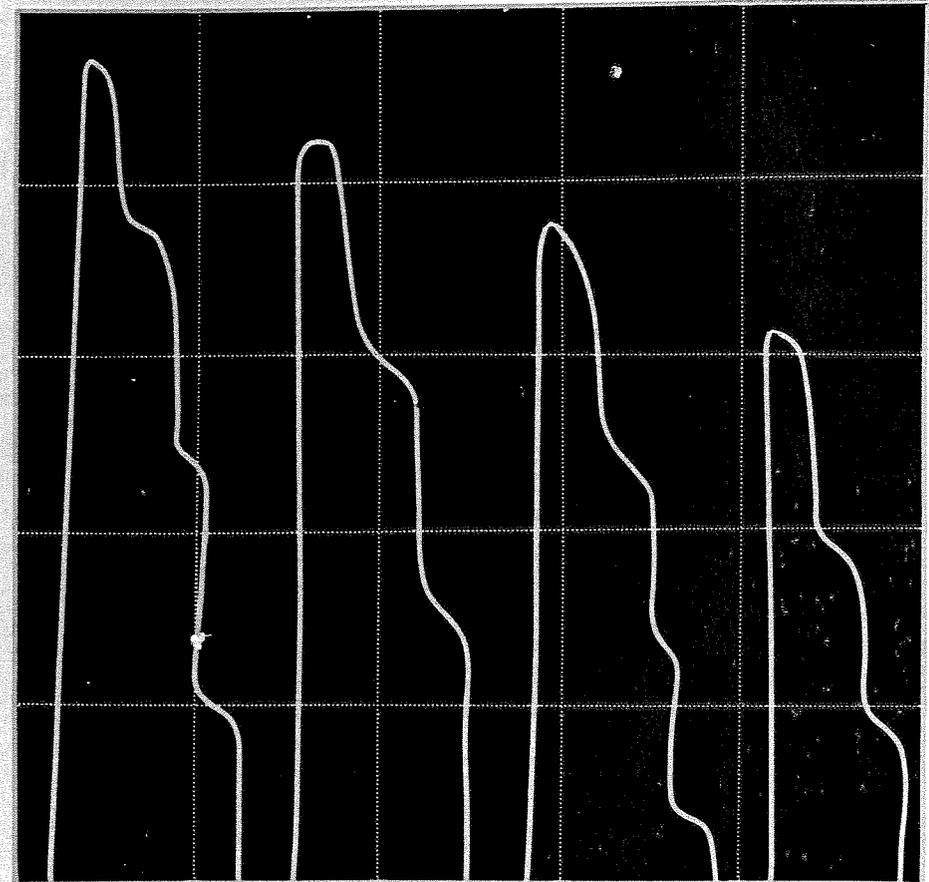


# Ensayos no destructivos por ultrasonidos

Alfonso Fernández Hatre



Ensayos no destructivos por ultrasonidos



PRINCIPADO DE ASTURIAS

Instituto de Fomento Regional

Parque Tecnológico de Asturias • 33420 Llanera (Asturias)  
Tfno. (98) 526 00 68 • FAX (98) 526 44 55



CENTRO PARA  
LA CALIDAD  
EN ASTURIAS

IFR

Instituto de Fomento Regional

# **MANUAL BASICO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

## **1. ULTRASONIDOS**

# INDICE

	PAGINA
<i>PROLOGO</i> .....	7
<i>Capítulo 1.— ONDAS ACUSTICAS</i> .....	8
1.— <i>El sonido</i> .....	8
2.— <i>Las ondas sónicas</i> .....	9
3.— <i>Ultrasonidos</i> .....	11
4.— <i>Alfabeto griego y Trigonometría</i> .....	11
5.— <i>Tipos de ondas</i> .....	12
6.— <i>Ondas longitudinales</i> .....	12
7.— <i>Ondas transversales</i> .....	14
8.— <i>Ondas de superficie</i> .....	14
9.— <i>Características de las ondas</i> .....	14
10.— <i>Parámetros y fórmulas</i> .....	15
<i>Capítulo 2.— PROPAGACION DE LAS ONDAS</i> .....	17
1.— <i>Velocidad acústica</i> .....	17
2.— <i>Algunos valores característicos</i> .....	18
3.— <i>Propagación con incidencia perpendicular</i> .....	18
4.— <i>Incidencia angular</i> .....	20
5.— <i>Reflexión y refracción de ondas longitudinales y transversales</i> ..	22
<i>Capítulo 3.— PRODUCCION Y CAPTACION DE ONDAS ULTRASONICAS</i> .....	25
1.— <i>Ondas ultrasónicas</i> .....	25
2.— <i>Construcción de palpadores</i> .....	26
3.— <i>Excitación por impulsos</i> .....	26
4.— <i>Materiales utilizados para la construcción de palpadores</i> .....	26
5.— <i>Generación de ondas</i> .....	28
6.— <i>Propagación de las ondas</i> .....	28

<i>Capítulo 4.— ENSAYOS POR ULTRASONIDOS .....</i>	<i>30</i>
1.— <i>Procedimiento de ensayos por ultrasonidos .....</i>	<i>30</i>
2.— <i>Método de impulso-eco .....</i>	<i>31</i>
3.— <i>Descripción del equipo para ensayos por el         método del impulso-eco .....</i>	<i>32</i>
4.— <i>Interpretación de las señales en la pantalla del monitor .....</i>	<i>33</i>
5.— <i>Escala de intensidades .....</i>	<i>34</i>
6.— <i>Campo próximo y campo lejano .....</i>	<i>35</i>
7.— <i>Distintos tipos de palpadores .....</i>	<i>37</i>
8.— <i>Palpadores de incidencia normal .....</i>	<i>37</i>
9.— <i>Palpadores bicristal tipo E-R .....</i>	<i>38</i>
10.— <i>Palpadores angulares .....</i>	<i>38</i>
11.— <i>Otros tipos de palpadores .....</i>	<i>39</i>
12.— <i>Elección del palpador .....</i>	<i>39</i>
13.— <i>Acoplantes .....</i>	<i>41</i>
<i>Capítulo 5.— CALIBRACIONES DEL EQUIPO .....</i>	<i>43</i>
1.— <i>Necesidad de calibración .....</i>	<i>43</i>
2.— <i>Bloques patrón .....</i>	<i>43</i>
3.— <i>Comprobación de la relación señal-ruído .....</i>	<i>45</i>
4.— <i>Poder de resolución .....</i>	<i>46</i>
5.— <i>Comprobación de la zona muerta .....</i>	<i>46</i>
6.— <i>Linealidad horizontal .....</i>	<i>46</i>
7.— <i>Linealidad vertical .....</i>	<i>47</i>
8.— <i>Calibración de la base de tiempos .....</i>	<i>47</i>
9.— <i>Determinación del punto de salida del eje en el         haz y del ángulo real .....</i>	<i>49</i>
10.— <i>Isobara de -20 dB .....</i>	<i>50</i>
11.— <i>Calibración de la sensibilidad .....</i>	<i>52</i>
<i>Capítulo 6.— REFERENCIAS PRACTICAS DE ENSAYO .....</i>	<i>53</i>
1.— <i>Procedimiento de ensayo .....</i>	<i>53</i>
2.— <i>Ley de la distancia .....</i>	<i>53</i>
3.— <i>Cálculo del diámetro equivalente de un defecto.         Diagramas AVG o DAT .....</i>	<i>54</i>
4.— <i>Sistema de trabajo con eco simple y eco múltiple .....</i>	<i>57</i>
5.— <i>Inspección de un cordón de soldadura.         Salto y medio salto .....</i>	<i>57</i>
6.— <i>Normas prácticas para el examen de soldaduras .....</i>	<i>58</i>
7.— <i>Normas de aceptación .....</i>	<i>61</i>
8.— <i>Informe del ensayo .....</i>	<i>61</i>
<i>BIBLIOGRAFIA .....</i>	<i>62</i>

## PROLOGO

El objeto de esta publicación es proporcionar a las empresas industriales asturianas un texto claro y resumido sobre la técnica de ensayos por Ultrasonidos, aplicable a la investigación de materiales y detección de defectos internos de los mismos.

Se trata de un pequeño folleto que forma parte de un Manual completo sobre técnicas de Calidad, que el **Centro para la Calidad en Asturias** desea poner a disposición de las empresas de la región, como una publicación de uso interno, complemento a los cursillos de formación que desde hace varios años lleva impartiendo con éxito creciente.

Siendo excesivamente ambicioso el proyecto de publicación del Manual de Técnicas, trata el Centro de ir cubriendo el objetivo de forma paulatina mediante la edición por separado de todos sus capítulos, como si de una entrega por fascículos se tratase. Confiamos en que así podremos tener terminado el Manual en tres o cuatro años.

Contamos para ello con la inapreciable ayuda del Instituto de Fomento Regional que ha patrocinado la presente edición y nos estimula de forma permanente en el cumplimiento de nuestro plan de actividades.

Dado que los Ensayos por Ultrasonidos son una técnica suficientemente desarrollada en nuestro país, queremos agradecer a todos aquéllos que nos han precedido en las publicaciones de textos y apuntes sobre la materia, en los que indudablemente nos hemos inspirado para la redacción de este folleto, y cuya relación figura explícitamente en la bibliografía reseñada.

# CAPITULO 1.— ONDAS ACUSTICAS

## 1.— El sonido

El sonido se transmite mediante ondas vibratorias en el interior de un cuerpo elástico como el aire, el agua, los metales, etc. Las ondas acústicas son compresiones y expansiones alternativas de conjuntos de moléculas.

La velocidad aproximada de transmisión del sonido en el aire es de 330 metros por segundo. Una vez conocida esta velocidad nos resulta fácil calcular a qué distancia se encuentra una tormenta, cronometrando el tiempo que tarda en oírse un trueno después de haber oído el rayo correspondiente.

En efecto, como la luz nos llega de forma casi instantánea, si después de haber visto el rayo pasan 3 segundos hasta que empezamos a oír el trueno, la tormenta estará a una distancia de:

$$330 \text{ m/seg} \cdot 3 \text{ seg} = 990 \text{ m}$$

o sea, aproximadamente a 1 kilómetro de distancia.

Aplicando este mismo método podríamos saber a qué distancia se encuentra una montaña sin más que dar un grito y cronometrar cuanto tiempo tarda en llegarnos el eco. El eco es el sonido reflejado en un obstáculo, de forma que el sonido de nuestro grito hace un recorrido de ida y vuelta. En este caso tendremos que dividir por dos el producto de la velocidad del sonido, por el tiempo y si el eco tarda en llegarnos 4 seg, la montaña se encontrará a:

$$\frac{330 \text{ m/seg} \cdot 4 \text{ seg}}{2} = 660 \text{ m}$$

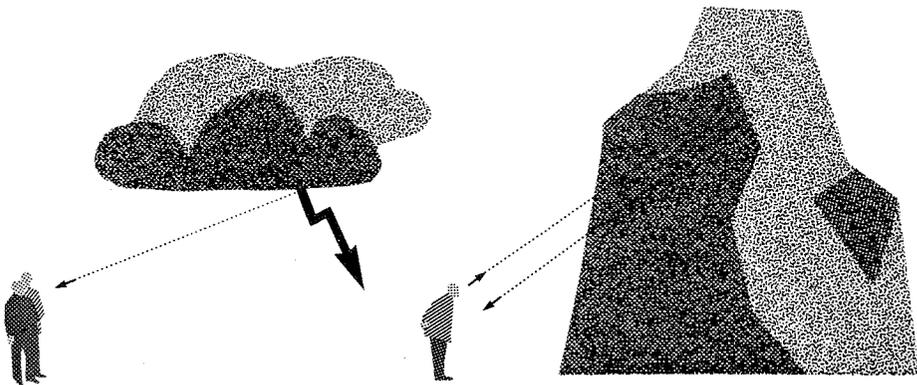


FIG. 1 LA VELOCIDAD DEL SONIDO

Estos sencillos ejemplos servirán para que tengamos una idea clara del método de ensayos no destructivos por ultrasonidos, el cual está basado en la transmisión de ondas a través de un cuerpo elástico y en el tiempo de recepción de los distintos ecos.

## 2.— Las ondas sónicas

El sonido se transmite por medio de ondas a través de un medio elástico, al igual que se transmiten las ondas en el agua de un estanque cuando se arroja una piedra sobre su superficie. Dichas ondas se llaman ondas sónicas y se caracterizan por su frecuencia, que es el número de ondas que pasan en cada segundo por un punto determinado. La variación de esta frecuencia es la que distingue los sonidos graves (baja frecuencia) de los sonidos agudos (elevada frecuencia). La frecuencia se mide en ciclos por segundo, o sea, Herzios.

Las ondas acústicas han sido utilizadas desde hace mucho tiempo para detectar defectos en los materiales. Valga como ejemplo el hecho conocido de que una campana agrietada suena de forma totalmente distinta. Esta técnica fué utilizada para detectar defectos de los materiales mediante el golpeo con un martillo.

No todas las ondas pueden ser apreciadas por el oído humano. Cuando la frecuencia es inferior a 16 Hz (16 ciclos/seg) las ondas son infrasónicas y no son audibles por las personas. Del mismo modo, si la frecuencia de una onda es superior a 20.000 Hz (20 kHz) las ondas son ultrasónicas y producen lo que se llaman ultrasonidos.

En el Cuadro de la Figura 2, se aprecia la zona de existencia de las diversas ondas de naturaleza acústica en función de la frecuencia y de la presión, la cual es asimilable a la intensidad.

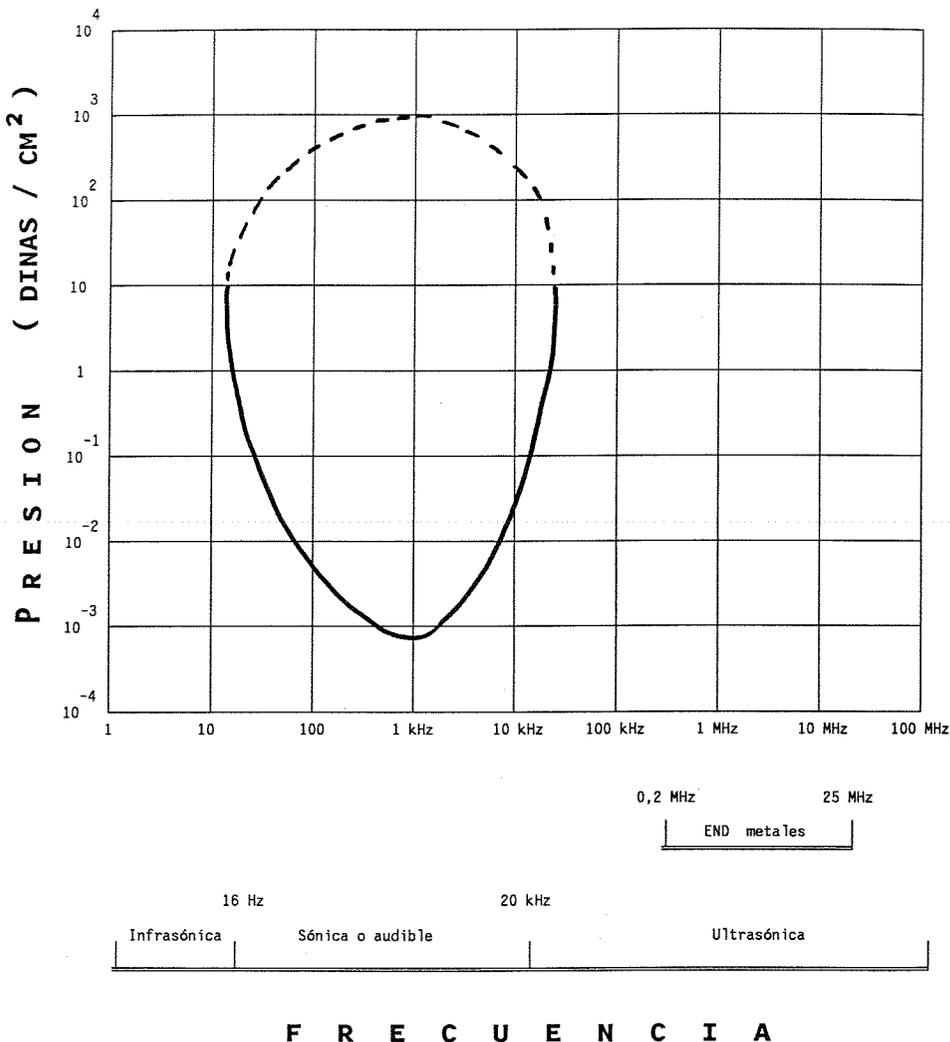


FIG. 2 EL ESPECTRO ACUSTICO

La frecuencia, como dijimos antes, se mide y expresa en Herzios (Hz) siendo sus múltiplos el Kiloherzio (1kHz = 1.000 Hz) y el Megaherzio (1Mhz = 1 millón de Hz). La escala horizontal del Cuadro de la Fig. 2 es logarítmica, que es una forma de representación comprimida, utilizada cuando, como en este caso, el campo a considerar es muy extenso.

### 3.— Ultrasonidos

Así pues, los ultrasonidos son ondas de la misma naturaleza que las ondas sónicas, transmitiéndose por tanto a la misma velocidad en el mismo medio, pero que tienen una frecuencia mayor, por lo que no resultan audibles.

