques I.I.W. V-1 y V-2, para la calibración y ajuste de los equipos ultrasónicos en ensayos a soldaduras.

#### 6.1.5.1. Calibración Según A.P.I. 5L

El Instituto Americano del Petróleo (A.P.I. - American Petroleum Institute), define una serie de discontinuidades artificiales que deben ser creadas en un bloque del mismo material para elaborar un patrón de referencia. Por ejemplo: la especificación API 5L

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

(especificación para tubería de línea), en su sección 9 (ensayos no destructivos), establece que la calibración de los equipos ultrasónicos debe ser efectuada mediante estándares de referencia fabricados partiendo de trozos del mismo material en los que se crean discontinuidades artificiales, como las mostradas en la Figura 6.7.

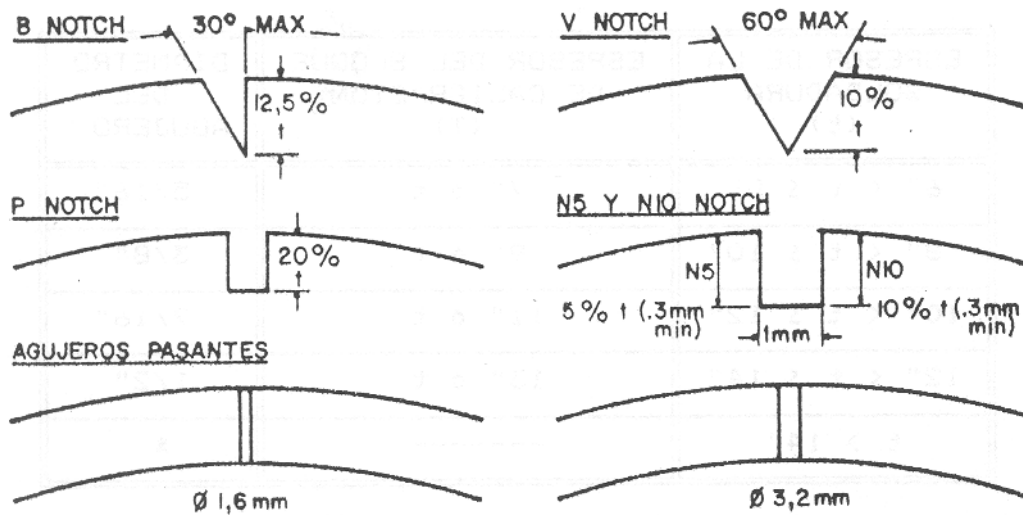


Figura 6.7. Discontinuidades artificiales a crear en un estándar de referencia según API 5L

### 6.1.5.2. Calibración Según ASME

Por su parte, la Sociedad Americana de Ingeniería Mecánica (ASME - American Society for Mechanical Engineer) , establece en el Artículo 4 de la Sección V del Código sobre Calderas y Recipientes a Presión (Boiler and Pressure Vessel Code), una serie de factores que deben ser tomados en cuenta al momento de efectuar la calibración de las funciones del instrumento. De la misma forma, establece un bloque básico de calibración con una serie de discontinuidades artificiales (ver Figura 6.8).

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

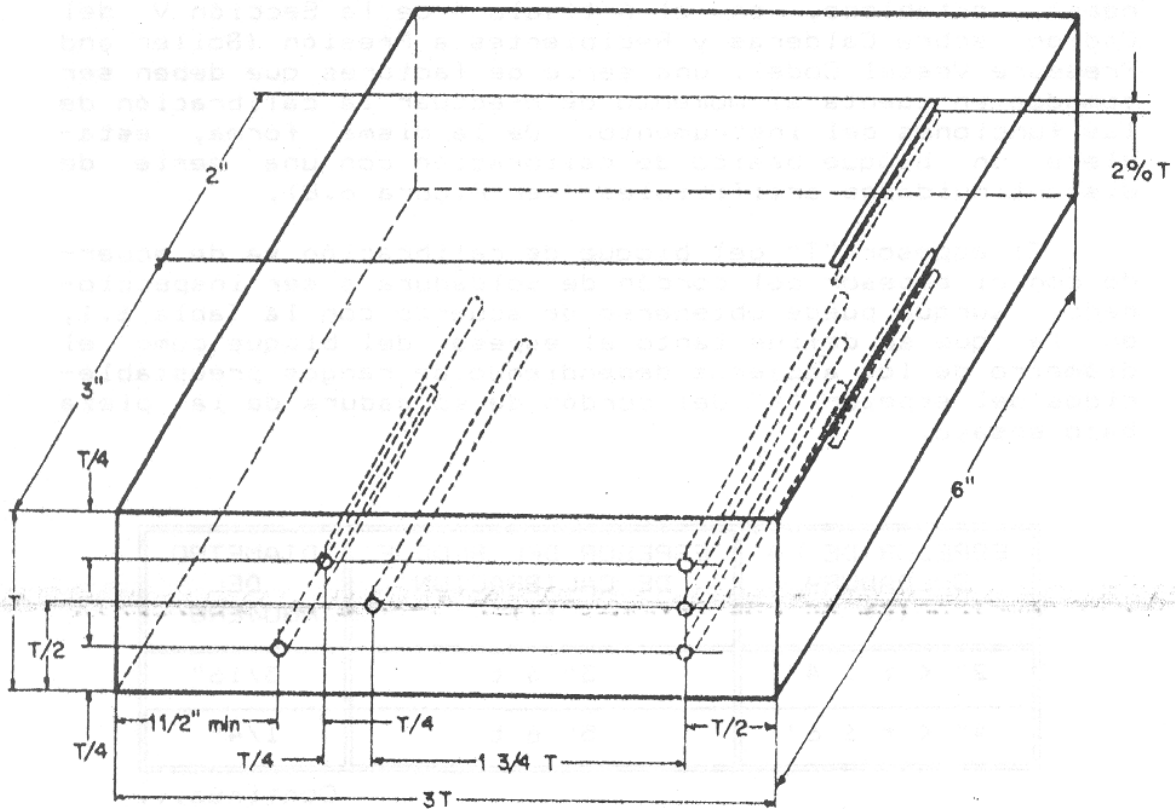


Figura 6.8. Bloque básico de calibración ASME

El espesor "T" del bloque de calibración va de acuerdo con el espesor del cordón de soldadura a ser inspeccionado, aunque puede obtenerse de acuerdo con la Tabla 6.1, en la que se define tanto el espesor del bloque como el diámetro de los agujeros dependiendo de rangos preestablecidos del espesor "t" del cordón de soldadura de la pieza bajo ensayo.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

Tabla 6.1 Valores del espesor “T” y del diámetro de los agujeros según los espesores reales del cordón de soldadura

<b>Espesor de la Soldadura “t”</b>	<b>Espesor del Bloque de Calibración “T”</b>	<b>Diámetro del agujero</b>
$2" < t \leq 4"$	3" ó t	3/16"
$4" < t \leq 6"$	5" ó t	1/4"
$6" < t \leq 8"$	7" ó t	5/16"
$8" < t \leq 10"$	9" ó t	3/8"
$10" < t \leq 12"$	11" ó t	7/16"
$12" < t \leq 14"$	13" ó t	1/2"
$t > 14"$	-	*

\* Para cada incremento del espesor “t” de dos pulgadas, el diámetro del agujero aumentará en 1/16”.

Es de hacer notar que las tolerancias permitidas en cuanto al diámetro del agujero es  $\pm 1/32"$ , la profundidad de las entalladuras podrá variar entre 10 y  $-20\%$ , y la desviación en la ubicación del centro de los agujeros a través del espesor será  $\pm 1/8"$ .

Sin embargo, el Código ASME permite la utilización de agujeros de calibración con diámetro igual a 1/4" para espesores entre 1/2" y 2", siendo imprescindible la utilización del agujero ubicado en T/2.

Para espesores mayores a 2", el diámetro de los agujeros será igual a 3/8", requiriéndose la utilización, en cuanto a la calibración se refiere, de los agujeros ubicados a T/4, T/2 y 3/4 T.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

### 6.1.5.3. Bloque Escalonado.

El bloque escalonado está diseñado para la calibración de palpadores normales, y mas exclusivamente de palpadores Emisor-Receptor, "E-R", para la medición de espesores. Su nombre se debe a que su forma es en escalera, tal y como se muestra en la Figura 6.9.

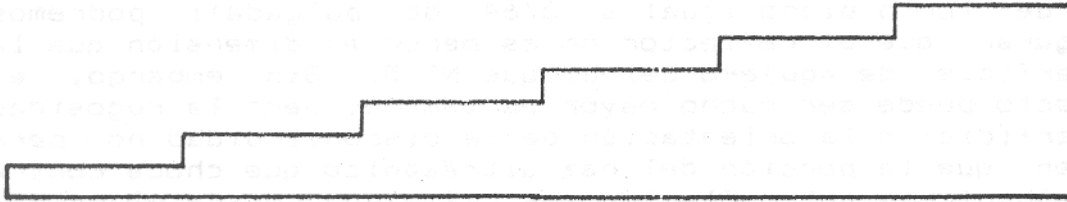


Figura 6.9. Bloque Escalonado

Los bloques escalonados pueden ser obtenidos con diferentes dimensiones, bien sea en el sistema inglés o en el sistema métrico decimal. Dentro de los mas comunes se encuentran con escalones entre 1 y 8 milímetros (8 escalones en total), y su equivalente en pulgadas; aunque existe una gama de bloques sumamente variada dentro de los cuales siempre hay uno que se ajustará a las necesidades del usuario.

## 6.2. APLICACION DE LOS BLOQUES NORMALIZADOS DE REFERENCIA

Los bloques normalizados de referencia son utilizados para estandarizar los equipos ultrasónicos en ensayos a piezas en general, la estandarización se realiza por dos razones: la primera, chequear que el conjunto equipo-palpador trabaje como se requiere; la segunda, seleccionar el nivel de sensibilidad o ganancia requerida para detectar las discontinuidades según sus dimensiones en la pieza de ensayo. La evaluación de discontinuidades se efectúa por comparación de sus indicaciones con las recibidas de una discontinuidad artificial de dimensiones conocidas, a la misma profundidad y en un bloque normalizado de referencia del mismo material.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

### 6.2.1. Aplicación del Set de Bloques ALCOA Serie A.

La aplicación del set de bloques ALCOA Serie A, está basada en que la amplitud del eco de indicación de un agujero de fondo plano, en la zona de campo lejano del haz de un palpador, es proporcional al área del agujero. Entonces, estos bloques son usados para relacionar la amplitud de la señal con el área de la discontinuidad, asumiendo siempre que no existan pérdidas causadas por rugosidad superficial.

Cuando se detecta una discontinuidad a la misma profundidad que un agujero de fondo plano; suponiendo que la señal de indicación presente una altura en pantalla similar a la producida por el bloque N° 5 (diámetro del agujero de fondo plano igual a 5/64 de pulgada); podremos asegurar que el reflector no es menor en dimensión que la superficie de agujero del bloque N° 5. Sin embargo, el defecto puede ser mucho mayor en tamaño, pero la rugosidad superficial o la orientación de la discontinuidad no permiten que la porción del haz ultrasónico que choca contra la superficie del reflector sea reflejada contra el palpador en su totalidad.

Supongamos que para la verificación lineal de un equipo de ultrasonido se ha elegido un palpador que cubre una pulgada de área a una distancia de tres pulgadas desde la cara del mismo en la zona de campo lejano. Si lo colocamos sobre el bloque N° 8 (diámetro del agujero de fondo plano igual a 1/8 de pulgada), y llevamos el eco proveniente de la superficie del agujero a una altura de pantalla igual al 80 %, si manteniendo la calibración del valor de ganancia del equipo ubicamos el palpador en el bloque N° 1 (diámetro del agujero de fondo plano igual a 1/64 de pulgada), veremos que la altura del eco proveniente del agujero ha disminuido proporcionalmente al área del mismo; o sea, de un 80 % bajará hasta un 1,25 % por lo que el eco no se observará en pantalla. Si tomamos ahora el bloque N° 4 (diámetro del agujero de fondo plano igual a 1/16 de pulgada), y manteniendo la calibración existente, colocamos el palpador sobre el mismo veremos que el eco se presenta con altura de 20 % de pantalla. Si no es así, deberán ser chequeadas las condiciones de operación del equipo.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

Cuando se calibra el equipo ultrasónico para que la altura de respuesta del eco sea de un 80 % para el bloque N° 8, para el resto de los bloques la altura deberá ser: N° 7 de 61,25 %, N° 6 de 45,0 %, N° 5 de 31,25 %, N° 4 de 20,0 %, N° 3 de 11,25 %, N° 2 de 5,0 %, y N° 1 de 1,25 %. Si inicialmente fijamos una altura de eco para el bloque N° 8 de 100 % en pantalla, la altura para el resto de los bloques será: N° 7 de 76,56 %, N° 6 de 56,25 %, N° 5 de 39,06 %, N° 4 de 25,0 %, N° 3 de 14,06 %, N° 2 de 6,25 % y N° 1 de 1,56 %. Esta es una forma de chequear que la relación entre la altura de los ecos en pantalla sea realmente lineal; manteniendo siempre un margen de error, que se encuentra alrededor de un 12,5 % y es aceptado por los códigos y normas aplicables. Además, como se dijo anteriormente la relación de altura puede ser modificada variando la ganancia u operando el control de atenuación o supresión, presentes en los equipos ultrasónicos que disponen del mismo.

### 6.2.2. Aplicación del Set de Bloques ALCOA Serie B.

La calibración de los equipos ultrasónicos mediante el set de bloques ALCOA Serie B, o Hitt, se basa en la relación existente entre la distancia y la amplitud, y es un poco más complicada que la efectuada por medio del set ALCOA Serie A, o set que relaciona el área de la discontinuidad con la amplitud de la señal de respuesta.

Previamente, vamos a calibrar el equipo en distancia, tomando en cuenta la máxima longitud del bloque (5 – 5075). A tal fin, la distancia a medir horizontalmente en la pantalla será igual a seis pulgadas. Dependiendo del palpador y de su zona de campo cercano tendremos, que para algunos bloques, la altura del eco será deficiente de acuerdo con la ganancia previamente fijada, por lo que debemos ubicar el bloque que nos resulte en la altura de eco mayor dentro de la zona de campo lejano.

El procedimiento es el siguiente: una vez calibrada la pantalla en distancia (por ejemplo, 6 pulgadas), colocaremos el palpador sobre el bloque de menor distancia (1/16 de pulgada) y llevaremos el eco de respuesta a una altura de 80% de pantalla;

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

luego ubicaremos el palpador sobre el bloque siguiente (1/8 de pulgada), la ganancia o mejor dicho, el nivel de ganancia deberá ser disminuido hasta que la altura del eco en pantalla sea igual al 80 %; ahora usaremos el bloque siguiente (1/4 de pulgada) y así sucesivamente hasta que obtengamos el bloque que resulte en una altura de eco de 80 %, y que con la misma graduación de ganancia, sea mayor que la respuesta del resto del set de bloques. Si mantenemos la ganancia seleccionada y probamos con todos los bloques, marcando en la pantalla los puntos de máxima altura de todos y cada uno de ellos, lograremos una curva de corrección distancia-amplitud (DAC – distance-amplitude correction), tal y como se observa en la Figura 6.10.

