

04.7.02

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1976

220
PMM/A-216

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

Cursos de Entrenamiento Avanzado en Metalurgia
Ciclo de Especialización

ENSAYO ULTRASONICO DE LOS MATERIALES

Juan N. Báez

INEND Proyecto PNUD ARG537/71

Programa Multinacional de Metalurgia

Programa Regional de
Desarrollo Científico y Tecnológico

Organización de los Estados Americanos
OEA

Argentina
1976

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

Cursos de Entrenamiento Avanzado en Metalurgia
Ciclo de Especialización

ENSAYO ULTRASONICO DE LOS MATERIALES

Juan N. Báez

INEND Proyecto PNUD ARG537/71

Programa Multinacional de Metalurgia

Programa Regional de
Desarrollo Científico y Tecnológico

Organización de los Estados Americanos
OEA

Argentina
1976

METODO DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO
POR ULTRASONIDO

1. INTRODUCCION

El ensayo no destructivo por medio de ultrasonido se ha desarrollado recientemente, principalmente a partir de la segunda guerra mundial. Como base importante para estos desarrollos deben considerarse los trabajos de investigación y desarrollo por Sokolov.

Su campo de aplicación es actualmente muy vasto y se prevé una mayor difusión aún, merced al desarrollo de nuevas técnicas, equipos y sistemas.

Las principales ventajas del método son:

- elevada sensibilidad de detección
- poca dependencia de la geometría de la pieza, bastando en la generalidad de los casos, el acceso a una sola de las caras
- posibilidad de inspeccionar volumétricamente el material, aún tratándose de grandes espesores, del orden de un metro en metales
- rapidez del examen y resultado inmediato
- utilización de aparatos manuales y de poco peso
- muy poco gasto en materiales de consumo y energía eléctrica; bajo costo de inversión en equipos y accesorios
- posibilidad de utilizar el mismo equipamiento básico en distintos tipos de exámenes: detección de defectos, evaluación de propiedades, medición de espesores
- ausencia de riesgos para el operador y personal circundante.

Esta serie de importantes ventajas no significa que el método ultrasónico sea el más apropiado para todos los ensayos. Existen por supuesto limitaciones en su uso ya sea por la naturaleza del material, el tipo de estructura interna, las condiciones de la superficie, la geometría, etc.

Por otra parte el ensayo ultrasónico requiere un mayor conocimiento y entrenamiento del operador con respecto al requerido para otros ensayos, como por ejemplo el radiográfico.

Un inconveniente que suele presentar el ensayo ultrasónico es la falta de un documento objetivo de su ejecución y las dificultades que puede ofrecer, en ciertos casos, la interpretación correcta de la información obtenida.

Estas objeciones e inconvenientes no obstan para considerar al ensayo ultrasónico como uno de los métodos importantes dentro del conjunto de los ensayos no destructivos.

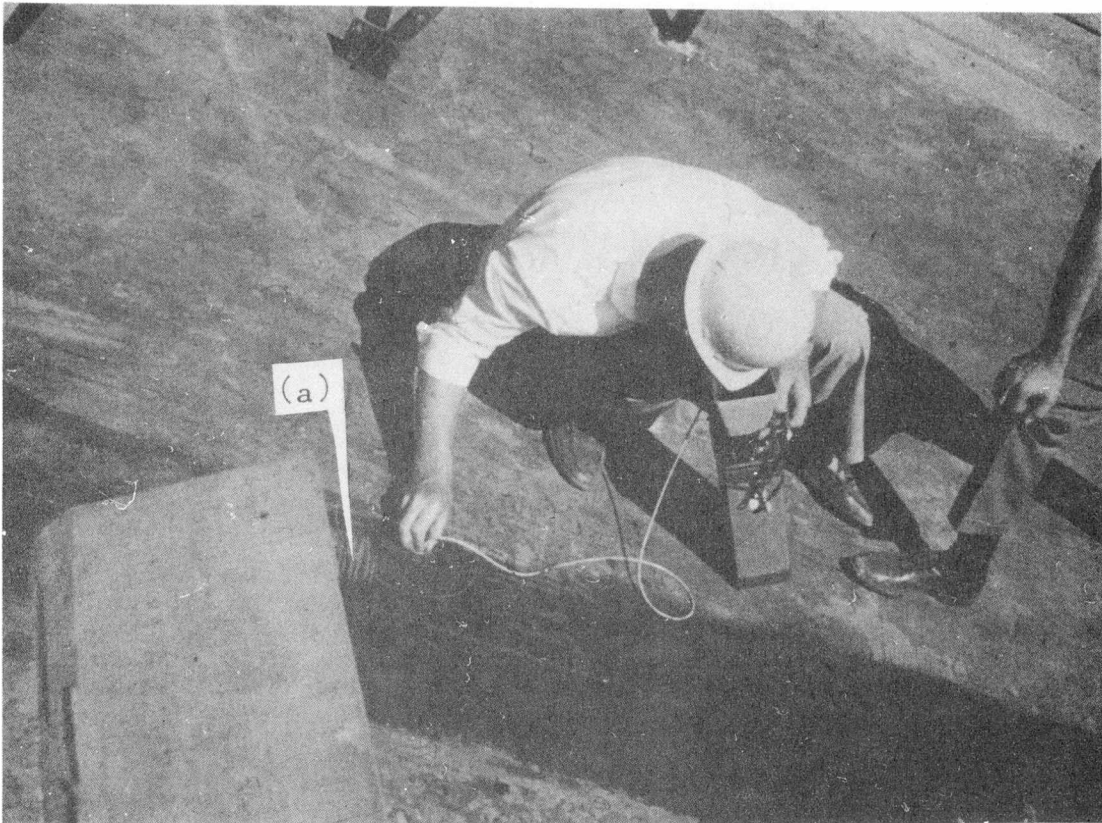


Figura 1 - Inspección ultrasónica de un cordón de soldadura. Obsérvese el trazo dejado por el palpador en su desplazamiento (a). El operador está examinando un defecto localizado en el metal base.

1.1. Características del ensayo ultrasónico

El ensayo ultrasónico de los materiales está basado en las propiedades de la propagación, reflexión y refracción de vibraciones mecánicas de frecuencia entre 0,5 y 15 MHz. Este rango de frecuencia se inscribe muy por encima del que corresponde al sonido, no es posible detectarlas mediante el oído y se las denomina por lo tanto ondas ultrasónicas.

Conocida la velocidad de propagación en el material ensayado es posible evaluar su espesor midiendo tiempo de recorrido.

En otros casos es posible evaluar propiedades mecánicas midiendo la velocidad de propagación en el material que se ensaya.

La más extendida de las aplicaciones se basa en la reflexión del ultrasonido en las discontinuidades del material en que se propaga, lo que permite la detección y evaluación de las mismas.

2. FUNDAMENTOS FISICOS DEL ULTRASONIDO

2.1. Ondas ultrasónicas

Todo material con propiedades elásticas puede ser sede de la propagación de ondas sónicas y ultrasónicas, en tanto las fuerzas elásticas son capaces de retraer las partículas a su posición de reposo.

En los cuerpos que poseen una estructura cristalina (por ejemplo metales al estado sólido) las partículas que forman la red pueden ser desplazadas de sus posiciones de equilibrio describiendo oscilaciones con trayectorias diversas, en función de la energía mecánica aplicada, originando distintos tipos de ondas ultrasónicas:

- Ondas Longitudinales
- Ondas Transversales
- Ondas Superficiales
- Ondas de Lamb.

Creemos oportuno remarcar que lo que se propaga a través del material en forma de una onda es la "perturbación" constituida por la puesta en oscilación de las partículas alrededor de sus respectivas posiciones de equilibrio.

2.1.1. Ondas Longitudinales

Se tienen *ondas longitudinales* cuando la dirección de oscilación de las partículas es paralela a la dirección de propagación de la onda.

En los líquidos y gases sólo es posible la propagación de este tipo de ondas mecánicas.

En la Fig.2 se ha esquematizado la propagación de ultrasonido mediante ondas longitudinales. Se observa que si la onda ultrasónica incide normalmente a la superficie, la propagación de la misma dentro del material provocará la oscilación de las partículas alrededor de su posición de equilibrio pero en la misma dirección de propagación. En un instante dado podríamos imaginar que la posición de las partículas en el material sería la que se indica en la parte inferior de la Fig.2, en la cual se observan zonas en que las partículas se han alejado entre sí y zonas en que se han acercado. La distancia entre dos puntos medios de dos zonas consecutivas de ^{igual} concentración de partículas corresponde a la longitud de onda del haz ultrasónico.

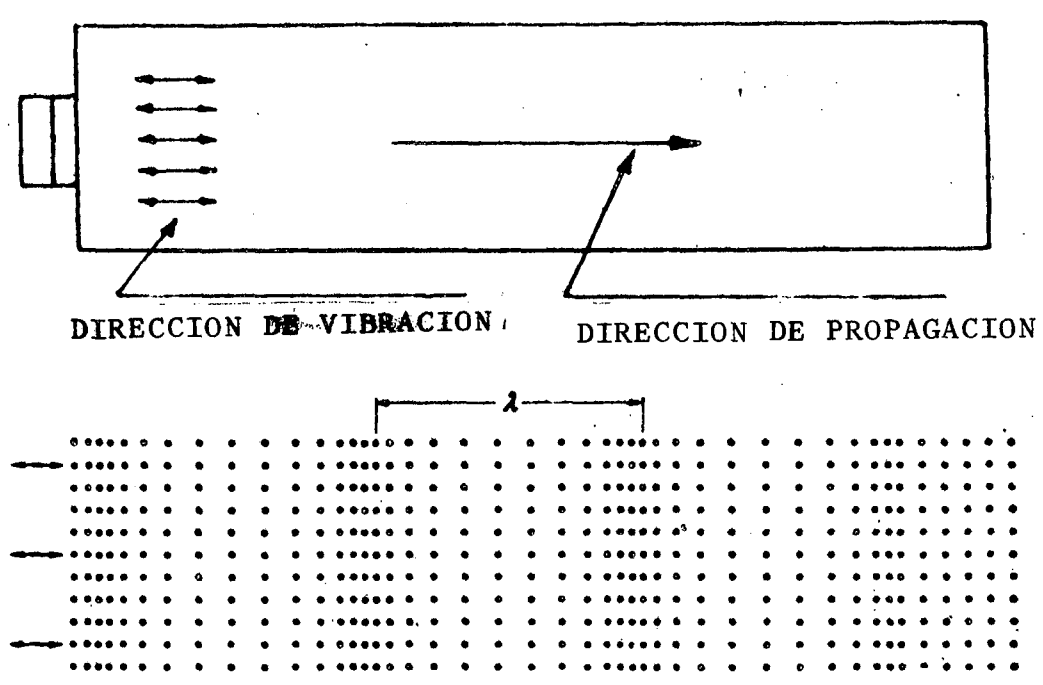


Figura 2 - Representación esquemática de la propagación de ondas longitudinales

2.1.2. Ondas Transversales

Se tienen ondas transversales cuando la dirección de oscilación de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda ultrasónica.

Esto se verifica en los materiales sólidos cuando la onda ultrasónica penetra en el material con un cierto ángulo respecto de la superficie.

En la Fig.3 se ha esquematizado la propagación de las ondas transversales. En este caso se observa que las partículas se alejan y acercan a su posición de equilibrio en dirección normal a la propagación de la onda manteniendo constante sus distancias relativas.

La longitud de onda λ está dada por la distancia entre dos puntos consecutivos que han alcanzado su máximo alejamiento de la posición de equilibrio en un mismo sentido.

2.1.3. Ondas Superficiales

Se habla de ondas superficiales (o de "Rayleigh") cuando el haz de ondas ultrasónicas se propaga exclusivamente en la superficie del material siguiendo el perfil del cuerpo, siempre que no haya variaciones bruscas en el mismo.

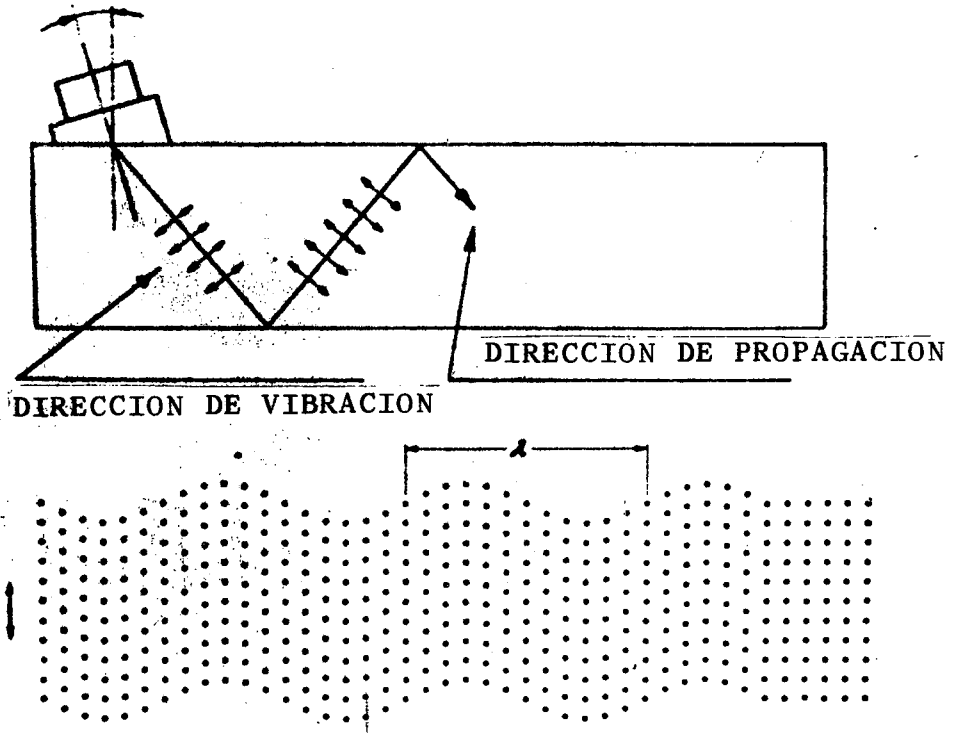


Figura 3 - Representación esquemática de la propagación de ondas transversales.

Las ondas superficiales se obtienen cuando el ángulo de incidencia del haz ultrasónico sobre el material tiene un valor tal que se alcanza el segundo ángulo crítico de refracción como veremos más adelante (2.4.).

En las ondas superficiales la oscilación de las partículas es normal a la dirección de propagación.

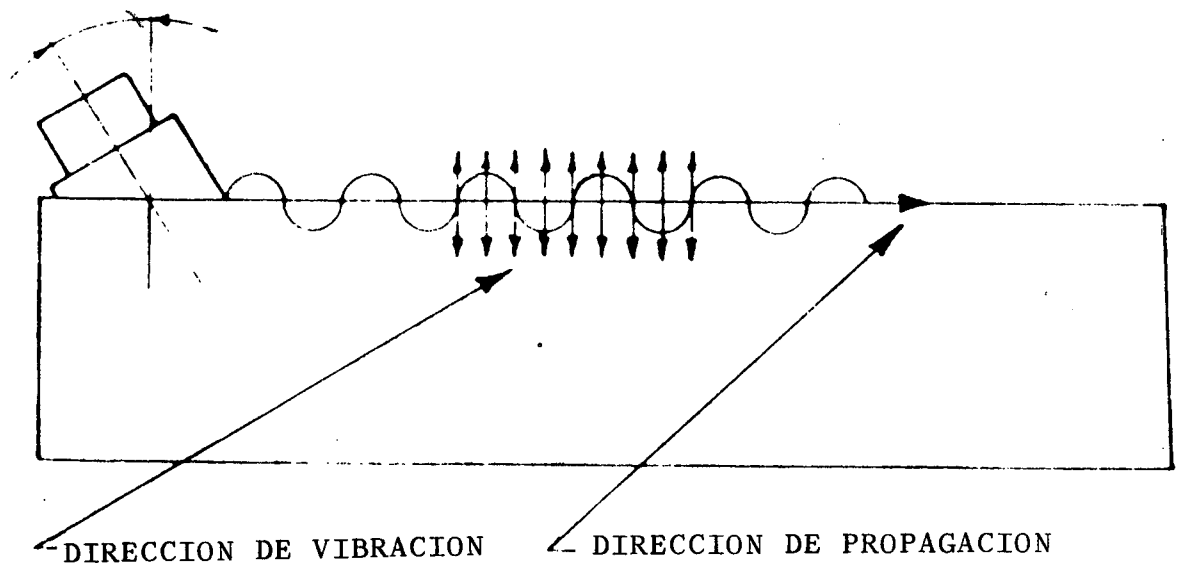


Figura 4 - Propagación de ondas superficiales.

2.1.4. Ondas de Lamb

Las ondas de Lamb se obtienen en láminas o hilos delgados cuando interviene en la propagación del haz ultrasónico, la totalidad del material; la lámina o el hilo vibran en su conjunto. Para un espesor o diámetro dado son posibles infinitos modos de vibración.

Existen dos formas fundamentales de ondas de Lamb:

- ondas simétricas de compresión
- ondas asimétricas de flexión.

La obtención de estas ondas, para un determinado espesor del material y una frecuencia dada del ultrasonido, se consigue variando el ángulo de refracción del haz generado.

En la Fig.5 se han representado las oscilaciones en las dos formas fundamentales de las ondas de Lamb, cada una en dos modos diferentes.