La utilización de los ultrasonidos es muy amplia en la actualidad, ya que tienen aplicación en diversos campos de la técnica, entre los cuales podemos destacar:

- |             |                                      |
|-------------|--------------------------------------|
| submarinos: | sonar                                |
| medicina:   | ecografías                           |
| química:    | limpiezas y producción de emulsiones |

En el campo de los materiales, los ultrasonidos tienen una aplicación creciente en los siguientes aspectos:

- detección de defectos internos o heterogeneidades
- medida de espesores con gran precisión
- identificación de distintos materiales

Las frecuencias utilizadas varían para las distintas aplicaciones, desde 10 - 100 kHz para el control de hormigones, hasta 25 MHz. Las ondas ultrasónicas utilizadas para el control de los materiales metálicos y uniones soldadas se encuentran en la zona de frecuencias comprendida entre 0,2 MHz y 25 MHz.

### 4.— Alfabeto griego y Trigonometría

En matemáticas y geometría se utilizan las letras para designar unas ciertas magnitudes de forma abreviada. Dado lo frecuente de su uso, además de las letras de nuestro alfabeto, se utilizan también las del alfabeto griego, especialmente para designar ángulos. Las letras griegas que utilizaremos en este texto y sus nombres, va a ser las siguientes:

$\alpha$	alfa	$\rho$	ro
$\lambda$	lambda	$\pi$	pi
$\gamma$	gamma	$\omega$	omega
$\mu$	mu		

Aunque al principio a algunos puedan sonarles algo raro, enseguida nos acostumbraremos a estas nuevas letras.

Resulta muy difícil operar con ángulos, el valor de los cuales se expresa en grados, minutos y segundos. Para superar esta dificultad, su valor en los cálculos se sustituye por ciertas magnitudes que les caracterizan y las cuales se denominan "seno", "coseno" y "tangente".

Si tenemos una circunferencia cuyo radio mida 1, los valores del seno, el coseno y la tangente equivalen a la longitud de los segmentos siguientes:

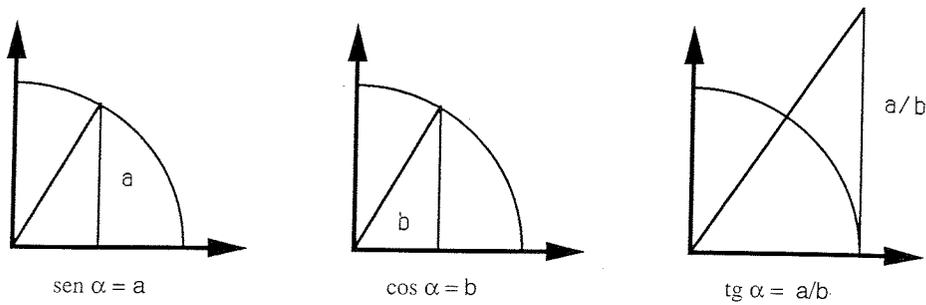


FIG. 2 RAZONES TRIGONOMETRICAS

Como puede comprobarse, desde  $0^\circ$  hasta  $90^\circ$ , el seno y la tangente son mayores cuanto mayor es el ángulo, mientras que el coseno disminuye al aumentar el ángulo.

### 5.— Tipos de ondas

Las ondas ultrasónicas que se propagan a través de un cuerpo elástico pueden ser de las siguientes clases:

Ondas longitudinales.— Producidas por la sucesiva compresión y expansión del medio elástico en el que se propagan.

Ondas transversales.— Producidas por la vibración de las moléculas en sentido transversal a la propagación de la onda.

Ondas de superficie o de Raleigh.— Son ondas transversales que se propagan solamente en la superficie del cuerpo elástico. Un caso particular de las mismas son las ondas de Lamb.

### 6.— Ondas longitudinales

Si aplicamos una vibración en el extremo de un cuerpo elástico, comunicaremos esa misma vibración a las moléculas del cuerpo, la cual se irá alejando de dicho extremo. Todas las moléculas que están situadas a la misma distancia del extremo se moverán al unísono, alejándose y acercándose al mismo. Esta fila de moléculas vibrará hacia adelante y hacia atrás de su posición original, sin embargo la compresión y la expansión de cada fila se irá alejando del extremo.

Se producen por tanto dos movimientos. El de las moléculas que vibran sobre su posición original y el de los sucesivos estados de compresión que se irán alejando del extremo en donde se ha aplicado la vibración.

En la Figura 4 se muestran estos fenómenos. Las líneas verticales indican filas de moléculas situadas a igual distancia del extremo sometido a percusión. Se puede ver que en la situación a) de reposo, se encuentran todas equidistantes entre sí. En la situación b) se ha aplicado una vibración perpendicular al extremo y las líneas verticales transmiten los sucesivos estados de

compresión y expansión. La situación c) representa un momento más, tarde en el cual los estados de compresión han avanzado longitudinalmente sobre el cuerpo elástico sometido a vibración.

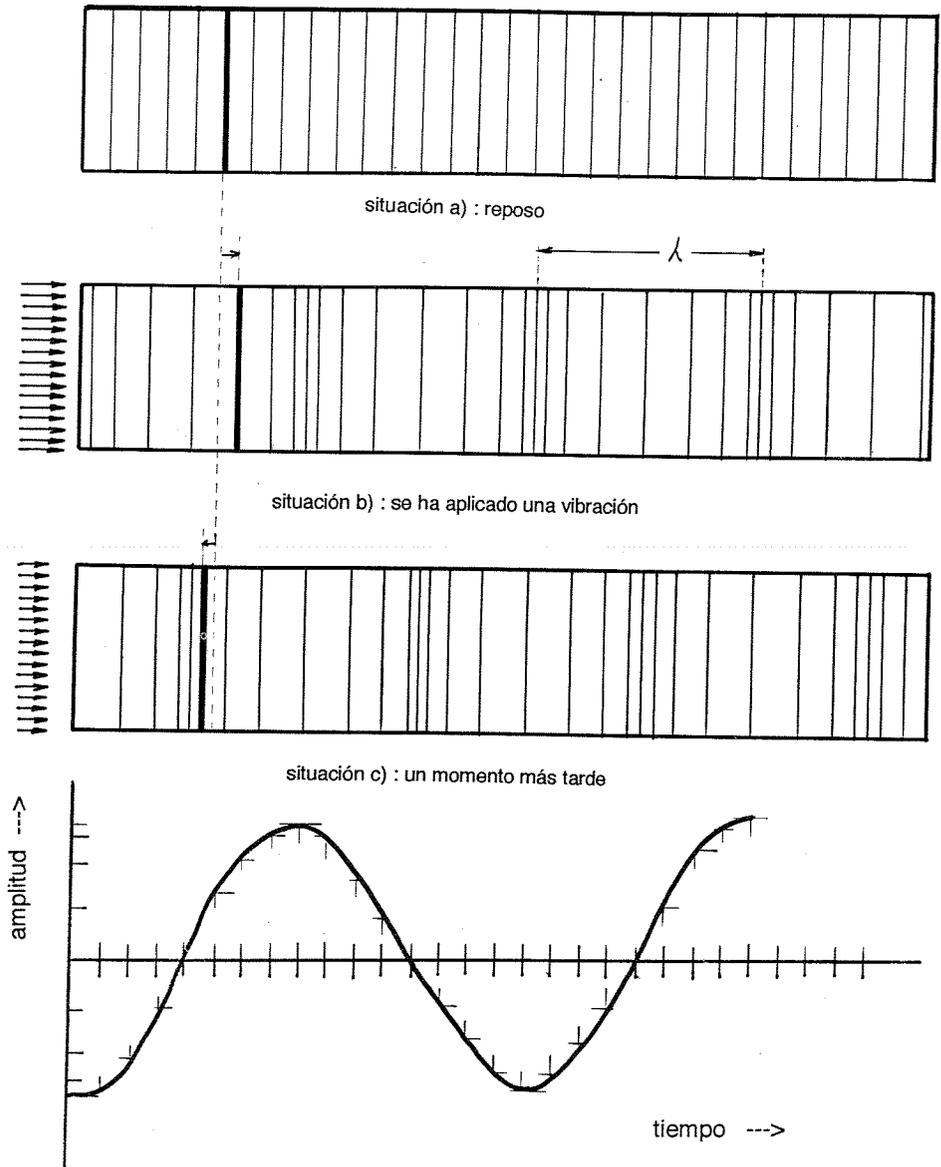


FIG. 4 CARACTER SINUSOIDAL DE LA VIBRACION

A la distancia entre dos estados similares de compresión o de expansión se le llama **longitud de onda** ( $\lambda$ ) y es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda.

Al espacio máximo que recorre cada molécula desde su posición inicial se le llama **amplitud** (A). Si en un sistema de ejes coordenados se van situando los distintos valores de la amplitud en relación con iguales periodos de tiempo, se obtiene una curva llamada sinusoidal, dado que es la misma que representa los valores del seno de un ángulo que aumenta uniformemente en el tiempo.

### 7.— Ondas transversales

En este caso la vibración se produce transversalmente a la cara del extremo del cuerpo elástico y aunque la vibración se transmite longitudinalmente alejándose del extremo sometido a “frotación”, las moléculas vibran transversalmente a la propagación de la onda. Esto ocurre porque cada fila de moléculas “frota” también a la fila de moléculas siguiente y la arrastra en su movimiento, si bien, con un cierto retraso debido a la inercia. Las moléculas no se alejan de la cara sometida a vibración, pero se mueven de forma transversal.

La amplitud de la vibración transversal también es sinusoidal y por lo tanto la oscilación de las moléculas también lo será, de forma que si pudiésemos hacer una fotografía de una línea recta longitudinal dibujada sobre el cuerpo, la veríamos convertida en una senoide.

### 8.— Ondas de superficie

Las ondas de superficie o de Raleigh son ondas transversales que se producen solamente en la superficie del cuerpo elástico. Son paralelas a dicha superficie.

Un caso particular de las mismas son las ondas de Lamb, las cuales son ondas de superficie que se producen a una profundidad de una longitud de onda.

### 9.— Características de las ondas

Las ondas que se transmiten en el interior de un cuerpo elástico, al ser excitado en un extremo por distintos tipos de vibración tienen las siguientes características:

- La oscilación de las ondas transversales y de superficie es sinusoidal.
- El movimiento requiere un cierto tiempo para ser transmitido.
- Las ondas se atenúan con la distancia recorrida.
- La atenuación de las ondas aumenta con la frecuencia.
- La propagación de una onda transporta energía y no masa.
- Las ondas no se transmiten en el vacío.

### 10.— Parámetros y fórmulas

Los parámetros que caracterizan a las ondas acústicas son:

- **frecuencia (f)**: número de oscilaciones por segundo
- **longitud de onda ( $\lambda$ )**: distancia entre dos planos en igual estado
- **amplitud (A)**: desplazamiento máximo de la partícula vibrante
- **velocidad acústica (C)**: velocidad de propagación de la onda. Se considera constante para cada material
- **presión acústica (P)**: indica la densidad de las partículas
- **impedancia acústica (Z)**: resistencia que el material opone a la vibración
- **intensidad acústica (I)**: cantidad de energía por unidad de superficie y de tiempo
- **velocidad máxima de vibración (V)**: máxima velocidad de las partículas vibrantes

Estos parámetros están ligados entre sí por las siguientes fórmulas:

#### Impedancia acústica

$$Z = P / V \quad \text{impedancia acústica} = \text{presión} / \text{velocidad máxima de vibración}$$

$$Z = \rho \cdot C \quad \text{impedancia acústica} = \text{densidad} \cdot \text{velocidad acústica}$$

como impedancias características de los materiales tenemos:

$$\begin{aligned} \text{acero} &= 45 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} & \text{materiales de alta impedancia} &= \text{acústicamente duros} \\ \text{agua} &= 1,5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} & \text{materiales de baja impedancia} &= \text{acústicamente blandos} \end{aligned}$$

#### Frecuencia

$$f \cdot \lambda = C \quad \text{frecuencia} \cdot \text{longitud de onda} = \text{velocidad acústica}$$

#### Presión acústica

$$P = Z \cdot V = Z \cdot \omega \cdot A = \rho \cdot C \cdot \omega \cdot A$$

$$\text{presión acústica} = \text{densidad} \cdot \text{velocidad} \cdot \text{frecuencia angular} \cdot \text{amplitud}$$

## Energía

$$E = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 = 1/2 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 = 1/2 \cdot P^2 / \rho \cdot C^2$$

$$E = 1/2 \cdot P^2 / Z \cdot C \quad \text{relación entre energía, amplitud y presión}$$

## Intensidad

$$I = 1/2 \cdot \rho \cdot C \cdot V^2 = 1/2 \cdot Z \cdot V^2 = 1/2 Z \cdot \omega^2 \cdot A^2$$

$$I = 1/2 P^2 / Z \quad \text{de donde se deriva que la indicación de un eco en la pantalla de un equipo de impulso-eco es proporcional a la presión acústica}$$

## Amplitud máxima de oscilación

$$\frac{A}{\lambda} = \sqrt{\frac{I}{2 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot C^3}}$$

Ejemplo para el aire:  $\rho = 1,3 \text{ kg / m}^3$

velocidad acústica = 330 m/s

$A = 10 \%$  de  $\lambda$  para las mayores intensidades

en el agua:  $A = 0,04 \%$  de  $\lambda$

para los materiales de ensayos no destructivos:

$A = 2$  millonésimas de  $\lambda$  para intensidades altas

## CAPITULO 2.—PROPAGACION DE LAS ONDAS

### 1.— Velocidad acústica

Podemos considerar que, en condiciones determinadas, las ondas se transmiten a una velocidad que es constante para cada medio. Esta velocidad se puede calcular para cada tipo de onda y se expresa en función de parámetros tales como el módulo de elasticidad del material, la densidad y la relación de Poisson.

La velocidad de transmisión de las ondas longitudinales, para un material determinado, será:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - \mu)}}$$

siendo:  $E$  = módulo de elasticidad  
 $\rho$  = densidad  
 $\mu$  = relación de Poisson

la velocidad de transmisión de las ondas transversales tiene la siguiente expresión:

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

como el valor de  $\mu$  oscila entre 0 y 0,5 el término bajo la raíz será inferior a 1 y por lo tanto:  $C_T < C_L$  o sea, la velocidad de propagación de las ondas transversales es inferior a la de las longitudinales

de igual modo se expresa la velocidad de las ondas de superficie:

$$C_S = \frac{0,87 + 1,12 \mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)}} = C_T \frac{0,87 + 1,12 \mu}{1 + \mu}$$

## 2.— Algunos valores característicos

Para el acero:

$$\mu = 0,28 \quad C_T = 0,55 \cdot C_L \quad C_S = 0,92 \cdot C_T$$

Acero de baja aleación:  $\rho = 7,85 \text{ kg/dm}^3$

$$C_L = 5.820 \text{ m/s} \quad C_T = 3.190 \text{ m/s} \quad Z = 45,7 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Acero inoxidable austenítico 18-8:  $\rho = 8,03 \text{ kg/dm}^3$

$$C_L = 5.660 \text{ m/s} \quad C_T = 3.120 \text{ m/s} \quad Z = 45,5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Resina Epoxy:  $\rho = 1,15 \text{ kg/dm}^3$

$$C_L = 2.500 \text{ m/s} \quad C_T = 1.100 \text{ m/s} \quad Z = 2,8 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

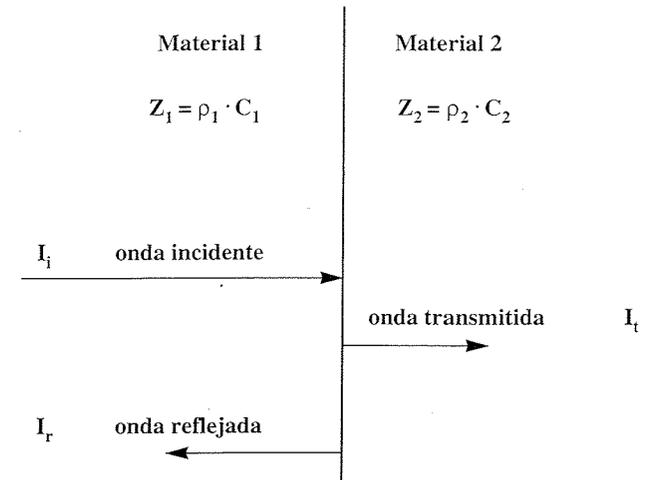
## 3.— Propagación con incidencia perpendicular

Veamos ahora que ocurre cuando las ondas ultrasónicas pasan de un medio a otro diferente. Se pueden diferenciar dos casos: que la incidencia sea perpendicular o que sea oblicua.

En el caso de incidencia perpendicular, ocurre que parte de la onda se refleja y vuelve al medio de procedencia, pero otra parte de la onda se transmite y se propaga a través del otro medio.