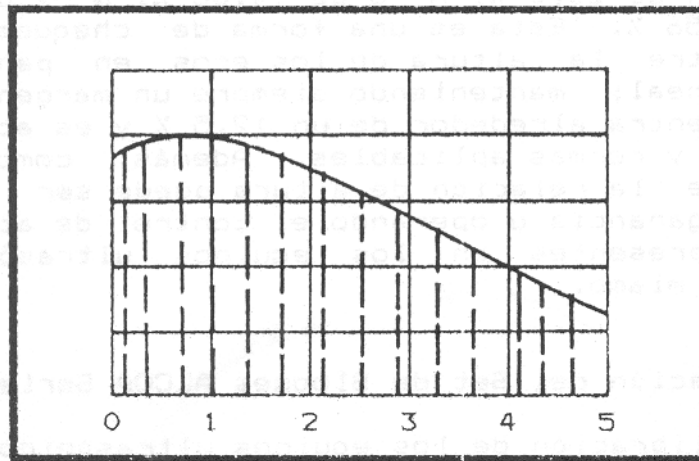


Figura 6.10. Curva de Corrección distancia - amplitud

La curva de corrección distancia-amplitud es utilizada para definir un nivel de aceptación o rechazo, o bien un nivel de referencia, con respecto a la altura de los ecos en pantalla, provenientes de reflectores en la pieza de ensayo, según su distancia o su profundidad en las piezas a ensayar.

### 6.2.3. Aplicación del Set de Bloques ASTM E-127.

El set de bloques ASTM E-127 es una combinación de bloques de calibración área-amplitud y distancia-amplitud. Por ser una mezcla de los sets de bloques de calibración ALCOA Series A y B, su aplicación es similar a la anteriormente expuesta

## **CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS**

sin embargo, está restringida debido a la cantidad de bloques que componen el set. Los bloques, en éste set se encuentran identificados de la misma forma que los bloques de las series Alcoa A y B, o sea, según el diámetro de la superficie del agujero de fondo plano y de la longitud desde la superficie de contacto hasta la reflectora.

### **6.2.4. Aplicación de los Bloques de Referencia I.I.W.**

Como se dijo anteriormente, los bloques normalizados de referencia I.I.W. (International Institute of Welding), se utilizan tanto para la calibración en distancia como en sensibilidad, según el Código A.W.S. (American Welding Society), en ensayos mediante la técnica de contacto directo.

#### **6.2.4.1. Aplicación del Bloque de Referencia I.I.W. V-1.**

Su aplicación, en cuanto a palpadores normales, se refiere a la calibración en distancia, para lo cual se utilizan los espesores de una y cuatro pulgadas (ver Figura 6.11 en sus posiciones A y B). Además, en la Figura 6.11 posición C, se muestra la forma como puede ser utilizado para chequear el nivel de resolución de los palpadores normales.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

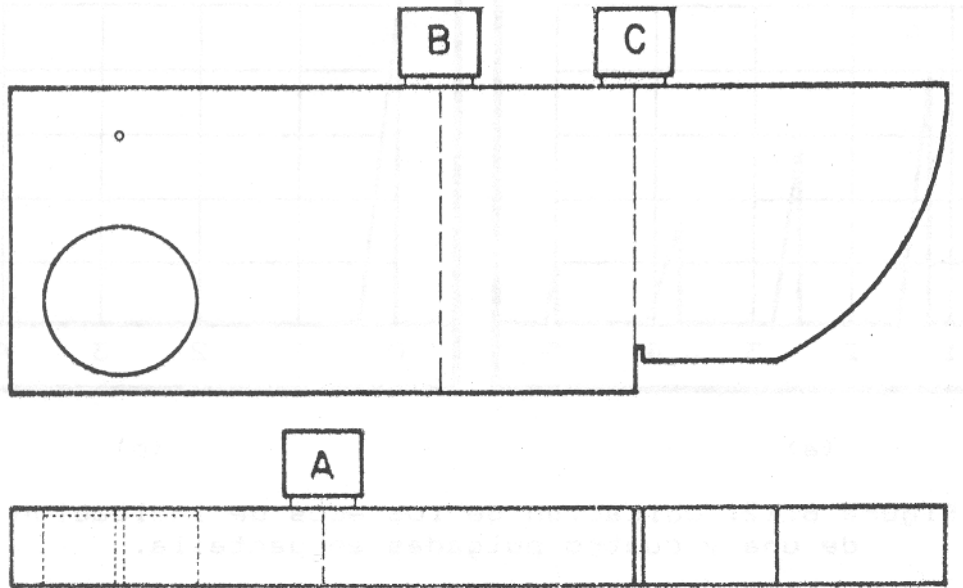


Figura 6.11. Aplicación del bloque I.I.W. V-1 para calibración de palpadores normales

En la Figura 6.11 podemos observar tres posiciones para palpadores normales (A, B y C). En la posición A, el palpador está dispuesto a medir una distancia de una pulgada; y en la posición B, cuatro pulgadas. De esta forma, puede ser efectuada la calibración del instrumento para una distancia mínima de cuatro pulgadas, con una distancia de referencia de una pulgada y la distancia máxima (ver Figura 6.12).

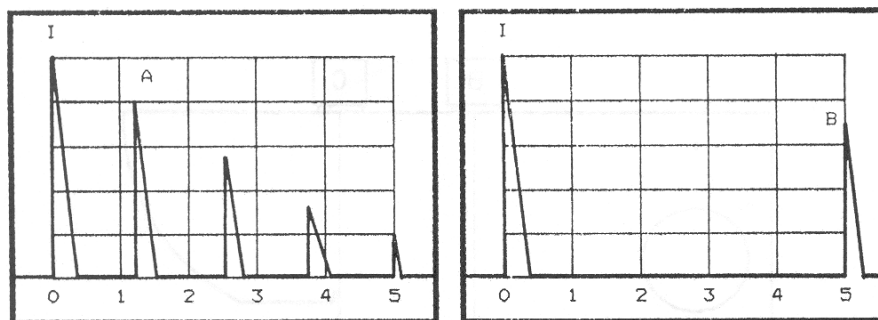


Figura 6.12. Ubicación de los ecos de indicación de una y cuatro pulgadas en pantalla

En la Figura 6.12, se observan tres ecos. El primero corresponde al eco de emisión o inicial, I; el segundo (ver Figura 6.12 a), identificado con la letra A, indica la distancia

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

equivalente a una pulgada. Nótese que entre el eco inicial y el eco A la distancia es la cuarta parte de la pantalla, así como los subsiguientes rebotes de fondo. Por último se observa el eco correspondiente a la posición B de la Figura 6.11 (identificado con la letra B en la Figura 6.12 b), la distancia entre el eco inicial y el eco B abarca toda la pantalla, y es equivalente a cuatro pulgadas. Es importante hacer notar que cuando el palpador está ubicado en la posición A de la Figura 6.11, únicamente se observarán los ecos inicial y A (ver Figura 6.12 a), con los correspondientes segundo, tercero, cuarto, etc. rebotes de fondo; cuando se ubica en la posición B, se obtendrá el eco B y el eco inicial se mantendrá, tal y como se muestra en la Figura 6.12 b

Una vez efectuada la calibración anterior podremos chequear el nivel de resolución del palpador ubicándolo en la posición C de la Figura 6.11, donde mediremos tres distancias a la vez (3.39 pulgadas, 3.64 pulgadas y 4 pulgadas; ó 85 mm, 91 mm y 100 mm) cercanas y escalonadas. Para efectuar el chequeo de resolución, el eco del primer rebote obtenido en la posición A (Figura 6.12 a - eco A) debe ser llevado a una altura de pantalla entre el 50 y 75 %, así obtendremos el nivel de referencia. Manteniendo el nivel de ganancia (nivel de referencia) obtenido se procederá al chequeo de resolución.

Recordemos que en el CAPITULO 2, Apartado 2.5 Características de los Palpadores, y Apartado 2.5.1 Resolución, se expuso que la resolución es la habilidad que presentan los palpadores para identificar y separar las señales de indicación de varios reflectores diferentes y cercanos, en lo que a profundidad se refiere. En la Figura 6.13 se muestran los ecos de indicación obtenidos mediante un palpador normal, ubicado en la posición C (chequeo de resolución) de la Figura 6.11.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

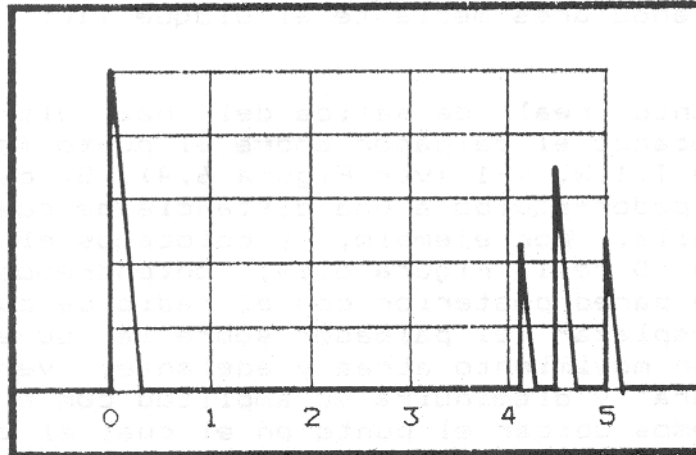


Figura 6.13. Ubicación de los ecos de indicación durante el chequeo de la resolución de un palpador normal

En el CAPITULO 5, Apartado 5.3.4: Sistema de Ganancia, se muestra el efecto producido por los controles de amplificación contra resolución (ver Figura 5.15); donde, operando éste control puede mejorarse la resolución de un sistema de ensayo.

Para la calibración y el chequeo de las condiciones de operabilidad de los palpadores angulares, se pueden utilizar tanto el bloque I.I.W. V-I como el bloque miniatura. En cuanto al bloque I.I.W. V-I, éste puede ser usado para obtener: (1) el punto real de salida del haz ultrasónico; (2) el ángulo real del haz ultrasónico del palpador y (3) la calibración en amplitud o sensibilidad. El chequeo del punto y del ángulo real de salida del haz ultrasónico, se efectúan toda vez que la zapata plástica sufre desgaste debido al roce superficial con las piezas de ensayo, o cuando el palpador no ha sido utilizado aún. En la Figura 6.14 se muestran las diferentes posiciones de ubicación de los palpadores en el bloque I.I.W. V-I.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

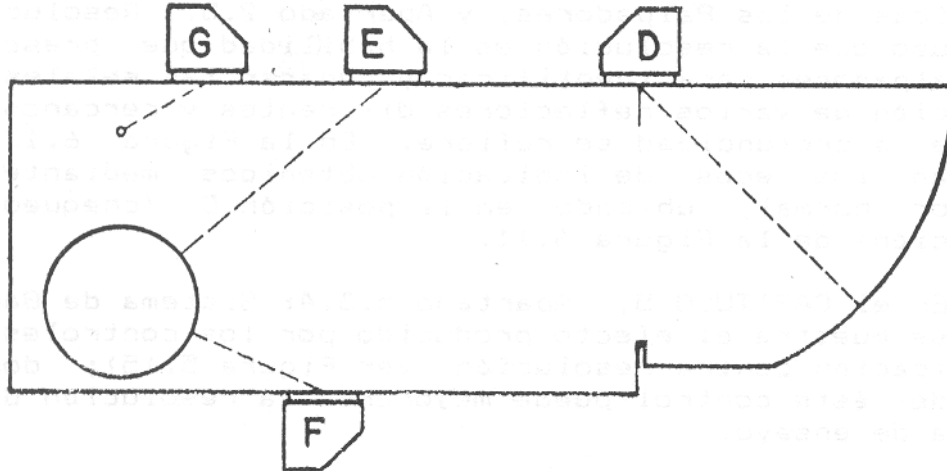


Figura 6.14. Calibración de palpadores angulares mediante el bloque I.I.W.

El punto real de salida del haz ultrasónico se obtiene colocando el palpador sobre el punto focal ubicado en el bloque I.I.W. V-I (ver Figura 6.4). Si calibramos el conjunto palpador-equipos a una distancia de cuatro pulgadas en pantalla, por ejemplo, y colocamos el palpador en la posición D de la Figura 6.14, obtendremos un eco de reflexión de pared posterior con el radio de cuatro pulgadas. Al desplazar el palpador sobre la superficie del bloque con un movimiento atrás y adelante, veremos que el eco aumentará y disminuirá su amplitud con el desplazamiento, debemos ubicar el punto en el cual el eco presente su mayor amplitud para así determinar el punto de salida del haz ultrasónico.

Adicionalmente, el radio de cuatro pulgadas, utilizado anteriormente para determinar el punto real de salida del haz, puede ser utilizado para calibrar el sistema ultrasónico en cuanto a distancia se refiere.

Una vez ubicado el punto real de salida del haz ultrasónico, podemos proceder a determinar el ángulo real del haz ultrasónico del palpador. Si observamos el bloque I.I.W. V-I, presentado en la Figura 6.4, veremos que posee indicaciones según el ángulo de cada palpador en sus costados. En la figura 6.14 se indican dos posiciones C y F, estas posiciones corresponden a las zonas donde se encuentran

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

indicados los ángulos, y las reflexiones respectivas se producirán desde el orificio de diámetro igual a dos pulgadas que posee en su interior un relleno de plástico (plexiglás) a manera de interfase; la posición E para palpadores con ángulo de incidencia entre 40 y 60 grados, y la posición F entre 60 y 70 grados. Al igual que en el caso anterior si desplazamos el palpador sobre la superficie del bloque observaremos que la amplitud de la indicación varía con el desplazamiento, al obtener el punto de amplitud máxima obtendremos, automáticamente, el valor del ángulo del haz ultrasónico del palpador.

La calibración en amplitud o sensibilidad se obtiene colocando el palpador angular en la posición G de la Figura 6.14. El palpador debe ser desplazado atrás y adelante hasta obtener la respuesta de máxima amplitud desde el orificio de diámetro 0.06 pulgadas (1,5 milímetros). Una vez obtenida la máxima respuesta se ajusta la ganancia para así determinar el nivel de referencia del sistema. La sensibilidad debe ser ajustada con una altura de pantalla de 80 %, el valor de la ganancia será el nivel de referencia.

La evaluación de las indicaciones según el Código A.W.S. (American Welding Society), está referida a las diferencias algebraicas existentes entre los niveles de ganancia de: nivel de indicación, nivel de referencia y factor de atenuación, de la siguiente forma:

$$d = a - b - c \quad (6.1)$$

Donde:

d : Grado de indicación.

a : Nivel de indicación.

b : Nivel de referencia.

c : Factor de atenuación.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

El nivel de indicación es el valor de la ganancia de detección de la discontinuidad. Esto significa que cuando detectamos una discontinuidad y llevamos su altura máxima de eco a un 80 % de la pantalla, el valor de la ganancia será el nivel de Indicación.

El factor de atenuación se calcula en base a la distancia angular, o la distancia recorrida por el haz ultrasónico desde el palpador hasta la discontinuidad, en pulgadas; según la siguiente ecuación:

$$c = 2 (h - 1) \quad (6.2)$$

Donde:

c : Factor de atenuación.

h : Distancia angular, en pulgadas.

El grado de indicación "d", obtenido de la ecuación 6.1 será comparado con las tablas de aceptación o rechazo, y clasificado según sea el caso.