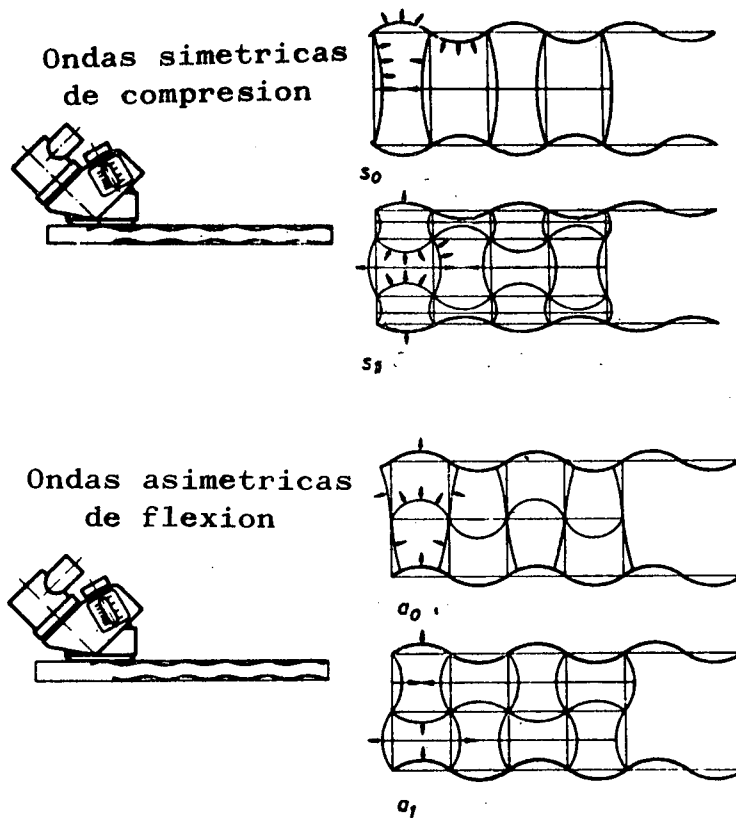


Figura 5 - Propagación de ondas de Lamb.

2.2. Velocidad de Propagación de las Ondas

Cada tipo de onda ultrasónica tiene distinta velocidad de propagación que depende en cada caso de las características elásticas del medio y es independiente de la frecuencia.

2.2.1. Velocidad de las ondas longitudinales

A fin de facilitar el estudio de la propagación del ultrasonido en los sólidos se puede utilizar un modelo constituido por esferas unidas entre sí por resortes como se indica en la Fig.6. Si se imprime un desplazamiento longitudinal a la primera esfera del modelo considerado ésta transmitirá su desplazamiento a la segunda esfera a través del resorte y así sucesivamente se transmitirá el desplazamiento inicial a lo largo de la cadena de esferas merced al vínculo elástico del resorte.



Figura 6 - Modelo de vibración lineal

Con el ultrasonido ocurre algo semejante: al incidir la onda ultrasónica normalmente a la superficie (Fig.2) la compresión mecánica produce el desplazamiento longitudinal de las partículas y la propagación de la perturbación en forma de onda longitudinal.

La velocidad de propagación de la perturbación en el caso del modelo será función de las características elásticas del resorte; de igual manera la velocidad de las ondas ultrasónicas resulta proporcional al módulo de elasticidad o módulo de Young del material.

En el caso del modelo es evidente que en la velocidad de propagación de la perturbación influye también la masa de las esferas. Un aumento de la masa significará una disminución de la velocidad. Este parámetro es comparable

con la densidad del material en el que se considera la propagación del ultrasonido.

Para un tratamiento más completo puede considerarse un modelo con dos dimensiones (Fig.7). En este modelo la propagación del desplazamiento aplicado a la primera esfera está influenciado no sólo por los elementos dispuestos en sentido longitudinal sino también por los dispuestos en sentido transversal.

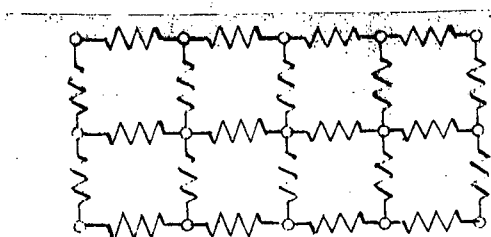


Figura 7 - Modelo de vibración bidimensional.

En el caso de la propagación del ultrasonido se debe considerar también, como en el último modelo, la influencia de las partículas adyacentes en el sentido transversal, aparece así un tercer parámetro, la relación de Poisson, en la determinación de la velocidad.

El estudio teórico de las condiciones de propagación aplicando modelos como los indicados conduce a una expresión que se considera válida para calcular la velocidad de propagación de ondas longitudinales, tenemos entonces:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\delta} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1)$$

donde: E es el módulo de elasticidad del material en Kg/m/s²; δ la densidad en Kg/m³; σ la relación de Poisson y V_L la velocidad de propagación en m/s.

En conocimiento de las características físicas y mecánicas del material se

puede entonces calcular la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas longitudinales que como vemos resulta independiente de la frecuencia y amplitud. En la tabla I se dan valores para distintos materiales usuales.

Material	Velocidad de propagación (m/s)			Impedancia acústica (10^{-6} g/cm ² .s)
	Longitud.	Transvers	Superfic	
Acero	5.925	3.255	2.790	4,76
Aluminio	6.250	3.100	2.790	1,65
Fundición*	4.000	2.200	2.300	3.36
Nickel	5.480	2.990	2.700	4,85
Bronce	4.450	2.120	1.950	3,65
Cobre	4.660	2.200	1.930	4,25
Zinc	4.170	2.480	2.230	2,96
Plexiglass	2.740	1.120	-	3,2
Vidrio Crown	5.660	3.420	3.060	1,4
Agua a 20°C	1.320	-	-	1,48
Aceite min.	1,250	-	-	1,16

Tabla I.- Velocidad de propagación del ultrasonido e impedancia acústica para diversos materiales

En piezas de poco diámetro pueden establecerse vibraciones longitudinales que abarcan toda la sección transversal, en cuyo caso la velocidad de propagación está dada por

$$V_0 = \sqrt{\frac{E}{\delta}} \quad (2)$$

2.2.2. Velocidad de las ondas transversales

En forma análoga a lo explicado anteriormente se puede estudiar la propagación de ondas transversales. En el modelo se considera la iniciación de la propagación mediante la aplicación de un desplazamiento transversal a la primera esfera.

La velocidad de propagación transversal queda dada por la expresión:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\delta} \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (3)$$

En la tabla I se dan los valores de V_t calculados para distintos materiales usuales.

De las ecuaciones (1) y (3) se puede calcular un valor de mucho interés que es la relación entre las velocidades de las ondas longitudinales y de las transversales, tendremos así:

$$\frac{V_T}{V_L} = \sqrt{\frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)}} \quad (4)$$

Vemos que la relación depende únicamente de la relación de Poisson, σ , para el material considerado. Para el acero σ vale 0,28 mientras que para el aluminio σ vale 0,34, podemos entonces calcular la relación de velocidades para ambos materiales y tenemos:

$$\text{acero } \frac{V_T}{V_L} = 0,55$$

$$\text{aluminio } \frac{V_T}{V_L} = 0,49$$

2.2.3. Velocidad de ondas superficiales

Para las ondas superficiales la velocidad de propagación está dada por la expresión:

$$V_s = \frac{0,87 + 1,12\sigma}{1 - \sigma} \sqrt{\frac{E}{\delta} \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (5)$$

En la tabla I se dan valores correspondientes a algunos materiales usuales.

La relación entre las velocidades de ondas superficiales y transversales está dada por la expresión:

$$\frac{V_s}{V_T} = \frac{0,87 + 1,12\sigma}{1 - \sigma} \quad (6)$$

luego para acero $\frac{V_s}{V_t} = 0,92$ y para aluminio $\frac{V_s}{V_t} = 0,93$

2.2.4. Velocidad de las ondas de Lamb

Para cada modo de vibración las ondas de Lamb se propagan con una ve

locidad que depende del producto entre el espesor del material y la frecuencia del haz ultrasónico.

En la Fig. 8 se dan las curvas que relacionan este producto de frecuencia por espesor con el ángulo de refracción que produce la onda de Lamb considerada y la velocidad de propagación resultante.

En dicha figura, en abscisas se da el producto frecuencia x espesor en unidades de KHz cm. y en ordenadas dos escalas: una con el ángulo de refracción del haz que produce la onda de Lamb y la otra con las velocidades resultantes en m/s.

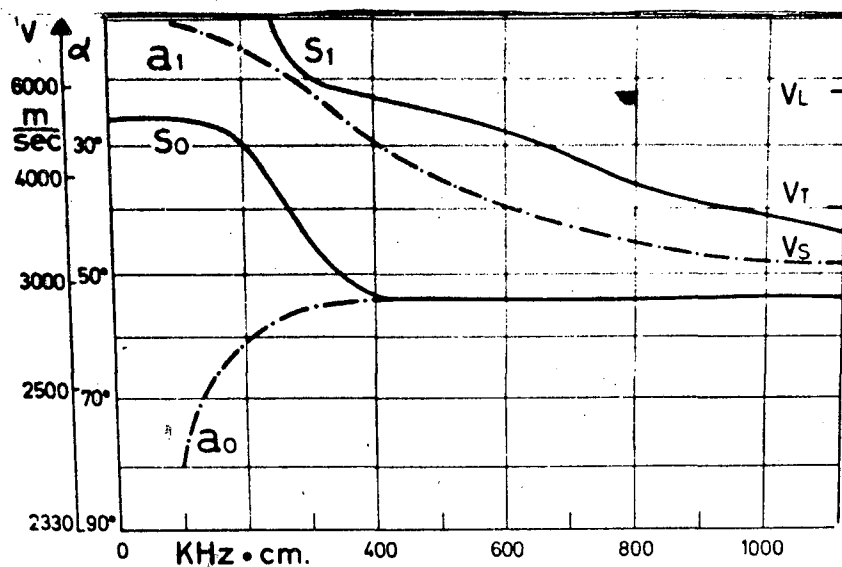


Figura 8 - Ángulos de refracción que producen ondas de Lamb y velocidad resultante.

Como ejemplo podemos considerar un espesor de 2 mm, con una frecuencia de 3 MHz tendríamos 600 KHz cm. y de acuerdo al gráfico vemos que el ángulo de refracción para generar ondas de Lamb en el modo a₁ será de 40° y la velocidad de propagación correspondiente igual a 3700 m/s.

2.3. Reflexión del haz ultrasónico

Cuando un haz ultrasónico que se propaga en un medio alcanza una superficie límite (interfase), por ejemplo una cara del cuerpo o una discontinuidad en su interior, se produce su reflexión con un comportamiento análogo al de un haz luminoso que se refleja en un espejo. La cantidad de energía

reflejada depende de las características de los medios que forman la interfase: aquel en que se propaga el haz y aquel que constituye la discontinuidad que determina la reflexión. Más exactamente, depende de la *impedancia acústica* Z , de los materiales.

La impedancia acústica es un parámetro que caracteriza la resistencia del medio al paso del ultrasonido y está definido por la relación:

$$z = \delta \cdot v$$

donde: δ es la densidad del material y V la velocidad de propagación del haz. En la tabla I se dan los valores de Z para algunos materiales usuales.

Si llamamos I a la energía ultrasónica incidente, la parte de energía que es reflejada será igual a I multiplicado por el coeficiente de reflexión r mientras que la parte de energía transmitida al segundo medio será igual a I multiplicado por el coeficiente de transmisión t . Si llamamos Z_1 y Z_2 a las impedancias acústicas correspondientes al primer medio y al segundo medio los valores de los coeficientes de reflexión y de transmisión serán:

$$r = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (7)$$

$$t = \frac{4 Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (8)$$

por otra parte resulta evidente que:

$$I = rI + tI \quad (9)$$

luego

$$r + t = 1 \quad (10)$$

Para el caso del acero y del aluminio el coeficiente de reflexión r es igual a 1 cuando el otro medio es aire.

2.4. Refracción del haz ultrasónico

Cuando el haz ultrasónico incide sobre una superficie o interfase con un ángulo distinto de cero respecto de la normal a dicha superficie, se produce la refracción de la parte de dicho haz que se transmite al segundo medio. La dirección del haz en el segundo medio puede determinarse por la Ley de Snell que tiene validez también en óptica.

I' , I'' , I''' indican en la Fig.9 la posición sucesiva del frente de onda de

un haz ultrasónico que incide sobre una superficie límite con ángulo θ , al cabo de intervalos de tiempo constante e igual a Δt .

Supongamos que el medio 1 es plexiglas y el medio 2 es acero, en el instante posterior al momento en que el frente de onda alcanza la posición AB los extremos del haz se encontrarán propagándose en medios con distinta velocidad. Así mientras en el primer medio el punto B al cabo del intervalo Δt habrá alcanzado la posición C recorriendo el camino $V_1 \cdot \Delta t$ (siendo la velocidad en el primer medio V_1) en igual tiempo el otro extremo habrá recorrido la distancia $V_2 \Delta t$ (V_2 es la velocidad en el segundo medio). Si con centro en A trazamos una circunferencia con radio igual al trayecto $V_2 \cdot \Delta t$ y por el punto C la tangente a dicha circunferencia en el segundo medio obtenemos el punto D que con el punto C determina el segmento CD que corresponde a la posición del nuevo frente de onda R' del haz ultrasónico refractado que continúan propagándose en el segundo medio con la velocidad V_2 determinando las posiciones sucesivas $R', R'' \dots$ al cabo de cada intervalo Δt siempre constante.

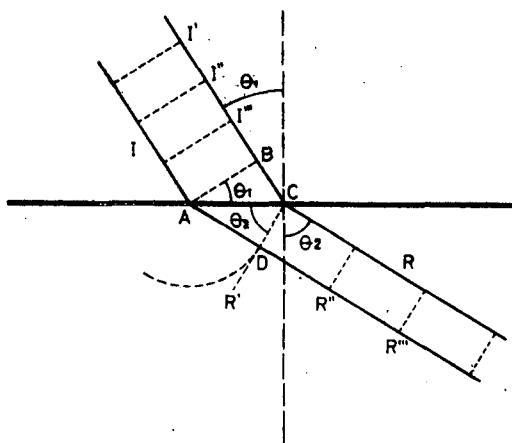


Figura 9 - Refracción del haz ultrasónico según la ley de Snell.

Considerando los triángulos ABC y ACD en la misma figura 9, se pueden escribir las relaciones:

$$BC = \Delta t V_1 = AC \text{ Sen } \theta_1 \quad (11)$$

$$AD = \Delta t V_2 = AC \text{ Sen } \theta_2 \quad (12)$$

Dividiendo miembro a miembro la (11) por la (12) y ordenando términos tendremos la expresión de la ley de Snell.

$$\frac{\text{Sen } \theta_1}{V_1} = \frac{\text{Sen } \theta_2}{V_2} \quad (13)$$

Cuando el haz ultrasónico incide oblicuamente en la superficie, ejerce una presión F (Fig.10) que puede ser descompuesta en dos componentes principales: una normal F_n que provoca el desplazamiento longitudinal de las partículas originando las ondas longitudinales y una componente tangencial F_t que determina la propagación de ondas transversales.

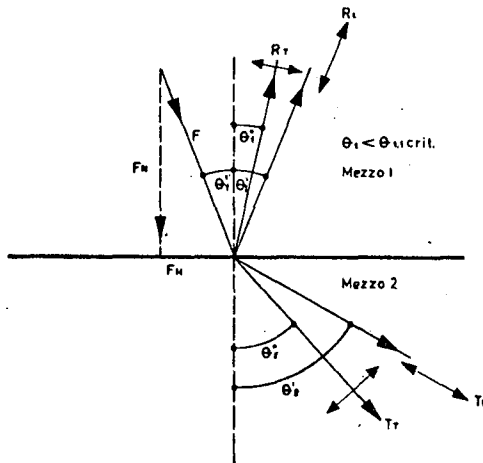


Figura 10 - Refracción del haz ultrasónico para ángulo de incidencia menor que el primer ángulo crítico: $\theta_1 < \theta_{1 \text{ critico}} < \theta_{2 \text{ critico}}$

En razón de ello se tienen ondas longitudinales y transversales reflejadas en el primer medio y ondas longitudinales y transversales refractadas en el segundo medio.

Los ángulos que cada una de estas ondas forma con la normal a la superficie límite están dados por la ley de Snell según la ecuación vista:

$$\frac{\text{Sen } \theta_1}{V_{1L}} = \frac{\text{Sen } \theta_1'}{V_{1T}} = \frac{\text{Sen } \theta_2}{V_{2L}} = \frac{\text{Sen } \theta_2'}{V_{2T}} \quad (14)$$

Se define como *1er. ángulo crítico* al valor del ángulo de incidencia θ_1 para el cual el ángulo de refracción de las ondas longitudinales se hace igual a 90° .

Con valores del ángulo de incidencia θ_1 iguales o mayores que el primer ángulo crítico en el segundo medio dejan de propagarse ondas longitudinales refractadas quedando únicamente la propagación de ondas transversales refractadas hasta que se alcanza un segundo valor del ángulo de incidencia θ_1 , que se llama *2do. ángulo crítico*, para el cual el ángulo de refracción de las ondas transversales se hace igual a 90° .

Para la interfase plexiglas-acero el primer ángulo crítico vale 27° y el segundo ángulo crítico 58° . En plexiglas-aluminio los valores son 13° y 27° respectivamente.

En la Fig.11a) se ha dibujado la situación que se presenta cuando el ángulo de incidencia se encuentra entre el 1er. y el 2do. ángulo crítico. En este caso sólo se propagan en el segundo medio las ondas transversales refractadas. Esta situación es la que se utiliza en el examen de piezas con cristales angulares ya que si el ángulo de incidencia fuera menor que el 1er. ángulo crítico se tendrían simultáneamente en el segundo medio, que es el que se inspecciona, dos haces ultrasónicos con distinta dirección de propagación, lo que haría muy compleja la interpretación de la información obtenida en el osciloscopio.

En la Fig.11b) se ha dibujado la situación que corresponde a un ángulo de incidencia mayor que el 2do. ángulo crítico. En este caso se produce la reflexión total del haz y no se transmite ningún tipo de onda ultrasónica en el segundo medio.