De acuerdo con el principio de conservación de la energía, la suma de la intensidad de la onda transmitida más la de la onda reflejada es igual a la intensidad de la onda incidente, o sea:

$$I_i = I_r + I_t$$



$$R = \frac{I_r}{I_i} = \text{coeficiente de reflexión}$$

$$R + T = 1$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \text{coeficiente de transmisión}$$

para la presión acústica no es de aplicación la ley de conservación de la energía. Los coeficientes de reflexión y transmisión son:

$$R' = \frac{P_r}{P_i} \quad T' = \frac{P_t}{P_i}$$

según las leyes de la acústica:

$$R' = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad T' = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

para el caso concreto de que los medios sean el acero y el aire:

$$\text{acero: } Z_1 = 45 \cdot 10^6 \quad \text{aire: } Z_2 = 0,0004 \cdot 10^6$$

$$R = R' = 1 \quad T = T' = 0 \text{ toda la onda se refleja}$$

o sea, que cuando se transmite una onda en el interior de una pieza de acero y llega perpendicular a un extremo formado por una cara plana, en contacto con el aire, toda la onda rebota como si se tratase de un eco.

#### 4.— Incidencia angular

Cuando un frente de ondas incide de forma oblicua sobre la superficie de separación entre dos medios con distinta velocidad de propagación del sonido en ellos, ocurren dos fenómenos distintos:

a) Reflexión.— El frente de ondas se refleja en la superficie de separación como si se tratase de un espejo, de manera que el ángulo de reflexión, que es el que forman las ondas reflejadas con la perpendicular a la superficie, es igual al ángulo de incidencia.

$$\alpha_r = \alpha_i$$

b) Refracción.— El frente de ondas atraviesa la superficie de separación y penetra en el segundo medio desviado de su dirección primitiva, de modo que el ángulo de refracción, que es el que forman las ondas transmitidas con la perpendicular a la superficie, no es igual al ángulo de incidencia, pero existe entre ambos la siguiente relación:

$$\frac{\text{sen } \alpha_t}{\text{sen } \alpha_i} = \frac{C_2}{C_1}$$

siendo  $C_1$  y  $C_2$  las velocidades de propagación del sonido en los distintos medios.

A esta relación se la llama **Ley de Snell**.

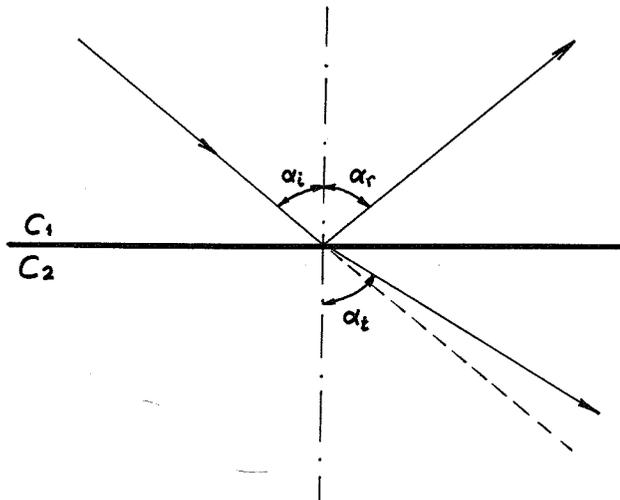


FIG. 5 INCIDENCIA ANGULAR

Para que se produzca el fenómeno de refracción, el ángulo de incidencia debe ser inferior a un valor determinado dado que, si la velocidad de propagación del sonido en el segundo medio es superior a la del primero, al inclinarse más el frente de ondas incidente, el ángulo de refracción llegará a los 90°, o sea, el frente de ondas se refractará en la superficie de separación del medio. Se dice entonces que el ángulo de incidencia está en el límite (ángulo límite).

Si se inclina aún más el ángulo de incidencia, superando el ángulo límite, el frente de ondas longitudinales transmitido sale fuera de la superficie del segundo medio, lo que quiere decir que desaparece, con lo que en este caso quedarán solamente las ondas reflejadas y no se producirá la refracción de las ondas longitudinales.

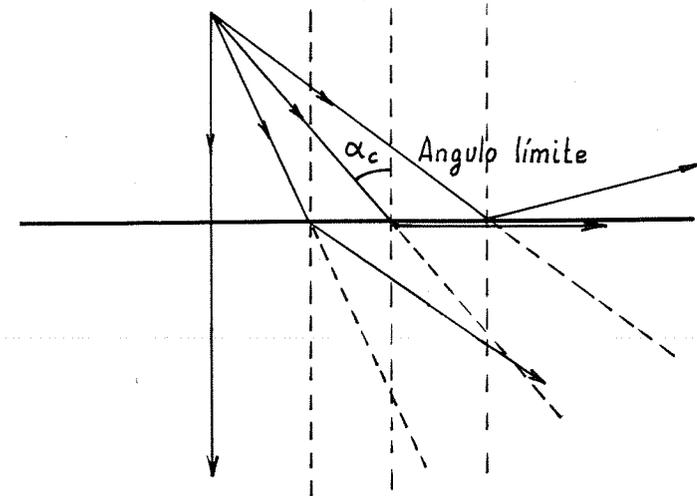


FIG. 6 ANGULO LIMITE

Teniendo en cuenta que las velocidades de propagación del sonido en el agua y en el acero, para ondas longitudinales son 1.500 m/s y 5.820 m/s, la ley de Snell nos dará:

$$\text{sen } \alpha_i = \frac{\text{sen } \alpha_t \cdot C_1}{C_2} = \text{sen } \alpha_t \cdot 0,26$$

el ángulo de incidencia límite se producirá cuando  $\alpha_t = 90^\circ$  o sea, cuando  $\text{sen } \alpha_t = 1$

Entonces:

$$\text{sen } \alpha_i = 1 \cdot 0,26 = 0,26 \quad \alpha_i = 14,9^\circ$$

lo que significa que para una inclinación del frente de onda con respecto a la perpendicular a la superficie de una pieza de acero, superior a 14,9° las ondas longitudinales transmitidas desaparecerán. En el caso práctico de un palpador angular cuya superficie de contacto con el acero sea de plástico ( $C = 2.700$  m/s), el ángulo límite será de 27,6°.

## 5.— Reflexión y refracción de ondas longitudinales y transversales

Estos fenómenos se complican algo más si tenemos en cuenta que al reflejarse o transmitirse las ondas, se desdoblan y una onda longitudinal da lugar a una longitudinal y a otra transversal, tanto en la reflexión como en la refracción.

Igual ocurre en la reflexión y refracción de ondas transversales, que darán lugar a ondas longitudinales y transversales, tanto reflejadas como transmitidas.

Estos fenómenos se explican en las Figuras 7 y 8 y serán aprovechados ampliamente en la práctica de ultrasonidos.

Teniendo en cuenta que la velocidad de propagación de las ondas transversales es menor que la de las ondas longitudinales, los ángulos de reflexión o refracción de las ondas transversales serán menores que los de sus respectivos de las ondas longitudinales.

Las distintas relaciones entre los ángulos incidente, reflejado y transmitido se deducen de la aplicación de la ley de Snell.

### Onda incidente longitudinal

En algunos ensayos por ultrasonidos se hace desaparecer la onda longitudinal transmitida, utilizando un ángulo de incidencia superior al ángulo límite. con ello se consigue que la onda incidente longitudinal se transforme en una onda transversal, la cual resulta más conveniente para cierto tipo de ensayos.

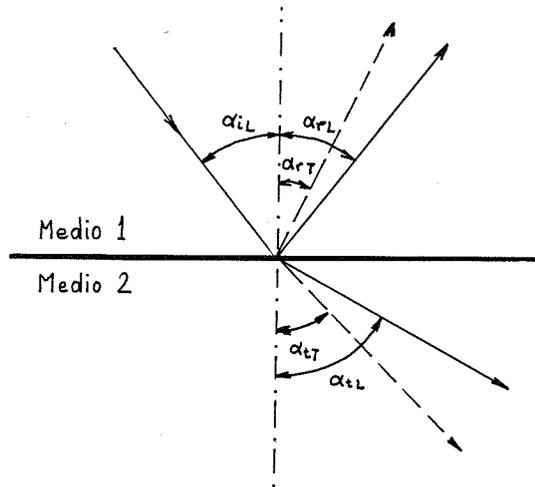


FIG. 7 ONDA INCIDENTE LONGITUDINAL

### Onda incidente transversal

Si la onda transversal transmitida alcanza el caso límite:  $\alpha_{tT} = 90^\circ$ , la onda transversal se transmite en forma de ondas de superficie.

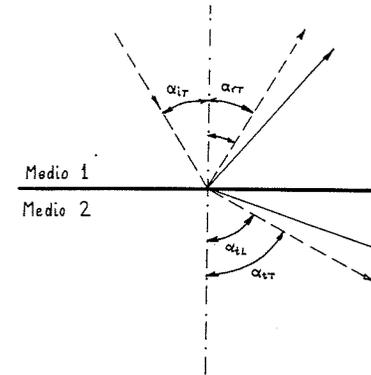


FIG. 8 ONDA INCIDENTE TRANSVERSAL

## CAPITULO 3.- PRODUCCION Y CAPTACION DE ONDAS ULTRASONICAS

### 1.- Ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas se pueden generar mediante la utilización de dos efectos:

- efecto piezoeléctrico
- efecto magnetostrictivo

Efecto piezoeléctrico.— Existen materiales que al deformarse mediante la aplicación de una fuerza exterior producen cargas eléctricas en su superficie. Inversamente, si ese material se coloca entre dos electrodos, cambia su forma al aplicar a los mismos una diferencia de potencial eléctrico.

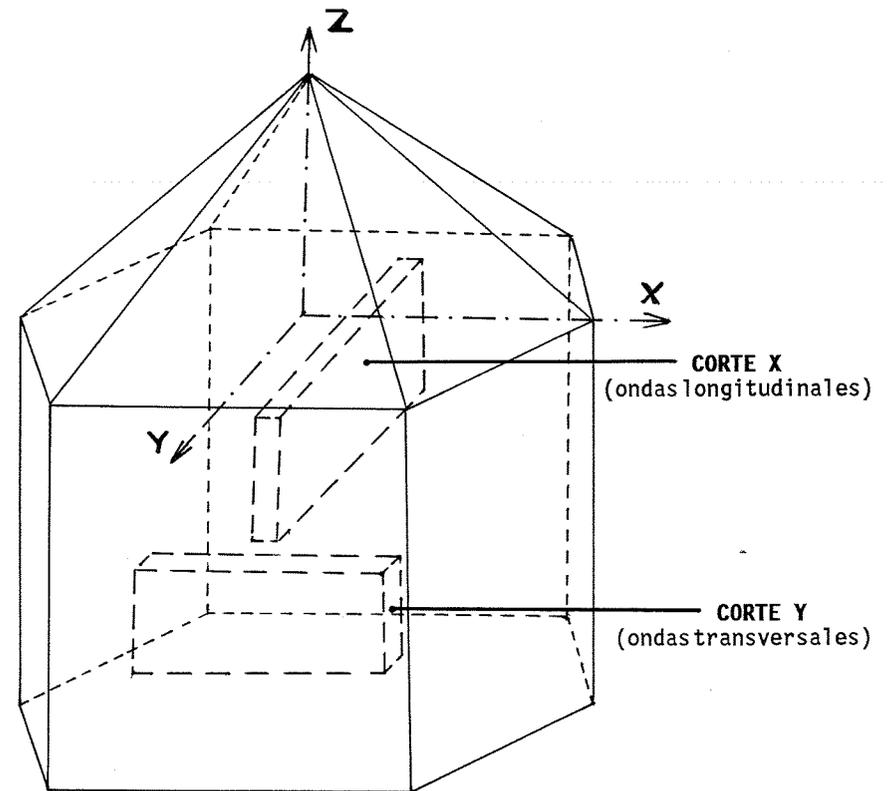


FIG. 9 OBTENCION DE CRISTALES DE CUARZO DE CORTE X Y DE CORTE Y

Efecto magnetostrictivo.— Existen otros materiales como el níquel y sus aleaciones, que generan campos eléctricos al deformarse por una presión externa. Estos campos pueden transformarse en corrientes eléctricas.

Para la producción más habitual de ondas ultrasónicas se utiliza el fenómeno de la piezoelectricidad, construyendo palpadores con materiales piezoeléctricos que se encuentran íntimamente ligados a electrodos mediante los cuales reciben descargas de corriente alterna que les deforman alternativamente también, produciendo vibraciones ultrasónicas.

El cuarzo es una material piezoeléctrico que cristaliza en forma de prismas y pirámides hexagonales. En la Figura 9 se aprecia la obtención de cristales piezoeléctricos de cuarzo que serán aptos para la producción de ondas longitudinales si sus caras mayores están talladas en la dirección de los ejes perpendiculares a las caras del prisma y para la producción de ondas transversales si sus caras mayores están talladas en la dirección de los ejes que pasan por las aristas entre las caras del prisma,

## 2.— Construcción de palpadores

Se llama palpador a la pequeña pieza que sirve para la aplicación de ultrasonidos al material a investigar. Está compuesto de una lámina de cristal piezoeléctrico en cuyas caras anterior y posterior lleva una fina película de plata formando los electrodos. El cristal forma como el dieléctrico de un condensador y las placas van unidas a un cable conductor de la corriente eléctrica. El conjunto se rodea con un plástico amortiguador y todo ello se incluye en una carcasa metálica.

Cuando se aplica a los electrodos un voltaje alterno y sinusoidal, el cristal vibra, generando pulsaciones ultrasónicas que podrán ser transmitidas a un material a investigar que se encuentre en estrecho contacto con el palpador. De igual forma, cuando los electrodos están desactivados y el cristal en reposo, puede recibir las ondas transmitidas a través del material, generando una corriente eléctrica que será captada por los electrodos y conducida a un instrumento medidor de corriente.

De esta forma, el palpador puede servir como excitador de ondas ultrasónicas o como receptor de las mismas.

## 3.— Excitación por impulsos

Si la corriente alterna aplicada a los electrodos es constante, la producción de ondas ultrasónicas en el palpador también lo será y el cristal servirá solamente como excitador. Para conseguir que el palpador sirva a la vez como excitador y como receptor se utilizan excitaciones por impulsos de corta duración. Concretamente la corriente se aplica durante un tiempo muy corto ( $3 \cdot 10^{-6}$  seg), con un intervalo de silencio de  $10^{-2}$  seg durante el cual el cristal, una vez amortiguada su inercia de vibración, puede captar las ondas ultrasónicas que le lleguen del material a investigar. Este es el sistema utilizado de forma más habitual en los equipos de ultrasonidos.

## 4.— Materiales utilizados para la construcción de palpadores

Existen varios materiales piezoeléctricos que pueden ser utilizados para la construcción de palpadores. Cada uno de ellos tiene distintas características y en cada caso se escogerá aquel que mejor se adapte a las condiciones del ensayo. Los más utilizados, junto con sus ventajas e inconvenientes son:

**Cuarzo.**— Estabilidad, homogeneidad, dureza y resistencia al desgaste elevadas. resiste bien la temperatura pero es un mal emisor. Muy utilizado para la producción de frecuencias altas.

**Sulfato de litio.**— Tiene baja impedancia acústica lo que le proporciona una buena amortiguación y capacidad de acoplamiento. Es el mejor receptor pero tiene baja resistencia a las temperaturas.

**Titanato de bario.**— Es el mejor emisor, pero tiene una impedancia acústica elevada. Restringido a frecuencias inferiores a 15 MHz.

**Metaniobato de plomo.**— Es un buen emisor y resiste bien la temperatura. Es el mejor material para generar impulsos cortos lo que le da un excelente poder de resolución.

A continuación se expone una tabla de características de los materiales piezoeléctricos más habituales.

	Cuarzo	Sulfato de litio	Titanato de bario	Metaniobato de plomo
Temperatura crítica	576° C	75° C	115 - 150° C	550° C
Módulo piezoeléctrico, d	2,3	15	190	80
Constante presión, g	57	165	11	37
Coefficiente amortiguación interna	1	1,2	1	1,3
Impedancia acústica o longitud $Z 10^6 \text{ Km}^2 \text{ sg}$	15,3	11,2	35	16
Frecuencia característica para 1 mm de espesor	2,88	2,36	2,2	1,4

FIG. 10 CARACTERISTICAS DE LOS CRISTALES

Módulo piezoeléctrico.— Deformación por unidad de voltaje

Constante de presión piezoeléctrica.— Cambio de voltaje por unidad de deformación. Inversa del módulo.

Coefficiente de amortiguación interna.— Capacidad para amortiguar la oscilación del propio material.

## 5.— Generación de ondas

Teniendo en cuenta los distintos tipos de ondas descritos anteriormente, a continuación se indican las formas de generar cada uno de ellos. Todos se consiguen mediante la producción de ondas longitudinales en los elementos piezoeléctricos del palpador. Estas ondas al ser transmitidas a través de la superficie del material a investigar y de acuerdo con el valor del ángulo de incidencia, dan lugar a ondas de diversas clases.

Las ondas longitudinales se generan mediante osciladores piezoeléctricos vibrando en la dirección perpendicular a la cara plana que forma la superficie del cristal. Se utilizan solamente en los palpadores de incidencia normal.

Las ondas transversales se generan mediante la producción de ondas longitudinales aplicadas en la superficie del material a ensayar con un ángulo determinado. Como vimos anteriormente, si se supera el ángulo límite de incidencia, las ondas longitudinales transmitidas desaparecen y quedan solamente las ondas transversales.

Las ondas de superficie y las ondas de Lamb se generan haciendo incidir una onda longitudinal sobre la muestra con un ángulo igual al ángulo límite, de forma que las ondas transversales producidas recorran solamente la superficie de la muestra.