### 6.2.4.2. Aplicación del Bloque de Referencia I.I.W. V-2.

En la Figura 6.5 se presentó un bloque miniatura. Este bloque presenta la ventaja de ser mas liviano y de menor volumen que el bloque I.I.W. V-1, pero aunque los códigos aplicables no admiten su sustitución, cumple las mismas funciones en cuanto al chequeo del funcionamiento de palpadores angulares, tales como: determinación del punto real de salida del haz, determinación del ángulo real de incidencia del haz y calibración en amplitud o sensibilidad. En éste caso, la determinación del ángulo real de incidencia se realiza utilizando el orificio de diámetro 0.06 pulgadas. En la Figura 6.15 se presentan las posiciones de los palpadores según su función en un bloque miniatura.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

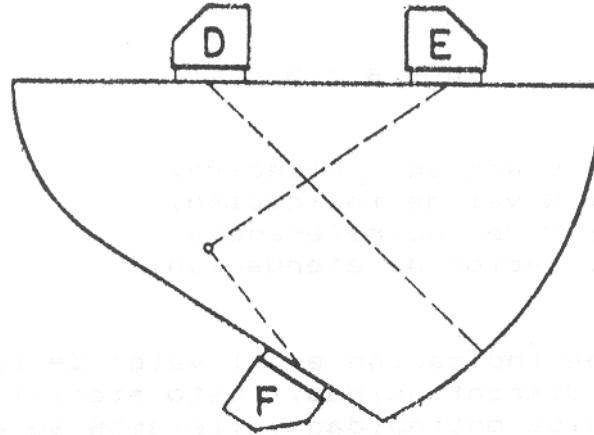


Figura 6.15. Calibración de palpadores angulares mediante el bloque miniatura

Para la determinación del punto real de salida del haz, similarmente al bloque I.I.W. V-I, se coloca el palpador en la posición D; mientras que tanto para la determinación del ángulo de incidencia como para la calibración en sensibilidad se utilizan las posiciones E y F, la posición E para palpadores con ángulo entre 45 y 60 grados, y la F para palpadores con ángulo mayor a 60 grados.

La calibración en distancia puede ser realizada con el bloque miniatura a un mínimo de dos pulgadas en pantalla. Si colocamos el palpador en la posición D y ubicamos el eco de indicación al final de la pantalla (2 pulgadas), luego con el palpador invertido (midiendo hacia el radio de 1 pulgada) ubicamos el eco de respuesta en el centro de la pantalla. Así, operando los controles de desplazamiento y dilatación de la imagen en pantalla e invirtiendo el palpador hacia los radios de 1 y 2 pulgadas, llegará el momento en el cual se obtendrán los ecos en las posiciones deseadas.

En la Figura 6.16 se muestra la ubicación de los ecos al calibrar el equipo a una distancia de cuatro pulgadas y ubicando el palpador en la posición señalada. Nótese que el eco señalado con el número 1 corresponde a la respuesta obtenida de la superficie con radio de una pulgada; sin embargo, por efecto de la interfase ubicada entre bloque y palpador, parte de la onda ultrasónica continuará su recorrido hasta la superficie ubicada a dos pulgadas de radio, será reflejada en (2) y retornará a la

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

interfase palpador-bloque, pero por la diferencia existente entre los ángulos de la onda y del palpador no será detectada. Igualmente por efecto de la interfase, parte de la onda viajará hacia el radio de una pulgada, será reflejada en 1 y detectada por el palpador. El eco de indicación correspondiente es el señalado con el número 2, ubicado a cuatro pulgadas del eco inicial.

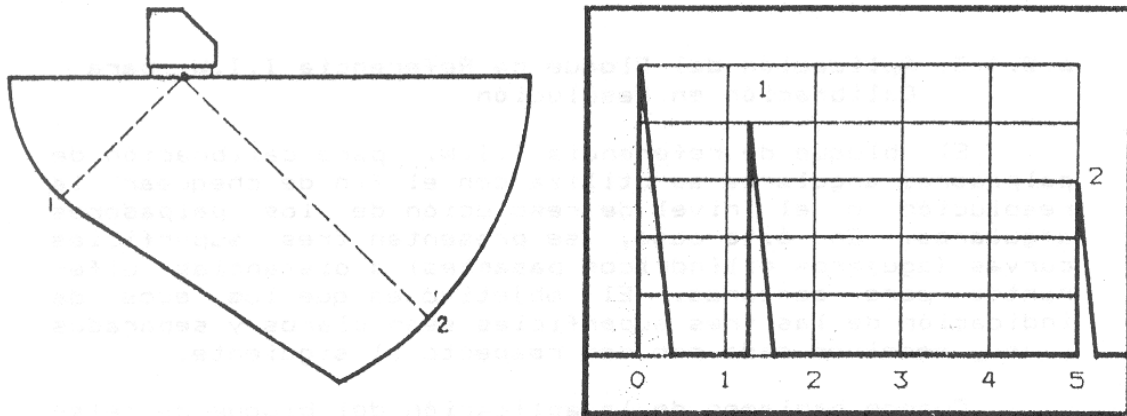


Figura 6.16. Calibración en distancia a cuatro pulgadas para palpadores angulares con el bloque miniatura

Si ahora calibramos el equipo a una distancia igual a cinco pulgadas y ubicamos el palpador tal y como se observa en la Figura 6.17, obtendremos de la misma forma los ecos correspondientes a las distancias de dos y cinco pulgadas (ecos 1 y 2). Cuando la calibración es mayor a cinco pulgadas, por cálculo matemático se puede obtener la posición correspondiente en pantalla de acuerdo a la distancia. En éste caso, los ecos se obtendrán a dos, cinco, ocho, once, etc. pulgadas de distancia en la pantalla del equipo ultrasónico; mientras que en el caso anterior, los ecos de indicación se observarán a una, cuatro, siete, diez, etc. pulgadas de distancia en pantalla.

### 6.2.4.3. Aplicación del Bloque de Referencia I.I.W. para Calibración en Resolución

El bloque de referencia I.I.W. para calibración de palpadores angulares se utiliza con el fin de chequear la resolución o el nivel de resolución de los palpadores angulares. En éste caso, se presentan tres superficies curvas (agujeros cilíndricos pasantes) a

## **CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS**

distancias diferentes pero cercanas. El objetivo es que los ecos de indicación de las tres superficies sean claros y separados y así, resolver cada eco con respecto al siguiente.

Cuando hablamos de la aplicación del bloque de referencia I.I.W. V-I, para palpadores normales (ver Figura 6.11 - posición C), se dijo que un palpador con buena resolución debe presentar un oscilograma como el mostrado en la Figura 6.13, correspondiente a la posición C de la Figura 6.11.

En el presente caso ocurre exactamente lo mismo, la calidad del oscilograma debe ser similar para considerar que el palpador, angular en este caso, posee un buen nivel de resolución.

### **6.2.5. Aplicación de los bloques especiales.**

Entre los bloques especiales, anteriormente descritos, se consideran: A.P.I. (American Petroleum Institute), A.S.M.E. (American Society for Mechanical Engineer) y el Bloque Escalonado.

#### **6.2.5.1. Aplicación Según A.P.I. 5L.**

Según el Instituto Americano del Petróleo (API - American Petroleum Institute), en su Especificación API 5L, el bloque de referencia debe presentar entalladuras tanto en la superficie superior como en la inferior, o agujeros pasantes tal y como se muestra en la Figura 6.6. Las entalladuras deben ser paralelas al eje de la soldadura, y estarán separadas la distancia suficiente como para producir señales fácilmente distinguibles entre sí. Los agujeros pasantes deben ser perforados, a través de la pared, perpendicularmente a la superficie.

Los criterios de aceptación o rechazo nos remiten a la comparación de la altura de los ecos en pantalla, entre las indicaciones provenientes de las discontinuidades

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

creadas en el bloque de referencia y las ubicadas en la pieza de ensayo, según la siguiente tabla:

Tabla 6.2. Criterios de aceptación o rechazo según la especificación API 5L.

Proceso de Soldadura	Tipo de Defecto		Límite de Aceptación
	Entalla	Agujero	
Soldadura por Arco Sumergido	N5	1.60 mm	100%
	Otra	3.20 mm	33%
Soldadura por Resistencia Eléctrica	N10 – V	3.20 mm	100%
	B - P	-	33%

Los tipos de defecto se refieren a los presentados en la Figura 6.7; y los límites de aceptación corresponden al porcentaje de altura de los ecos provenientes de la pieza de ensayo respecto de los obtenidos del patrón de referencia. Por ejemplo, si en juntas realizadas mediante el proceso de arco sumergido calibramos con un agujero pasante de diámetro 1,60 mm y ubicamos el eco de respuesta a un 80 % de altura de pantalla, cualquier indicación proveniente de la pieza de ensayo que sobrepase éste valor será rechazada (mayor que el 100 %).

### 6.2.5.2. Aplicación del Bloque de Calibración A.S.M.E.

La Sociedad Americana de Ingeniería Mecánica (ASME - American Society for Mechanical Engineer) en los Artículos 4 y 5 de la Sección V, Examinación No Destructiva (Section V -Nondestructive Examination) del Código de Calderas y Recipientes a Presión (Boiler and Pressure Vessel Code), define el uso de las curvas de corrección distancia-amplitud (DAC - Distance-Amplitude Correction) creadas a partir de señales de indicación provenientes de los agujeros ubicados a 1/4, 1/2 y 3/4 del espesor del bloque presentado en la Figura 6.8.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

La calibración del sistema se realiza obteniendo señales de indicación de todos y cada uno de los agujeros para el recorrido total del haz ultrasónico en su zona de interés. Así, se obtendrán ecos de indicación de: 1/4 T, 1/2 T, 3/4 T, 5/4 T, 3/2 T y 7/4 T, para crear la curva DAC (100 % DAC). El procedimiento de obtención de la curva DAC, es el siguiente:

Dependiendo del espesor de la pieza a ensayar, se debe calibrar la distancia de recorrido en pantalla. La calibración se hará mediante la siguiente ecuación:

$$h = \frac{2.e}{\cos\alpha} \quad (6.3)$$

Donde:

h : Distancia angular.

e : Espesor de la pieza.

$\alpha$  : Angulo del palpador.

Aplicando ésta ecuación, obtendremos la distancia de recorrido del haz ultrasónico para un paso completo.

Se debe obtener ahora el eco de indicación de cualquiera de los agujeros, que resulte en la mayor altura de pantalla y lo ubicaremos a un 80 %. Trazaremos el punto en la pantalla.

Al obtener la altura de ecos de los restantes agujeros se deben trazar en pantalla sin modificar el nivel de ganancia obtenido a 80 % en el paso anterior.

Dibujar en la pantalla la curva que una los puntos obtenidos y trazados anteriormente. Esta curva es la 100% DAC (ver Figura 6.18).

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

Siguiendo el procedimiento anterior, trazar sobre la pantalla una curva que represente una disminución del 50% (6 dB) respecto de la curva 100 % DAC. Esta curva se denomina 50% DAC (ver Figura 6.18).

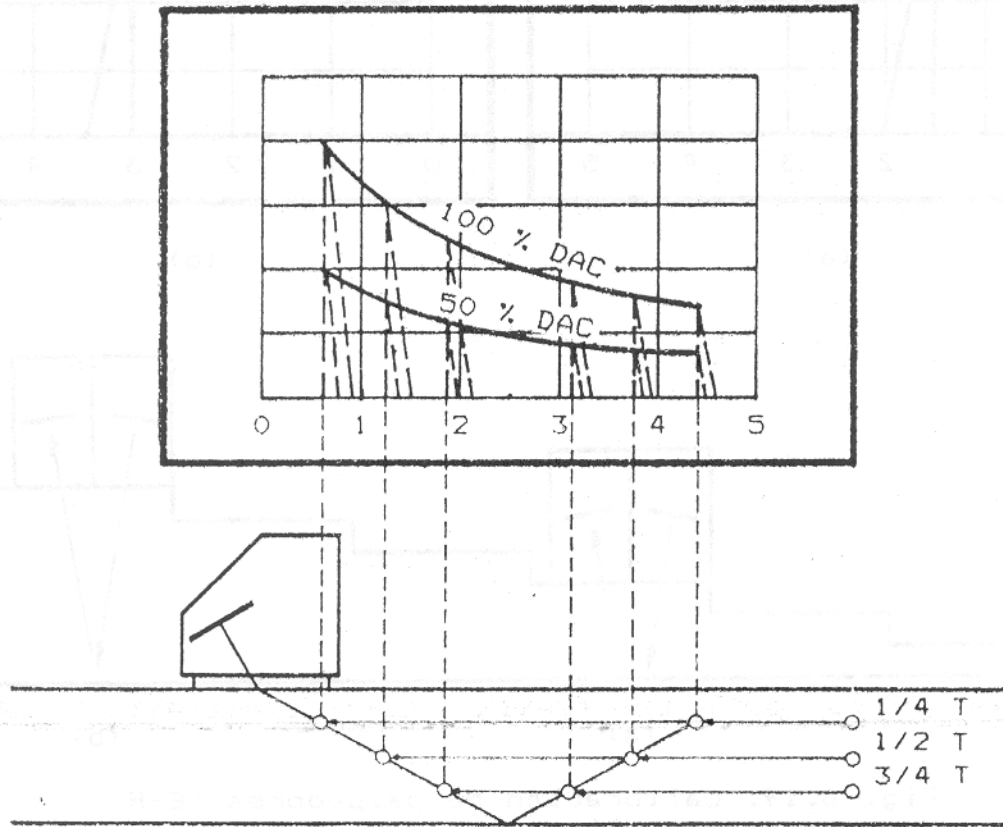


Figura 6.18. Realización de las curvas de corrección distancia-amplitud 50 y 100% "DAC"

Los criterios de aceptación o rechazo están referidos a discontinuidades cuyos ecos de indicación superen, en altura, la curva 50 % DAC y estén por debajo de la curva 100 % DAC; o superen también la curva 100 % DAC. Sin embargo, dependen de las dimensiones y del tipo de pieza sometida a examinación.

### 6.2.5.3. Aplicación del Bloque Escalonado.

Los palpadores "E-R", cuando son utilizados con equipos de presentación A-scan (ver CAPITULO 5 - Apartado 5.2.1), son calibrados utilizando patrones que

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

presenten, como mínimo, dos espesores diferentes entre los cuales se encontrará el rango de espesores a medir (ver Figura 7.1). Sin embargo, se encuentran en el mercado patrones de calibración escalonados, los cuales presentan escalones con diversas medidas destinados a la calibración (ver Figura 6.19).