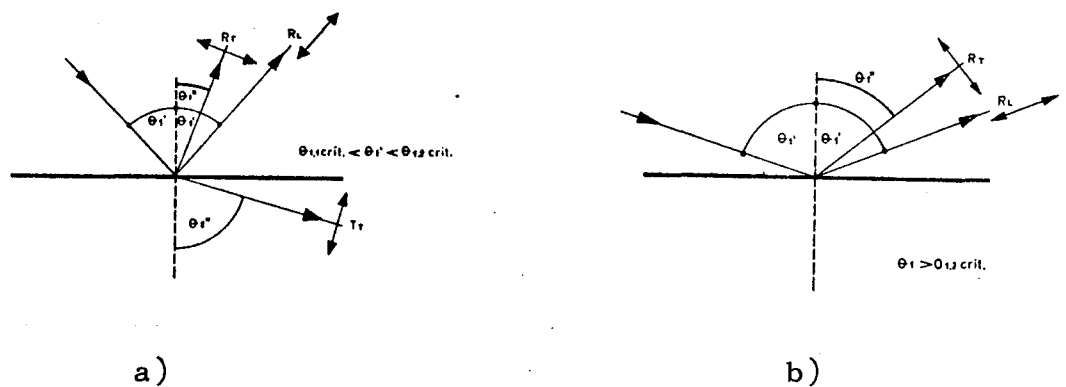


Figura 11 - a) Refracción del haz ultrasónico para ángulo de incidencia comprendido entre los dos ángulos críticos.
b) Reflexión para ángulo de incidencia mayor que el 2do. ángulo crítico.

En la Fig.12 se dan curvas que relacionan el ángulo de incidencia con el ángulo de transmisión para las interfaces plexiglass-acero y agua-aluminio.

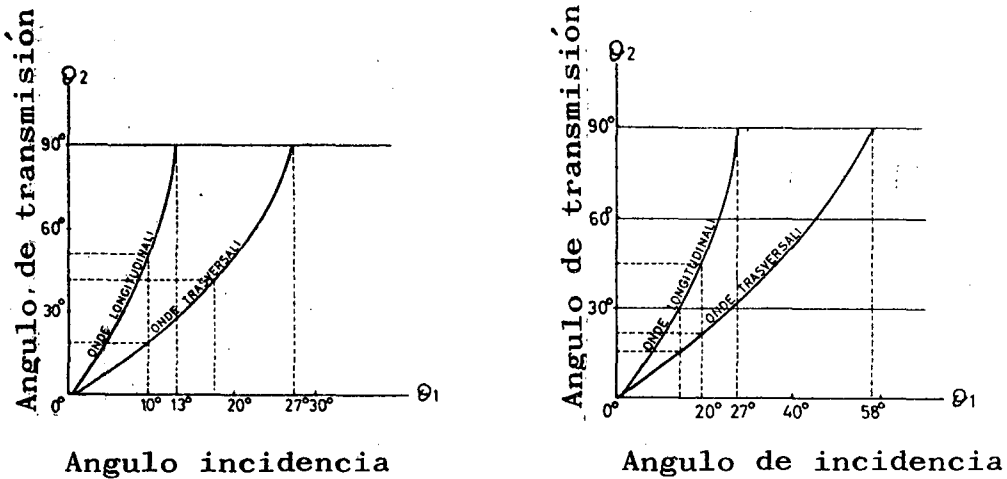


Figura 12 - Angulo de refracción en función del ángulo de incidencia.

a) Plexiglas-acero. b) Agua-aluminio.

2.5. Conversión de Modos de Propagación

Ya hemos visto que en un medio extendido la energía acústica se propaga en tres modos principales: como ondas longitudinales, transversales o su per ficia les. Cada modo de propagación presenta una velocidad característica para cada material.

Cuando un haz de ultrasonido incide con un ángulo distinto del normal, en la interfase entre dos materiales de diferentes impedancias acústicas, parte de la energía puede ser convertida en otros modos de propagación en la reflexión o refracción.

Un simple ejemplo de esta situación puede verse en la reflexión de un haz de ondas longitudinales incidente sobre una cara desde el interior de un bloque de acero, como se muestra en la figura 13. Dado que sólo una cantidad despreciable de energía es transmitida al aire la reflexión es considerada total, observándose no obstante que se producen dos haces reflejados.

Uno de ellos está constituido por ondas longitudinales y el otro por ondas transversales (Fig.13a). Es decir que en el caso del ejemplo parte de la energía incidente ha convertido su modo de propagación de onda longitudinal a transversal.

La energía que corresponde a cada uno de los modos de propagación no es la misma, dependiendo en alto grado del ángulo de incidencia del haz.

En la figura 13bis), se ha graficado la presión sonora que corresponde a cada modo de propagación del haz reflejado en función del ángulo de incidencia del haz. Se observa que entre 60° y 75° se tiene un mínimo para la onda longitudinal y un máximo para la onda transversal. En esta región se puede decir que hay una conversión prácticamente total del modo de propagación, provocando situaciones en las cuales pueden aparecer indicaciones falsas o de difícil interpretación.-

Un caso particularmente molesto se produce cuando el ángulo del haz incidente y el del haz reflejado suman 90° y encuentran, durante su trayectoria en la pieza un borde en escuadra. En la figura 13b) se ha representado la situación para el caso de un haz incidente de ondas longitudinales, y en la figura 13c), la misma situación para un haz incidente de ondas transversales. Estas situaciones pueden ocurrir durante la aplicación práctica del ensayo y dar lugar a indicaciones erróneas.

En acero los ángulos de incidencia correspondientes a estas situaciones pueden ser calculados como sigue:

$$\text{Condición de conversión total; } \theta_T + \theta_L = 90^\circ \quad (15)$$

$$\text{luego; } \sin \theta_L = \sin (90^\circ - \theta_T) = \cos \theta_T \quad (16)$$

de acuerdo a la ley de Snell;

$$\frac{V_T}{V_L} = \frac{\sin \theta_T}{\sin \theta_L} = \frac{\sin \theta_T}{\cos \theta_T} = \text{tg } \theta_T \quad (17)$$

reemplazando valores para el acero tenemos;

$$\text{tg } \theta_T = \frac{3230 \text{ m/s}}{5900 \text{ m/s}} = 0,548 \quad (18)$$

los ángulos buscados serán; $\theta_T = 28,7^\circ$ y $\theta_L = 61,3$

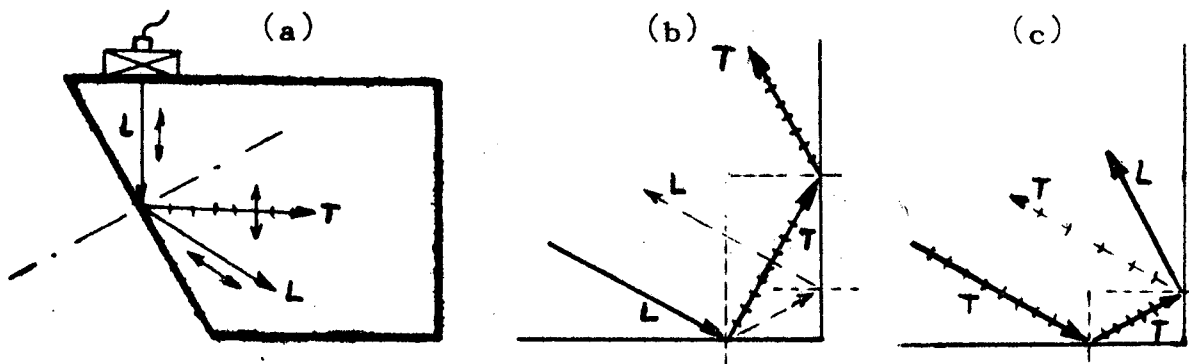


Fig. 13.- Modos de conversión

Estos casos tienen particular interés cuando se utilizan cabezales angulares de 60° (Fig.13b) y también cuando operando con haz de incidencia normal (ondas longitudinales) se encuentra una falla con orientación de 61° aproximadamente.

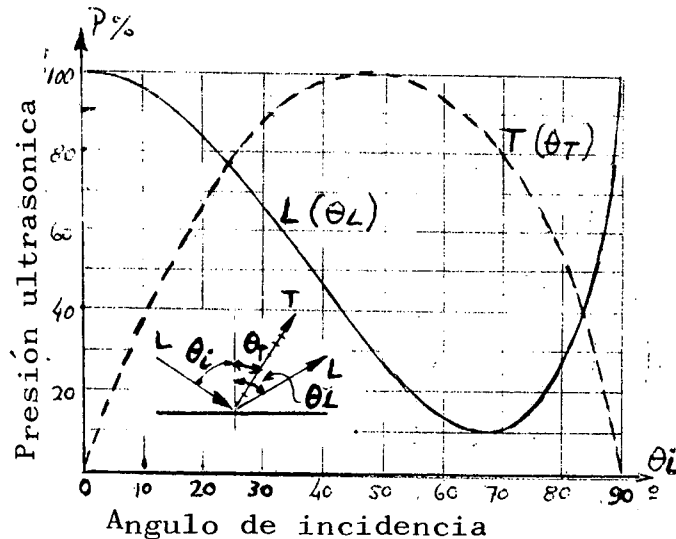


Fig.- 13 bis: Presión de las ondas longitudinales y transversales reflejadas, en función del ángulo de incidencia.
El máximo respectivo está tomado como 100% de presión

2.6. Formación del haz ultrasónico

En el ensayo por ultrasonidos la producción de energía ultrasónica se basa generalmente en el efecto piezoeléctrico.

En algunos cristales la compresión o la tracción en ciertas direcciones respecto de los ejes cristalográficos provoca la aparición de cargas eléctricas sobre las caras comprimidas o traccionadas. La energía mecánica aplicada al cristal mediante la acción de deformación, se transforma en parte en energía eléctrica que determina la aparición de cargas eléctricas y una diferencia de potencial entre las caras involucradas.

Este fenómeno llamado efecto piezoeléctrico es reversible, vale decir que aplicando sobre las dos caras del cristal un potencial eléctrico se induce una deformación en el cristal con la consiguiente transformación de energía eléctrica en energía mecánica. El cristal así excitado vibra mecánicamente con frecuencia que depende de su espesor.

Pastillas de ciertos materiales cerámicos del tipo del titanato de bario o zirconato de plomo, previamente polarizados con tensión continua exhiben el mismo comportamiento que los cristales piezoeléctricos y sometidos a un cam

po eléctrico variable vibran mecánicamente con frecuencia propia que depende de su composición y del espesor.

Este comportamiento debido a la presencia de cargas orientables con un campo eléctrico externo se llama ferroelectricidad debido al comportamiento similar al de un material ferromagnético bajo un campo magnético.

Las pastillas ferroeléctricas son de utilización corriente para la preparación de sondas ultrasónicas.

En la formación del haz ultrasónico el cristal piezoeléctrico o la pastilla ferroeléctrica pueden ser considerados como constituidos por un conjunto de numerosos cristales elementales que excitados simultáneamente brindan cada uno su propio aporte. La intensidad de la presión asociada al haz ultrasónico y por lo tanto la presión en un punto dado es la resultante en amplitud y fase de las contribuciones de los múltiples cristales elementales. El valor de la presión asociada al haz está regulado por el principio de Huygens.

En la Fig.14 se da la representación de la distribución de la presión en un haz ultrasónico, mediante la holografía óptica. En el holograma se puede observar la forma del haz, las zonas de mayor presión son más blancas y las zonas negras corresponden a presión ultrasónica nula.

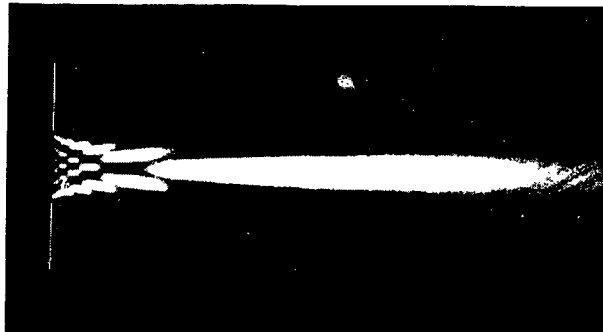


Figura 14 - Holograma óptico de la distribución de la presión ultrasónica en el haz.

En la Fig.15 en cambio se da la curva de los valores de presión a lo largo del eje del haz a medida que se aleja del cristal emisor.

En ambas figuras se pueden distinguir claramente dos zonas en el haz. Una próxima al cristal llamada "campo cercano" en la cual hay grandes variaciones de presión de un punto a otro, oscilando los valores entre cero y un

máximo, con una configuración que corresponde aproximadamente a un cilindro de presión. A continuación, a partir de una distancia:

$$L_0 = \frac{d^2}{4\lambda} \quad (19)$$

donde: d = diámetro de la pastilla

λ = longitud de onda

que corresponde a la profundidad del "campo cercano" (near field) el haz adquiere una forma tronco cónica divergente en el cual la presión disminuye gradualmente del centro hacia los bordes y a medida que se aleja del emisor.

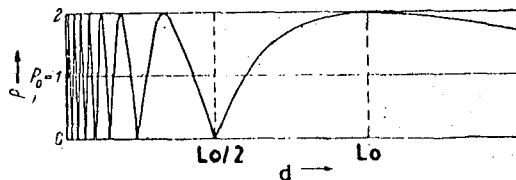


Figura 15 - Distribución de la presión en una pieza metálica, a lo largo del eje del haz ultrasónico en función de la distancia a la superficie emisora.

El ángulo de semidivergencia γ que conjuntamente con el valor L_0 del "campo cercano" caracteriza al haz ultrasónico está dado por las relaciones:

$$\text{sen } \gamma = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (20)$$

$$\text{tang } \gamma = \frac{d}{4 L_0} \quad (21)$$

En la Fig.16 se muestra la determinación gráfica de la configuración del haz.

2.7. Atenuación del haz ultrasónico

La intensidad del haz ultrasónico en la zona lejana o haz cónico (ver Fig.15) disminuye con la ley del cuadrado de la distancia que es aplicable al efecto de la propagación cónica. Al diverger el haz la intensidad del mismo, o lo que es lo mismo la presión ultrasónica, disminuye en razón inversa al cuadrado de la distancia medida al punto de entrada del haz ultrasónico en el material considerado.

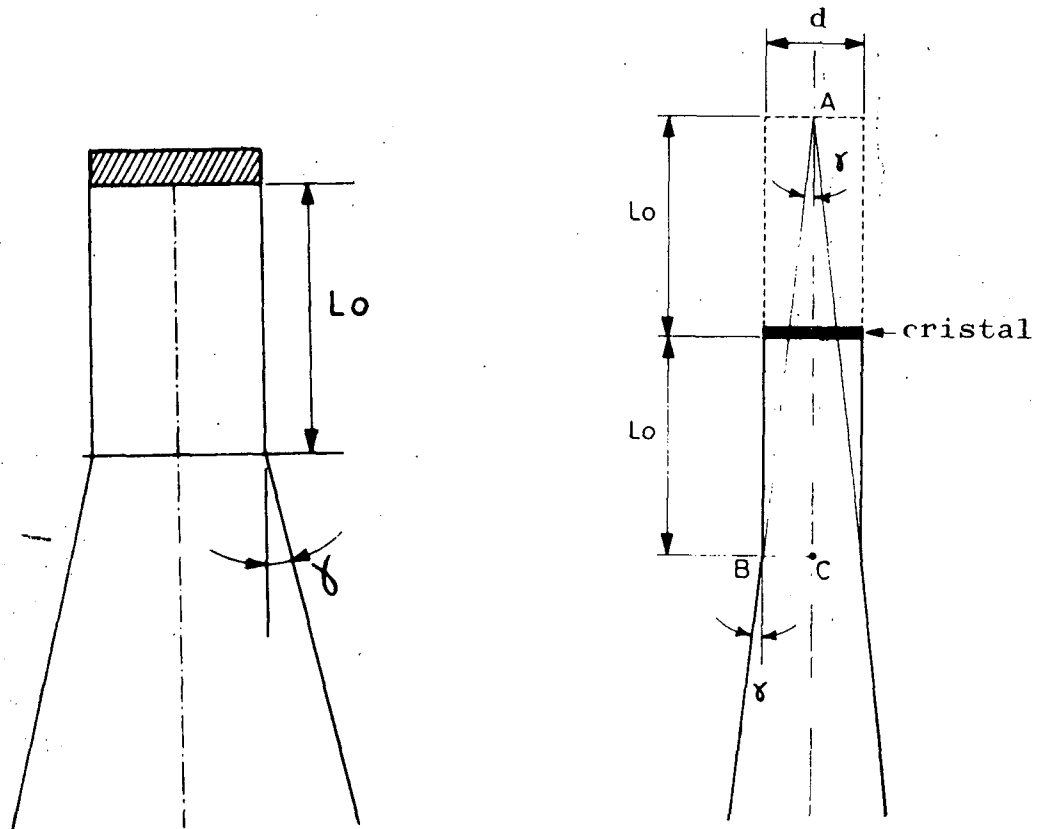


Figura 16 - Determinación Gráfica del haz ultrasónico.

2.8. Absorción de la energía ultrasónica

Además de la atenuación debida a la expansión cónica del haz, en la propagación del mismo la energía inicial es gradualmente absorbida por la resistencia mecánica del material. La absorción sigue una ley exponencial del tipo:

$$I_x = I_0 e^{-kx} \quad (22)$$

donde I_0 es la intensidad inicial, I_x la intensidad al cabo de una distancia x , y k el coeficiente de absorción.

El coeficiente de absorción resulta directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, inversamente proporcional a la densidad del medio y al cubo de la velocidad de propagación.

Los líquidos presentan el menor coeficiente de absorción, aumentando progresivamente en el aluminio, el acero, el latón y el bronce.

La utilización de una baja frecuencia (mayor longitud de onda) implica una menor absorción del haz ultrasónico pero se disminuye la sensibilidad de detección.