Los mismos procedimientos son válidos para la recepción de todos estos tipos de ondas.

## 6.— Propagación de las ondas

Las ondas longitudinales o transversales transmitidas a través de un material sometido a ensayo, se propagan en línea recta, sufren una fuerte atenuación con la distancia recorrida y se reflejan y transmiten al llegar al extremo del material.

La atenuación de las ondas ultrasónicas es debida a dos fenómenos que llamaremos Dispersión y Absorción.

Dispersión.— Las ondas transmitidas pierden intensidad por dispersión debido a que los materiales no son completamente homogéneos en su interior, dado que tienen pequeños poros, inclusiones de impurezas, modificaciones en sus estructuras cristalinas y diferentes direcciones principales de sus cristales.

Absorción.— Las ondas ultrasónicas transmitidas en el interior de un material, se convierten poco a poco en energía calorífica, con lo cual la intensidad va disminuyendo con la distancia.

La atenuación aumenta con la frecuencia, por lo que si queremos disminuirla, debemos reducir la frecuencia de emisión.

Cuando un frente de ondas llega al extremo de un material o a una fuerte heterogeneidad del mismo, se encuentra con una superficie de separación entre dos medios. Si la superficie es muy irregular, las ondas se perderán en múltiples reflexiones y transmisiones, pero si la superficie es plana, serán de aplicación las leyes estudiadas con anterioridad.

Dada la reducida impedancia acústica del aire con relación al acero, vimos anteriormente que una onda que se transmite en el interior de una pieza de acero y llega a una cara que está en contacto con el aire, se refleja casi totalmente como si se tratase de un eco. Esto ocurre para todos los materiales metálicos.

Por el contrario, para una onda que se transmite en el agua e incide sobre la superficie de un material metálico, la aplicación de las leyes nos da un excelente coeficiente de transmisión para la presión acústica, lo que permitirá la utilización de ensayos ultrasónicos de inmersión.

## CAPITULO 4.— ENSAYOS POR ULTRASONIDOS

### 1.— Procedimiento de ensayos por ultrasonidos

Los ensayos no destructivos realizados a base de ultrasonidos utilizan principalmente los siguientes procedimientos:

- método de resonancia
- método de transparencia o de sombra
- método de impulso-eco

**Método de resonancia.**— Se utiliza para la medición muy precisa de espesores de chapas de superficies paralelas y requiere un equipo determinado con excitación continua.

Cuando se propaga una onda en un medio metálico y llega a una cara plana exterior después de haber recorrido una semilongitud de onda o un número entero de semilongitudes, como en los casos de la figura, la onda reflejada se refuerza por superponerse en fase, produciéndose la resonancia.

El ensayo consiste en variar la frecuencia de excitación de un cristal aplicado a una cara plana de una chapa hasta que se detecte la resonancia. Podremos asegurar entonces que el espesor de la chapa que queremos medir es un múltiplo de la semilongitud de onda aplicada, la cual es función de la frecuencia de orden n que ha producido la resonancia.

Como en el momento de presentarse la resonancia no sabemos el número entero de semilongitudes de onda que la han producido, aumentaremos la frecuencia hasta que se vuelva a producir la resonancia nuevamente. La diferencia de frecuencias que hemos tenido que aumentar nos señala la frecuencia fundamental de resonancia y como la semilongitud de onda es igual a la mitad del cociente entre la velocidad del sonido en el material y la frecuencia fundamental, podremos calcular dicha semilongitud de onda que es la medida del espesor de la chapa.

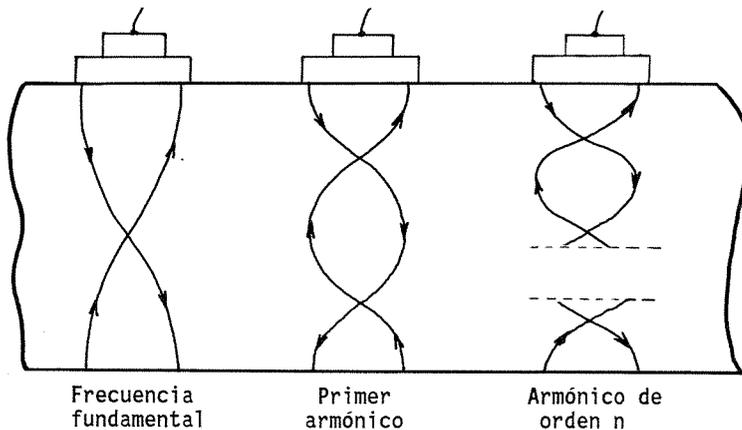


FIG. 11 METODO DE RESONANCIA

$$e = \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C}{f_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C}{f_{n+1} - f_n}$$

**Método de transparencia o de sombra.**— En este método el oscilador emisor genera un haz de ondas ultrasónicas que es recibido por otro oscilador receptor.

Cuando el haz de ondas ultrasónicas es interceptado por un obstáculo, disminuye la intensidad acústica del haz ultrasónico captada por el receptor y de la apreciación de dicha reducción de señal se puede deducir la magnitud del obstáculo interceptado.

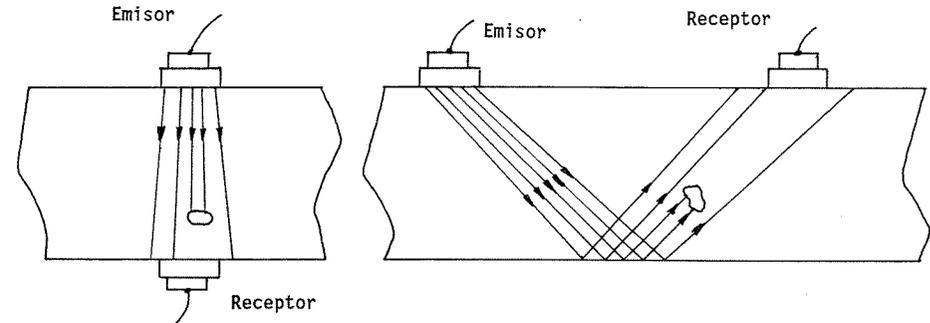


FIG. 12 METODO DE TRANSPARENCIA O DE SOMBRA

El sistema debe calibrarse en una zona exenta de defectos y los palpadores, con excitación continua, pueden ser de incidencia normal, situados uno a cada lado de la pieza o de incidencia angular cuando las condiciones de accesibilidad de la pieza hacen necesario el ensayo por reflexión.

### 2.— Método de impulso-eco

Cuando un haz de ultrasonidos que se transmite por el interior de un objeto sólido encuentra una superficie exterior de fondo, se refleja casi en su totalidad. Igualmente se reflejará cuando encuentra un obstáculo reflector. En ambos casos, el eco producido por el haz ultrasónico reflejado será captado por el oscilador receptor.

La interferencia de las ondas emitidas con las reflejadas impide la utilización de ondas continuas, por lo que se utiliza la excitación por impulsos. De esta forma resulta posible el uso de palpadores que sean a la vez emisores y receptores de la señal ultrasónica con lo cual se facilita sobremanera la operación, aunque lógicamente estará sometida a unas reglas operativas determinadas.

Midiendo solamente el tiempo de recorrido del haz y de su eco, podemos determinar la distancia a la que se encuentra un determinado reflector. De esta forma se pueden determinar espesores de tuberías y recipientes con equipos de bolsillo, los cuales permiten apreciar espesores entre 2 y 300 mm.

Por otra parte, se puede medir también la intensidad acústica del eco producida por un defecto o por el fondo de la pieza, ya que la señal eléctrica generada podrá representarse en una pantalla de rayos catódicos en donde la altura de la señal será proporcional a la presión acústica del eco.

El método del impulso-eco con medida de intensidad y de tiempo es el más extendido en el campo de la detección de defectos, tanto en piezas o conjuntos como en uniones soldadas.

### 3.— Descripción del equipo para ensayos por el método del impulso-eco

El equipo consta de un aparato compacto en cuyo frente se sitúan la pantalla del monitor, los mandos de alimentación y de ajuste y las tomas para conexiones de alimentación y palpadores.

Los elementos fundamentales del equipo son:

- sistema de sincronismo
- generador de impulsos de alta frecuencia
- amplificador
- tubo de rayos catódicos

El haz ultrasónico generado en el palpador emisor se transmite por el interior del material a investigar, se refleja en el defecto o en la pared del fondo y vuelve al palpador receptor haciéndole vibrar y generando una pequeña corriente que se transmite a los electrodos y es conducida por el cable del palpador hasta el amplificador. La señal amplificada se aplica a las placas de deflexión del tubo de rayos catódicos, dando lugar a la primera indicación o eco de fondo.

Todo este proceso se desarrolla en 1/50 de segundo dado que, como dijimos antes, el impulso dura 3 millonésimas de segundo, siendo el resto intervalo de silencio. En el siguiente 1/50 de segundo se vuelve a repetir el mismo proceso, por lo que en la pantalla del monitor, que tiene cierta inercia luminosa, se superponen las imágenes y aparece una señal fija de los ecos detectados.

El sistema de sincronismo produce la señal de sincronización para la emisión de los sucesivos impulsos eléctricos de alta energía por parte del generador de alta frecuencia, controla la luminosidad de la señal en la pantalla y la apaga en el recorrido de vuelta para evitar que se sobrepongan las imágenes.

El sistema de sincronismo contiene también un generador de barrido que produce un voltaje, el cual actúa sobre las placas del campo desviador horizontal del tubo de rayos catódicos, haciendo que la señal luminosa de la pantalla recorra ésta de izquierda a derecha en forma de pincel electrónico, dibujando en la parte inferior una línea horizontal llamada base de tiempos. Sobre esta línea se situarán las señales de los ecos.

Como mandos más importantes del equipo aparecen:

El regulador de la velocidad de barrido, mediante el cual podemos variar la escala de la base de tiempos, consiguiendo tener en la pantalla más o menos ecos repetidos.

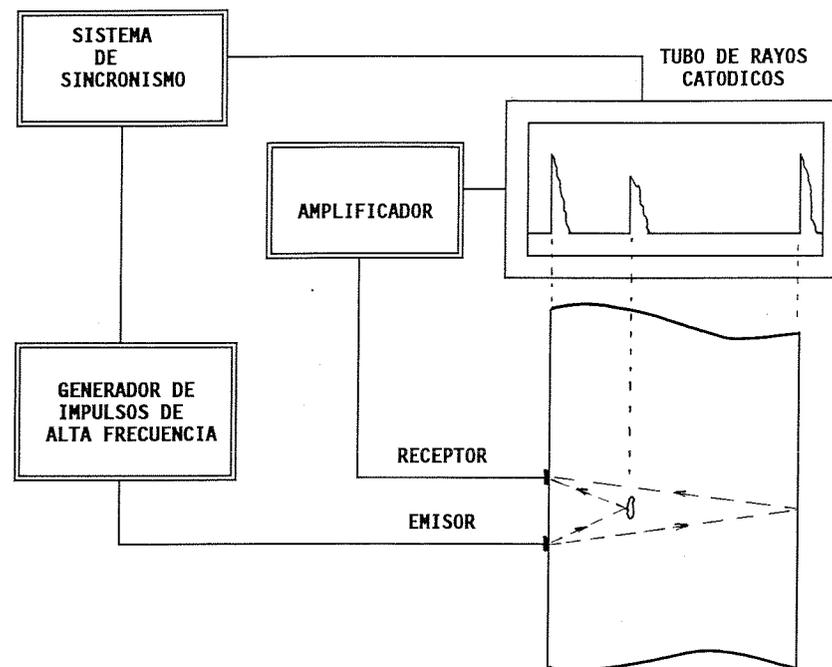


FIG. 13 INSTRUMENTO BASICO DEL IMPULSO ECO

El mando de centrado que desplaza lateralmente la línea de base de tiempos y el conjunto de ecos sobre ella, sin modificar su distancia relativa.

El regulador de ganancia del amplificador, mediante el cual se regula la altura de los ecos. Suelen ser dos mandos, uno con saltos de 20 en 20 dB y otro más fino con saltos de 2 dB.

### 4.— Interpretación de las señales en la pantalla del monitor

La primera señal detectada en la pantalla es la que se genera en el momento en que el impulso eléctrico llega al cristal emisor. Se le denomina eco de emisión y tiene la forma de un pico muy pronunciado el cual nos servirá de referencia para señalar el comienzo de la base de tiempos.

Si el material no tiene ningún reflector interno (defecto o heterogeneidad) la onda ultrasónica llegará hasta el fondo de la pieza investigada y allí sufrirá una reflexión. Si el eco de la misma es captado por el palpador receptor aparecerá otro eco más a la derecha del eco de emisión y de apariencia similar al primero.

El sistema de sincronismo regula la línea de base de tiempos de tal forma que la distancia entre el eco de emisión y el primer eco de fondo sea equivalente al tiempo que tarda el haz ultrasónico entre la salida del emisor y su vuelta al receptor. De esta forma, si se detecta un reflector intermedio, será localizado por su eco correctamente situado sobre la base de tiempos y dicha línea horizontal podrá ser utilizada como un eje de distancias.

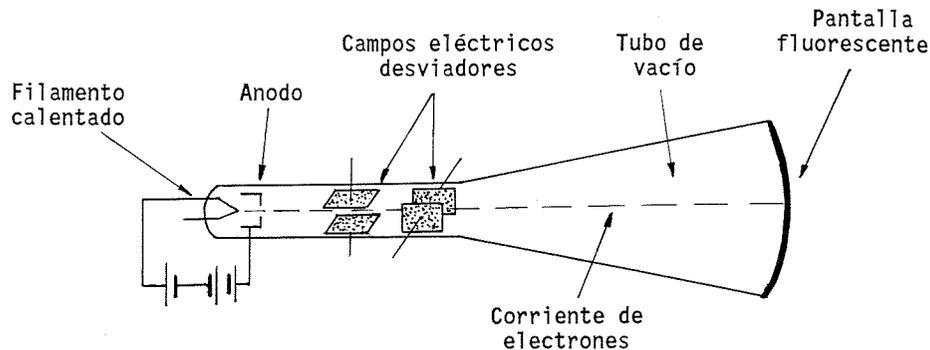


FIG. 14 ESQUEMA DE UN TUBO DE RAYOS CATODICOS

El eco reflejado en la pared del fondo vuelve hasta la pared inicial y se refleja de nuevo en ella. El haz doblemente reflejado comienza un nuevo recorrido similar al anterior que producirá un nuevo eco de fondo sobre la línea de tiempos, a doble distancia que el primero, del eco de emisión. Los sucesivos ecos de fondo seguirán produciéndose indefinidamente hasta que el haz se atenúe en su totalidad, aunque en la pantalla sólo aparecerán los que quepan en ella, según la escala adoptada para la base de tiempos.

Las indicaciones de los ecos aparecen, por tanto, a distancias de la base de tiempos proporcionales a su distancia al oscilador, siendo su altura proporcional a la presión acústica reflejada en el obstáculo.

### 5.— Escala de intensidades

Dado que el rango de intensidades acústicas utilizables es muy amplio, se suele utilizar una escala logarítmica en la que se sitúa la relación de la intensidad "I" con una intensidad de referencia "I<sub>o</sub>". Esta nueva unidad:

$$\log \frac{I}{I_o}$$

se mide en belios (en honor de Graham Bell), pero como aún resulta demasiado grande, se ha decidido utilizar los decibelios, que son la décima parte de los belios.

$$dB = 10 \cdot \log \frac{I}{I_o}$$

Si en la expresión anterior sustituimos las intensidades por su valor en las fórmulas dadas anteriormente, queda:

$$dB = 10 \cdot \log \frac{(1/2) \cdot (P^2/Z)}{(1/2) \cdot (P_o^2/Z)} = 10 \cdot \log (P/P_o)^2$$

y hallando el logaritmo del cuadrado:  $dB = 20 \cdot \log (P/P_o)$

Como la altura de los ecos en la pantalla del monitor (H) es proporcional a la presión, resulta:

$$dB = 20 \cdot \log (H/H_o)$$

y dichas alturas pueden representar las de dos ecos sucesivos, concretamente, el primero y el segundo eco de fondo.

Esto nos da una referencia para establecer la ampliación en dB del equipo, utilizando la técnica de los ecos múltiples, ya que dando al primer eco de fondo el nivel adecuado de sensibilidad, la expresión anterior nos marcará la altura correspondiente al segundo.

### 6.— Campo próximo y campo lejano

En las proximidades del oscilador y debido al efecto Fresnell, se produce un fenómeno de interferencias del haz ultrasónico, en una distancia cuya longitud (N) depende del diámetro del palpador (D) y de la longitud de onda (λ).

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4 \cdot \lambda} = \frac{D^2}{4 \cdot \lambda} = \frac{S}{\pi \cdot \lambda}$$

La presión acústica tiene un máximo al final del campo próximo igual al doble de la presión media. A partir de ahí, la presión va disminuyendo y el haz ultrasónico se va ensanchando, formando un campo cónico cuyo ángulo de divergencia es:

$$\text{sen } \gamma_o = 1,2 \frac{\lambda}{D}$$

Ejemplo.— Para un oscilador de 20 mm de diámetro que emite con una longitud de onda de 1,5 mm correspondiente a una frecuencia de 4 MHz en acero, se tiene:

$$N = \frac{20^2}{4 \cdot 1,5} = 66 \text{ mm} \quad \text{sen } \gamma_o = 0,09 \quad \gamma_o = 5,2^\circ$$

La fórmula de la presión acústica en el eje, en función de la presión media en el haz es:

$$P = P_o \cdot \pi \cdot \frac{N}{a}$$

por lo que, para una distancia de 3N, la presión:

$$P = P_o \cdot \pi \cdot \frac{N}{3N} = P_o$$

es igual a la presión media.