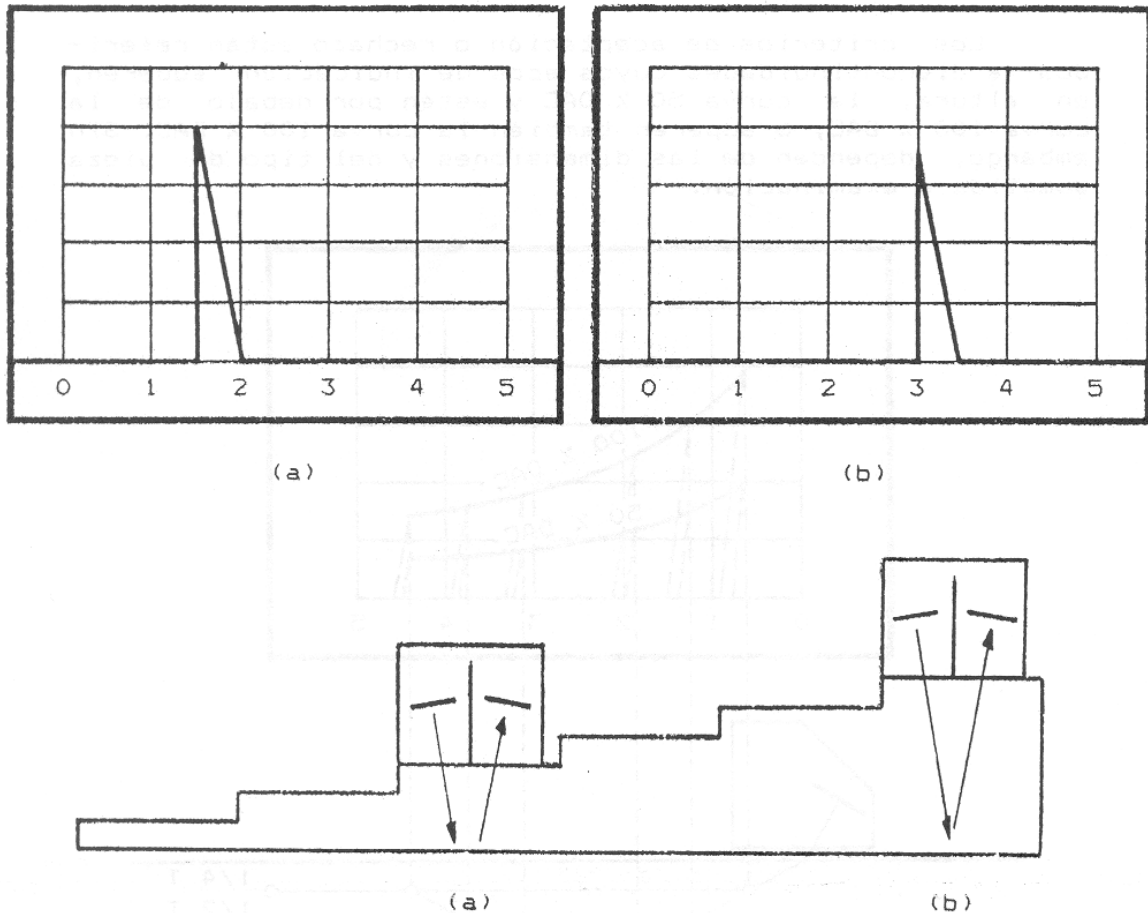


Figura 6.19. Calibración de palpadores "E-R" para medición de espesores

La calibración de palpadores "E-R" para medición de espesores se realiza de la siguiente forma:

1. Seleccionar el rango de distancia-profundidad a medir (en la Figura 6.19, el rango seleccionado es de 10 milímetros);

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

2. Colóquese el palpador en la posición "(a)" (3 milímetros) y ubíquese el eco en la posición deseada;
3. Colóquese el palpador en la posición "(b)" (6 milímetros) y ubíquese el eco en su posición en pantalla.
4. Los pasos (2 y 3) deben ser efectuados cuantas veces sea necesario hasta que ambos ecos estén en su posición correspondiente. En este momento, el sistema equipo-palpador estará listo para medir con precisión espesores dentro del rango seleccionado (3 a 6 mm).

### 6.3. RELACION ENTRE LA ALTURA DE INDICACIONES.

Cuando operamos el control de ganancia de un equipo ultrasónico, observamos que la altura de los ecos de indicación varia de acuerdo con la cantidad de decibeles. Esta variación puede ser calculada algebraicamente, de manera que podemos conocer con exactitud la cantidad de decibeles que deberán ser aumentados o disminuidos para llevar la altura de un eco a mayor o menor posición. Esta relación nos indica que un decibel es igual a "veinte veces el logaritmo decimal de la relación de altura del o los ecos de indicación". Esta relación queda definida por la ecuación:

$$\delta H = 20 \cdot \log \frac{H_2}{H_1} \quad (6.4)$$

Donde:

$\delta H$  : Valor en dB de la diferencia de altura entre dos ecos.

$H_2$  : Altura final de la indicación o altura del segundo eco.

$H_1$  : Altura inicial de la indicación o altura del primer eco.

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

Es posible formular esta ecuación en función de la diferencia de altura de los ecos de indicación, de la siguiente forma:

$$\frac{H_2}{H_1} = (10)^{\frac{\delta H}{20}} \quad (6.5)$$

De la misma forma, existen ciertas ecuaciones que definen la relación existente entre la altura de los ecos de indicación con la diferencia en distancia o tamaño del reflector.

### 6.3.1. Relación entre altura de Indicación y distancia de pared posterior.

La relación existente entre la variación de la altura de los ecos de indicación y la variación de la distancia del palpador a la pared posterior es inversamente proporcional, ya que a menor distancia mayor altura de eco, manteniendo siempre el mismo nivel de ganancia. Esta relación queda definida por la ecuación:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{s_1}{s_2} \quad (6.6)$$

Donde:

$H_2$  : Altura del eco de indicación correspondiente a la distancia  $s_1$ .

$H_1$  : Altura del eco de indicación correspondiente a la distancia  $s_2$ .

$S_2$  : Distancia de recorrido del haz ultrasónico correspondiente al eco  $H_2$ .

$S_1$  : Distancia de recorrido del haz ultrasónico correspondiente al eco  $H_1$ .

### 6.3.2. Relaciones entre Altura de Indicación y Agujero Cilíndrico Transversal.

Existen dos ecuaciones que relacionan la variación de la altura de los ecos de indicación con los agujeros cilíndricos transversales (TCH - Transverse Cylindrical

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

Hole). La primera, relaciona la variación de la altura de los ecos de indicación con la variación de la distancia de recorrido del haz ultrasónico a través del material hasta el agujero cilíndrico transversal, la ecuación es la siguiente:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^{1.5} \quad (6.7)$$

La segunda, relaciona la variación de la altura de los ecos de indicación con la variación del diámetro del agujero cilíndrico transversal, manteniendo la distancia de recorrido constante. Esta relación queda definida por la ecuación:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{0.5} \quad (6.8)$$

Donde:

$D_2$  : Diámetro del TCH correspondiente al eco de indicación  $H_2$ .

$D_1$  : Diámetro del TCH correspondiente al eco de indicación  $H_1$ .

### 6.3.3. Relaciones entre Altura de Indicación y Agujero de Fondo Plano.

Existen dos ecuaciones que relacionan la variación de la altura de los ecos de indicación con los agujeros de fondo plano (FBH -Flat Bottom Hole). La primera, relaciona la variación de la altura de los ecos de indicación con la variación de la distancia de recorrido del haz ultrasónico a través del material hasta el agujero de fondo plano, de la siguiente manera:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^2 \quad (6.9)$$

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

La segunda, relaciona la variación de la altura de los ecos de indicación con la variación del diámetro del agujero de fondo plano, manteniendo la distancia de recorrido constante. Esta relación queda definida por la ecuación:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 \quad (6.10)$$

### 6.3.4. Relación entre las Superficies Reflectoras de "TCH" con "FBH".

Cuando procedemos a calibrar los sistemas ultrasónicos, a menudo es necesario realizar patrones de calibración que presenten agujeros de fondo plano como requisito para la comparación de los ecos de respuesta de la pieza de ensayo. Resulta difícil la realización de éste tipo de superficies reflectoras, sobre todo cuando estos deben ser mecanizados sin las maquinarias adecuadas y en cortos períodos de tiempo.

Sin embargo, teniendo la posibilidad de sustituir las superficies reflectoras de fondo plano (FBH) por superficies reflectoras cilíndricas (TCH), las cuales son mas fáciles de mecanizar, podemos obtener resultados similares. La siguiente ecuación demuestra que es posible sustituir los agujeros de fondo plano por agujeros cilíndricos transversales, ubicados a la misma distancia, tomando en cuenta tanto la longitud de onda como la distancia de recorrido del haz ultrasónico. Es importante hacer notar que esta ecuación es válida únicamente en la zona de campo lejano del haz, así:

$$\phi_{FBH} = \sqrt{\frac{2}{\Pi} \lambda \sqrt{\phi_{TCH} \cdot s}} \quad (6.11)$$

## CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS ULTRASÓNICOS

Donde:

$\phi$  FBH : Diámetro del orificio de fondo plano

$\lambda$  : Longitud de onda

$\phi$  TCH : Diámetro del agujero cilíndrico transversal

s : distancia de recorrido del haz ultrasónico

**TIPOLOGÍA DE LAS  
INDICACIONES  
ULTRASÓNICAS**

A lo largo de la exposición realizada sobre las técnicas operatorias, aplicadas primordialmente a la detección de discontinuidades en los materiales, no se ha tomado en cuenta el problema de la interpretación de las indicaciones que aparecen en pantalla. Producida la indicación, mediante la técnica operatoria adecuada, es preciso interpretarla. La interpretación consiste en hallar la correlación entre la indicación observada con la propia naturaleza, morfología, orientación, posición y tamaño de la discontinuidad; es decir, la interpretación es el dictamen sobre que es lo que da motivo a una indicación. Sin embargo, se debe ser cuidadoso, pues, algunas veces los ecos observados en pantalla no corresponden a discontinuidades presentes en la pieza de ensayo.

La interpretación es, pues, una función de importancia primordial y su responsabilidad recae de lleno en el experto en los ensayos no destructivos por ultrasonido (ver Introducción - Apartado i.4, Niveles I y II).

En los ensayos por el método de pulso-eco con representación de las indicaciones en la pantalla tipo A-scan, hay que resaltar la dificultad que supone la interpretación adecuada de éstas indicaciones, ya que son originadas por reflectores de características, en principio, desconocidas. La única información de que se dispone para su identificación es precisamente la indicación de su eco en pantalla, la cual se deberá analizar cuidadosamente en todos sus parámetros, entre los que cabe destacar:

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

- Distancia de la indicación al origen de la pantalla
- Altura de la indicación
- Forma de la indicación
- Cambio que experimenta al mover el palpador
- Variación que sufre con la frecuencia de ensayo.

De los resultados de éste análisis, se deben extraer conclusiones acerca de la naturaleza, morfología, orientación, posición y tamaño de la discontinuidad que ha dado lugar al eco.

La indicación del eco de una discontinuidad es, pues, una imagen abstracta de la misma. Indudablemente, nada ayudará tanto al interesado como su propia experiencia en la resolución de problemas reales y prácticos mediante ensayos por ultrasonido, y sus conocimientos sobre la tecnología de los materiales y sobre los procesos o las condiciones de servicio a que ha sido sometida la muestra de ensayo, es decir, sobre el historial de la misma.

Antes de continuar, es importante aclarar conceptos acerca de las indicaciones que pueden presentarse durante la ejecución de los ensayos ultrasónicos, así como los diferentes tipos de discontinuidades.

### 7.1. DIFERENCIA ENTRE REFLECTOR, DISCONTINUIDAD y DEFECTO.

Generalmente se habla de defecto, entendiéndose por esto todo eco de indicación que aparece entre el eco de emisión y el de fondo; ésta argumentación es totalmente incorrecta.

Lo correcto es hablar de reflectores, entendiéndose por este término, todo lo que origina un eco de indicación, es decir, una reflexión del sonido; según ésta definición, tanto puede ser un reflector una pared de fondo como un cambio de sección, una

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

perforación o una grieta que pueda presentar la pieza bajo ensayo; en fin, cualquier superficie que origine un eco.

Dentro de éstos casos, existen los reflectores propios de la pieza, es decir, los que por disposición constructiva o por geometría de la pieza originan reflexiones del sonido. Estos reflectores, no pueden ser llamados "defectos", ya que son propios de la pieza, o sea, superficies límites.

A todo eco de indicación o reflexión del sonido producido por cualquier otra causa que no sean las anteriores, se les debe tratar como "discontinuidades", o sea, son reflectores que no son propios de la geometría de la pieza y, por tanto requieren una mayor atención.

Una vez detectadas y localizadas las discontinuidades, hay que estudiar su posible origen, y seguidamente ver si esta discontinuidad pone en peligro la función que ésta pieza o elemento vaya a realizar y, por tanto, la hace inapropiada; en éste caso si podemos hablar de defectos.

La decisión sobre la peligrosidad de una discontinuidad no puede depender del operario del equipo, sino que éste debe disponer de una especificación exacta, en la cual, se le debe informar sobre los criterios de evaluación de tales discontinuidades, de forma que basándose en éstos pueda determinar si la discontinuidad localizada es un defecto.

En resumidas cuentas, las discontinuidades son reflectores que pueden ser defectos o no. Los ecos de indicación originados por una pared opuesta, una perforación o cualquier otra característica constructiva de la pieza sometida a verificación, no son discontinuidades.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

### 7.1.1. Reflectores Pequeños y Grandes.

Una vez vista la diferencia entre reflector, discontinuidad y defecto, y ante la importancia que éstos tienen, conviene, además, definirlos de una forma cuantitativa, es decir, aparte de señalar su posición, hay que definir también su forma, orientación y tamaño.

En cuanto a su tamaño, conviene compararlos con algún valor conocido; éste puede ser en principio la forma o geometría del haz que puede, en todo momento, ser determinada. Es decir, podemos clasificar las discontinuidades diciendo que son mayores o menores que el haz sonoro, según como se muestra en la Figura 7.1.

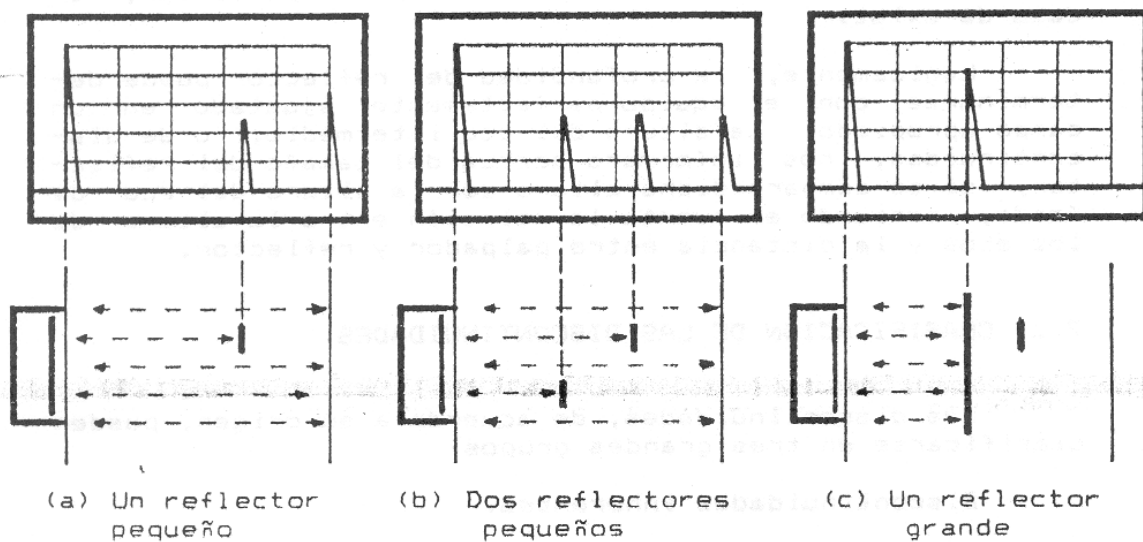


Figura 7.1. Comparación entre los ecos de indicación de reflectores pequeños y grandes

En la Figura 7.1 se muestra la comparación entre los ecos de indicación de reflectores grandes y pequeños. Nótese, tanto la reducción comparativa entre los ecos de indicación de pared de fondo entre las Figuras 7.1 a y 7.1 b, como su desaparición en la Figura 7.1 c. También se puede observar que en la Figura 7.1 c se encuentra oculto, al haz ultrasónico, un reflector pequeño.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

La orientación y forma del reflector pueden determinarse por el empleo sucesivo de varios palpadores, con diferentes ángulos de refracción, o con diferentes frecuencias. Mediante el cambio de altura del eco de indicación de un reflector, se puede saber la orientación y forma del mismo, así como su extensión transversal con respecto al eje del haz sonoro.

En el caso de reflectores grandes, o sea, reflectores que tengan un tamaño y forma mayor que el haz sonoro, no existe tanta dificultad a la hora de determinar su forma y orientación, así como la evaluación de su tamaño.

Sin embargo, en el caso de reflectores pequeños, hay que emplear otro sistema de evaluación. Hay que tener en cuenta que una parte del haz sonoro pasa lateralmente por los reflectores pequeños, por cuyo motivo se obtienen ecos, tanto del reflector como de la pared posterior, en caso de existir.