2.9. Dispersión del haz ultrasónico

En algunos materiales que presentan estructura cristalina gruesa, segregaciones o presencia de fases separadas (tales como la fundición gris, latones y otras aleaciones) se presenta el fenómeno de la dispersión del haz ultrasónico, lo que produce una pérdida notable de energía ultrasónica ya que gran parte de la misma es reflejada por los cristales o interfases del material en las más diversas direcciones que corresponden a las distintas orientaciones de los infinitos planos de reflexión que se presentan en el interior del material. Este fenómeno puede considerarse análogo a la dispersión de un haz luminoso en la niebla.

Para disminuir este efecto se debe trabajar con la frecuencia más baja posible.

3. SONDAS ULTRASONICAS

En el punto 2.6. hemos visto brevemente el principio de generación de ondas ultrasónicas mediante el uso de materiales piezoeléctricos y ferroeléctricos.

Para la construcción de palpadores o sondas para ensayo ultrasónico se utiliza generalmente el titanato de bario en forma de pastillas sinterizadas policristalinas polarizadas, cuando se trata de generar ondas ultrasónicas con frecuencias inferiores a los 10 MHz. Este material no es disuelto por el agua y resulta particularmente indicado para obtener haces ultrasónicos de suficiente energía, si bien no puede operar con temperaturas superiores a los 80-100°C salvo que se disponga de un sistema especial de refrigeración de la sonda.

Los cristales de cuarzo son utilizados normalmente para la construcción de sondas para generar haces ultrasónicos de elevada frecuencia, superior a los 10 MHz. Son también apropiados para sondas que deben trabajar a alta temperatura ya que su punto de Curie (temperatura a la cual el cristal pierde sus propiedades piezoeléctricas) es de casi 550°C.

3.1. Características principales

Las características de una sonda ultrasónica típica para frecuencia de 1 MHz se dan en la tabla II.

Se pueden calcular los valores de dichas características para otras frecuencias aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Espesor} \quad t = t_1 / f \quad (23)$$

$$\text{Capacidad} \quad c = c_1 \times f \times A \quad (24)$$

en las cuales: t es el espesor del cristal y t_1 es el espesor del cristal para frecuencia de 1 MHz.

c es la capacidad en μuf y c_1 es la capacidad unitaria en $\mu\text{uf}/\text{in}^2$.

f es la frecuencia en MHz y A el área del cristal en pulgadas cuadradas.

Material	Onda	Espesor $f = 1 \text{ Mc}$	Capacidad eléctrica area = 1 cm^2
Cuarzo-corte X	Longitud.	2,860 mm	1,39 uuF
Cuarzo-corte Y	Transvers.	2,1336 mm	2,17 uuF
Sulfato de Litio	Longitud.	2,54 mm	3,41 uuF
Titanato cerámico	Longitud.	2,54 mm	310,07 uuF

Tabla II

Entre las características de interés de una sonda ultrasónica se deben considerar además la *Constante de Actividad*, el *Poder de Resolución* y la *Sensibilidad*.

La constante de actividad indica las sensibilidades aproximadas de los elementos como transmisores acústicos (S_T) y como receptores (S_R) cuando se los compara con un cristal de cuarzo tallado según su eje X. El valor absoluto de estas magnitudes depende de la carga mecánica en las caras anterior y frontal del transductor (cristal o pastilla cerámica), de la naturaleza de la señal eléctrica aplicada y de las impedancias eléctricas efectivas involucradas.

El poder de resolución de una sonda es directamente proporcional a su ancho

de banda (Δf) que es fundamentalmente una función de la amortiguación producida por la carga mecánica en sus caras.

Inversamente, el número de ciclos requeridos para que la vibración del cristal alcance su plena amplitud cuando se excita con una tensión constante de corriente alterna, está dado por su factor de acoplamiento mecánico, Q , (la inversa del ancho de banda, expresada en porcentaje).

En la tabla III se dan valores típicos de Δf y Q , determinados experimentalmente para frecuencia de 1 MHz en sondas ultrasónicas de inmersión (con una carga de agua en la cara frontal).

Transductor	Temp. de Curie	Respaldo	Frecuen. (1 mm)	Δf (MHz)	Z ($10^6 \text{ g/cm}^2 \text{ s}$)	Q
Cuarzo	575 °C	Aire	2,88MHz	0,06	15,3	17
Cuarzo		Fenólico		0,16		6
Cuarzo		Epoxy/carga		0,25		4
Titanato de Ba	120 °C	Fenólico	2,2 MHz	0,1	35	10
Titanato de Ba		Epoxy/carga		0,25		4
Sulfato de Li	75 °C	Epoxy/carga	2,36MHz	0,3	11,2	3

Tabla III

Ya que la sensibilidad de un sistema dado aumenta directamente con el valor de Q de sus componentes (sonda, generador de pulsos y amplificador eléctrico) resulta deseable llegar a una solución de compromiso para obtener el óptimo producto sensibilidad-resolución.

Valores de Q entre 3 y 10 son típicos en equipos de ultrasonido para detección de defectos por el método de pulsos de onda. Para un dado valor de Q la resolución aumenta directamente con la frecuencia del sistema.

3.2. Requerimientos adicionales de diseño

En el diseño de sondas ultrasónicas de uso práctico se deben tener en cuenta los requerimientos adicionales según el tipo de aplicación previsto.

Entre ellos tenemos:

- 1) Mecánicos : Area de contacto, resistencia al desgaste, hermeticidad al agua y tipo de conectores.
- 2) Eléctricos : Tensión, forma de pulso, capacidad y puesta a tierra.
- 3) Acústicos : Nivel de ruido, divergencia del haz y recubrimiento de las caras.

3.3. Detalles constructivos

En la Fig.17 se dan detalles constructivos de los cuatro tipos principales de sondas ultrasónicas.

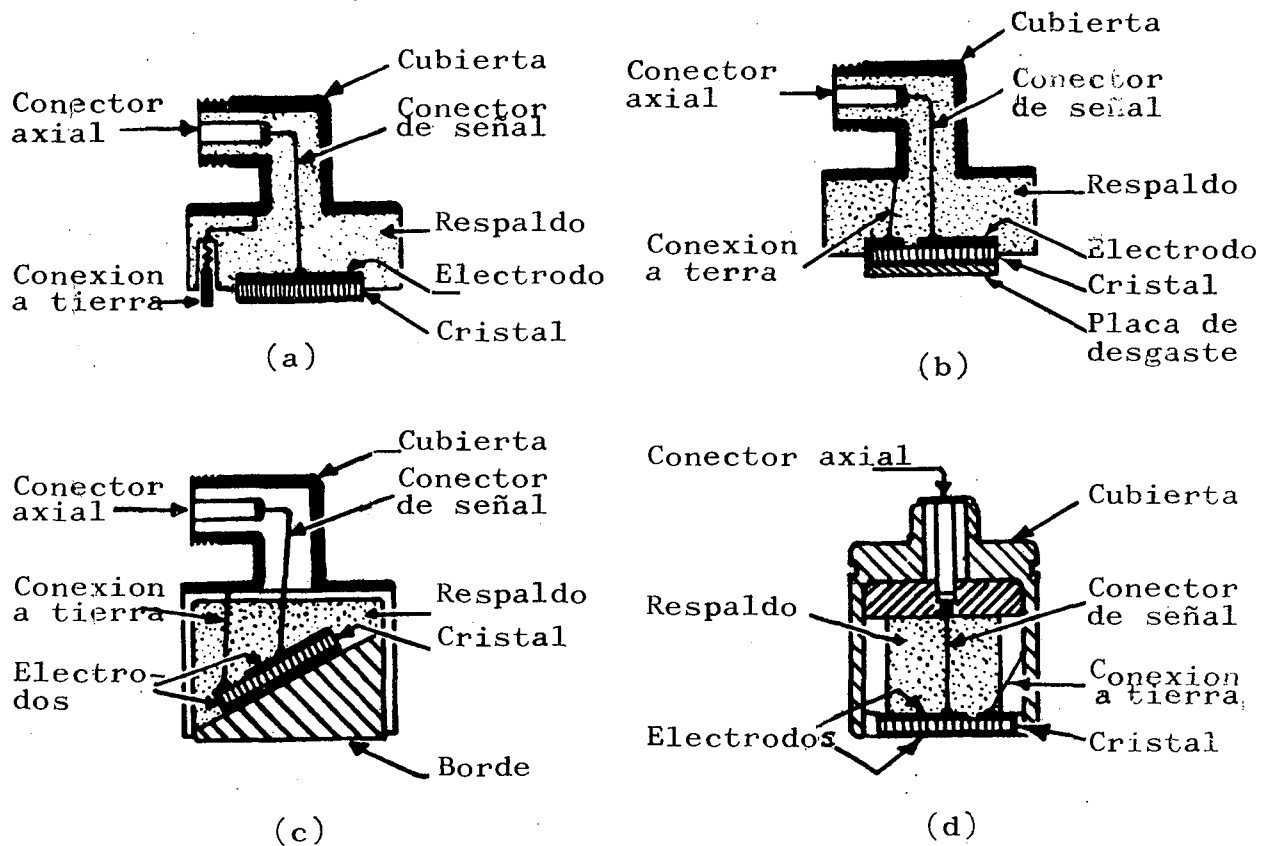


Figura 17 - Detalles constructivos de distintos tipos de palpadores ultrasónicos.

Las sondas para usar en técnicas de contacto con haz de incidencia normal pueden ser de dos tipos: con cara expuesta, Fig.17a), o con cubierta de desgaste, Fig.17b). Las primeras tienen una de las caras expuestas en contacto con la pieza que se examina. Estas sondas son usadas en el rango de frecuencia entre 0,5 y 10 MHz cuando se trate de examinar piezas con superficies razonablemente planas y eléctricamente conductoras. Variaciones típicas consisten en cristales montados sobre resortes y cristales curvos que se adaptan a la superficie a examinar.

En las sondas de contacto con haz de incidencia normal provistas de cubierta de desgaste se emplean películas finas para proteger el cristal y el electrodo frontal que provee la puesta a tierra. Esta cubierta puede ser de cuarzo, metal, plástico o goma. Estas sondas se utilizan en superficies rugosas y en no conductoras.

Las sondas de contacto con haz de incidencia angular, ó simplemente sondas angulares de contacto, Fig.17c) usan una cuña de plástico entre el cristal y la pieza a examinar a fin de lograr que el haz ultrasónico incida en la misma con el ángulo previsto. Para la construcción de esta cuña se han empleado distintos tipos de plástico pero el más apropiado resulta ser el plástico acrílico. La mayoría de las sondas comerciales de este tipo operan entre 1 y 5 MHz. Los tipos especiales incluyen sondas con cuña con cara de contacto curvada para inspección de tubos y sondas con ángulo variable para examen de ejes.

Las sondas de inmersión, Fig.17d), se utilizan separadas de la pieza en examen utilizando un acoplante en considerable espesor. El montaje del cristal debe ser hermético al agua y en la cara frontal debe disponerse de un electrodo a tierra. Estas sondas son provistas comercialmente con frecuencias entre 0,2 y 25 MHz.

Frecuencia (MHz)	Espesor (pulg.)	Diametro del area activa (en pulgadas)			
		Tipo			
		Contacto	Cubierto	Angular	Inmersión
0,2	0,5	-	-	-	3
0,5	0,2	1 1/8, 2	-	1x1	1 1/8
1,0	0,1	3/4, 1 1/8	1 1/8	1x1	3/4, 1 1/8
2,25	0,05	3/4, 1 1/8	3/4, 1 1/8	1/2 x 1/2, 1x1	3/4, 1 1/8
5,0	0,02	3/4, 1 1/8	3/4	1/2 x 1/2, 1x1	3/8, 3/4, 1 1/8
10	0,01	3/4	-	-	3/8, 3/4
15	0,007	-	-	-	3/8
20	0,006	-	-	-	3/8
25	0,005	-	-	-	3/8

Tabla IV.- Frecuencias y tamaños de los palpadores de mas uso

4. ACOPLAMIENTO ULTRASONICO ENTRE SONDA Y ESPECIMEN A ENSAYAR

El aire y en general los gases atenúan fuertemente la energía ultrasónica, por lo tanto para lograr la transferencia de energía de la sonda a la pieza en examen es necesario interponer un medio fluído que desplace al aire y realice el llamado acoplamiento ultrasónico.

El medio fluido está generalmente constituido por agua común o emulsionada, solución acuosa de carbonilmetilcelulosa. Esta última tiene la ventaja de una elevada viscosidad de no pegarse y de evitar la oxidación de la superficie por formar, al secarse, un film que puede ser retirado con una espátula. Son también de uso generalizado las grasas y aceites minerales de viscosidad adecuada según el tipo de superficie y fluidos en base a siliconas en el caso de examen de piezas a elevada temperatura, hasta 400°C.

4.1. Influencia del medio de acoplamiento

Mientras el medio de acoplamiento mantiene su espesor por debajo de $1/4$ de la longitud de onda del haz ultrasónico que se transmite no produce ninguna perturbación sensible en la propagación del ultrasonido. Esto ocurre normalmente en todos los ensayos manuales efectuados sobre superficies lisas.

Cuando el espesor del medio de acoplamiento es mayor que el largo de onda del haz se verifican numerosas reflexiones en el espesor de acoplamiento con la consiguiente disminución de la energía transmitida y con aumento considerable de la zona muerta. Esta situación puede encontrarse en el examen de piezas con superficie muy corroída. Los inconvenientes derivados de esta situación sólo pueden ser observados mediante una adecuada preparación de la superficie a examinar; el tiempo que se pierde en esta operación se recupera ampliamente en el examen mismo que se torna más rápido y preciso.

5. TÉCNICAS DE ENSAYO

Las técnicas de ensayo que utilizan sondas ultrasónicas con frecuencia de vibración fija son fundamentalmente dos: por reflexión (pulso-eco) y por transmisión. Ambas técnicas a su vez pueden ser aplicadas mediante inmersión o por contacto.

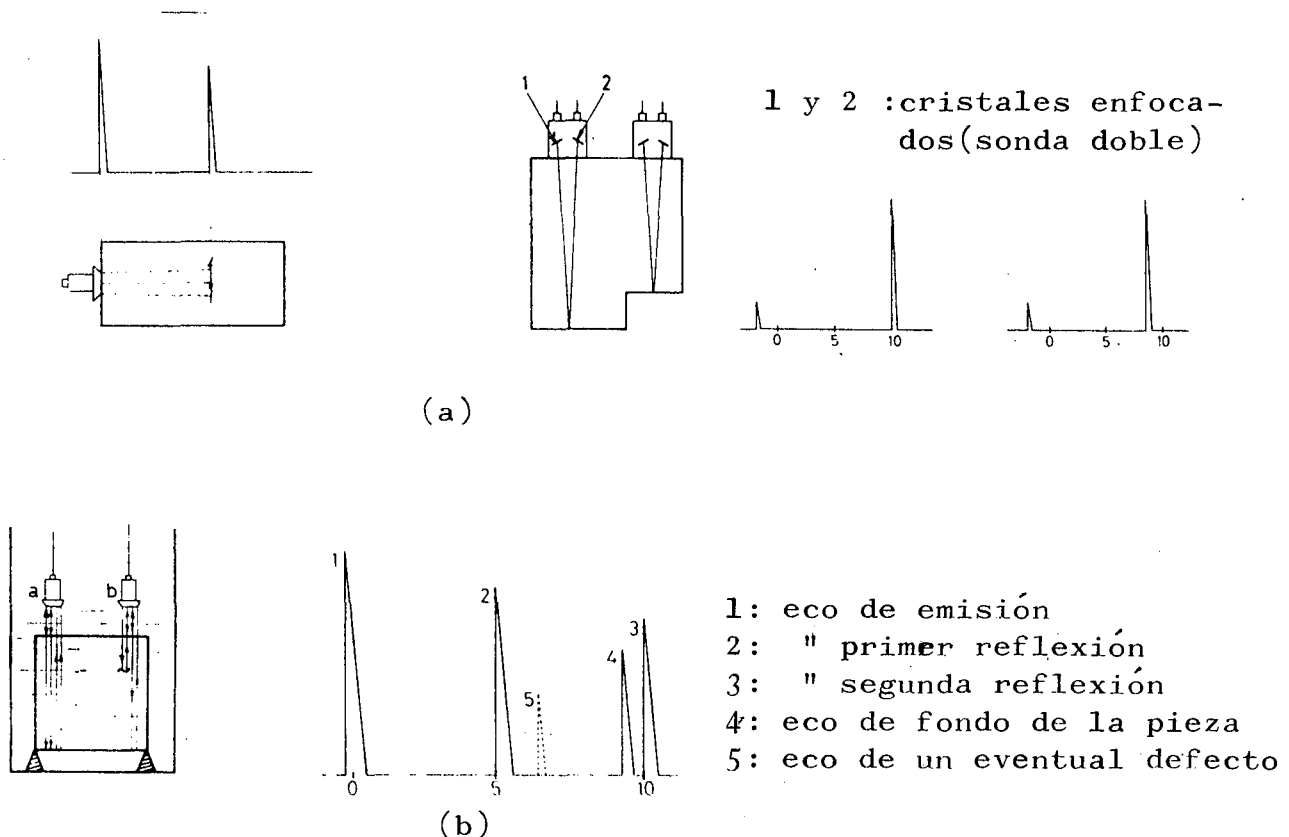
Otra técnica de aplicación más limitada es la de resonancia, en la cual la sonda no trabaja a frecuencia fija.

5.1. Técnicas por reflexión

Esta técnica está basada en el principio de la reflexión del haz ultrasónico. La energía de excitación ultrasónica es aplicada al cristal en forma de pulsos cortos, repetidos con una frecuencia que permite al sistema detectar entre pulso y pulso la energía ultrasónica reflejada en cualquier interfase existente en el interior del material o en las superficies límites del mismo. Por esta razón se la designa técnica por pulso-eco.