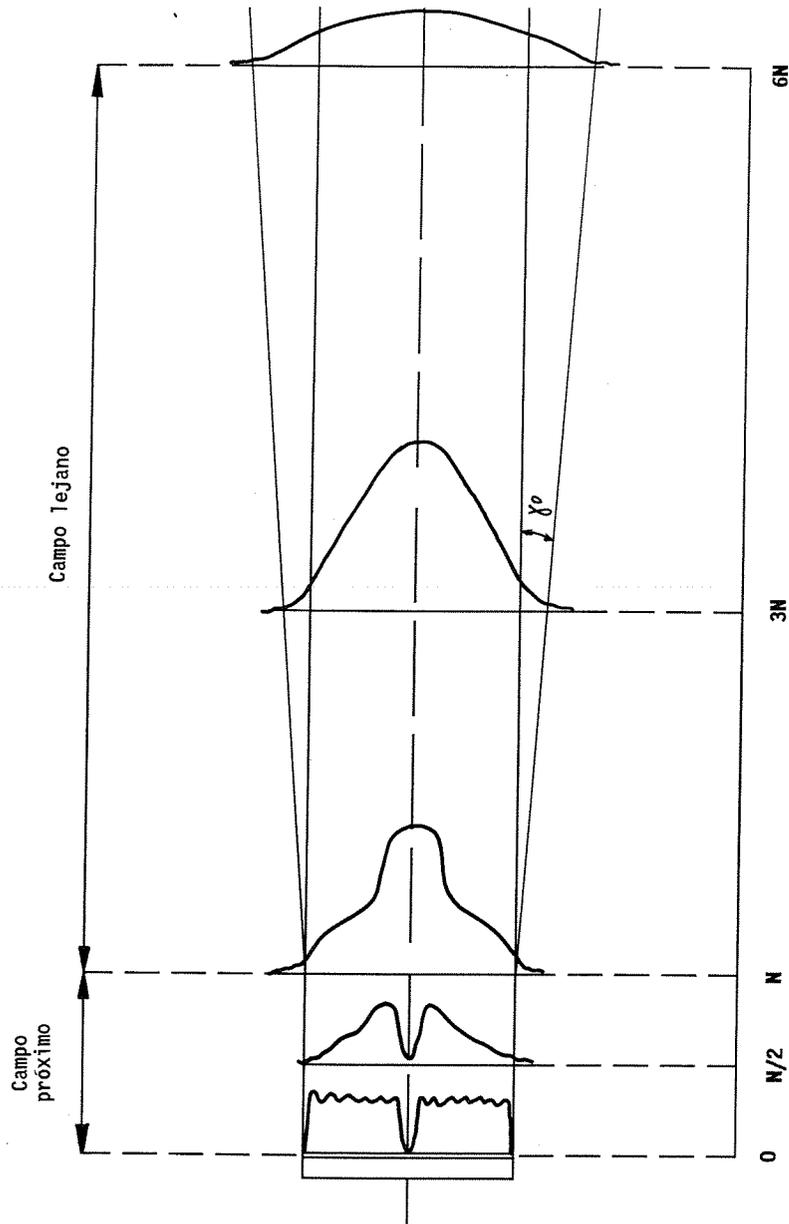


FIG. 15 DISTRIBUCION DE LA PRESION ACUSTICA

En el ensayo de materiales es aconsejable seleccionar los palpadores de manera que los defectos a detectar (reflectores), coincidan —a ser posible— con la posición del comienzo del campo lejano, por lo que dichos quedarán “iluminados” por un haz ultrasónico sin irregularidades y en la zona de máxima presión acústica. Además, una vez detectado el defecto, conviene desplazar el palpador hasta obtener la máxima altura de la indicación del eco, con lo que se habrá logrado que el defecto quede interceptado por el propio eje del haz, que es la zona de menor distorsión de impulsos.

### 7.— Distintos tipos de palpadores

Estudiaremos los tres tipos más importantes de palpadores:

- palpadores de incidencia normal
- palpadores bicristal, uno emisor y otro receptor
- palpadores angulares

### 8.— Palpadores de incidencia normal

La mayor parte de ellos llevan osciladores que emiten ondas longitudinales.

Un palpador de incidencia normal consta de una montura metálica, el amortiguador, el cristal, los electrodos, la conexión y el hilo conductor.

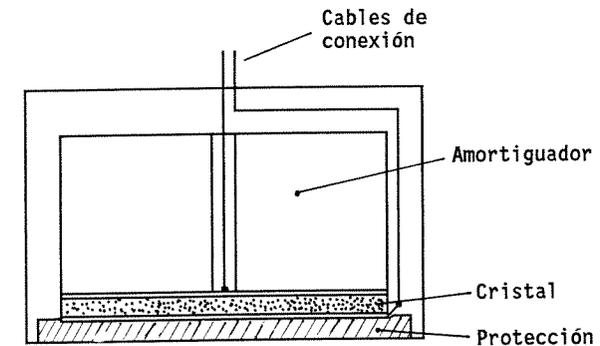


FIG. 16 PALPADOR DE INCIDENCIA NORMAL

El amortiguador sirve para soportar mecánicamente el cristal, reducir su tiempo de oscilación y absorber las ondas de interferencia. Suele ser de resina sistémica.

El cristal, está situado como el dieléctrico de un condensador cuyas placas son los electrodos. Estos se forman mediante una suspensión de plata a 500° extendida sobre las caras del cristal y a las cuales van soldadas las conexiones.

A veces los palpadores llevan una suela protectora de plástico endurecido con polvos de carbóndum para evitar el desgaste. En caso de no llevarla, se suprime la capa de plata de la superficie inferior y actúa como electrodo el propio material a investigar.

A fin de incrementar la sensibilidad para distancias grandes, se utilizan palpadores de diámetro máximo y frecuencia elevada, compatible con la atenuación del material, aunque con menor poder de resolución.

### 9.— Palpadores bicristal tipo E-R

Con objeto de explorar la "zona muerta" causada por el campo próximo del palpador, que oscila entre 4 y 5 mm para palpadores sin suela sobre acero, se utilizan palpadores con dos cristales aislados eléctrica y acústicamente, uno emisor y otro receptor, montados con una cierta inclinación convergente sobre una columna de plástico que concentra el haz ultrasónico. Con ello se consigue la máxima sensibilidad en las proximidades de la superficie del material a ensayar, pudiendo medir espesores y detectar defectos a partir de distancias equivalentes a la longitud de onda.

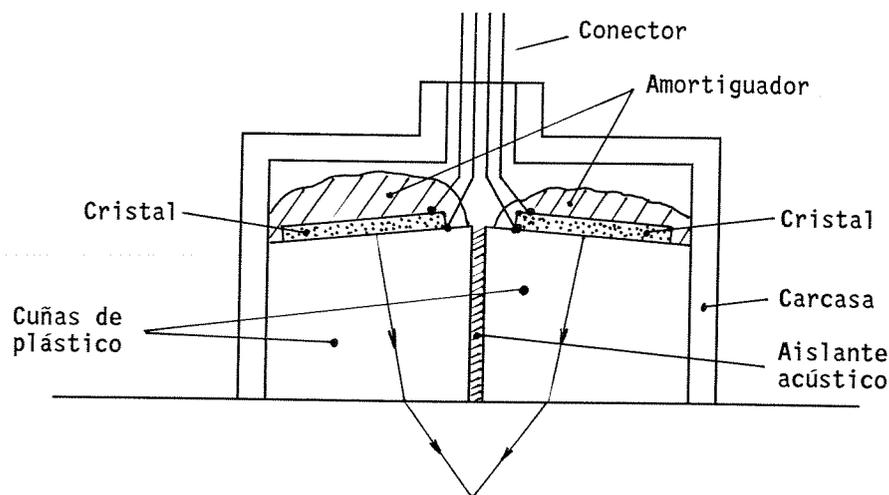


FIG. 17 PALPADOR BI-CRISTAL EMISOR-RECEPTOR

### 10.— Palpadores angulares

Consisten en un oscilador de ondas longitudinales montado mediante una fina capa de adhesivo sobre una de las caras de un prisma de plástico (perpex). Este prisma tiene un ángulo de incidencia comprendido entre  $27,6^\circ$  y  $57,8^\circ$  para muestras de acero, con el fin de que, de los dos tipos de ondas transmitidos, queden anuladas las longitudinales, pudiendo trabajar solamente con ondas transversales.

El amortiguador, colocado en un lateral con la superficie de separación estriada para aumentar el efecto, absorberá las ondas reflejadas.

En este tipo de palpadores es preciso tener bien determinado el punto de salida del haz y el ángulo real de refracción. Dichos valores vienen marcados sobre el propio palpador, pero es necesario contrastarlos para evitar los desajustes producidos por su desgaste.

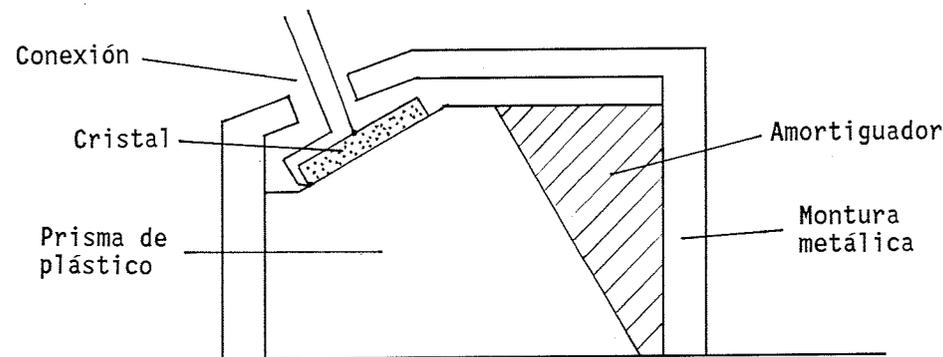


FIG. 18 PALPADOR ANGULAR

### 11.— Otros tipos de palpadores

Además de los descritos, se utilizan también palpadores para elevadas temperaturas, de inmersión, para ondas de superficie, montajes de varios palpadores para superficies cóncavas o convexas y palpadores angulares de incidencia variable para la generación de ondas de Lamb.

### 12.— Elección del palpador

Para la detección de defectos de formas y posición variada, conviene un palpador de baja frecuencia, los cuales poseen una elevada apertura angular. Proporcionan baja sensibilidad, por lo que sólo localizarán defectos de gran magnitud.

Si elegimos un haz ultrasónico estrecho y de alta intensidad para localizar defectos pequeños, podemos pasar alguno inadvertidamente.

Para materiales de grano grueso, conviene utilizar frecuencias muy bajas, del orden de 0,2 a 2 MHz.

Para materiales de grano fino la frecuencia aconsejada es de 2 a 5 MHz. Si se trata de un acero, las longitudes de onda serán de 1 a 3 mm por lo que se podrán localizar discontinuidades de 0,5 mm, que ya se pueden considerar defectos.

Para materiales de grano extremadamente fino, en donde se quieran localizar defectos extremadamente pequeños, se utilizarán frecuencias entre 5 y 10 MHz.

Si los defectos se esperan a corta distancia, se utilizarán palpadores de corto campo cercano que, dentro de la misma frecuencia, serán los de menor diámetro.

Si deseamos mucho poder resolutivo y sensibilidad, se utilizarán palpadores de mucha frecuencia, pero también tiene importancia el tipo de cristal, siendo conveniente el titanato de bario (cristales tipo B..SN y MB..SN) que tienen bastante sensibilidad y buen poder resolutivo.

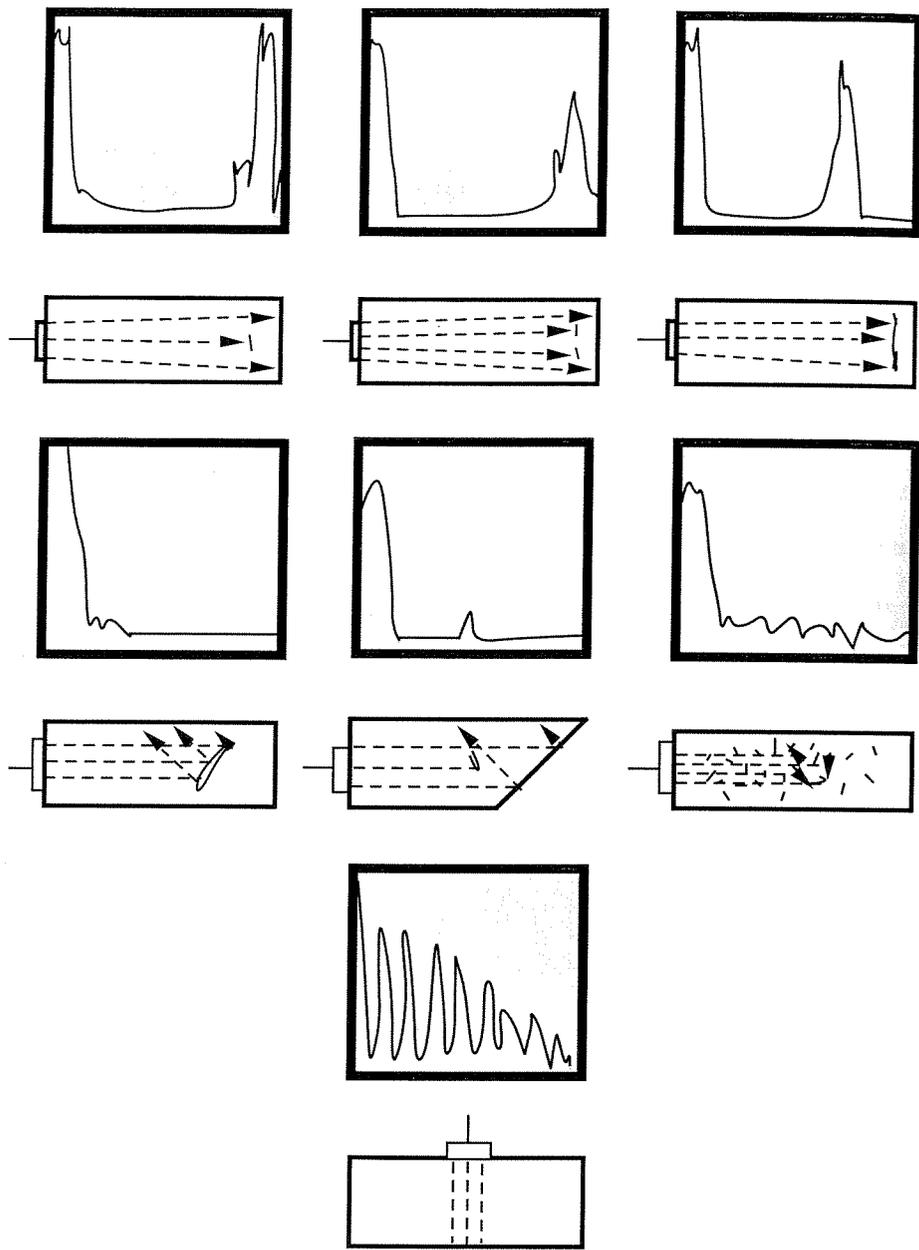


FIG. 19 EJEMPLOS DE ENSAYOS DE IMPULSO-ECO

### 13.— Acoplantes

Con objeto de eliminar la delgada lámina de aire entre el palpador y el material a ensayar, la cual presenta una elevadísima impedancia acústica que haría imposible la transmisión del haz ultrasónico, es necesario el uso de líquidos acoplantes.

El mercurio y sus amalgamas son los mejores medios de transmisión acústica para su aplicación en muestras metálicas, pero su elevado precio, su toxicidad y lo engorroso de su aplicación les hacen raramente utilizables.

La glicerina es acústicamente muy buen conductor, pero presenta el inconveniente de que no "moja" bien la superficie de los materiales. Pese a ello se aplica con mucha frecuencia, especialmente en el caso de superficies de acabado fino.

Los acoplantes más corrientemente empleados son las grasas y los aceites minerales de diversos grados de viscosidad. Cuanta mayor sea la rugosidad superficial, mayor debe ser la viscosidad del aceite.

El agua y las preparaciones acuosas como puede ser el engrudo, son muy buenos acoplantes, pero pueden oxidar la superficie de la pieza.

Para ensayos en caliente se pueden emplear aceites de elevado punto de ebullición, superior a 300° o silicona, a pesar de su elevado precio.

En los ensayos por inmersión, el medio de acoplamiento es el propio líquido que rodea la muestra. Con frecuencia, en vez de agua se utiliza queroseno, con objeto de evitar la oxidación del material que se ensaya.

## CAPITULO 5.- CALIBRACIONES DEL EQUIPO

### 1.- Necesidad de calibración

La buena práctica señala que no se debe nunca comenzar a trabajar con un equipo de ultrasonidos sin haber ajustado previamente el conjunto aparato-palpador.