Lógicamente, la profundidad del reflector puede determinarse con el equipo perfectamente ajustado en un campo apropiado. La altura del eco intermedio, o de discontinuidad, nos informará acerca del tamaño del reflector, si se compara dicha altura con la altura del eco de fondo, teniendo en cuenta la relación entre la altura de los ecos y la distancia entre palpador y reflector.

### 7.2. CLASIFICACION DE LAS DISCONTINUIDADES.

Las discontinuidades, de acuerdo a su origen, pueden clasificarse en tres grandes grupos:

- Discontinuidades inherentes.
- Discontinuidades de proceso o fabricación.
- Discontinuidades de servicio.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

### 7.2. 1. Discontinuidades inherentes.

Las discontinuidades inherentes son todas aquellas que se originan durante la solidificación del material. Ejemplos de éstas son: rechupes, grietas de solidificación, porosidades, gotas frías, laminaciones, etc.

Durante el proceso de fabricación de piezas fundidas pueden ocurrir discontinuidades por interrupción de vaciado, gotas frías, o se pueden observar grietas superficiales o de contracción, vacíos de contracción, agujeros, bolsas de gas, porosidades, inclusiones de escoria o arena, etc.

### 7.2.2. Discontinuidades de Proceso o Fabricación.

Las discontinuidades ocurridas durante los procesos de fabricación, como su mismo nombre lo indica, son aquellas que se originan durante los procesos de manufactura, tales como: laminación, forja, extrusión, soldadura, tratamientos térmicos, revestimientos metálicos, etc.

Durante la laminación de planchas, pueden ocurrir laminaciones por efecto de bolsas de gas aplastadas por el proceso. Además, pueden ocurrir también variaciones de espesor, agujeros, orificios y defectos superficiales.

El proceso de forja puede producir, a su vez, una serie de discontinuidades, tales como: pliegues, inclusiones, grietas, fisuras, corte y hendiduras.

Durante los procesos de soldadura se pueden crear ciertas discontinuidades. Ejemplos de éstas discontinuidades son: inclusiones de escoria, grietas de contracción, faltas de fusión, porosidades, faltas de penetración, etc. En el Capítulo 8

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

se ampliará la información acerca de las discontinuidades y la inspección de soldaduras.

### 7.2.3. Discontinuidades de Servicio.

Las discontinuidades de servicio abarcan todas aquellas relacionadas con las condiciones de servicio, tales como: corrosión, erosión, fatiga, etc.

La corrosión puede ser definida, en pocas palabras, como el deterioro de un material mediante reacciones químicas o electroquímicas con el ambiente al cual está expuesto. La corrosión puede provocar la disminución desigual del espesor. En los bordes de grano de la estructura metalúrgica, puede ocurrir un fenómeno conocido como corrosión intergranular. También se pueden producir grietas sumamente pequeñas o microgrietas por el fenómeno conocido como corrosión bajo tensión.

Por su parte, la erosión se define como la destrucción de materiales por la acción abrasiva de fluidos en movimiento, generalmente acelerada por la presencia de partículas sólidas o materia en suspensión. Su efecto se refleja en una disminución del espesor de la pieza.

La fatiga es un fenómeno que origina la fractura de un material sometido a esfuerzos repetidos o fluctuantes, con un valor de esfuerzo máximo (esfuerzo de rotura), menor que el límite elástico del material. Las fracturas por fatiga son progresivas, empezando como fisuras diminutas que crecen bajo la acción del esfuerzo fluctuante. La fatiga produce una disminución de las propiedades elásticas del material; por plasticidad, se producirá la fractura final.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

### 7.3. INTERPRETACION DE LAS INDICACIONES.

Como se dijo anteriormente, la interpretación de las indicaciones que se presentan en la pantalla de un equipo de ultrasonido, requiere del conocimiento de una serie de factores que permitirán su clasificación.

#### 7.3.1. Tipos de Discontinuidades.

Las posibilidades de detección de una discontinuidad por ultrasonido depende de sus propias características, de las del material que las contiene y de los parámetros de ensayo. Analizaremos brevemente éstos factores, recordando algunos conceptos.

##### 7.3.1.1. Características de las Discontinuidades.

Las discontinuidades vienen definidas, principalmente, por su naturaleza, morfología, orientación, posición y tamaño.

###### 7.3.1.1.1. Naturaleza de las Discontinuidades.

La naturaleza de las discontinuidades influye sobre su impedancia acústica. Mas que su valor absoluto, interesa su relación con la impedancia acústica del medio que la rodea. Si ambas impedancias son similares, la reflexión en la superficie límite será débil, lo que dará lugar a una menor altura de la indicación del eco, o incluso, a su no aparición.

###### 7.3.1.1.2. Morfología de las Discontinuidades.

La configuración geométrica de las discontinuidades es importante, en cuanto afecta a la cantidad de energía reflejada y, en consecuencia, sobre la altura y la forma de la

## **TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS**

indicación. Así, una discontinuidad de tipo esférico y de superficie rugosa, puede pasar desapercibida (a determinada frecuencia) a causa de la dispersión de energía que provoca.

### **7.3.1.1.3. Orientación de las Discontinuidades.**

Deberá ser tal que permita alguna reflexión del haz en la dirección adecuada. La orientación óptima se produce cuando el plano principal de la discontinuidad es perpendicular al eje del haz ultrasónico. Una discontinuidad de morfología plana, con orientación paralela al haz ultrasónico no dará, prácticamente, lugar a un eco.

### **7.3.1.1.4. Posición de las Discontinuidades.**

Si la distancia a que se encuentra la discontinuidad es suficientemente grande, su eco puede llegar a confundirse con el ruido de fondo y pasar inadvertida. Evidentemente, a medida que sea mayor su tamaño, mayor será la distancia a que tenga lugar la pérdida de la indicación. Por otra parte, la discontinuidad puede ser o no accesible al haz ultrasónico como consecuencia de la forma de la muestra.

### **7.3.1.1.5. Tamaño de las Discontinuidades.**

En general, deberá ser igual o mayor que la semilongitud de onda del haz ultrasónico. Un disco plano, de diámetro igual a la mitad de la longitud de onda, sólo será detectable en condiciones muy favorables, por lo que, en la práctica, ésta dimensión se considera como límite inferior de sensibilidad.

### **7.3.1.2. Características del Material.**

Las características del material que mas afectan al ensayo por ultrasonido, son su impedancia acústica, su coeficiente de atenuación y el estado superficial de la muestra.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

### 7.3.1.2.1. Impedancia Acústica.

Influye, sobre todo, según se ha dicho, su relación con la impedancia acústica de la discontinuidad (ver Capítulo 3, Apartado 3.2).

### 7.3.1.2.2. Coeficiente de Atenuación.

Los fenómenos de absorción y dispersión de la energía en el seno del material limitarán, por un lado, la distancia que podrá ser alcanzada para un nivel dado de sensibilidad y, por otro, producirán ruido de fondo que, en su caso, podrá enmascarar las indicaciones de los ecos de las pequeñas discontinuidades.

### 7.3.1.2.3. Estado Superficial.

Será deseable que la muestra tenga un acabado fino, a fin de que las pérdidas de energía en la transmisión sean mínimas, pero esta circunstancia no siempre se presenta en la práctica. Si la superficie posee una rugosidad de media longitud de onda, la penetración de las ondas en el material puede no tener lugar, por lo que deberá amolarse o lijarse la superficie para alcanzar la sensibilidad requerida en el ensayo (ver Capítulo 3, Apartado 3.4.2.2).

### 7.3.1.3. Parámetros de Ensayo.

En los Capítulos 1 y 2 fue analizada la influencia de la frecuencia y de las características del palpador sobre los parámetros de ensayo: longitud del campo cercano, divergencia del haz, penetración, sensibilidad y poder de resolución.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

### 7.3.1.3.1. Frecuencia.

Dada su relación con la longitud de onda, su influencia será decisiva en cuanto a la detectabilidad de discontinuidades pequeñas. Por otra parte, si para alcanzar niveles altos de poder de resolución se utilizan frecuencias de ensayo elevadas, se corre el riesgo de que, al aumentar excesivamente el coeficiente de atenuación, se pierda tanto poder de penetración que el ensayo resulte inviable.

### 7.3.1.3.2. Características del Palpador.

Los palpadores se caracterizan por su frecuencia, diámetro y poder de resolución. El diámetro junto con la frecuencia, determina la longitud del campo cercano y la divergencia del haz (ver Capítulo 2, Apartado 2.2).

Si el campo cercano es largo, el palpador tendrá buena sensibilidad para detectar pequeñas discontinuidades situadas lejos de él. En general, será difícil detectar discontinuidades pequeñas que estén situadas a una distancia superior a tres veces la longitud del campo cercano.

La posibilidad de emplear palpadores de mayor diámetro o de mayor frecuencia está limitada, en la práctica, por las disponibilidades del mercado, por la superficie útil de apoyo del palpador en las muestras o por el aumento de la atenuación.

Así, para muestras de grandes dimensiones, se utilizarán palpadores de gran diámetro, eligiendo los más pequeños y de elevada frecuencia, sólo para ensayos de hasta 100 milímetros de distancia.

El poder de resolución está muy influido por el tipo de cristal piezoeléctrico y por ciertas características constructivas del palpador, entre las que cabe destacar la amortiguación de la vibración del cristal una vez concluido el impulso eléctrico. Si el

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

cristal está insuficientemente amortiguado, el poder de resolución disminuye, sobre todo, en distancias cortas, al aumentar la anchura de la señal de emisión.

### 7.3.2. Detección e Identificación de una Discontinuidad.

Mediante las técnicas operatorias descritas en el Capítulo 5, podemos suponer detectada la discontinuidad, que habrá dado lugar a la indicación de su eco en la pantalla. Esa indicación es la única imagen de que se dispone de la discontinuidad y será preciso un cuidadoso análisis de la misma para interpretarla, es decir, tratar de deducir las siguientes características de la discontinuidad:

- Morfología (plano, cilíndrica, esférica, rugosa, irregular),
- Orientación (respecto al haz ultrasónico: perpendicular u oblicua),
- Posición
- Tamaño
- Naturaleza (grieta, escoria, poro, cavidad, hoja, etc)

#### 7.3.2.1. Morfología de la Discontinuidad.

La forma del eco de indicación, puede proporcionar alguna información acerca de la morfología de la discontinuidad. Si el eco de indicación alcanza su altura total con pocos escalones (nodos de alta frecuencia), normalmente, suele proceder de un reflector plano irradiado en dirección próxima a la perpendicular a dicho plano. Por el contrario, si la discontinuidad no es plana o es irregular o, siendo plana y rugosa, no se irradia perpendicularmente, la elevación del eco de indicación suele ser mas gradual, resultando, pues, mas ancha. Este mismo tipo de eco de indicación, puede provenir de pequeñas discontinuidades aisladas muy próximas, formando una agrupación de morfología esférica o cilíndrica.

Cuando se utilizan palpadores de incidencia normal a la superficie, suele ser difícil la detección de la discontinuidad desde diversos ángulos, por lo que la información

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

acerca de su morfología no será muy completa. Sin embargo, si se utilizan palpadores angulares, es posible, con frecuencia, irradiar la discontinuidad desde diversos puntos o ángulos, lo que permite mayor precisión en la determinación de su morfología. La forma de la curva envolvente de los picos de las indicaciones móviles obtenidas al mover el palpador, puede proporcionar una idea acerca de la morfología del reflector. En ensayos con palpadores angulares, las discontinuidades se pueden clasificar dentro de tres categorías simples:

- Planas, Figura 7.2
- Cilíndricas, Figura 7.3
- Esféricas, Figura 7.4.

No siempre será posible una clasificación tan simple, ya que las discontinuidades naturales no suelen tener una forma definida, pero se habrá dado un gran paso en la determinación de su morfología si se logra un dictamen de éste tipo.

Otro método que permite determinar la morfología del reflector es su análisis a distintas frecuencias. De esta forma, se puede determinar su rugosidad que, si es menor que la tercera parte de la longitud de onda, dará una reflexión especular y, si es mayor, la reflexión será difusa. Un eco que a baja frecuencia es único, puede resolverse en varios ecos si se utiliza una frecuencia mayor, revelando que la indicación corresponde bien a una discontinuidad múltiple o bien a una discontinuidad irregular o muy rugosa.

# TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

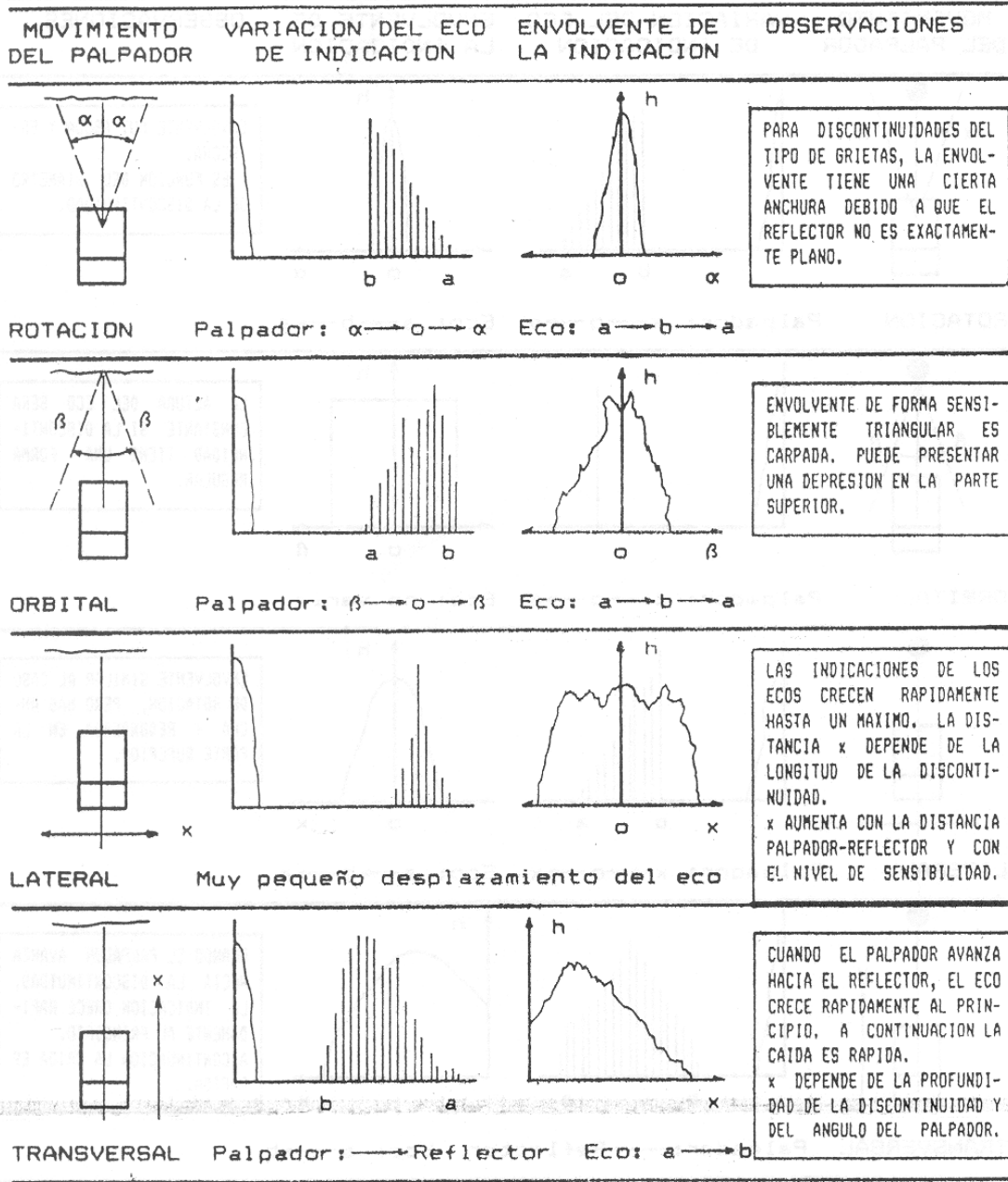


Figura 7.2. Estudio de un reflector con morfología plana mediante un palpador angular

# TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

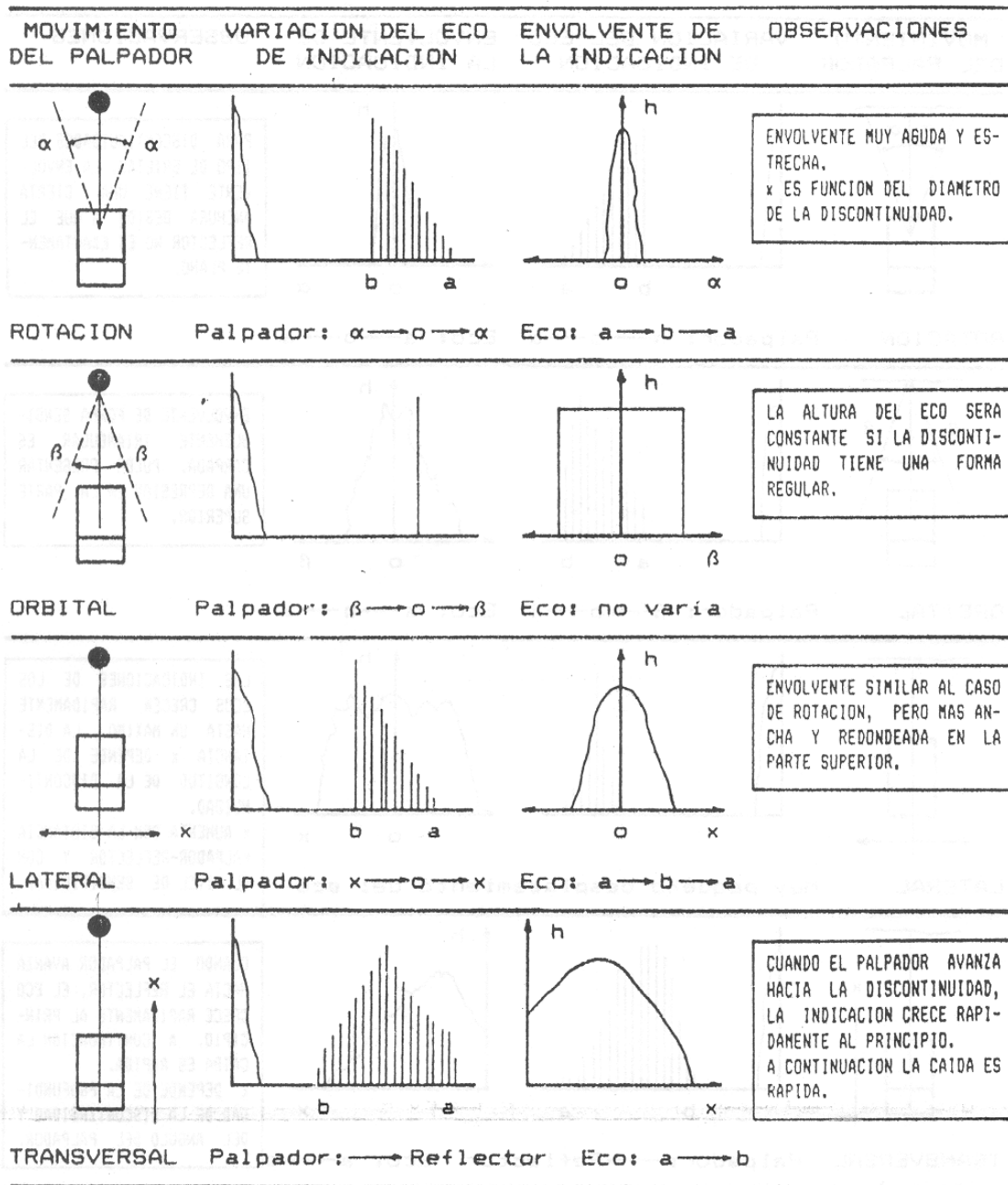


Figura 7.3. Estudio de un reflector con morfología cilíndrica mediante un palpador angular (perpendicular al plano)

# TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASONICAS

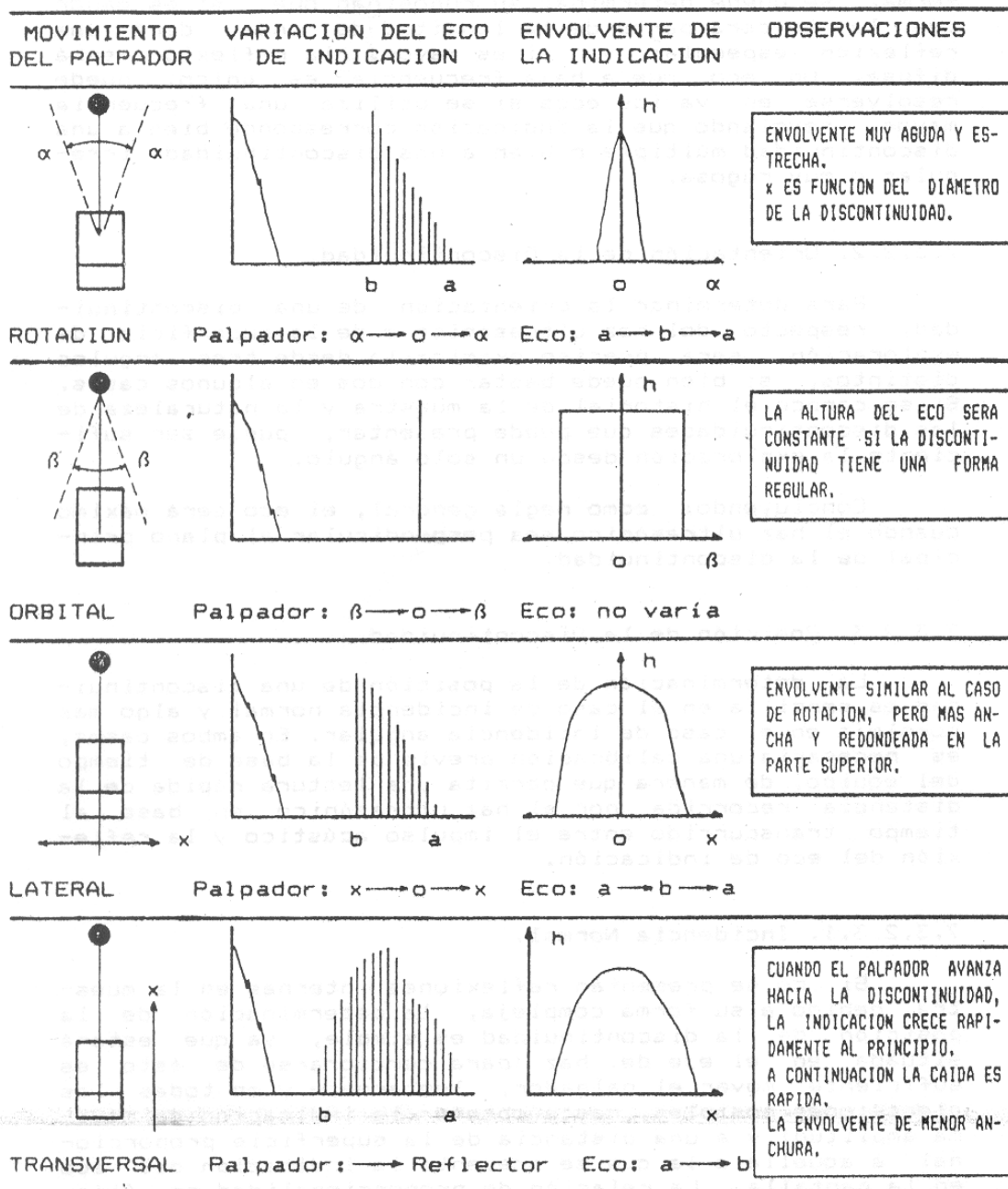


Figura 7.4. Estudio de un reflector con morfología esférica mediante un palpador angular

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

### 7.3.2.2. Orientación de la Discontinuidad.

Para determinar la orientación de una discontinuidad, respecto del haz ultrasónico o de la superficie de exploración, será preciso examinarla desde tres ángulos distintos, si bien puede bastar con dos en algunos casos. Si se conoce el historial de la muestra y la naturaleza de las discontinuidades que puede presentar, puede ser suficiente la exploración desde un solo ángulo.

Concluyendo: como regla general, el eco será máximo cuando el haz ultrasónico sea perpendicular al plano principal de la discontinuidad.

### 7.3.2.3. Posición de la Discontinuidad.

La determinación de la posición de una discontinuidad es sencilla en el caso de incidencia normal y algo más compleja en el caso de incidencia angular. En ambos casos es necesaria una calibración previa de la base de tiempo del equipo, de manera que permita una lectura rápida de la distancia recorrida por el haz ultrasónico en base al tiempo transcurrido entre el impulso acústico y la reflexión del eco de indicación.

#### 7.3.2.3.1. Incidencia Normal.

Si no se presentan reflexiones internas en la muestra debido a su forma compleja, la determinación de la posición de la discontinuidad es simple, ya que estar situada en el eje de: haz (para cerciorarse de esto es suficiente mover el palpador, lentamente y en todas las direcciones posibles, hasta obtener la indicación de máxima amplitud) y a una distancia de la superficie proporcional a aquella a la que se presenta la indicación del eco en la pantalla. La relación de proporcionalidad se fija, en la calibración en distancia del equipo, con una muestra de espesor conocido y, a ser

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

posible, de idéntica naturaleza a la de la muestra objeto bajo ensayo (ver Capítulo 6, Calibración de los Sistemas Ultrasónicos).

Si por la forma compleja de la muestra de ensayo se presentan reflexiones internas del haz, lo más indicado será realizar un dibujo o croquis a escala de la sección recorrida por el haz y, sobre el, reconstruir la trayectoria según las leyes de reflexión, de manera que se pueda llevar la distancia y obtener así la posición de la discontinuidad. En ciertos ensayos, éste trazado puede resultar muy complicado, debido a la aparición de indicaciones de ecos provocados por conversiones o transformaciones de onda (ver Capítulo 3 - Apartado 3.3.2, Modos de Conversión) con los consiguientes cambios en la velocidad de propagación.

### 7.3.2.3.2. Incidencia Angular.

En el caso de incidencia angular, resulta más compleja la determinación de la posición de las discontinuidades, por lo que se debe hablar de casos específicos. Siendo la inspección de soldaduras una de las aplicaciones más amplias dentro de las relativas a la detección de discontinuidades, en el Capítulo 8 se dedica con sumo detenimiento a este respecto. Así, más adelante se realizará una descripción amplia sobre la detección y ubicación de las diferentes discontinuidades que pueden presentarse en soldaduras.

### 7.3.2.3.3. Ondas de Superficie.

En éste caso, la localización de la discontinuidad no presentará problemas; ya que siempre estará en la superficie y a una distancia del palpador que se puede leer directamente sobre la pantalla, si previamente ha sido calibrado el equipo mediante discontinuidades artificiales realizadas en piezas patronas. Sin embargo, la rugosidad superficial puede alterar o provocar indicaciones falsas, por lo que se debe tener cuidado.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

### 7.3.2.4. Tamaño de la Discontinuidad.

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

Por ésta razón, en el Apartado 7.3.3 se analiza extensamente éste problema.

### 7.3.2.5. Naturaleza de la Discontinuidad.

Hemos dejado para el final la discusión de la determinación de la naturaleza de una discontinuidad, porque su diagnóstico debe venir informado previamente con los datos obtenidos del ensayo y relativos a la morfología, orientación, posición y tamaño de la discontinuidad. No se podrá asegurar, por ejemplo, que el reflector es una grieta menos que, previamente, se haya comprobado que su morfología tiende a ser plana.

Pero, por su naturaleza, las discontinuidades se pueden presentar como un vacío en el material (grietas, rechupes, cavidades, poros, etc.) o como impurezas, esto es, un cuerpo extraño en el material (escoria, inclusiones, segregaciones, etc.). Desde el punto de vista de su detección por ultrasonido recordamos que, aunque sus impedancias acústicas son muy distintas, su diferenciación puede llegar a ser engorrosa.

Aquí, una vez mas, son de gran utilidad los conocimientos sobre tecnología de materiales, de sus procesos y el disponer del historial completo de la muestra.

Aún así, se presentan dificultades a la hora de dictaminar sobre la naturaleza de una discontinuidad dada. Por ejemplo, en una unión soldada puede ser difícil distinguir

## **TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS**

entre una falta de penetración y una grieta longitudinal en la raíz, o una, falta de alineación oculta y una falta de fusión en la raíz.

En los casos que se requiere de una interpretación correcta sobre la naturaleza de una discontinuidad, se puede recurrir, si es factible, al empleo de otros ensayos no destructivos que complementen la información obtenida mediante un ensayo por ultrasonido. Si se trata de la puesta a punto de un proceso de inspección de una producción, será aconsejable recurrir a ensayos destructivos sobre muestras preseleccionadas.

### **7.3.3. Criterios y Técnicas operatorias para la Determinación del Tamaño de las Discontinuidades.**

Desde el punto de vista del ensayo por ultrasonido se establece una primera clasificación del tamaño de las discontinuidades en "muy grandes" y "normales", sobre la base de que sean, respectivamente, mayores o menores que la sección transversal del haz ultrasónico; ya que, según que la discontinuidad pertenezca a uno u otro tipo, la determinación de su tamaño se realiza por diferentes técnicas operatorias.

#### **7.3.3.1. Discontinuidades Mayores que la Sección Transversal del Haz Ultrasónico.**

Se determina su tamaño desplazando el palpador por la superficie de la pieza, de manera que quede trazado el contorno de la proyección de la discontinuidad sobre dicha superficie.

Esta técnica se suele denominar de exploración dinámica, en contraste con la de exploración estática (sin movimiento del palpador) que se realiza para la determinación del tamaño de discontinuidades que hemos denominado normales, es decir, menores que la sección transversal del haz ultrasónico.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

En la Figura 7.5 se representa la variación de las alturas de las indicaciones de los ecos de pared posterior y de la discontinuidad, al mover el palpador desde una zona sana a otra defectuosa. La indicación de la discontinuidad alcanza una altura máxima, que se mantiene constante si la discontinuidad se irradia perpendicularmente a su plano principal y si presenta además, reflexión especular (ver Figura 7.5a).