En la aplicación de la técnica por reflexión se utilizan sondas simples, angulares o normales, que actúan como emisoras y detectoras de energía ultrasónica; sondas con doble cristal, uno con función de emisor y el otro como detector o bien dos sondas, una de ellas como emisoras y la otra como receptora, posicionadas de manera tal que esta última pueda recibir las eventuales reflexiones del haz emitido por la primera.

En la figura 18a) se dan las disposiciones típicas correspondientes a esta técnica cuando se las utiliza por contacto y en la figura 18b) la disposición correspondiente a la misma técnica en caso de usar la inmersión.



Fif.18.- Ensayo por reflexión. (a)técnicas por contacto;
(b) técnica por inmersión.-

Esta técnica de ensayo permite además de un relevamiento selectivo de las discontinuidades su evaluación y localización dentro del material. La ubicación del eco en las abscisas del osciloscopio da la información de la distancia a la cual se encuentra la discontinuidad, mientras que la amplitud y la forma del eco da información sobre la dimensión y característica del defecto.

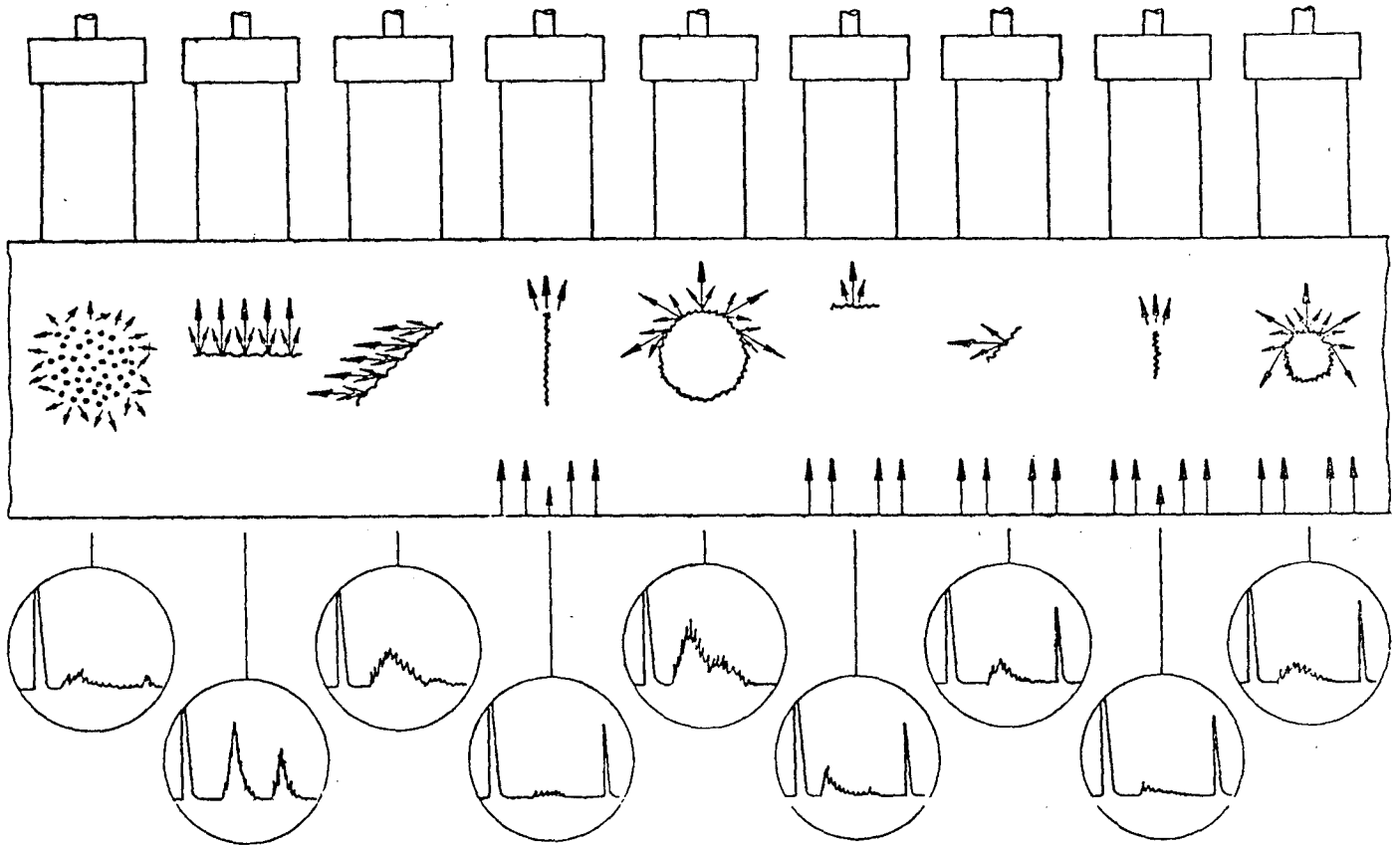


Figura 19 - Esquema de las formas de reflexión para defectos de distinto tipo y geometría y sus correspondientes presentaciones en la pantalla del osciloscopio.

5.2. Técnica de ensayo por transmisión

En el examen ultrasónico realizado por la técnica de transmisión se utilizan dos sondas vinculadas mecánicamente para asegurar que ambas se mantienen enfocadas durante el desplazamiento sobre la pieza. Una de las sondas actúa como emisora de energía ultrasónica y la otra como detector del haz transmitido a través del material que se examina.

La presencia de una discontinuidad es revelada por una disminución de la energía ultrasónica que llega a la sonda que actúa como detector. Si la discontinuidad es suficientemente amplia reflejará la totalidad del haz ultrasónico y la señal en la sonda detectora se anula.

La técnica por transmisión exige un acoplamiento ultrasónico y mecánico constante entre sondas ya que variaciones en el acoplamiento producirán variaciones en la energía transmitida a través de la pieza de manera análoga a las que puede producir una discontinuidad, produciendo así indicaciones erróneas.

Por la razón expuesta esta técnica se utiliza únicamente por inmersión. En la Fig.20 se da la disposición típica en este tipo de ensayos.

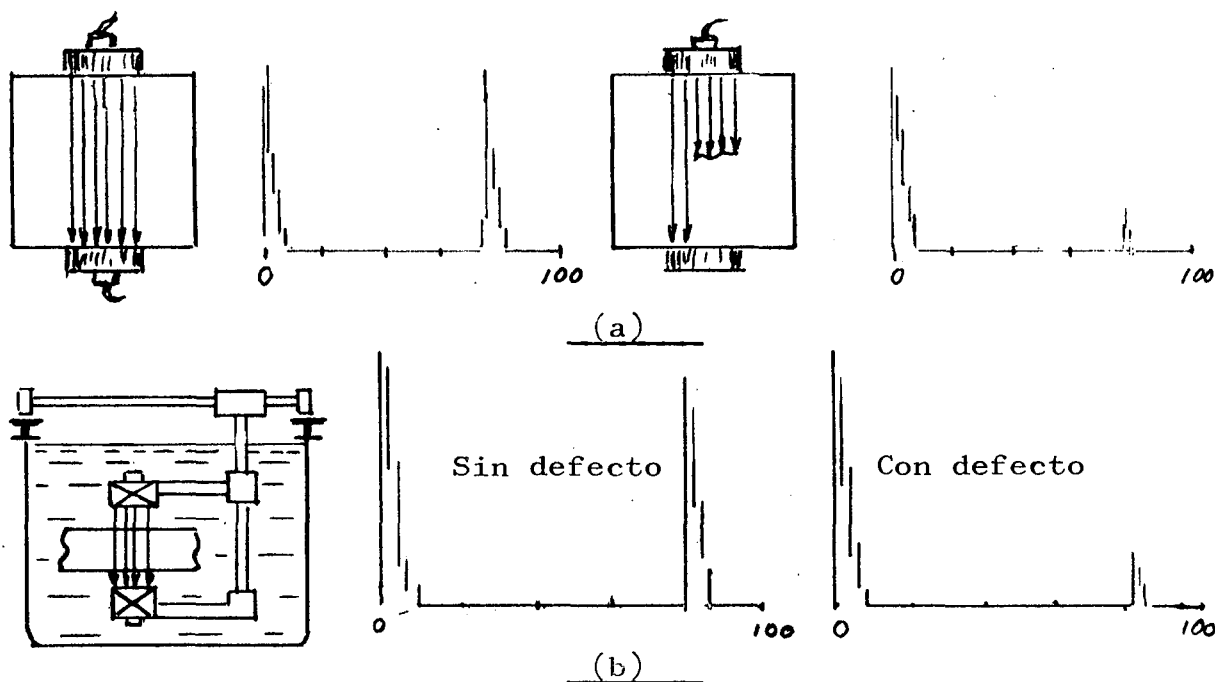
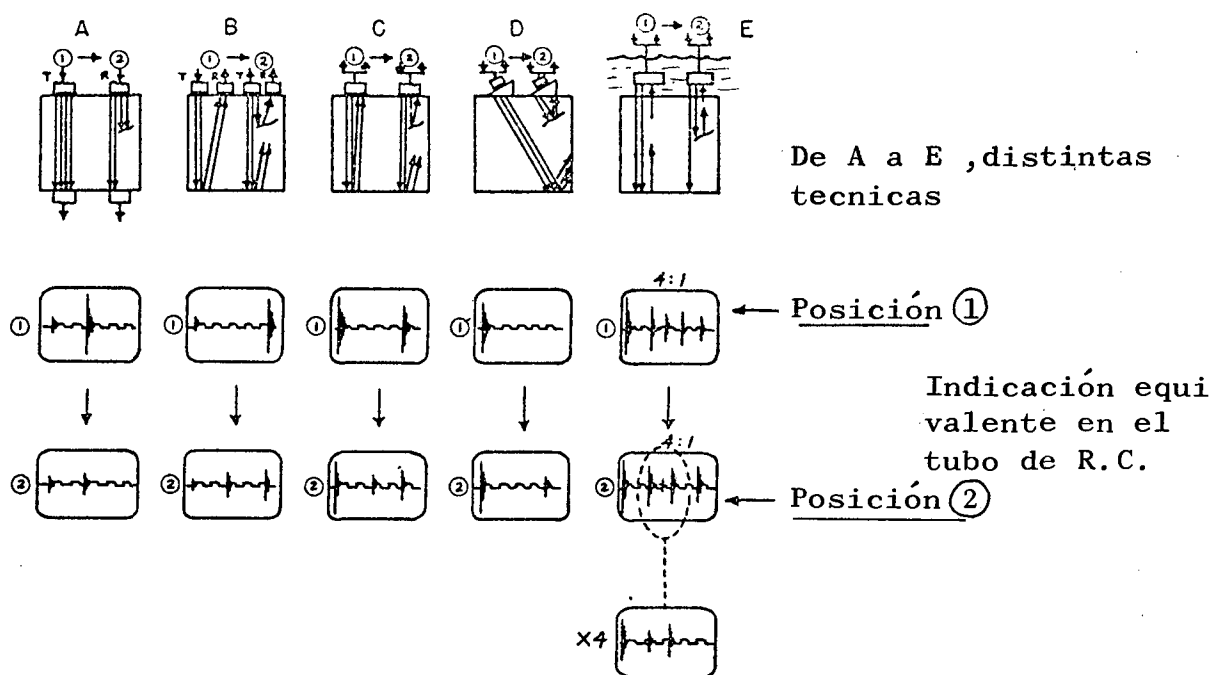


Fig.20: Ensayo por transmisión. (a) Contacto. (b) Inmersión

La determinación de defectos mediante la técnica de transmisión es menos sensible y menos selectiva que la realizada por la técnica de pulso-eco ya que son más fáciles de revelar pequeños ecos provenientes de reflexiones en discontinuidades de mínima extensión que pequeñas variaciones de intensidad sobre una señal de amplitud considerable. Por otra parte esta técnica no da información sobre la profundidad a que se encuentra la discontinuidad que provoca la disminución de la señal transmitida. Su ventaja principal reside en que puede ser aplicada aún para espesores mínimos en la pieza a examinar.

Las aplicaciones más interesantes de estas técnicas son en el examen de materiales con elevado coeficiente de absorción de la energía ultrasónica (cerámicos, plásticos, refractarios, etc.), el control de adherencia metálica entre dos superficies planas (colaminación por ejemplo) y evaluación de variaciones de estructura del material capaces de modificar la absorción del haz ultrasónico.



- A: Transmisión ,por contacto
- B: Reflexión,por contacto,doble sonda
- C: Reflexión,por contacto.Sonda normal,emisor-receptor
- D: Reflexión,por contacto.Sonda angular,emisor-receptor
- E: Reflexión ,por inmersión

Fig.21.- Técnicas básicas de ensayo para detección de defectos

5.3. Ensayo por resonancia

La técnica de ensayo por resonancia utiliza haz continuo de ondas longitudinales (compresión) transmitido en material plano desde una de las caras. La frecuencia, es decir la longitud de onda, es variada en forma manual o automática hasta que una onda es reflejada dos veces y deja la primera cara o superficie del material en fase con otra onda que ingresa. Se instalan así ondas estacionarias en la placa obligándola a resonar o vibrar con mayor amplitud. Si el espesor es de media longitud de onda la placa entra en resonancia. La resonancia es indicada por su efecto de carga sobre el transductor ultrasónico acoplado al material bajo ensayo.

Esta indicación puede ser visualizada en la pantalla del equipo por una raya vertical, cuya posición corresponde a la frecuencia de resonancia (orden de la armónica) y su altura a la energía puesta en juego por el efecto de resonancia.-

Durante la medición de espesores en chapas, por el método de resonancia, también pueden detectarse discontinuidades si adopta una disposición adecuada.

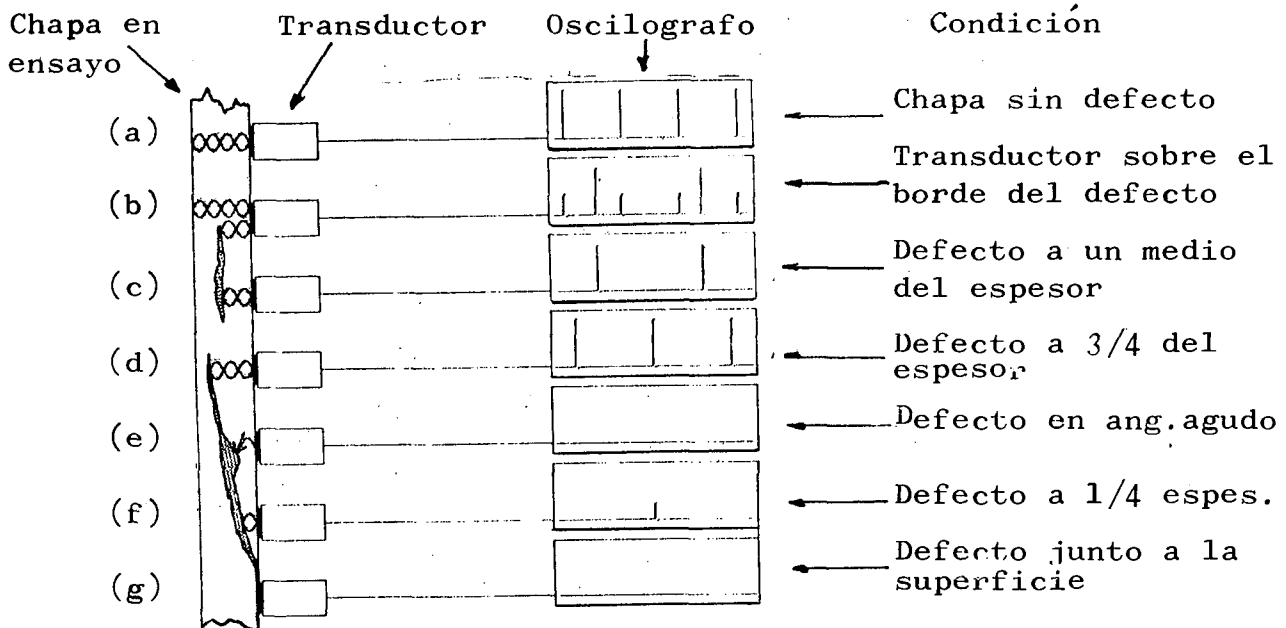


Fig.22: Examen de chapas por resonancia de ultrasonidos.-

En efecto, el equipo puede ser ajustado de manera que en la pantalla del oscilograma se tengan dos o tres líneas, correspondientes a la resonancia en dos otros modos (1^{era} , 2^{a} , 3^{a} armónica), con el espesor íntegro, como puede observarse en la figura 22a).

La presencia de defectos (discontinuidades) quedará evidenciada por un desplazamiento en la posición de las indicaciones y/o la desaparición de todas o algunas de ellas como se indica en la figura 22 de b) a g). Además, como se muestra en la figura 22b), el comienzo de una discontinuidad puede ser ubicado ya que parte del haz cubrirá el espesor íntegro y parte el espesor que corresponde a la profundidad de la discontinuidad. En esas condiciones se verán dos series de rayas de resonancia que tendrán generalmente distintas alturas, relacionadas según el área de discontinuidad que cubre el haz de US

La técnica de resonancia fue usada inicialmente en interferómetros para medir velocidad del sonido en gases y líquidos. Actualmente es usada ampliamente para medir espesores desde un solo lado del material. Se aplica también para detectar discontinuidades laminares (laminares, fallas de laminación etc.) en chapas.

El rango de frecuencias utilizado es de 0,75 a 20 MHz, pudiendo medirse espesores entre 0,5 y 100 mm.-

6.- EQUIPOS PARA EL ENSAYO ULTRASONICO

Teniendo en cuenta los parámetros que indican, los equipos de ultrasonido usados en la inspección de materiales pueden ser agrupados en tres categorías:

- 1) Con indicación de energía transmitida únicamente.
- 2) Con indicación de la carga producida por la pieza sobre el transductor.
- 3) Con indicación de la amplitud y tiempo de tránsito de la energía transmitida o reflejada.