Durante el transcurso del ensayo deberá volver a ajustarse el conjunto cada vez que se produzca una variación fundamental en el trabajo, como puede ser el cambio del palpador o la calidad del material a ensayar.

En cualquier caso se toma como una práctica adecuada ajustar el conjunto cada 2 horas en ausencia de modificaciones fundamentales en el trabajo.

La calibración y ajustes del equipo se ve facilitada por bloques patrón normalizados, pero no resulta obligatorio su uso y cada operador puede contar con patrones preparados por él mismo, de dimensiones perfectamente conocidas y que se adapten a las características del trabajo que va a desarrollarse.

Los patrones deben estar fabricados de un material similar al que vaya a ser objeto del ensayo y los reflectores de prueba, naturales o artificiales, serán de la misma naturaleza que los que se espere encontrar. El aparato, palpador, cable y acoplante utilizados en los ensayos de calibración serán exactamente los que vayan a utilizarse para los ensayos de trabajo.

### 2.- Bloques patrón

Existen bloques patrón normalizados que pueden resultar útiles para la calibración de los equipos, los cuales incorporan formas y dimensiones que les hacen apropiados para ello. Los más conocidos son:

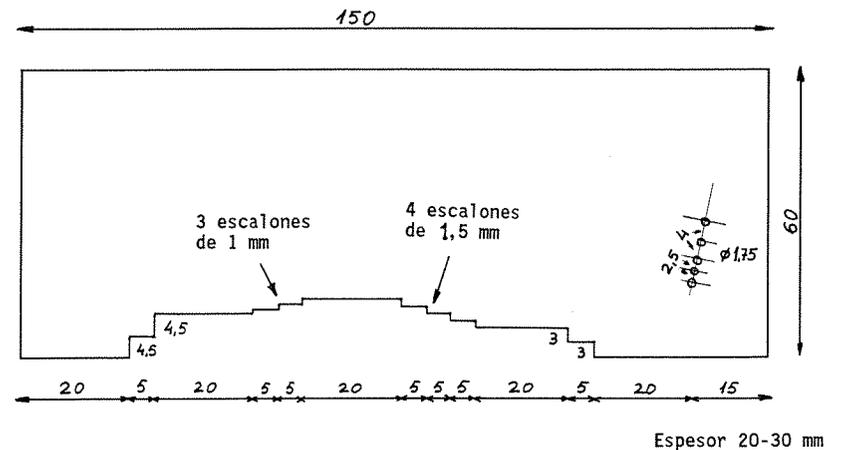
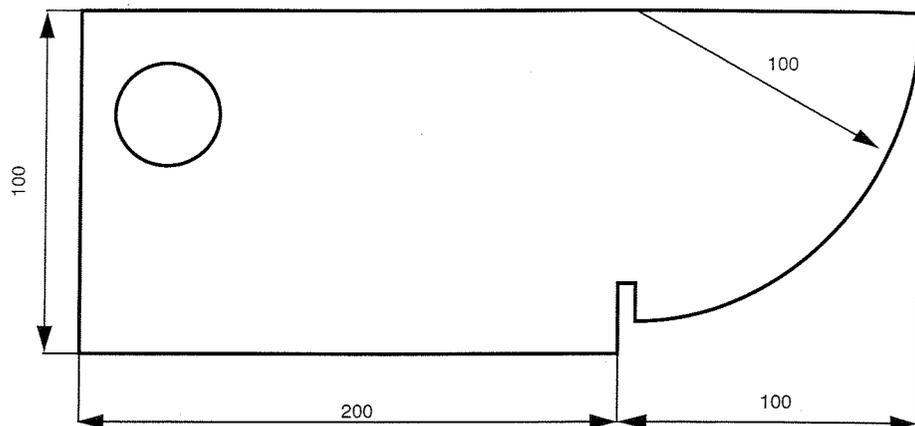
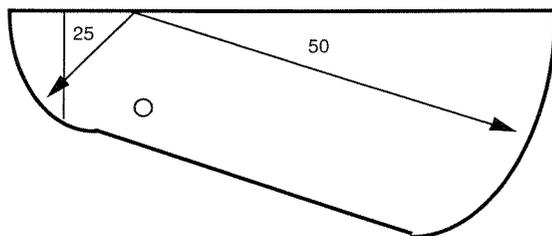


FIG. 20 BLOQUE PATRON INTA



UNE 7414

espesor 25



DIN 54122

espesor 12,5

FIG. 21 BLOQUES PATRON UNE 7414 Y DIN 54122

### 3.- Comprobación de la relación señal-ruido

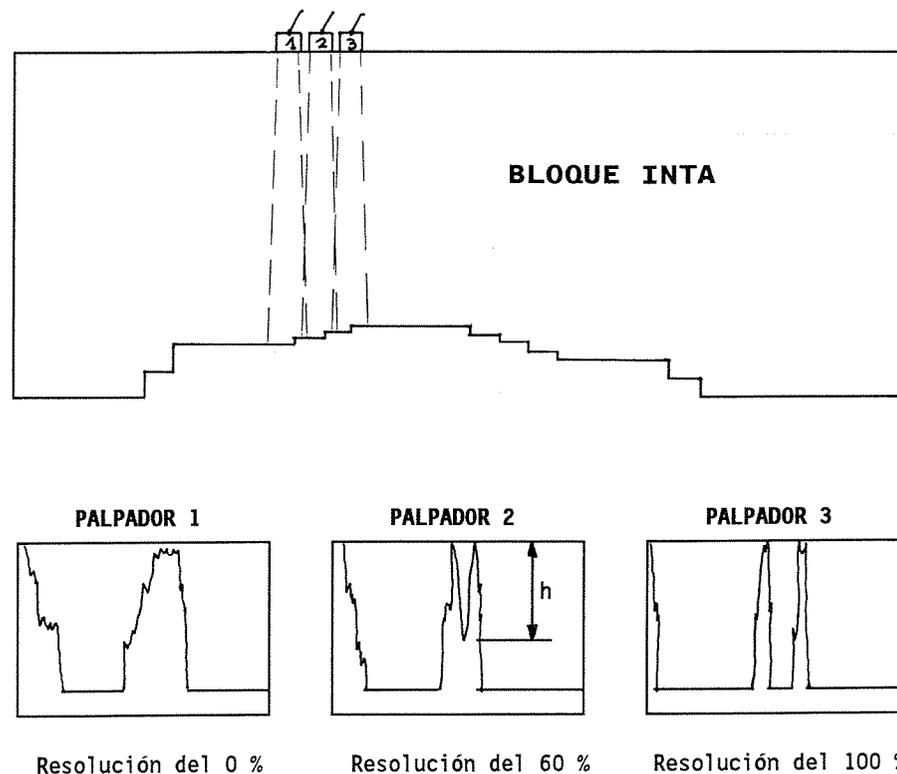
La atenuación del haz ultrasónico producido por la dispersión da lugar a múltiples señales de escasa magnitud que se presentan en la pantalla como una especie de "cesped" sobre la línea de base de tiempos. Si el cesped es importante, puede llegar a encubrir ecos que deban ser detectados.

Para determinar la relación señal-ruido de un equipo se obtiene un eco de 100 mm de distancia en el Bloque UNE 7414, modificando el regulador de ganancia para llevarlo hasta una altura del 50 % de la altura de la pantalla.

Posteriormente se rebaja la ganancia en 24 dB. El eco debe permanecer visible.

Se vuelve a llevar el eco al 50 % de la pantalla.

Se aumenta la ganancia en 50 dB. Las señales de ruido de fondo (cesped) no deben sobrepasar el 20 % de la altura de la pantalla.



Resolución del 0 %

Resolución del 60 %

Resolución del 100 %

FIG. 22 PODER DE RESOLUCION DE LOS PALPADORES

#### 4.- Poder de resolución

Poder de resolución es la capacidad del aparato para separar dos ecos próximos. Para determinarlo se utiliza el bloque INTA de la figura ## en el que hay escalones de 1; 1,5; 3,0 y 4,5 mm y se coloca el palpador de forma que se perciba el eco de un haz ultrasónico que se refleje en el borde de uno de los escalones.

Dado que los ecos recorren una distancia ligeramente diferente, deberán aparecer en la pantalla dos ecos desplazados en el tiempo. Llevando la altura de los mismos al 100 % de la altura de la pantalla, se mide la profundidad "h" del valle que se crea entre ambos y nos dará, en porcentaje sobre la altura de la pantalla, el poder de resolución del aparato.

#### 5.- Comprobación de la zona muerta

Se llama zona muerta a la que aparece en la parte derecha del eco de emisión, que impide localizar heterogeneidades a poca distancia de la superficie.

Siempre que se vaya a comenzar un ensayo determinado, después de ajustar la sensibilidad del equipo, el borde derecho del eco de emisión o las señales de ruido del palpador no sobrepasarán el 20 % de la altura de la pantalla, en la zona de la base de tiempos que se vaya a utilizar para el ensayo de trabajo.

#### 6.- Linealidad horizontal

Un aparato de ultrasonidos es lineal horizontalmente cuando las distancias reales a los ecos en la base de tiempos son exactamente proporcionales a los tiempos invertidos por los haces electrónicos en generar dichos ecos. En el caso concreto de un eco múltiple de fondo, habrá que comprobar que en la pantalla se mantienen iguales las distancias entre las sucesivas señales.

Para comprobar la linealidad horizontal se utiliza un bloque de caras paralelas y a fin de poder medir la distancia correcta de los ecos en la base de tiempos, se hacen coincidir dos de ellos con divisiones exactas de la escala. Se lleva cada uno de los ecos al 80 % de la altura de pantalla con el mando de amplificación y se toma la distancia entre dos bordes izquierdos consecutivos.

No serán admisibles errores de linealidad horizontal que sean superiores al 5 %.

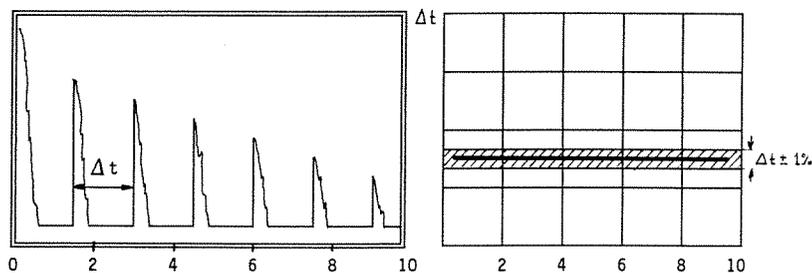


FIG. 23 COMPROBACION DE LA LINEALIDAD HORIZONTAL

#### 7.- Linealidad vertical

Utilizando el mismo ensayo que para la linealidad horizontal y con la ayuda de una regla milimetrada se mide la altura de dos ecos sucesivos que superen ligeramente el 10 % de la altura de pantalla. Se calcula la relación entre las dos alturas:  $R_1$ .

Con sucesivos aumentos de la amplificación, por ejemplo de 2 dB, se van determinando las relaciones  $R_2, R_3$ . Hasta por lo menos diez valores, de forma que los ecos no lleguen a exceder la altura de la pantalla.

Se considera que un aparato tiene linealidad vertical cuando ninguna de las relaciones difiere en más del 5 % del valor más repetido.

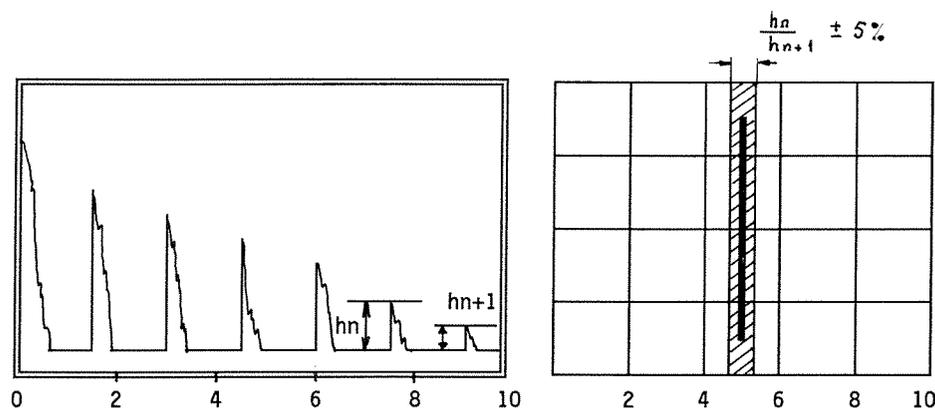


FIG. 24 COMPROBACION DE LA LINEALIDAD VERTICAL

#### 8.- Calibración de la base de tiempos

La escala de base de tiempos, que cuenta con 50 divisiones, es muy fácil de calibrar si se dispone de un patrón con dimensiones conocidas. Para ello habrá que escoger un rango de medidas que sea algo mayor del doble del espesor de la pieza que se pretende investigar, con objeto de que aparezcan en pantalla dos ecos de fondo.

Utilizando un patrón de caras paralelas a 25 mm, tal como el espesor de la pieza UNE 7414, se pueden hacer aparecer cuatro ecos de fondo, con lo que la escala estará graduada a 100 mm y cada una de sus 50 divisiones significará 2 mm.

Esta misma pieza patrón tiene una altura de 100 mm y una longitud hasta la muesca de 200 mm, lo que nos servirá para calibraciones de escala de mayor rango.

Para la calibración de la escala con palpadores angulares puede utilizarse como fondo la parte curva de la pieza patrón, o los dos arcos de la pieza DIN 54122 que tienen el mismo centro.

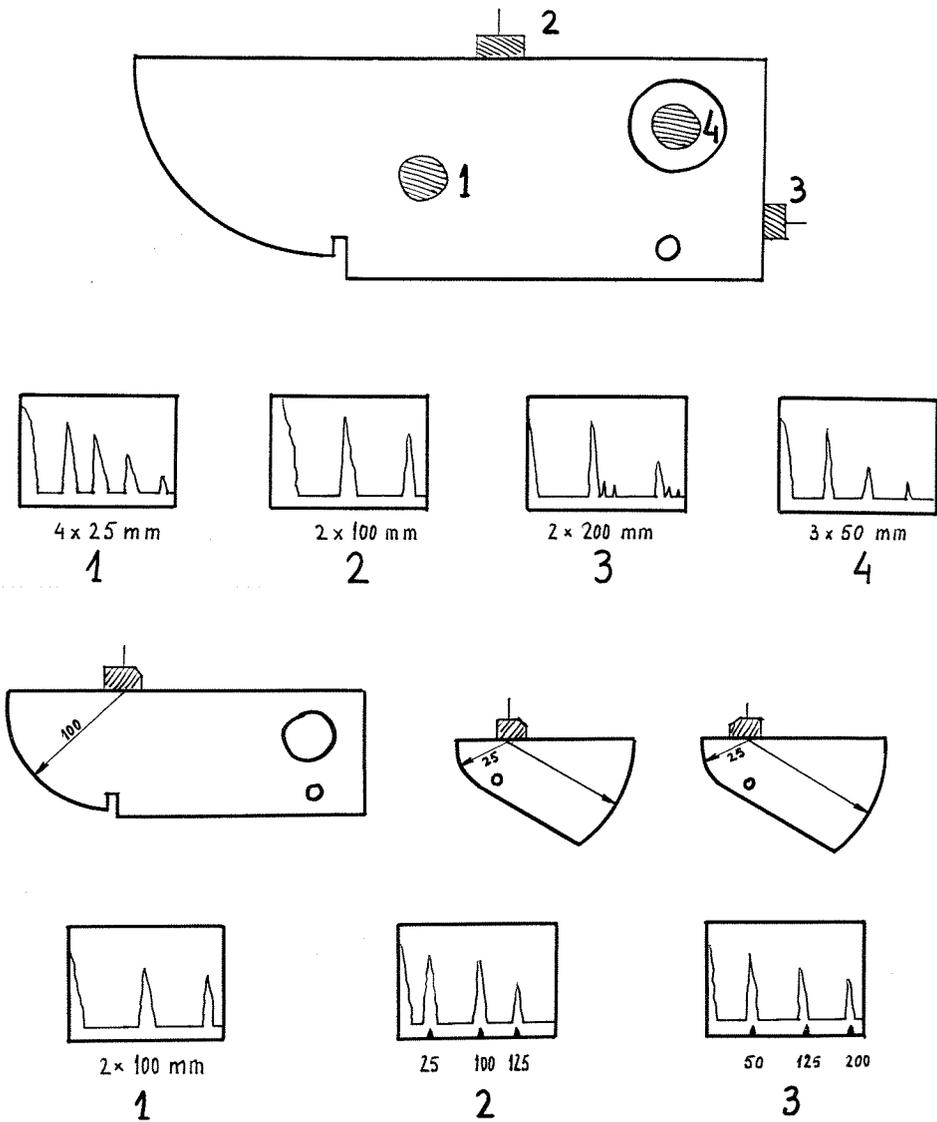


FIG. 25 CALIBRACION DE LA BASE DE TIEMPOS

### 9.- Determinación del punto de salida del eje en el haz y del ángulo real

Los desgastes producidos en el prisma de plástico de los palpadores angulares pueden hacer necesario que se determinen nuevamente el punto de salida del haz y su ángulo.