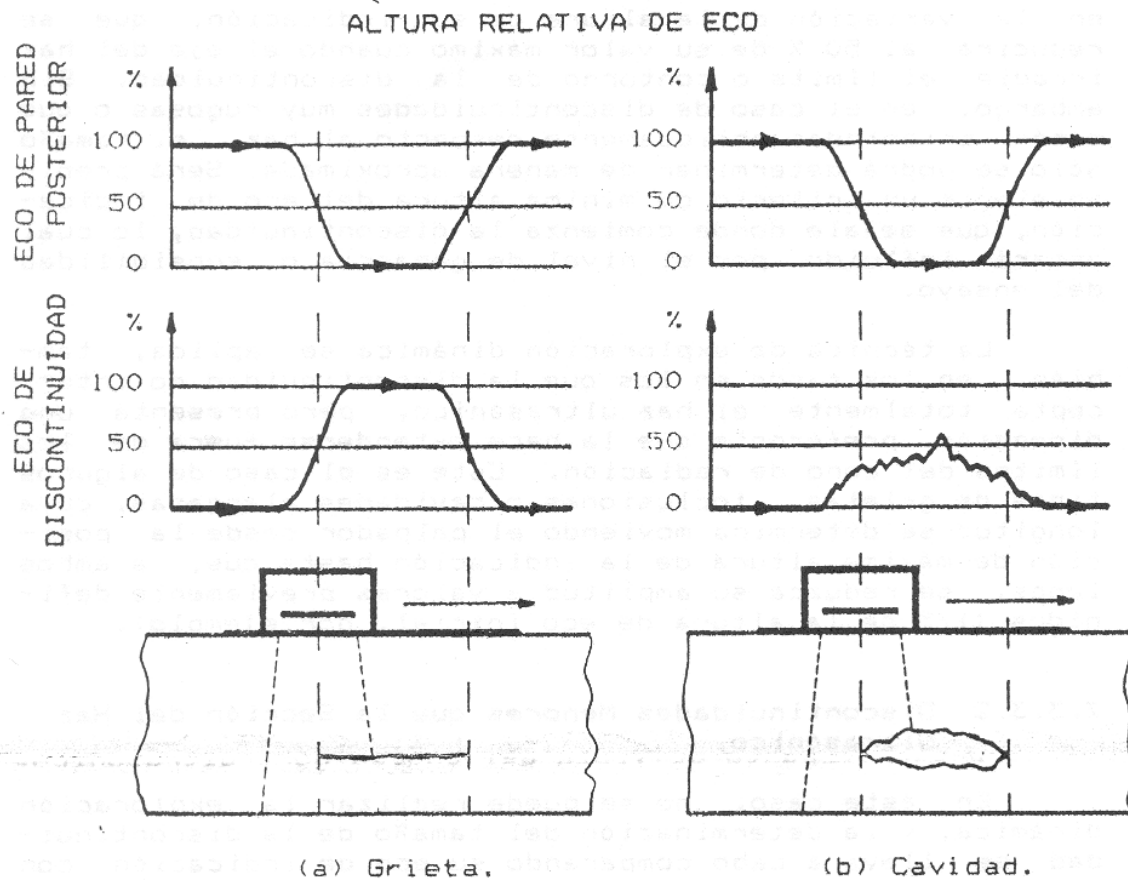


Figura 7.5. Variación de las alturas de los ecos de pared posterior y discontinuidad

Una discontinuidad muy grande de forma arbitraria (grietas oblicuas o cavidades de contracción) se puede explorar de igual manera, siempre que sea posible observar la variación de la altura del eco de indicación de pared posterior que seguirá siendo regular, disminuyendo a la mitad de su valor cuando el eje del haz toca el borde de la

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

discontinuidad (ver Figura 7.5b). El tamaño así obtenido es, sensiblemente, independiente del nivel de sensibilidad del ensayo.

Si no es posible disponer de la indicación del eco de pared posterior, una discontinuidad plana y perpendicular al haz ultrasónico, no presentara problemas de determinación de su extensión, ya que será suficiente fijarse en la variación de la altura de su indicación, que se reducirá al 50 % de su valor máximo cuando el eje del haz irradie el límite o contorno de la discontinuidad. Sin embargo, en el caso de discontinuidades muy rugosas o que estén orientadas oblicuamente respecto al haz, el tamaño sólo se podrá determinar de manera aproximada. Será preciso elegir un criterio de mínima altura del eco de indicación, que señale donde comienza la discontinuidad, lo cual estará influido por el nivel de ganancia o sensibilidad del ensayo.

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

### 7.3.3.2. Discontinuidades Menores que la Sección del Haz Ultrasónico.

En este caso, no se puede realizar la exploración dinámica, y la determinación del tamaño de la discontinuidad se lleva a cabo comparando su eco de indicación con los de otros reflectores ensayados en las mismas condiciones. Estos pueden ser:

- Tipo A: discontinuidades naturales conocidas, de idéntica naturaleza y morfología,
- Tipo B: discontinuidades artificiales, de morfología similar a la esperada,

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

- Tipo C: reflectores de forma de disco circular plano.

Evidentemente, lo ideal sería disponer de probetas de comparación con reflectores del tipo A, pero esto no es siempre posible, por lo que su empleo está limitado a casos muy particulares y sobre los que se tiene mucha experiencia.

La comparación con reflectores del tipo B se suele llevar a cabo en los casos en que la forma peculiar de la muestra o la posición particular de sus discontinuidades hace necesario el estudio cuidadoso de las condiciones de ensayo.

El tipo C es el más general y el que permite ser aplicado a mayor número de problemas. A cambio, los resultados que se obtienen se apartan tanto más de la realidad cuanto más lejos estén las discontinuidades reales de tener una forma plana circular y orientadas perpendicularmente al haz ultrasónico.

Una discontinuidad en un campo ultrasónico se comporta como un oscilador, es decir, puede asimilarse a un nuevo emisor de ondas, por lo que dará lugar a fenómenos de difracción, dispersión e interferencia, en función de su tamaño y de la longitud de onda del haz ultrasónico, con sus características direccionales, campo cercano, campo lejano y otras.

Por ello, cuando las discontinuidades son menores que la sección del haz ultrasónico, se puede establecer una nueva clasificación de tamaño, en base a su comparación con la longitud de onda:

- Discontinuidad muy pequeña, en relación con la longitud de onda,
- Discontinuidad pequeña, del mismo orden de tamaño que la longitud de onda,
- Discontinuidad grande, en relación con la longitud de onda. El efecto de la relación tamaño de la discontinuidad/longitud de onda ( $Dd/\lambda$ ), sobre la direccionalidad, produce que, para el caso de un reflector perfecto en forma de disco circular plano, perpendicular al haz ultrasónico, la reflexión sea

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

especular para relaciones de  $Dd/\lambda \geq 2$ , mientras que la reflexión será difusa para relaciones  $Dd/\lambda \leq 0,5$ .

En el caso de un reflector perfecto, en forma esférica con una relación  $Dd/\lambda \approx 3$ , la reflexión será difusa, por lo que la altura de su eco de indicación es de solamente 1/50 a 1/60 de la de un disco circular de igual diámetro.

En un reflector perfecto de forma cilíndrica, la reflexión es mas débil. La altura de su indicación es del orden de 1/10 de la altura de la indicación de un disco circular de superficie proyectada equivalente.

La rugosidad de la superficie de éstos reflectores afecta, también, el carácter de la reflexión, de manera que, para rugosidades menores que 1/3 de la longitud de onda, la reflexión será del tipo especular y difusa para rugosidades mayores.

La morfología, el tamaño y la rugosidad de una discontinuidad son, pues, magnitudes relativas y función de la longitud de onda.

Las discontinuidades naturales pueden ser de morfología muy irregular y compleja, por lo que no será fácil la determinación de su tamaño mediante cálculo. No obstante, en primera aproximación, se pueden asimilar a una discontinuidad en forma de disco circular perpendicular al haz ultrasónico, en cuyo caso los cálculos se simplifican y, en la práctica, se utilizan para éste fin también taladros de fondo plano.

Dado que las discontinuidades naturales presentan, además, superficies irregulares y rugosas y que no siempre su superficie reflectante principal es perpendicular al haz ultrasónico, darán lugar, en la práctica, a indicaciones de altura menor que la de un disco circular de igual superficie reflectante perpendicular al haz ultrasónico. Es decir, y esto es lo que se desea resaltar, El tamaño de una discontinuidad natural, menor que la sección del haz ultrasónico, será igualo mayor que el de un disco circular perpendicular al haz ultrasónico, presente en la misma muestra, cuyo eco de como

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

resultado una indicación de igual altura. A éste respecto, ya se hizo notar la excepción, poco probable, de que la superficie de la discontinuidad natural forme un espejo cóncavo, en cuyo caso el haz reflejado se focalizará, pudiendo dar lugar a un eco mas fuerte que el correspondiente a una discontinuidad equivalente en forma de disco circular plano.

Los estudios y experiencias sobre la determinación del tamaño de una discontinuidad, mediante la comparación de sus ecos de indicación con las correspondientes a reflectores en forma de disco circular plano, han dado lugar a dos técnicas distintas, pero que conducen a resultados similares:

- Utilización de bloques patrones, con reflectores constituidos por taladros de fondo plano (ver Capítulo 6, Calibración de los Sistemas Ultrasónicos),
- Empleo de diagramas, obtenidos mediante estudio teórico del comportamiento de un reflector circular plano en el campo ultrasónico.

Ambos procedimientos permiten, si son correctamente utilizados, la obtención de resultados reproducibles, evitando errores que podrían introducirse por cambio de operador, modificación o avería del equipo, influencias del clima o la temperatura. etc.

### 7.3.4. Guía para la Interpretación.

Las siguientes reglas son un compendio de todo lo anteriormente expuesto y pueden ser útiles al operador en el momento de realizar el ensayo:

1. Determinar con la mayor exactitud la posición de la discontinuidad.
2. Si la discontinuidad es mayor que la sección del haz. ultrasónico, mover el palpador y determinar la proyección de su contorno sobre la superficie de la pieza. Si se trata de discontinuidades menores que la sección del haz, aplicar alguna de las técnicas descritas.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

3. Si la discontinuidad está inclinada, ensayar con varios ángulos de incidencia hasta obtener la indicación máxima, lo que significará que se irradia perpendicularmente.
4. Si la altura de la indicación permanece relativamente constante al variar el ángulo de incidencia, la discontinuidad puede ser muy pequeña, rugosa o esférica.
5. Si la altura de la indicación decrece rápidamente al variar el ángulo de incidencia la discontinuidad puede ser relativamente grande y plana.
6. Si la altura de la indicación aumenta al ensayar a frecuencias mas bajas, la discontinuidad es rugosa.
7. Si, por el contrario, la altura de la indicación disminuye al utilizar frecuencias mas bajas, la discontinuidad está probablemente formada por pequeños reflectores discretos.

### 7.4. INDICACIONES FALSAS.

Se consideran como indicaciones falsas, los ecos de indicación que aparecen en pantalla y que no se deben a discontinuidades propias del material, o a la presencia de reflectores no identificados. Su aparición puede estar motivada a las siguientes causas:

- Interferencias eléctricas.
- Indicaciones motivadas por el palpador.
- Indicaciones originadas por la rugosidad superficial de la pieza.
- Indicaciones debidas a reflexiones con conversión de ondas.
- Indicaciones debidas a detalles constructivos de la pieza de ensayo.
- Indicaciones debidas a la estructura del material.
- Indicaciones accidentales.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

### 7.4.1. Interferencias Eléctricas

Debido a que el rango de frecuencias del material está, prácticamente, dentro de la gama de los receptores de radio, se pueden captar interferencias que se manifiestan en la pantalla como una "crepitación" de la línea base de tiempo o un aumento del nivel de ruido.

Estas interferencias pueden originarse por chispas producidas en máquinas o instrumentos eléctricos, tales como: espectrógrafos, equipos de soldadura, hornos eléctricos, etc., conectados o no a la misma red que el equipo de ultrasonido. Este tipo de interferencia, rara vez da lugar a errores en los casos de operación manual. Sin embargo, puede crear problemas en instalaciones automáticas, cuyo monitor no será capaz de distinguir cuando un impulso proviene de una interferencia exterior o cuando corresponde a una discontinuidad real. Para evitarlo, se construyen los monitores de manera que sólo acusan recibo de una señal cuando está dentro de sus límites. De esta forma, es muy difícil, pero no imposible, registrar un impulso procedente de interferencias, pero, con ello, se limita la velocidad de ejecución del ensayo.

### 7.4.2. Indicaciones Motivadas por el Palpador.

Cuando se trabaja con palpadores angulares, aparecen indicaciones de ecos próximos al eco inicial que provienen de reflexiones internas en la zapata de plástico y que son fácilmente identificables, pues se presentan aún sin apoyar el palpador en la pieza. En la Figura 7.6 se muestra éste efecto.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

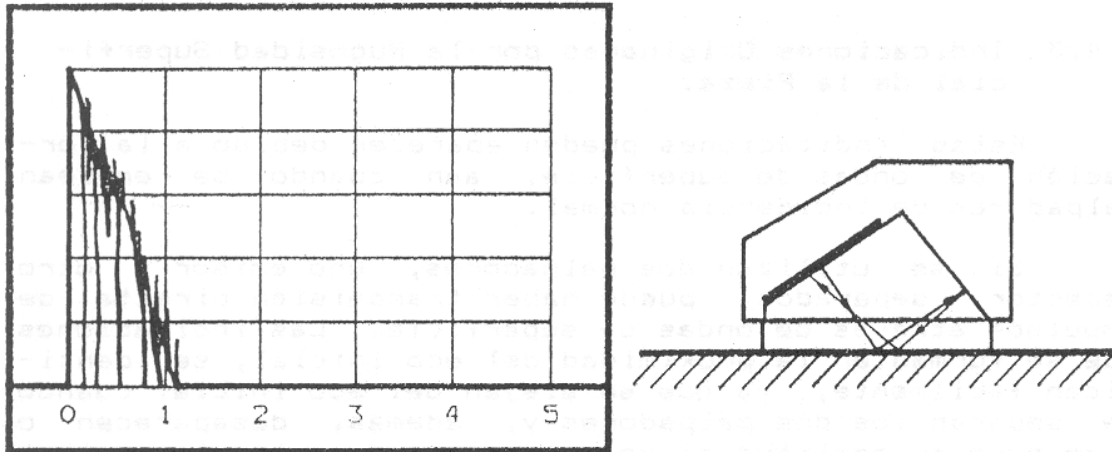


Figura 7.6. Efecto producido por la zapata del palpador en la señal ultrasónica cerca del eco inicial

Si el cristal piezoeléctrico se daña, se afloja o se separa del amortiguador o de la suela protectora, el eco inicial se ensanchará en la pantalla aumentando la zona muerta. Esta avería se puede traducir, también, en una baja de la sensibilidad o del poder de resolución del palpador, o de ambos. En la Figura 7.7 se muestra tanto la ubicación y amplitud de un palpador en funcionamiento correcto, como de un palpador dañado.

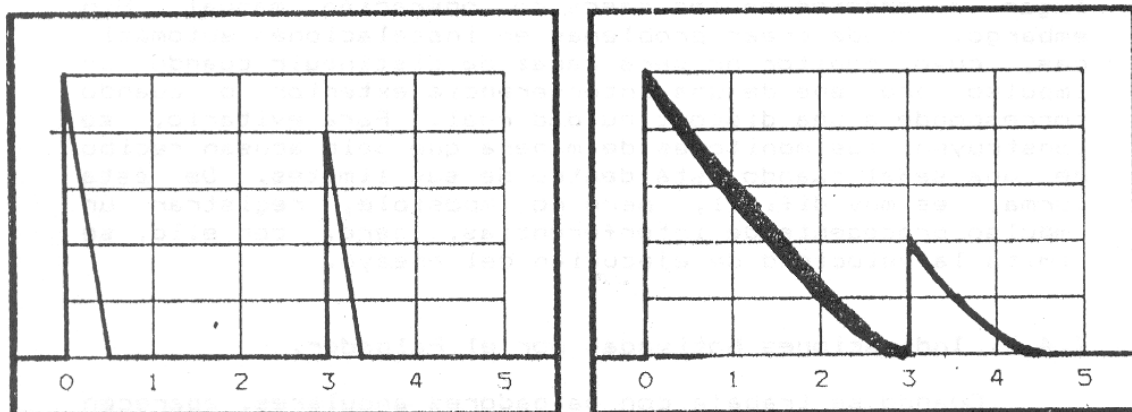


Figura 7.7. Indicaciones motivadas por el palpador

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

### 7.4.3. Indicaciones Originadas por la Rugosidad Superficial de la Pieza.

Estas indicaciones pueden aparecer debido a la formación de ondas de superficie, aún cuando se emplean palpadores de incidencia normal.