Los equipos de tipo 1) son simples de uso restringido. Su esquema básico se da en la figura 23.

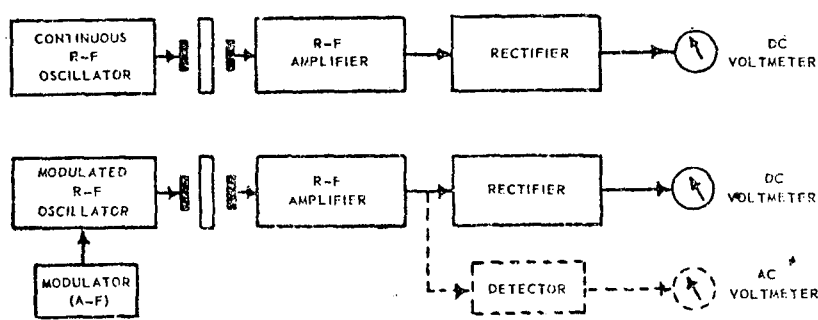


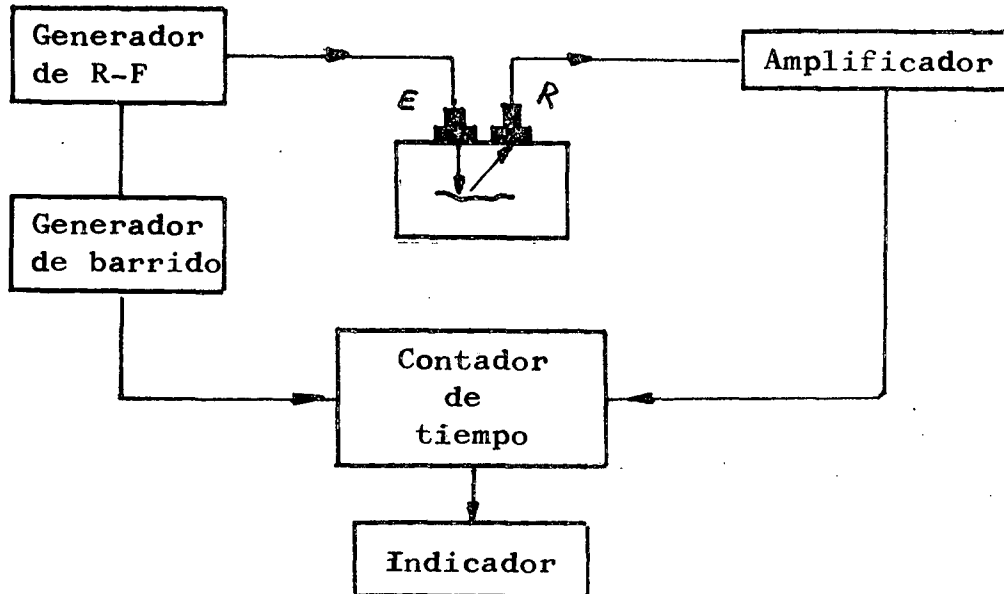
Figura 23 - Circuito esquemático de equipos de ultrasonido con indicación de energía transmitida únicamente.

Los equipos del tipo 2) son usados generalmente para medición de espesores por la técnica de resonancia y su esquema y principio de operación se muestra en el punto 8.3.2.↔

De uso más generalizado, principalmente para la detección de defectos, son los equipos que corresponden al tipo 3). Estos equipos son utilizados para aplicar las técnicas de ensayo que usan indicación de amplitud y tiempo de tránsito (fig.24). Estas técnicas involucran la medición simultánea de dos parámetros:

- 1) la amplitud de señal obtenida de cualquier discontinuidad interna.
- 2) el tiempo empleado por el haz ultrasónico para recorrer la distancia entre la superficie de entrada del mismo y la superficie de la discontinuidad que lo refleja.

Fig.24: Circuito básico de un equipo con indicación de amplitud y tiempo de tránsito



Dentro de este tipo general existen variantes, principalmente, en lo referido a la forma o formas de presentar las indicaciones.

De acuerdo a esto último tenemos:

- Equipos con presentación en tubo de rayos catódicos con indicación de posición del defecto y amplitud de señal de defecto. Se les llama de barrido A (A-Scanning). (Fig.25)
- Equipos con presentación en tubo de rayos catódicos con indicación de profundidad del defecto y distribución de los defectos en el plano transversal de la pieza. Barrido B (B-Scanning). Fig.28.
- Equipos con presentación en tubo de rayos catódicos con indicación de forma y distribución de los defectos en el plano de la inspección. Barrido C (C-Scanning). Fig.29.
- Equipos con sistema de compuertas. Dan señal eléctrica, alarma audible, accionan marcadores, producen fascículos o registros según el requerimiento fijado por la especificación de la inspección.

6.1. Equipos de Pulso-Tiempo con Barrido A

En el ensayo volumétrico de materiales para la detección de defectos, ya sea en control de calidad o en inspecciones de mantenimiento el tipo de equipo que se utiliza es casi universalmente el de pulso-tiempo con presentación de la indicación en Barrido A.

El circuito esquemático de este tipo se puede observar en la Fig.25.

El principio de funcionamiento es el siguiente:

Un *oscilador*(1) es el encargado de activar al *generador de barrido*(2) y al *generador de pulsos*(3). El oscilador es el que genera la frecuencia de recepción de los pulsos, la que puede ser variada por medio de una llave *selecc*
tora de frecuencias(4).

El generador de barrido, mediante señal diente de sierra produce la tensión que se aplica a las placas de deflexión horizontal del *tubo de rayos catódicos*(5). De esta forma el haz de electrones barre la pantalla a velocidad constante que depende de la inclinación del diente de sierra. Cuanto más suave es la pendiente de la rampa del diente de sierra más lento es el desplazamiento del haz sobre la pantalla. Modificando la pendiente se puede entonces seleccionar la velocidad de barrido. Este control en la mayoría de los equipos se efectúa mediante una llave de puntos indicada con "Rango" (6) que efectúa la regulación gruesa. Por ejemplo: una posición equivale al tiempo en que el ultrasonido recorre 100 mm. en el material y otra posición el tiempo necesario para recorrer 250 mm. En el primer caso el ancho de escala corresponde a 100 mm y en el segundo a 250 mm. Pero además de este control, que podemos llamar grueso, existe un control fino para modificar la velocidad de barrido de acuerdo con las variaciones de la velocidad del ultrasonido en distintos materiales, por esta razón a este control, que es continuo, se lo llama "Materiales"(6).

El generador de pulsos produce los pulsos eléctricos de muy corta duración y de una tensión de pico de algunos kilovolts que se aplican al cristal pieza eléctrico. En el momento en que el cristal recibe el pulso la señal también es transmitida a las placas de deflexión vertical del tubo de rayos catódicos produciéndose en la pantalla un impulso vertical que se llama "eco de emisión" y que se toma como origen para interpretar el ensayo. Al ser excitado el cristal vibra mecánicamente con su propia frecuencia originando el haz de ondas ultrasónicas (también en forma de pulso de corta duración) que se transmite a través del material que se ensaya, a velocidad constante.

Al llegar a una superficie límite puede ser recibido por otro cristal que actúa como "detector" o bien reflejarse y volver al mismo cristal que la originó y ahora la detecta actuando en forma pasiva. En ambos casos al reci-

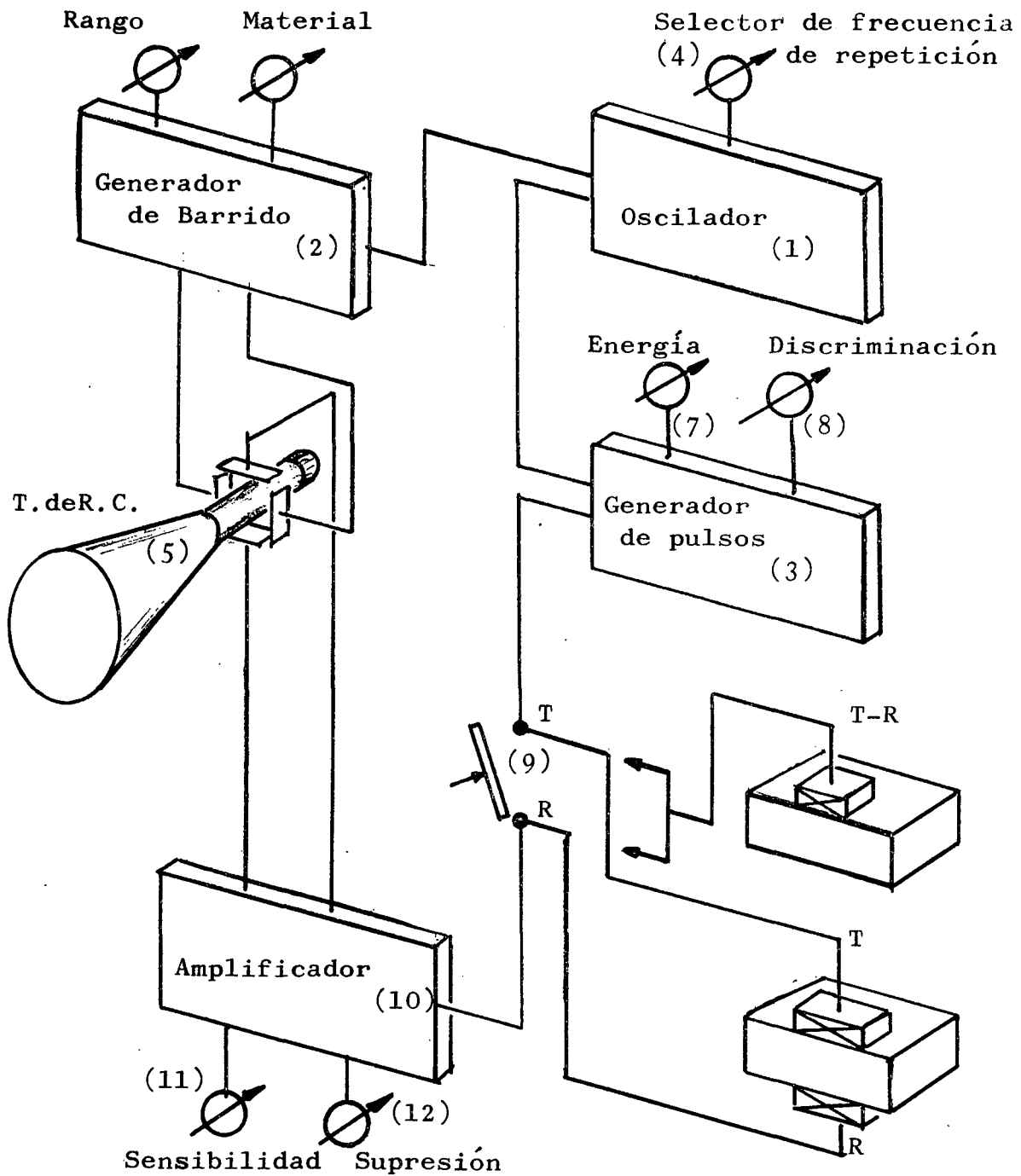


Fig.25 : Circuito esquemático de un equipo Pulso-Tiempo con presentación en barrido A

bir el cristal, que actúa como detector, el pulso ultrasónico se produce el fenómeno inverso y la energía mecánica es transformada en pulso eléctrico.

En el generador de pulsos existen dos controles: uno de *energía*(7) y otro *discriminador*(8).

La función de ambos es variar la envolvente del pulso (Fig.26). El control de energía actúa variando la tensión del pulso eléctrico que se aplica al cristal, mientras que el control discriminador varía la duración del pulso, es decir el número de ciclos a la frecuencia seleccionada.

En el circuito de la Fig.25 se indica una llave(9) cuya función es separar eléctricamente la entrada del cristal, de la salida del emisor, cuando el equipo funciona con la técnica de transmisión-recepción con dos cristales.

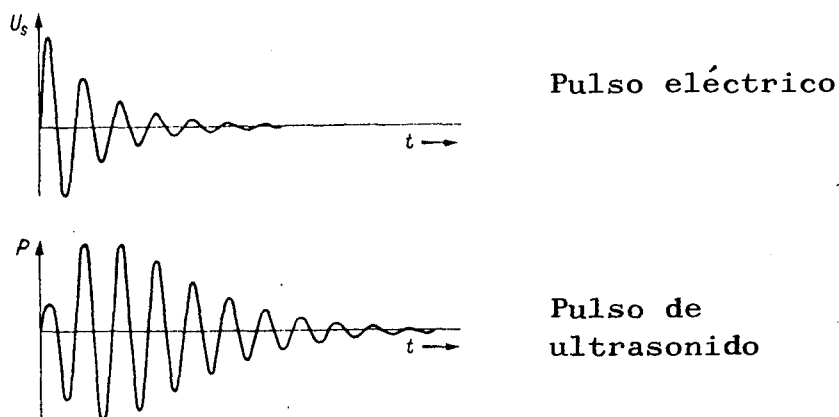


Fig.26 : Tensión eléctrica y presión sónica en función del tiempo durante la generación de un pulso de ultrasonido en un cristal de cuarzo

El *amplificador*(10) tiene por función regular la amplitud de la señal recibida desde el cristal receptor antes de aplicarla a las placas de deflexión vertical en el tubo de rayos catódicos.

En esta etapa generalmente existen dos controles: el de *sensibilidad*(11) y el de *supresión*(12). El primero permite variar la altura de los ecos en la pantalla, es decir variar la *sensibilidad de detección de señales*. Este control tiene un ajuste grueso, por etapas, y otro fino continuo.

El control de supresión tiene por función eliminar ecos pequeños, carentes de significación que constituyen una suerte de ruido de fondo y dificultan la interpretación del oscilograma sobre todo en ensayos manuales.

El control de sensibilidad no modifica la relación de alturas entre los ecos sucesivos que se obtienen por múltiple reflexión mientras que el supresor sí lo hace por cuanto está diseñado para evitar el paso de las señales más débiles. En este caso al aplicar el supresor la diferencia de altura entre ecos sucesivos, se mantiene pero no la relación entre los mismos.

Las variaciones de amplificación son medidas en *decibels* (dB), unidad que se expresa por la relación

$$\text{dB} = 20 \log. \frac{I_0}{I_1} \quad (28)$$

donde I_0 e I_1 representan la amplitud de señal antes y después de la amplificación.

Cuando la variación de amplificación es en más se usa el término "ganancia" expresado en dB. Si las variaciones son en menos se aplica el término "atenuación" que se expresa también en dB.

El control de sensibilidad suele ser designado en algunos equipos como "ganancia". En todos los casos el control de sensibilidad tiene indicada la ganancia o amplificación en dB.

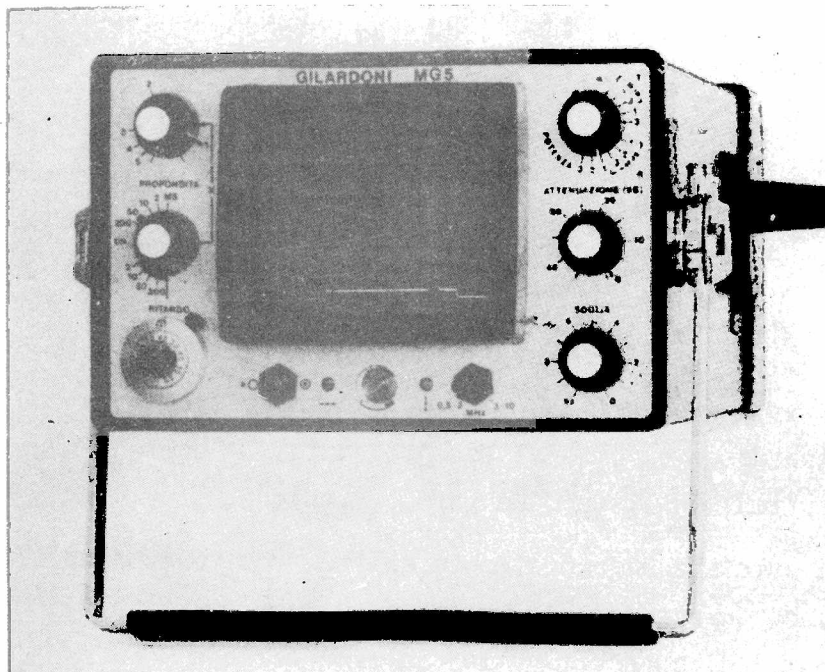


Fig.27 : Equipo portatil de Ultrasonidos con presentación de la indicación en tubo de rayos catódicos

6.2. Equipos de Pulso-Tiempo con Barrido B

En la figura 28, se muestra el circuito esquemático correspondiente a los equipos de pulso tiempo con presentación de la indicación en barrido B. La característica de estos circuitos es que el generador de barrido está aplicado a las placas de deflexión vertical, mientras que la deflexión horizontal está sincronizada mecánicamente con el desplazamiento de la sonda en el plano transversal de la pieza que se examina.

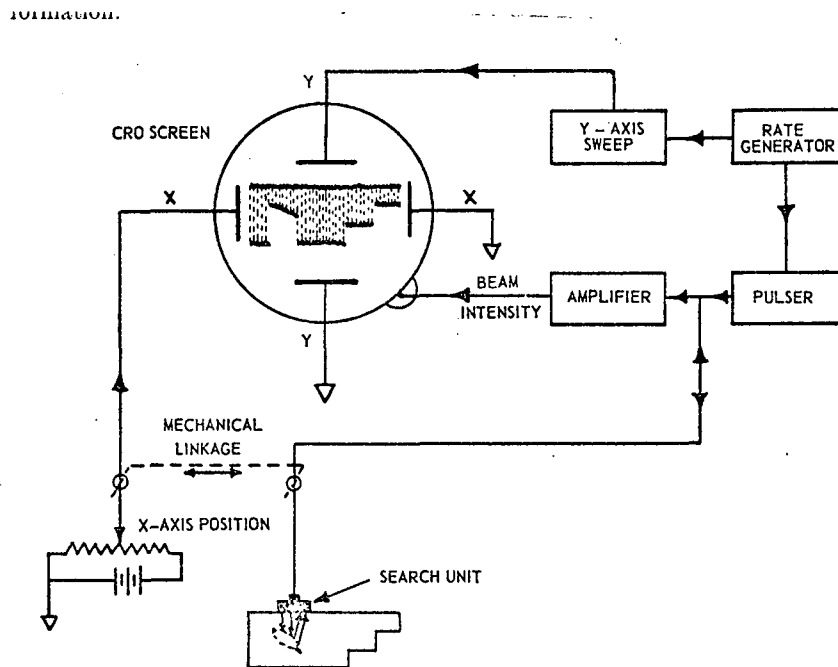


Figura 28 - Circuito de un equipo de ultrasonido con presentación de la indicación en barrido B.