Colocando el palpador en el centro del cuadrante de la pieza UNE 7414 y mirando hacia dicho arco, se mueve ligeramente sobre su posición hasta obtener el eco máximo correspondiente a un haz radial con respecto al cuadrante. La muesca que señala el centro del arco de la pieza patrón señalará el punto exacto de salida del haz y se puede marcar en el palpador.

Girando el palpador 180° y apuntando hacia el agujero relleno de metacrílico que hay en el otro extremo de la pieza, cuando se consiga el eco máximo será señal de que estamos apuntando hacia el centro del agujero circular. El punto de la escala donde coincida la marca de salida del haz determinada con anterioridad, nos señalará el ángulo real en la escala de grados que va grabada en el borde de la pieza patrón.

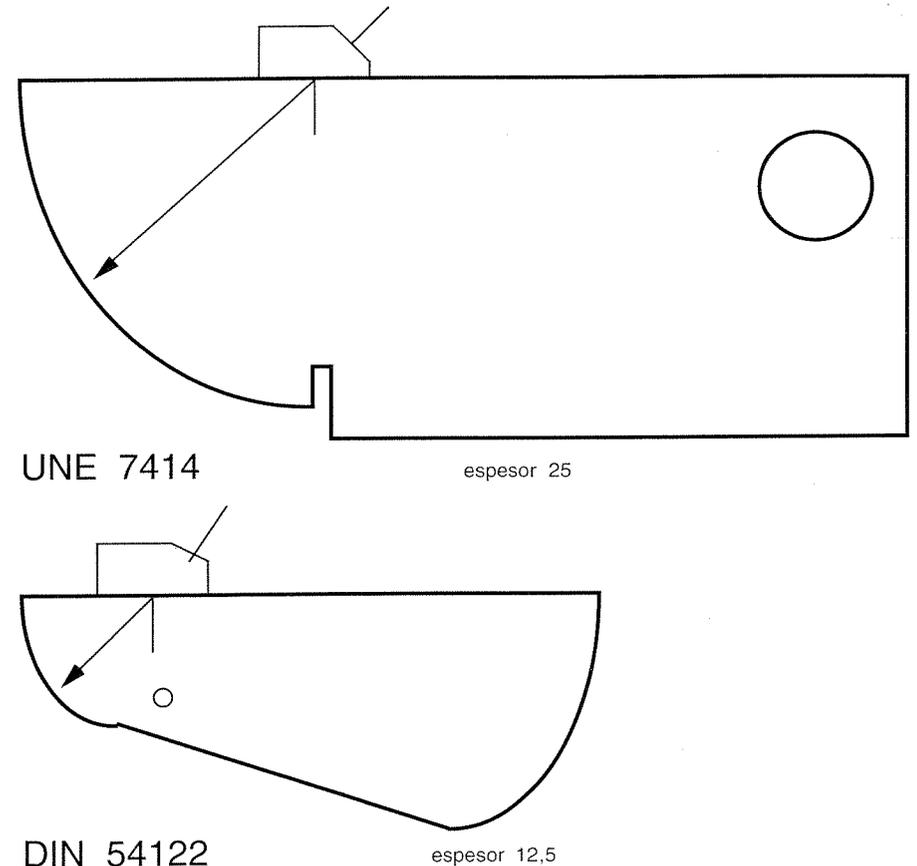
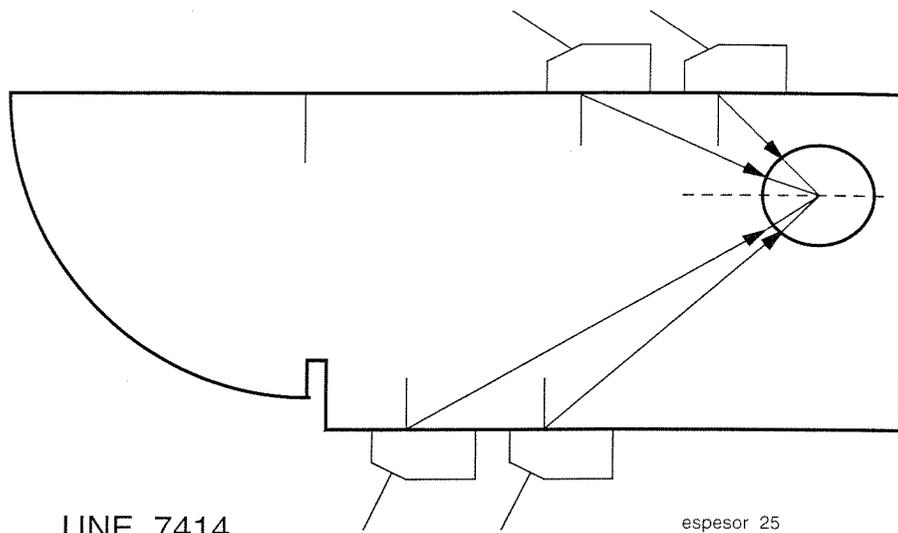


FIG. 26 DETERMINACION DEL PUNTO DE SALIDA DEL EJE DEL HAZ



UNE 7414

espesor 25

FIG. 27 DETERMINACION DEL ANGULO REAL DEL PALPADOR

### 10.- Isobara de -20 dB

Debemos conocer cuales son los límites prácticos del haz ultrasónico, o sea la zona límite de acción. Se considera que está en los puntos en donde el haz se debilita en 20 dB con relación a su máxima presión acústica. El plano cónico de igual presión que nos determina este límite se llama isobara de -20 dB y su determinación se hace mediante la identificación de cuatro puntos, dos en el plano horizontal y otros dos en el vertical.

Como reflector se utiliza el fondo de un taladro lateral de profundidad conocida y se sitúa el palpador a una distancia de él, doble de su campo próximo.

Se busca el eco máximo en la dirección transversal al taladro y cuando se haya encontrado se desplaza el palpador paralelamente al taladro, hasta que al sobrepasar su fondo, el eco se reduce en 20 dB. La distancia  $a - b$  es la semiapertura del haz en posición horizontal a la distancia del taladro.

Repitiendo el proceso por el lado contrario podemos calcular la otra semiapertura, que debe coincidir en valor con la anterior.

Para el cálculo en el plano vertical se parte del eco máximo obtenido según el anterior experimento y cuando se haya encontrado, se mueve el palpador perpendicularmente al eje del taladro hacia adelante y hacia atrás, hasta señalar los dos puntos en que la presión acústica disminuye 20 dB, determinando las medidas  $m$  y  $n$  que definen la isobara a esa distancia.

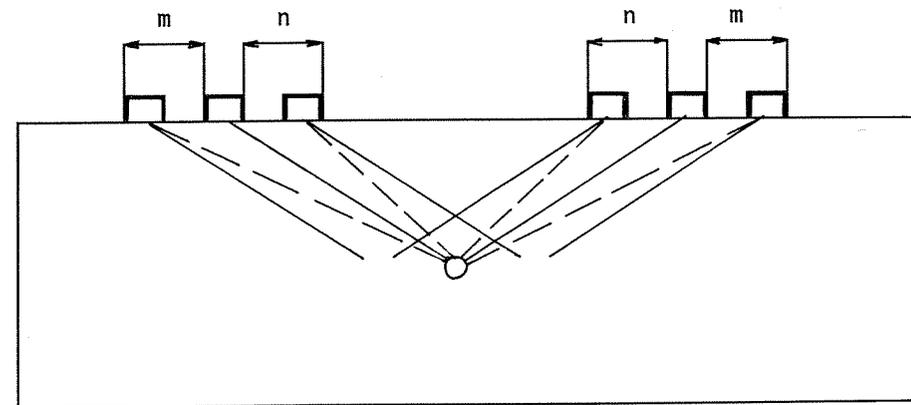
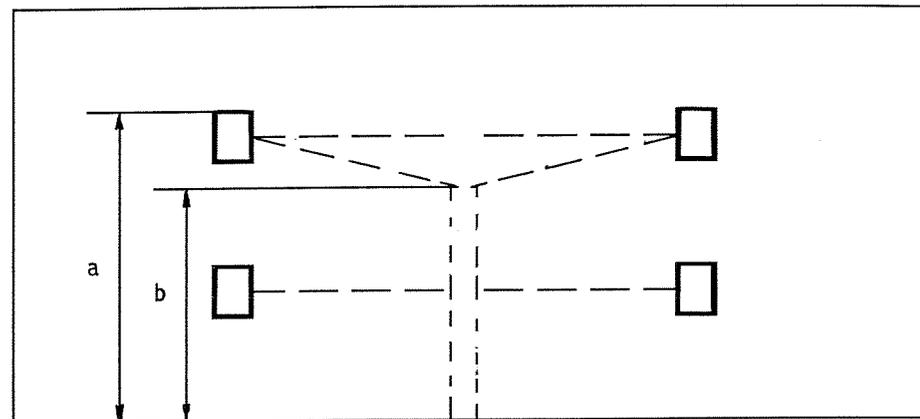


FIG. 28 DETERMINACION DE LA ISOBARA -20 DB EN LOS PLANOS HORIZONTAL Y VERTICAL

## 11.- Calibración de la sensibilidad

Esta calibración debe realizarse cuando el ensayo exija información sobre el tamaño de los defectos y se determina con reflectores patrón de igual naturaleza que los que se espera encontrar.

Se buscará el eco máximo del reflector patrón, que debe encontrarse entre el 50 % y el 90 % de la altura de la pantalla. Dicho eco se amplificará hasta la altura que especifique el procedimiento escrito y se anotará el número de decibelios que fué preciso amplificar, sin que a partir de ese momento se vuelva a mover el mando de amplificación continuo.

## CAPITULO 6.- REFERENCIAS PRACTICAS DE ENSAYO

### 1.- Procedimiento de ensayo

Para asegurar el barrido total de la zona que se pretende explorar, cada paso del palpador deberá solapar al menos el 10 % de la anchura del cristal oscilador. La velocidad de exploración no excederá de 150 mm/s.

Usando un bloque patrón con agujeros de fondo plano a distinta distancia de la superficie, se pueden detectar los ecos de dichos agujeros y marcar la indicación de su altura sobre la pantalla del monitor, dibujando una curva mediante la unión de estas marcas en la pantalla o en un papel de gráficos adecuados. La máxima amplitud de señal utilizada deberá encontrarse a tres cuartos de la altura de la pantalla. A esta curva se le denominará el 100 % de la curva de corrección de amplitud de distancia (CAD).

Al objeto de facilitar la detección de defectos, la sensibilidad de la exploración puede elevarse 6 dB sobre la determinada en el ensayo de sensibilidad, pero deberán rebajarse de nuevo cuando se detecte un defecto y sea preciso evaluarlo.

La calibración de los aparatos deberá repetirse cada 2 horas o cada vez que se modifique alguna variable del equipo.

### 2.- Ley de la distancia

Para el cálculo de la presión acústica reflejada por un obstáculo es preciso distinguir entre aquellos obstáculos pequeños cuya dimensión es mucho menor que el diámetro del haz ultrasónico y son por tanto totalmente iluminados por él y aquellos otros que interceptan el haz ultrasónico en su totalidad, ya que tienen comportamientos diferentes.

a) Obstáculos pequeños.- Para un defecto pequeño, mucho menor que el diámetro del haz ultrasónico, la presión acústica que recibe es:

$$P = P_o \frac{S}{\lambda \cdot a} \quad \text{en donde:}$$

$P_o$  es la presión que envía el palpador

$S$  es la superficie del defecto

$a$  es la distancia a la que se encuentra el defecto

Si la reflexión es total, el defecto comienza a vibrar con la presión recibida, comportándose como un nuevo oscilador. La presión acústica que devuelve al palpador es:

$$P_{eco} = P \frac{S'}{\lambda \cdot a} = P_o \frac{S \cdot S'}{\lambda^2 \cdot a^2}$$

siendo  $S'$  la superficie del palpador

Pero como la altura del eco en la pantalla es proporcional a la presión, se determina que:

Para reflectores pequeños, la altura de su eco es proporcional a su superficie e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia.

Así se ve que un mismo obstáculo situado a distintas profundidades proporciona alturas de eco desiguales y que un obstáculo pequeño a escasa profundidad proporciona en la pantalla una altura de eco similar a la que corresponde a un obstáculo de mayor tamaño situado a mayor distancia.

A mitad de distancia el eco es cuádruple y se eleva

$$dB = 20 \cdot \log \frac{H}{H_0} = 20 \cdot \log \frac{H}{H/4} = 20 \cdot \log 4 = 12 \text{ dB}$$

b) Obstáculos mayores que la sección del haz.- Si el defecto es mayor que la presión del haz electrónico, el palpador actuando como receptor, mide la presión acústica de su propio haz ultrasónico, a una distancia aparente de  $2a$

$$P_{eco} = P \frac{S}{\lambda \cdot 2a}$$

y por lo tanto:

**La altura del eco de un defecto grande es inversamente proporcional a su distancia al palpador.**

Es fácil en este caso determinar la amplitud del obstáculo moviendo el palpador hasta que el eco desaparezca. Una determinación exacta de su magnitud se facilita por el hecho de que cuando el haz se encuentre en el extremo del obstáculo, la altura del eco disminuirá en 6 dB ya que, en ese punto, el área interceptada y por tanto la presión reflejada caerá a la mitad y calculando la diferencia de altura de los ecos:

$$dB = 20 \cdot \log \frac{H}{H/2} = 20 \cdot \log 2 = 20 \cdot 0,3 = 6 \text{ dB}$$

o sea, que la exploración con el palpador nos dará el contorno del obstáculo sin más que ir marcando los puntos en los que la altura del eco en la pantalla disminuya 6 dB.

### 3.- Cálculo del diámetro equivalente de un defecto. Diagramas AVG o DAT

Cuando en un ensayo nos encontramos con un defecto resulta a veces difícil poder determinar sus dimensiones. Los diagramas AVG (Abstand, Verstärkung und Groesse) en español: DAT (Distancia, Amplificación, Tamaño) nos dan el diámetro equivalente de un reflector equiparable a un disco plano, para un palpador determinado.

La secuencia práctica del trabajo es como sigue:

Conocemos la profundidad del eco de fondo: 600 mm y la ponemos a 5/5 de pantalla (100 % de altura), anotando la amplificación: 40 dB.

Localizamos un defecto con su eco máximo, medimos su profundidad en la base de tiempos: 200 mm y lo ponemos a 5/5 anotando la amplificación: 66 dB