Si se utilizan dos palpadores, uno emisor y otro receptor, separados, puede haber transmisión directa de impulsos a través de ondas de superficie. Las indicaciones que se forman en la proximidad del eco inicial, se identifican fácilmente, ya que se alejan del eco inicial cuando se separan los dos palpadores y, además, desaparecen o disminuye su amplitud si se apoya un dedo entre los palpadores. En la Figura 7.8 se observan las indicaciones producidas por ondas de superficie Figura 7.8a. Con el empleo de un medio de acoplamiento adecuado puede lograr su eliminación Figura 7.8b.

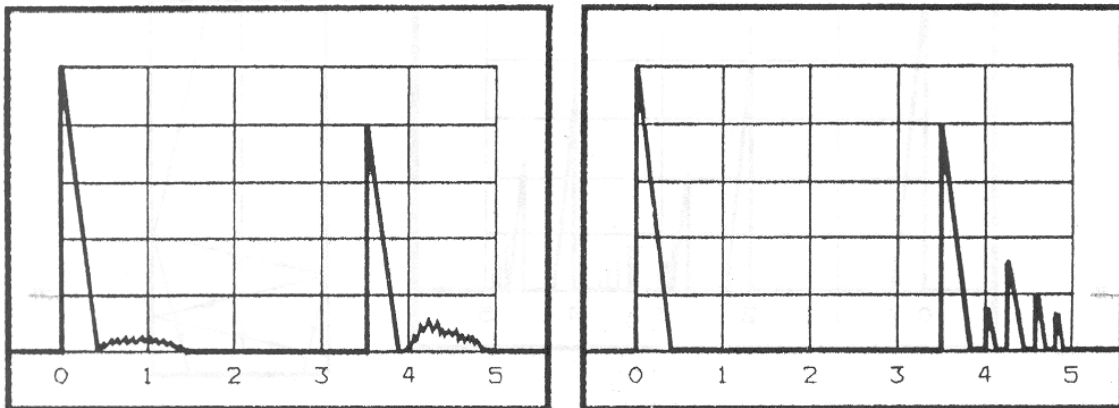


Figura 7.8. Indicaciones producidas por ondas de superficie

Incluso con un sólo palpador, pueden aparecer indicaciones de ecos perturbadores, debido a la reflexión de ondas de superficie en las aristas o bordes de la pieza de ensayo. También se identifican fácilmente, ya que se desplazan hacia la derecha a medida que se aleja el palpador

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

La rugosidad superficial de la pieza puede tener una influencia considerable sobre la apariencia de las señales de respuesta, especialmente cuando la rugosidad regular del mecanizado es del orden de la longitud de onda.

### 7.4.4. Indicaciones Debidas a Reflexiones con Conversión de Ondas.

En el Capítulo 3 - Apartado 3.3.2, vimos como se producen los modos de conversión de ondas ultrasónicas, cuando una onda ultrasónica incide sobre una superficie límite oblicuamente, se produce, tanto la reflexión como la refracción de la onda. En los casos prácticos, la conversión de las ondas puede dar origen a ecos secundarios por reflexión, tal y como se muestra en las Figuras 7.9 y 7.10.

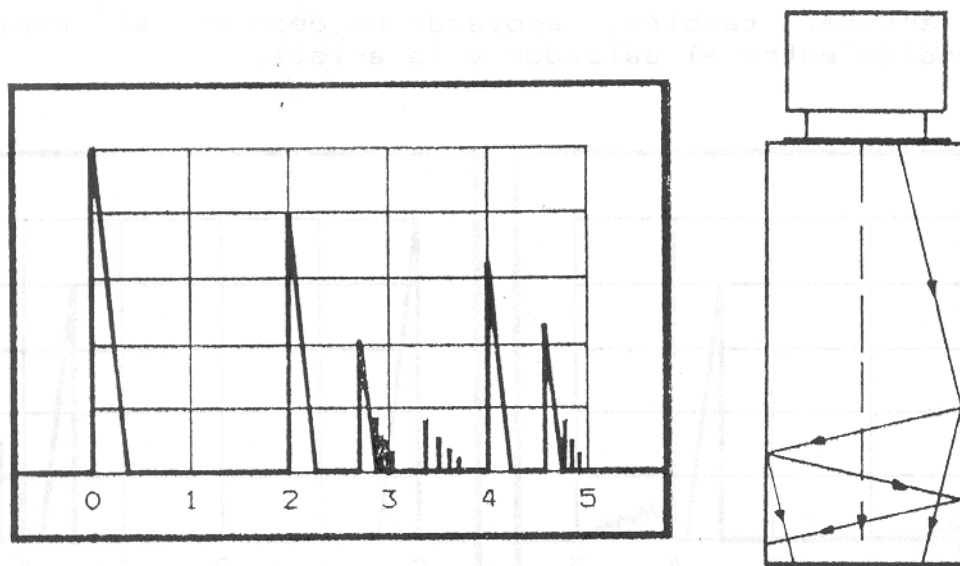


Figura 7.9. Ecos secundarios en el ensayo cilíndrico

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

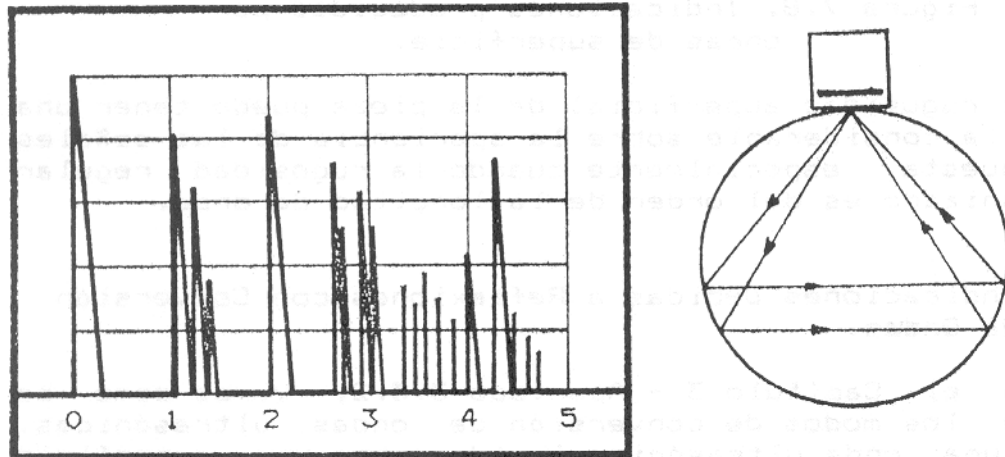


Figura 7.10. Ecos secundarios en el ensayo redondo

Afortunadamente las indicaciones de éste tipo de ecos secundarios aparecen, en éstos ejemplos, detrás de la indicación del primer eco de fondo, con lo que el operador dispone de toda una zona libre de indicaciones ajenas a discontinuidades. Por ésta razón, se suele limitar la zona de ensayo a la comprendida entre el eco de emisión y la indicación del primer eco de fondo.

En ocasiones, éste efecto de conversión de ondas con producción de indicaciones secundarias, se puede aprovechar para el ensayo de determinado tipo de muestras. Así, por ejemplo, un redondo de acero presentara unas señales como las mostradas en la Figura 7.11a, si el material está libre de discontinuidades en el núcleo. Ahora bien, si se presentan ciertas discontinuidades (ver Figura 7.11b), resultará en la desaparición de los ecos secundarios por el impedimento en la transmisión de las ondas transversales.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

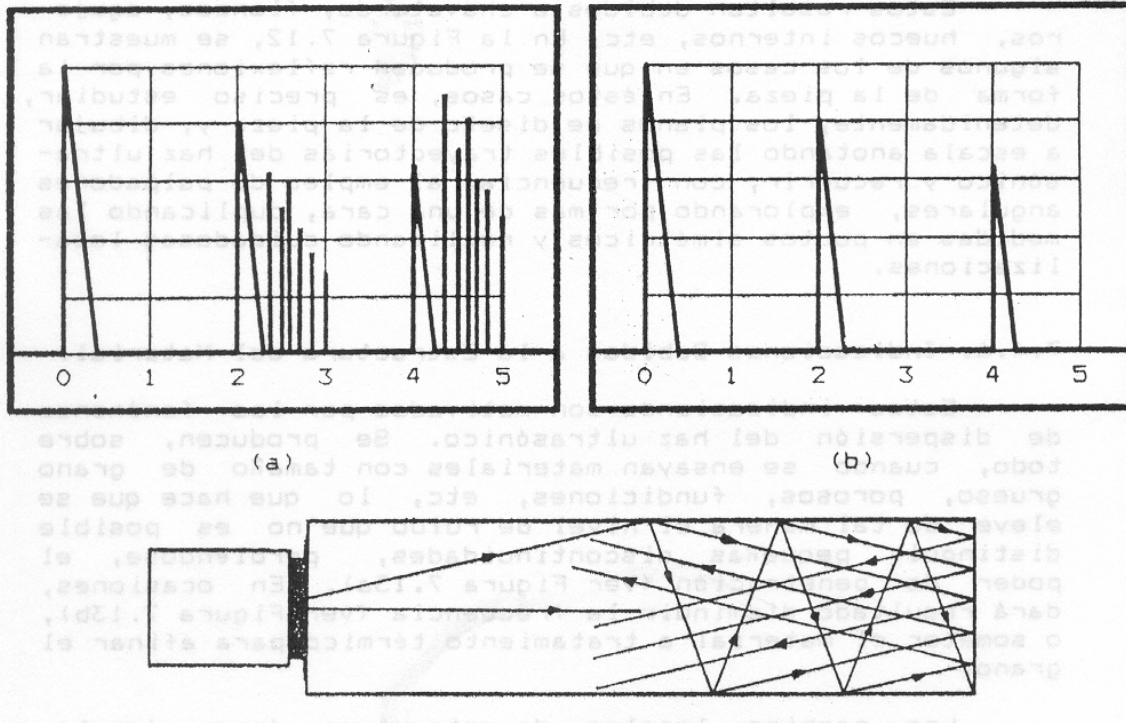


Figura 7.11. Pérdida de los ecos secundarios por la presencia de discontinuidades en el núcleo

### 7.4.5. Indicaciones Debidas a Detalles Constructivos de la Pieza de Ensayo

Estos resultan debidos a chaveteros, flancos, agujeros, huecos internos, etc. En la Figura 7.12, se muestran algunos de los casos en que se producen reflexiones por la forma de la pieza. En éstos casos, es preciso estudiar, detenidamente, los planos de diseño de la pieza y, dibujar a escala anotando las posibles trayectorias del haz ultrasónico y recurrir, con frecuencia, al empleo de palpadores angulares, explorando por mas de una cara, duplicando las medidas en puntos simétricos y realizando cuidadosas localizaciones.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

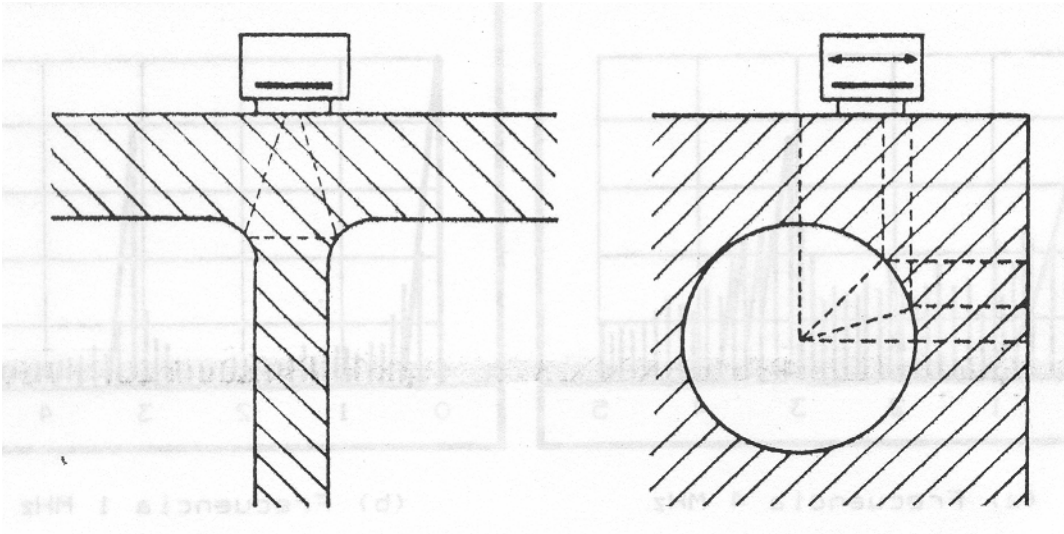


Figura 7.12. Ecos secundarios debidos a detalles constructivos de la pieza de ensayo

### 7.4.6. Indicaciones Debidas a la Estructura del Material.

Estas indicaciones son motivadas por los fenómenos de dispersión del haz ultrasónico. Se producen, sobre todo, cuando se ensayan materiales con tamaño de grano grueso, porosos, fundiciones, etc, lo que hace que se eleve de tal manera el nivel de ruido que no es posible distinguir pequeñas discontinuidades, perdiéndose el poder de penetración (ver Figura 7.13<sup>a</sup>). En ocasiones, dará resultado disminuir la frecuencia (ver Figura 7.13<sup>b</sup>), o someter el material a tratamiento térmico para afinar el grano.

## TIPOLOGÍA DE LAS INDICACIONES ULTRASÓNICAS

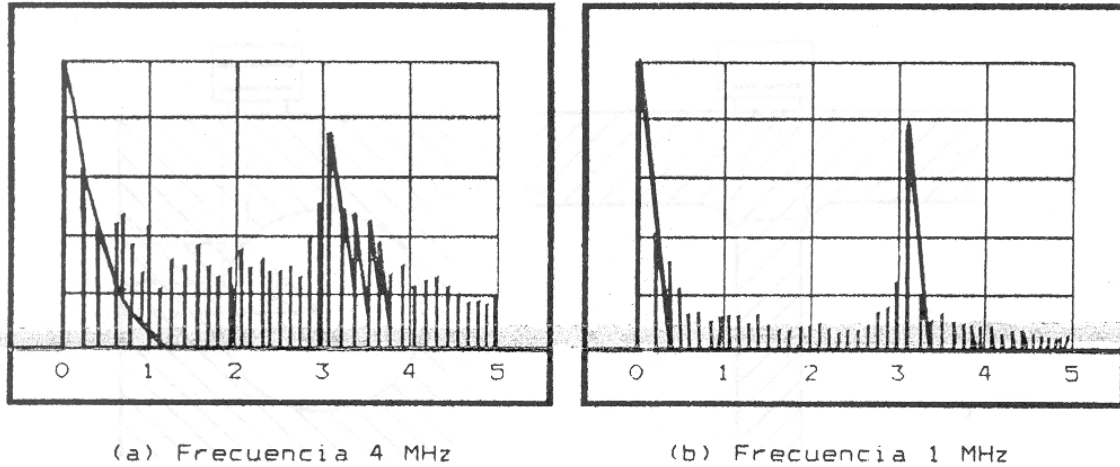


Figura 7.13. Indicaciones debidas a la estructura interna del material bajo ensayo

Los cambios locales de estructura (por ejemplo, zonas de crecimiento de grano en algunas uniones soldadas) pueden dar lugar a indicaciones como resultado de la dispersión del haz ultrasónico. Esto, que podría considerarse como una circunstancia desfavorable, se puede aprovechar para detectar cambios estructurales que impliquen variaciones significativas de sus características mecánicas.

### 7.4.7 Indicaciones Accidentales

La presencia de gotas de aceite o grasa, así como restos de tejidos o suciedad, puede ser causa de la aparición de ecos perturbadores, sobre todo cuando se trabaja con palpadores angulares o de onda superficial.