La señal detectada es aplicada en la modul acción de intensidad de manera que el brillo sea proporcional a la amplitud de la señal.

La pantalla tiene aplicada un tipo de sustancia fosforescente que da mayor persistencia a la imagen.

Este tipo de presentación permite visualizar la posición y longitud de los defectos en cada sección transversal examinada.

6.3. Equipos de Pulso-Tiempo con Barrido C

En este tipo de equipos el desplazamiento vertical y horizontal del haz electrónico en el tubo de rayos catódicos está sincronizado con los des

plazamientos de la sonda en los ejes y-x respectivamente, como se indica en el esquema de la fig.29. Además para lograr este tipo de presentación se suprimen señales indeseables (tales como el eco inicial, eco de interface y eco de fondo) y se utiliza una compuerta electrónica para lograr que el sistema de representación sólo sea sensible durante el corto período de tiempo de barrido en el cual aparece una señal dentro del rango de profundidad establecido.

De esta manera se puede lograr en el tubo rayos catódicos una imagen de la distribución de defectos en una proyección plana.

Dado lo lento del proceso de barrido en toda la superficie de la pieza se deben utilizar tubos de rayos catódicos con memoria o bien reemplazado por registradores (X, Y, Z).

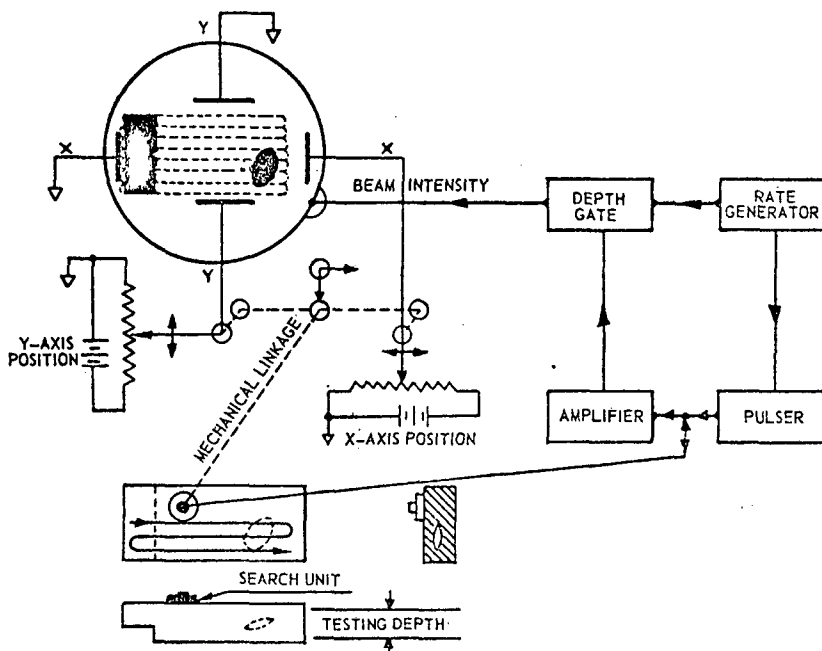


Fig. 29. C-scan presentation.

Figura 29 - Circuito de un equipo de ultrasonido con presentación de la indicación en barrido C.

7. DETECCION Y UBICACION DE DEFECTOS

La detección de un defecto mediante el examen ultrasónico es influenciada por diversos parámetros, en particular por su orientación, su naturaleza, sus dimensiones en relación a la frecuencia utilizada y su profundidad en la pieza que se ensaya.

7.1. Orientación de los defectos

La detección de un defecto con la técnica por reflexión (pulso-eco) importa la recepción por parte de la sonda de la energía ultrasónica reflejada en el defecto.

El haz reflejado debe por lo tanto poseer la misma dirección de propagación del haz ultrasónico primario transmitido en el material. Por lo tanto la orientación ideal de la superficie reflectante de la discontinuidad será aquella normal a la dirección de propagación del haz incidente.

Cuando el haz incide sobre el defecto con ángulo distinto de cero, la energía reflejada detectada por la sonda se reduce notablemente o puede resultar completamente nula.

En la figura 30 se presenta a la izquierda el caso de una superficie reflectante lisa con una orientación tal que hace imposible su detección por la técnica de pulso-eco. El haz de ultrasonido se refleja con dirección distinta de la de incidencia y no vuelve a la sonda emisora-receptora.

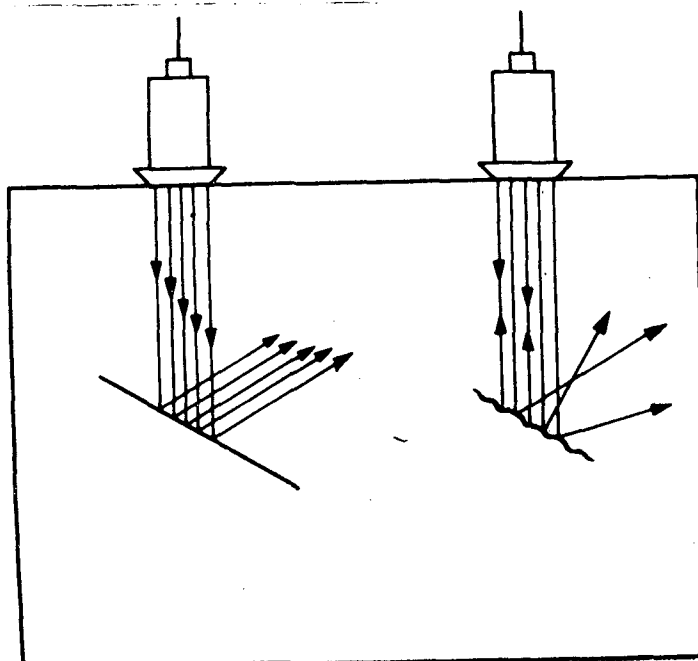


Figura 30 - Influencia de la orientación y forma del defecto en la detección por ultrasonido.

En la misma figura a la derecha se muestra en cambio el caso de un defecto que tiene igual orientación pero su superficie es irregular, rugosa. Estas irregularidades implican la presencia de zonas elementales que son normales a la dirección de la propagación del haz ultrasónico y reflejarán por lo tanto fracciones de energía que pueden llegar a la sonda emisora-receptora, permitiendo la detección del defecto.

Se ha verificado que con defectos planos y de superficie lisa al pasar de la condición de incidencia normal (ángulo de incidencia cero) a un ángulo de incidencia de 2°30' la energía reflejada y captada por la sonda se reduce en 10 veces, es decir que la amplitud de la señal recibida disminuye 20 decibeles.

En la práctica los defectos más comunes y peligrosos, fisuras por ejemplo, presentan una superficie reflectante rugosa que favorece la detección en el caso de tener orientación distinta la normal al haz ultrasónico.

Material	Longitud de onda (mm)			
	1 MHz	2 MHz	3 MHz	5 MHz
Acero	5,85	2,925	1,95	1,17
Aluminio	6,25	3,125	2,08	1,25
Fundición	3,5/5,6	1,7/2,8	1,17/1,87	0,7/1,12
Bronce	4,45	2,225	1,49	0,89
Cobre	4,66	2,33	1,55	0,93
Plexiglas	2,7	1,35	0,9	0,54

Tabla V

La definición de superficie rugosa o lisa no es absoluta sino que está en relación con la longitud de onda del haz ultrasónico. Se tiene una superficie rugosa cuando la altura de las irregularidades de la superficie son mayores que 1/10 de la longitud de onda del ensayo. (Tabla V).

7.2. Tamaño de los defectos y frecuencia de ensayo

Un defecto puede ser detectado cuando sus dimensiones son tales que permiten reflejar el haz ultrasónico que se emplea en el ensayo.

Teóricamente existe la posibilidad de detectar un defecto cuando sus dimensiones transversales con respecto al haz ultrasónico son mayores que $1/4$ de la longitud de onda (Tabla V). Discontinuidades con dimensiones superiores a dicho límite reflejan el haz ultrasónico según las leyes normales de la acústica mientras que aquellas que tienen dimensiones menores no producen reflexión y por tanto no son detectables.

Puesto que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia ($\lambda = v/f$) la detección de los defectos pequeños está estrechamente vinculada con la frecuencia de examen: más elevada es la frecuencia del haz ultrasónico mayor es la sensibilidad de detección. En la tabla V se dan las longitudes de onda correspondientes a distintas frecuencias, para los materiales de uso más común.

El defecto para ser detectado debe constituir un obstáculo para la propagación del haz ultrasónico de manera que lo refleje total o parcialmente.

La reflexión del haz depende de la relación entre la impedancia acústica del medio que se examina y la impedancia acústica del medio que constituye la discontinuidad de acuerdo a lo visto anteriormente.

7.3. Evaluación de la profundidad

La evaluación de la profundidad a que se encuentra una discontinuidad dentro del material en examen sólo es posible mediante la técnica de reflexión (pulso-eco).

La discontinuidad al reflejar una parte del haz provoca la aparición del eco en la pantalla. La amplitud del eco depende de muchos factores; orientación, dimensión, naturaleza, posición, etc. La posición en la pantalla, en cambio, es unívocamente proporcional a la distancia a que se encuentra de la sonda, es decir a su profundidad.

La profundidad es evaluada con suficiente precisión si se ha calibrado correctamente el aparato.

La presencia de dos o más ecos de defecto en el ensayo por reflexión con sonda normal, ecos que se presentan entre el pulso de transmisión y el eco de fondo, no siempre indica que existen otros tantos defectos a distintas profundidades detectados simultáneamente. En realidad estos ecos pueden indicar reflexiones múltiples de un mismo defecto. Estas reflexiones se distinguen por presentarse a intervalos iguales.

La profundidad a que se encuentra un defecto influye notablemente en la detec

ción del mismo. Así los defectos subsuperficiales no se evidencian si caen dentro de la zona muerta de la sonda emisora-receptora.

Los defectos que se encuentran a gran profundidad son detectados con dificultad por la reducción de la sensibilidad debida a la absorción de energía ultrasónica de parte del material o a causa de la divergencia del haz.

8. MEDICION DE ESPESORES

La medición de espesores es un campo importante de aplicación del ensayo ultrasónico.

La posibilidad de medir espesores desde una sola de las caras es una prerrogativa del método ultrasónico de examen de los materiales.

Esta posibilidad resulta de particular interés en inspecciones de mantenimiento de planta cuando es necesario detectar a tiempo la disminución de espesores de pared en tuberías y recipientes sometidos a presión y expuestos a desgastes por corrosión o erosión. Esta situación se presenta en plantas generadoras de vapor, en centrales eléctricas, en plantas químicas, petroquímicas, destilerías y en prácticamente todas las plantas industriales y el transporte naval, de ahí la gran importancia que han adquirido en la actualidad las técnicas de ensayo ultrasónico para medición de espesores.

Las técnicas utilizadas son las siguientes:

- por reflexión con sonda normal
- por reflexión con dos transductores enfocados
- por resonancia

8.1. Reflexión con sonda normal

Para la medición de espesores con esta técnica se emplea una sonda normal que actúa como emisor-receptor de ondas longitudinales.

Aplicada la sonda en una de las caras el haz ultrasónico, en forma de pulsos con cierta frecuencia de repetición (como se vio en el punto 6.1) es transmitido al material, en el cual se propaga normalmente a la superficie, reflejándose sucesivamente en las caras que limitan el espesor a medir. La misma sonda actuando como detectora de energía ultrasónica reflejada transmite los sucesivos pulsos al tubo de rayos catódicos resultando un oscilograma compuesto por una serie de ecos de reflexión cuya amplitud es gradual

mente decreciente en función de la pérdida de energía que sufre el haz al aumentar el camino recorrido. Los intervalos entre eco y eco en cambio se mantienen constantes ya que representan el camino recorrido por el haz entre cada par de reflexiones sucesivas.

Si el aparato ha sido calibrado previamente con un espesor conocido (ver punto 9.1.2) del mismo material que se desea ensayar, se podrá medir el espesor verificando la posición de los ecos múltiples sobre la escala graduada del osciloscopio.

En la fig.31, se ha esquematizado el oscilograma que correspondería al caso de una medición de espesor efectuada por la técnica de ecos múltiples.

En dicha figura, los pulsos indicados con línea de trazos corresponden a la calibración del aparato usando un espesor de 20 mm con cinco ecos, el último de los cuales se fija en correspondencia con la división 100 de la escala (fondo de escala). Los pulsos indicados con trazo entero corresponden al oscilograma obtenido sobre la pieza en ensayo de espesor E_x , que en este caso presenta 6 ecos visibles.

Si consideramos igual número de ecos que el empleado para la calibración, es decir 5 ecos, vemos que el quinto eco en este caso incide con la división 82. Como en la calibración con espesor de 20 mm, el quinto eco correspondía a la división 100 se puede establecer la siguiente relación:

$$\frac{82}{100} = \frac{E_x}{20 \text{ mm}} \quad (29)$$

y calcular el valor E_x que será:

$$E_x = 20 \text{ mm} \frac{82}{100} = 16,4 \text{ mm} \quad (30)$$

Operando de la misma manera descripta se pueden reducir los errores de lectura en forma proporcional número de ecos utilizados.

Debido a la presencia de la zona muerta característica de las sondas emisoras-receptoras no es posible aplicar esta técnica para medir espesores menores que 5 mm de acero.

La frecuencia generalmente utilizada para la medición de espesores está comprendida entre 2 y 10 MHz y el rango de medición está entre 5 mm y 10 ó 15 mm según los materiales.

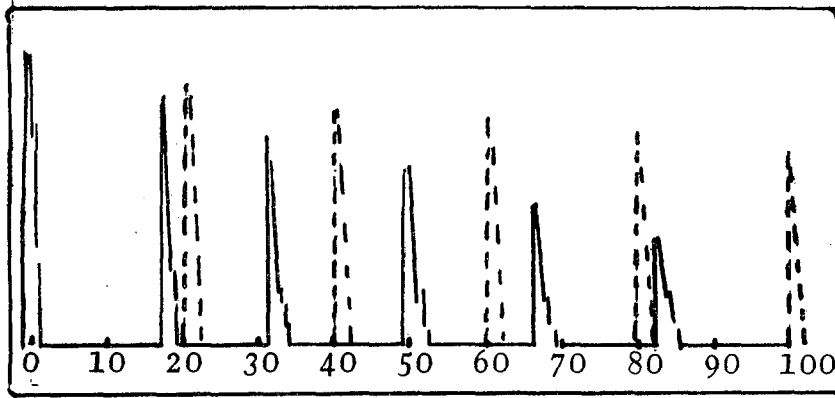


Figura 31 - Medición de espesores con ecos múltiples. Representación esquemática del oscilograma.

8.2. Reflexión con dos transductores enfocados

Fundamentalmente esta técnica se basa en el uso de una sonda con cristales ultrasónicos dispuestos con una pequeña inclinación entre 4° y 12° respecto de la normal al plano de contacto de la sonda (Fig.32a) de manera que queden enfocados dentro de un cierto rango de espesores. Uno de los cristales actúa como emisor y el otro como receptor:

La determinación del espesor se efectúa evaluando el tiempo que tarda el pulso ultrasónico en su recorrido a través del material desde el cristal hasta el receptor previa reflexión en la cara opuesta.

La frecuencia del ensayo está comprendida generalmente entre 2 y 18 MHz y el campo de medición se extiende entre 1 y 100 mm.

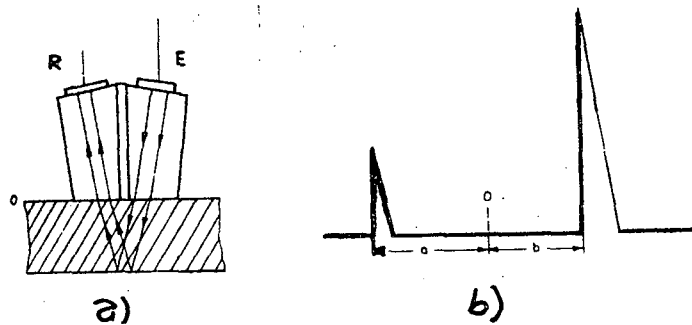


Fig. 32: Medición de espesores con cristales enfocados

La inclinación de los cristales y la divergencia del haz caracterizan un rango de espesores para el cual la sonda es aplicable. Dentro del margen de aplicación la sensibilidad de la sonda varía de acuerdo al espesor que se mide, siendo prácticamente nula en los puntos extremos de dicho rango.

En la figura 33 se han representado esquemáticamente los haces ultrasónicos de un palpador con dos cristales enfocados para medición de espesores. En correspondencia con los mismos se ha dibujado la curva de sensibilidad en función del espesor que se mide.