La diferencia de amplificación es  $66 - 40 = 26 \text{ dB}$

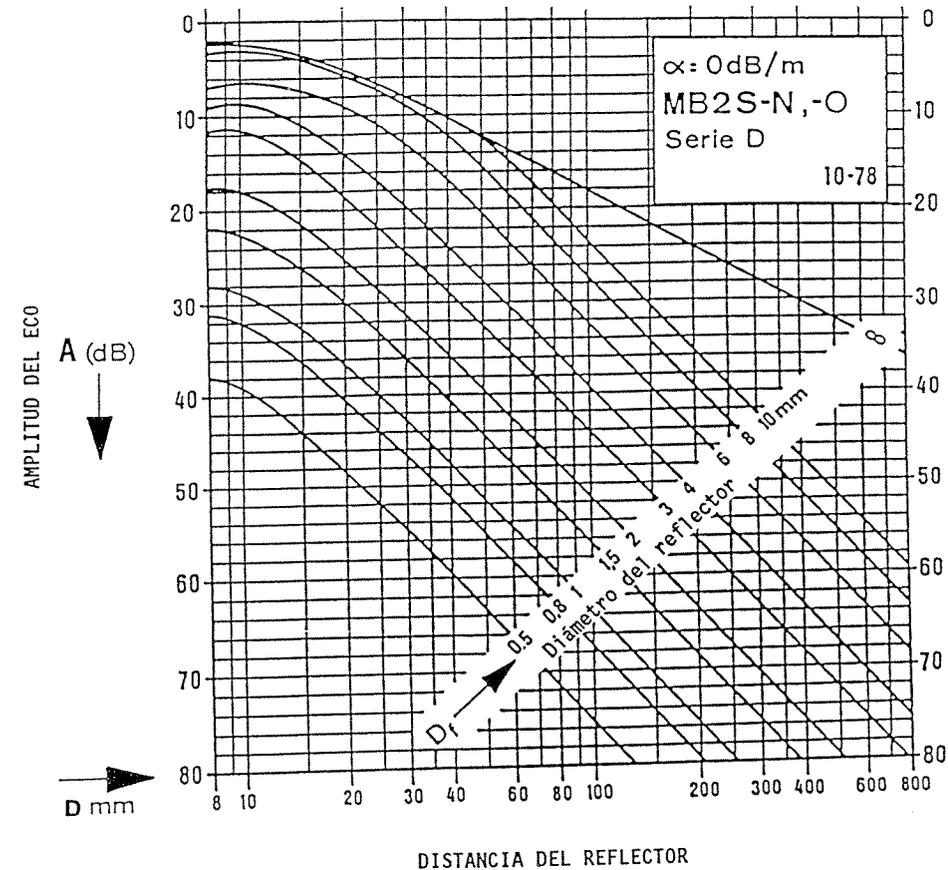


FIG. 29 DIAGRAMAS DAT - DISTANCIA, AMPLIFICACION, TAMAÑO

## DIAGRAMAS DAT

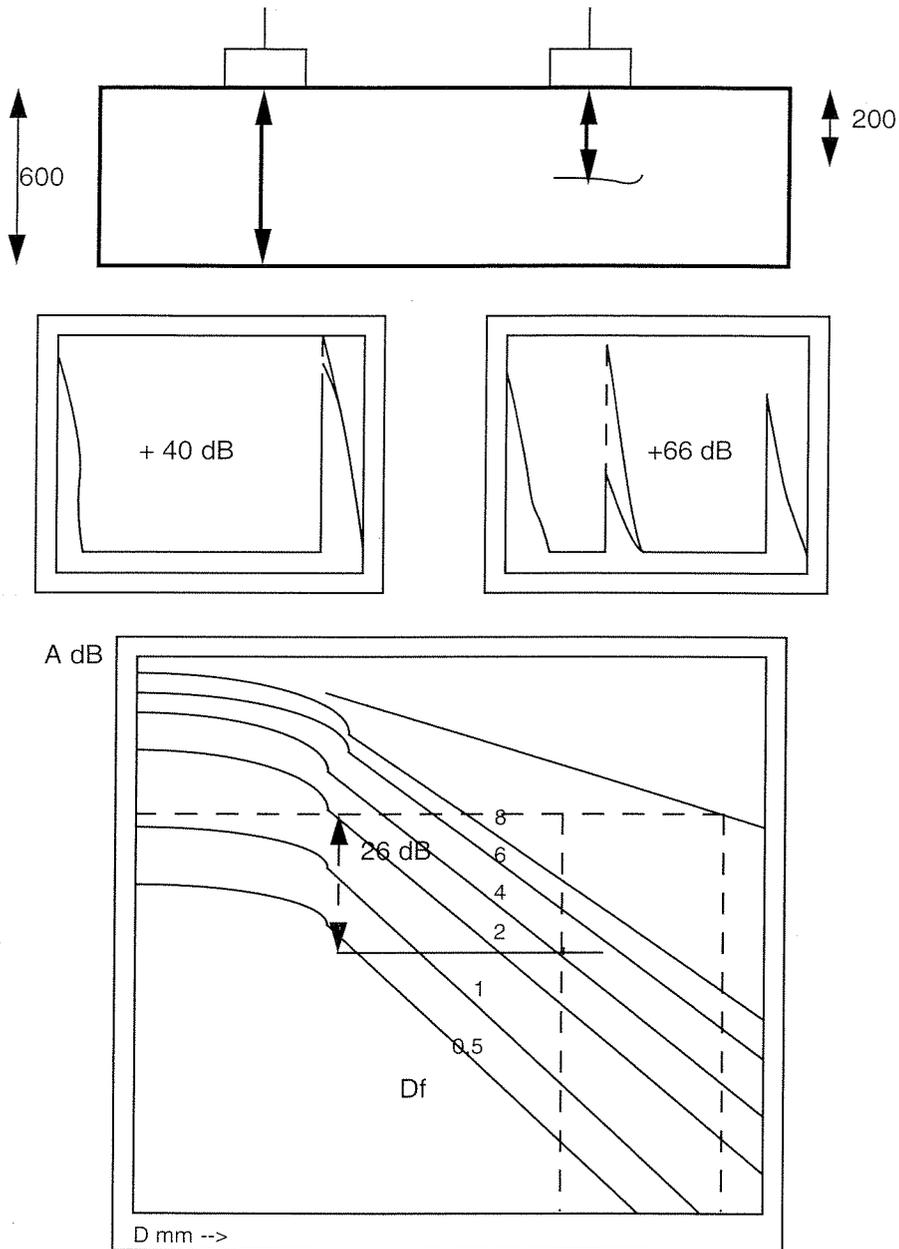


FIG. 30 CALCULO DEL DIAMETRO EQUIVALENTE

En el gráfico DAT subimos dos verticales a 200 mm y a 600 mm y se traza una recta horizontal que pase por donde la vertical de 600 mm corte a la curva oo.

Se traza otra horizontal a 26 dB por debajo, la cual corta en un punto a la vertical de 200 mm. La curva del gráfico que pasa por ese punto nos da el diámetro equivalente del defecto.

## 4.- Sistema de trabajo con eco simple y eco múltiple

La técnica de exploración de defectos en la investigación de un material, puede realizarse con el sistema de eco simple o el de eco múltiple.

En el primer caso, en la pantalla figura simplemente el espacio comprendido entre el eco de emisión (pico I) y el primer eco de fondo (pico H) y tanto su distancia como su superficie podrán calcularse por el método anteriormente descrito.

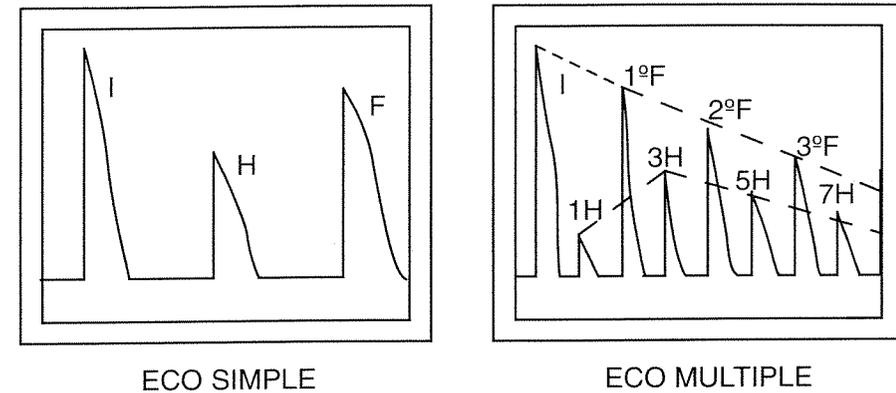


FIG. 31 OSCIOGRAMAS DE UN ECO SIMPLE Y UN ECO MULTIPLE

En el caso de un sistema de eco múltiple, se hacen aparecer en la pantalla varios ecos de fondo (picos 1°F, 2°F, 3°F...) a distancia iguales si el aparato goza de una buena linealidad horizontal y con alturas en disminución, debido a la pérdida de la presión acústica debida a la atenuación. En caso de detectar un defecto, éste aparecerá con ecos intercalados entre los de fondo (picos 1H, 3H, 5H...) de los cuales el primero es más bajo que el segundo debido a la influencia del campo cercano. Los demás sufrirán también la atenuación de señal.

## 5.- Inspección de un cordón de soldadura. Salto y medio salto

Se puede obtener la exploración interna de un cordón de soldadura, entre los bordes inferior y superior del mismo, situando un palpador angular de forma que el haz incida en dicha zona después de haber sufrido una reflexión en la parte inferior de la chapa.

La exploración del punto inferior del cordón se produce a una distancia  $p/2$  entre el punto de salida del haz y el borde superior del cordón, mientras que la de la parte superior se produce a una distancia  $p$ . Por tanto, el haz barre toda la sección transversal del cordón al desplazar el palpador entre las distancias  $p/2$  y  $p$ , llamadas por ello "medio salto" y "salto" respectivamente.

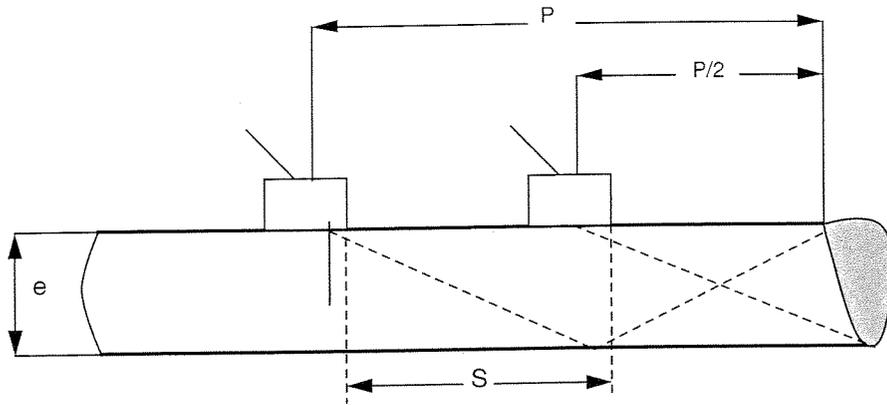


FIG. 32 SALTO Y MEDIO SALTO

Conociendo el ángulo  $\alpha$  de entrada del haz y el espesor de la chapa  $e$ , se pueden calcular ambas distancias.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{p/2}{e} \quad \text{y por tanto:} \quad p/2 = e \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad p = e \cdot 2\operatorname{tg} \alpha$$

para facilitar los cálculos, los palpadores llevan grabados el factor  $2\operatorname{tg} \alpha$

### 6.- Normas prácticas para el examen de soldaduras

El examen de los cordones de una estructura soldada representa una de las más importantes aplicaciones de los ensayos por ultrasonidos. Dado que en muchos casos es necesario investigar una gran cantidad de cordones realizados con la misma técnica, el mismo material y el mismo espesor de chapa, conviene que el inspector tenga un conocimiento previo de las siguientes características.

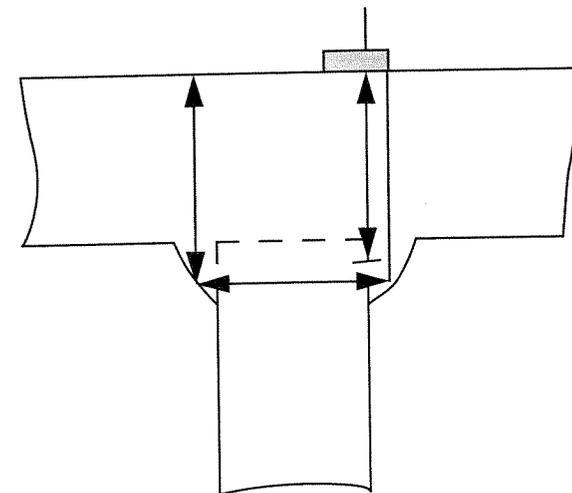
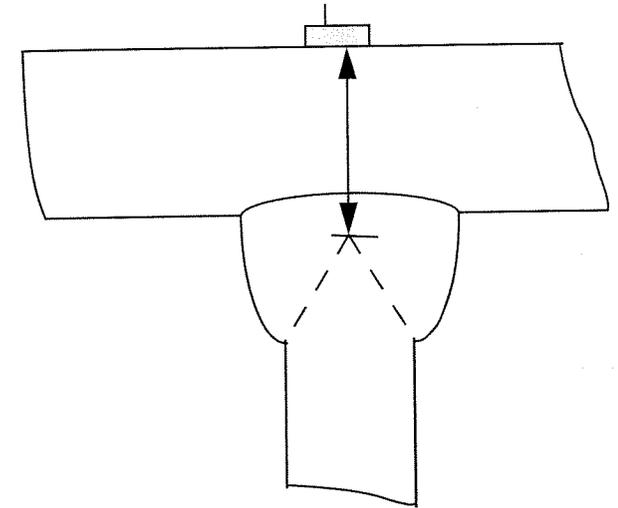
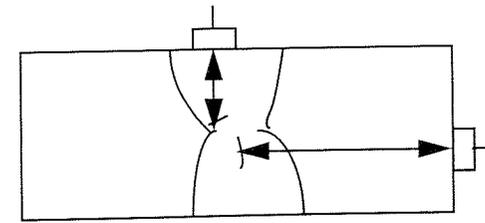
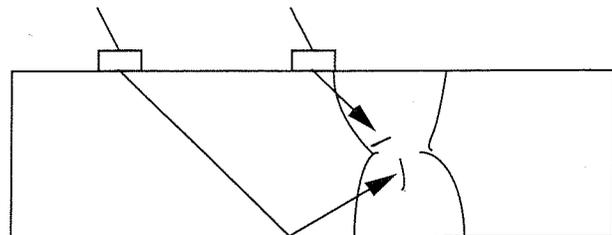


FIG. 33 EJEMPLO DE ENSAYO CON PALPADORES DE INCIDENCIA NORMAL



- 1.- Clase de material a examinar
- 2.- Espesor de la chapa
- 3.- Preparación de los bordes del cordón
- 4.- Procedimiento de soldadura utilizado
- 5.- Posibles tratamientos térmicos que haya sufrido la soldadura
- 6.- Existencia de chapa o anillo soporte en la raíz del cordón

El conocimiento de estos puntos ayudará al inspector a hacer un trabajo más eficaz y le ahorrará caer en muchos errores de bulto que la ignorancia de los datos previos le puede ocasionar.

### 7.- Normas de aceptación

En toda inspección por ultrasonidos de elementos que respondan a un pedido, deberán establecerse niveles de calidad aceptable entre el cliente y el suministrador, basados en apreciaciones realistas de las necesidades del servicio y de la calidad que pueda ser obtenida en el procedimiento de fabricación.

Es conveniente que dichos niveles se refieran a alguna norma determinada, lo que nos da un sistema completo de evaluación en el que están definidas con precisión las características del ensayo.

### 8.- Informe del ensayo

El informe final del ensayo por ultrasonidos hecho por el inspector deberá contener los siguientes datos.

El número total, localización, amplitud y superficie, con los límites si es posible determinarlos mediante el movimiento del palpador, de todas las indicaciones que superen los niveles de calidad aceptable establecidos.

Las áreas sospechosas que no se hayan podido determinar con exactitud en el ensayo, pero que podrían ser susceptibles de comprobar por otro método distinto.

La frecuencia del ensayo, caracterización del equipo, palpadores empleados, líquido de acoplamiento, número de lote o pedido de referencia, fecha del ensayo y firma del inspector.

Gráficos mostrando las piezas, incluyendo las dimensiones de todas las zonas no inspeccionadas, con la localización y medidas de las indicaciones no aceptables y sospechosas.

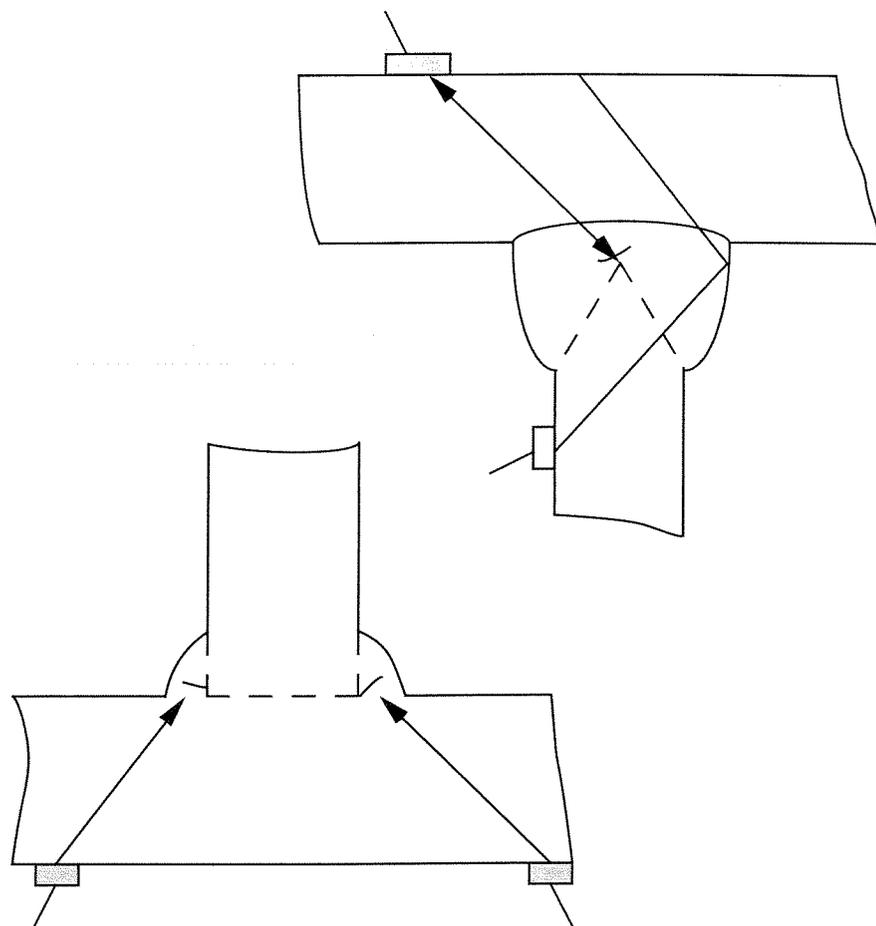


FIG. 34 EJEMPLO DE ENSAYOS CON PALPADORES DE INCIDENCIA ANGULAR

## BIBLIOGRAFIA

- APLICACIONES DE LOS METODOS DE END A LAS UNIONES SOLDADAS. A. Ruiz Rubio y J. Serrano. Edit. Urmo.
- INTRODUCCION A LOS METODOS DE END PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE LOS MATERIALES. F. Ramírez Gómez, Fdez. Soler, Delojo, Valdecantos, Alonso Roldán, SUárez Pascual y De los Ríos. Edit. Inta.
- APUNTES DEL CURSILLO SOBRE ULTRASONIDOS DE LA FUNDACION CONFEMETAL. Carlos Blanco Martínez, Castilla, Fradejas, Gómez Fraile y Marín Blanco.
- MANUAL DE FORMACION EN LOS ULTRASONIDOS. Krautkrämer España, S.A.
- NORMAS INTA SOBRE ULTRASONIDOS
- NORMAS ASTM SOBRE ULTRASONIDOS