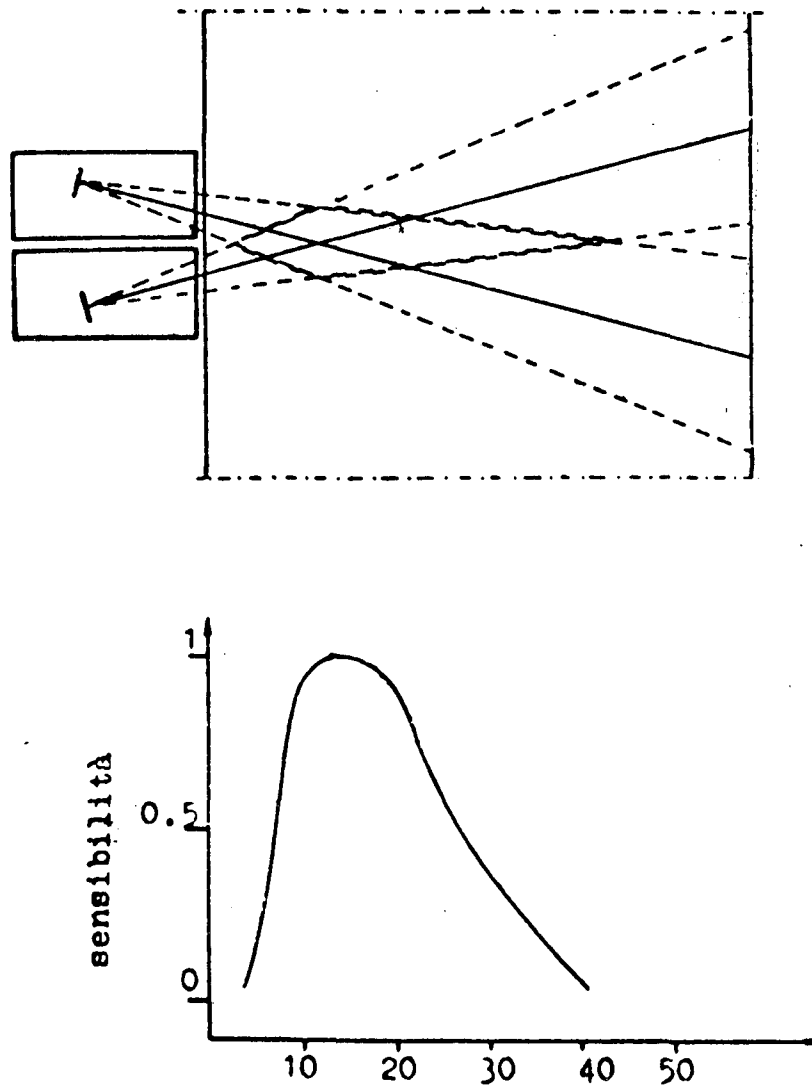


Figura 33 - Sensibilidad de una sonda doble en función de la profundidad.

Aclarando que la sensibilidad a que nos referimos es la de detección del eco es decir la amplitud del pulso correspondiente a energía reflejada. Podemos ver en la figura citada que la mínima sensibilidad corresponde a los puntos de intersección de los límites externos de los haces ultrasónicos, mientras que la máxima sensibilidad corresponde cuando el espesor coincide

con el punto de intersección de los ejes de los haces ultrasónicos.

Cuando las señales son transmitidas a un tubo de rayos catódicos, la evaluación del espesor se efectúa en el oscilograma previamente calibrado de manera que actuando sobre el retardo de transmisión el punto cero coincida con la separación entre el camino recorrido por el haz dentro del plástico de la sonda y el camino recorrido en el material que se ensaya y ajustando factor de la escala mediante el uso de un punto de referencia del mismo material y espesor perfectamente conocido (Fig.32b).

El espesor de referencia se elige de manera que sea lo más próximo al espesor que se desea medir. El barrido horizontal se ajusta de manera que el pulso de reflexión caiga dentro del segundo tercio del total de la escala a fin de poder leer con comodidad variaciones de espesor en más o menos.

Sin embargo la mayoría de los equipos comerciales especialmente diseñados para medir espesores por este método no utilizan la representación en oscilograma sino que electrónicamente traducen el tiempo de propagación en el material en una indicación digital o en una indicación analógica de corriente que puede ser directamente leída ya sea como valores numéricos directos o como deflexión en un instrumento de aguja.

8.3. Resonancia

La técnica de medición de espesores por resonancia utiliza ondas ultrasónicas longitudinales transmitidas en el material desde una de las caras en forma continua en vez de pulsos. El cristal no oscila libremente en este caso con su frecuencia propia sino que lo hace en forma forzada en la frecuencia de los impulsos eléctricos que lo excitan.

De esta manera es posible variar la frecuencia (o lo que es lo mismo: la longitud de onda) de las ondas ultrasónicas que se aplican, ya sea en forma manual o automática, hasta lograr que la onda reflejada en la cara opuesta se encuentre en fase con la onda que ingresa. Se instalan así ondas estacionarias dentro del material obligándolo a vibrar o resonar con una mayor amplitud.

La resonancia en el material es indicada por su efecto de carga de energía sobre la sonda ultrasónica. La condición de resonancia se obtiene cuando el espesor del material en ensayo es la mitad de la longitud de onda o bien un múltiplo de ésta.

En la Fig.34 se muestra la más baja frecuencia, o frecuencia fundamental de resonancia (fundamental) para una placa de espesor E.

Similar situación de resonancia se produce en múltiples o armónicas de esta frecuencia fundamental. En las Figs.35b), 35c) y 35d) se han esquematizado los casos correspondientes a la segunda, tercera y cuarta armónica. En cada caso se establece una onda estacionaria y la placa entra en resonancia.

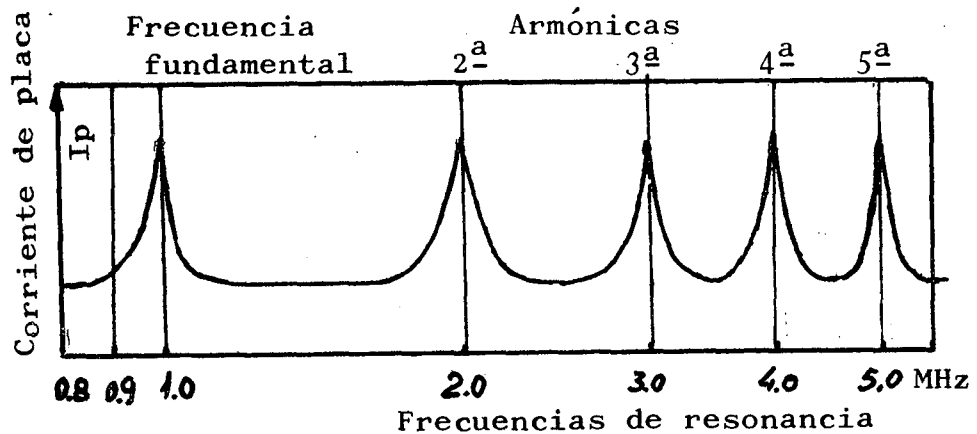


Figura 34 - Indicaciones de resonancia en una placa de aluminio de 3,175 mm de espesor

Material	Constante K 10^6 pulgadas/s.
Aluminio	0,121-0,131
Bronce	0,188-0,193
Cobre	0,086-0,092
Fundición de hierro	0,087-0,110
Acero fundido	0,110-0,116
Vidrio	0,115-0,134
Plomo	0,047-0,049
Magnesio	0,114-0,116
Monel	0,106-0,108
Nickel	0,113-0,115
Polietileno	0,036
Cuarzo	0,114
Acero Inoxidable	0,112-0,114
Acero	0,115-0,118
Teflon	0,024-0,0335
Agua	0,028 (aprox.)
Uranio	0,066-0,070
Zirconio	0,093-0,102

Tabla V. I - Valores de la constante K para varios materiales.

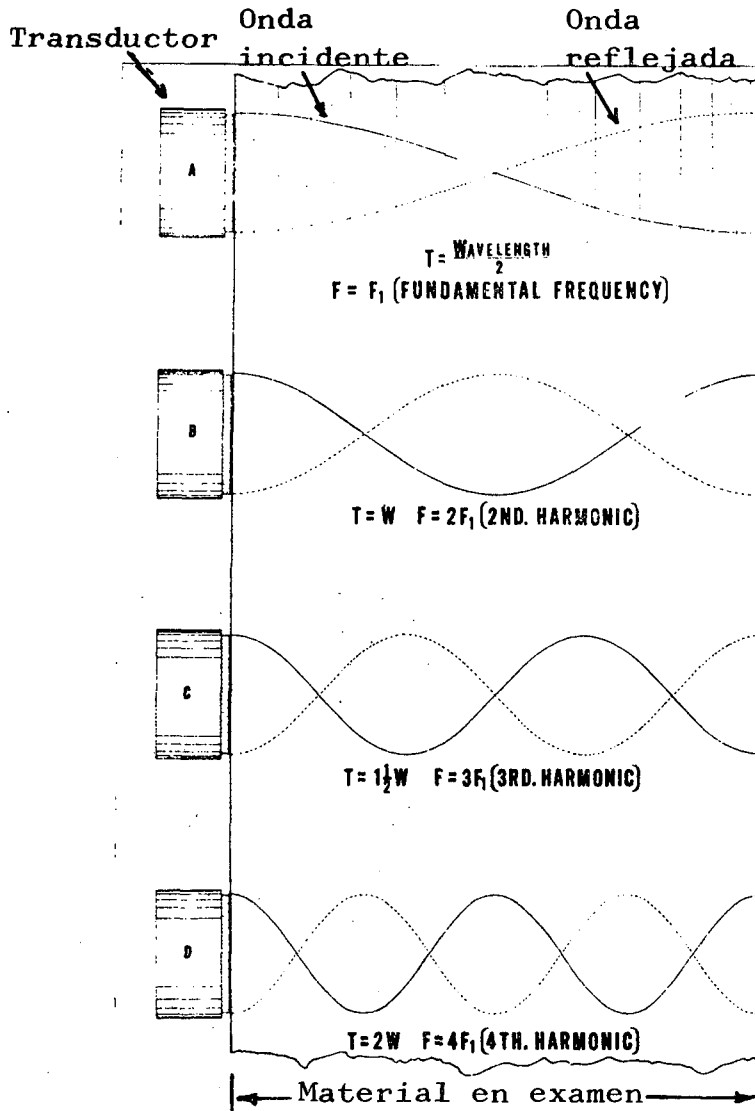


Figura 35. - Frecuencias de resonancia en una placa

La frecuencia de vibración correspondiente a la propagación del ultrasonido en material está dada por la ecuación:

$$f = \frac{V}{\lambda} \tag{31}$$

donde:

f = frecuencia de vibración (s^{-1})

V = velocidad de propagación en el material (m/s)

λ = longitud de onda (m)

Siendo E el espesor del material, la condición de resonancia estará dada por

$$\lambda = 2 E \quad (32)$$

Por lo tanto la frecuencia de resonancia f_r será

$$f_r = \frac{V}{2 E} \quad (33)$$

Considerando que la velocidad de propagación es un valor constante para cada material podemos hacer

$$\frac{V}{2} = K \quad (34)$$

Reemplazando en la ecuación (33) y despejando el valor del espesor E tendremos la ecuación que nos da el espesor en función de la frecuencia de ensayo:

$$E = \frac{K}{f_r} \quad (35)$$

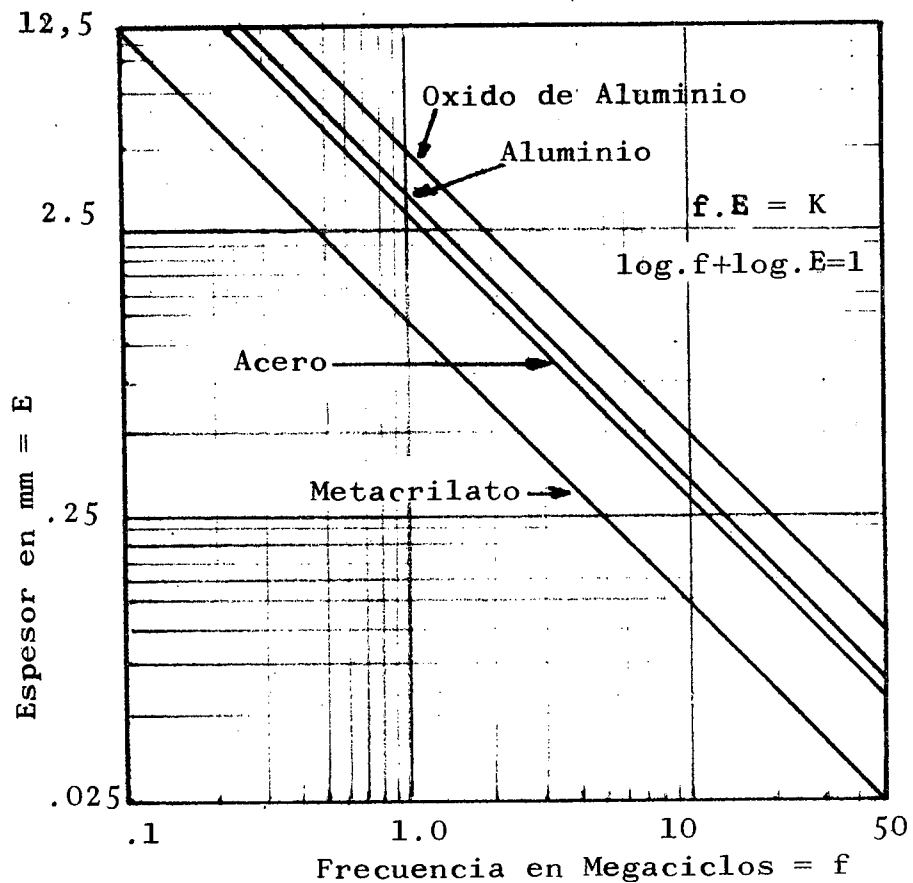


Figura 36 - Frecuencia de Resonancia en función del espesor.

El valor de la constante K para distintos materiales puede verse en la tabla VI.

El espesor se puede también calcular en función de las frecuencias armónicas, en efecto, si consideramos que el intervalo de frecuencia entre dos armónicas consecutivas es igual a la frecuencia fundamental podemos escribir:

$$E = \frac{K}{f} = \frac{K}{f_3 - f_2} \quad (36)$$

donde f_3 es la tercer armónica y f_2 la segunda y generalizando para armónicas de orden (n) y (n-1) tendremos:

$$E = \frac{K}{f_n - f_{(n-1)}} \quad (37)$$

Para la medición de espesores no será entonces necesario conocer el orden de las armónicas sino simplemente considerar dos armónicas sucesivas.

8.3.1. Condiciones generales del ensayo

De acuerdo a la ecuación (35) el mínimo espesor que se puede medir para un determinado material depende de la máxima frecuencia que sea posible utilizar. Así con una frecuencia de 25 M/Hz se podrá medir un espesor de 0,127 mm en acero y un espesor de 0,1 mm en cobre o bronce.

Algunos materiales no transmiten ondas de elevada frecuencia y por lo tanto no será posible medir en los mismos pequeños espesores.

El máximo espesor que se puede medir depende de la frecuencia y del diseño del equipo. Normalmente puede llegar a 75-150 mm.

La exactitud no es afectada en forma apreciable por variables tales como temperatura, ambiente, propiedades magnéticas, pequeñas diferencias en aleación o tratamiento térmico. La exactitud está limitada por la resolución del equipo, variaciones del valor de K, variaciones en las condiciones de contacto de la sonda con el material y por la calibración del equipo. Normalmente las medidas pueden realizarse con errores del orden de 0,1 al 3,0% respecto del espesor a medir.

Cuando una o ambas caras se encuentran severamente corroidas el ensayo no resulta aplicable.

El acoplamiento puede hacerse por contacto directo o por inmersión.

8.3.2. Equipos de ensayo

Esencialmente el equipo para medición de espesores por resonancia es tá constituido por los siguientes componentes básicos:

- Fuente de poder y oscilador para convertir la frecuencia de la alimentación (50 a 60 c/s) en energía de alta frecuencia.
- Circuitos de detección, amplificación y presentación de la señal.
- Transductor o sonda que convierte la energía eléctrica de alta frecuencia en energía mecánica de alta frecuencia.

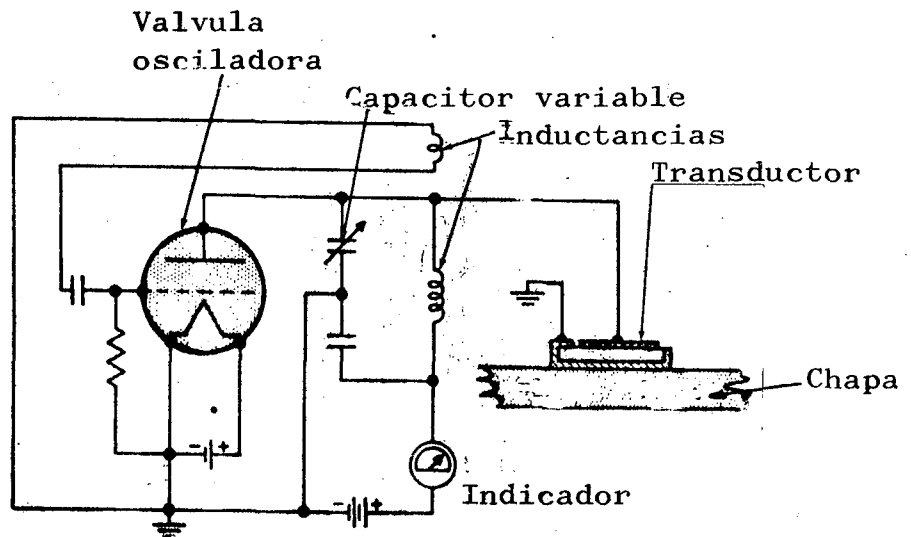


Figura 37 - Circuito esquemático de un instrumento para medir espesores por resonancia.

Un circuito típico, simplificado, que presenta la indicación en un instrumento de aguja se muestra en la fig. 37.

Un circuito oscilador auto excitado, provisto de un capacitor o un inductor variable, que permite el cambio de frecuencias está conectado a la placa de una válvula osciladora.

Cuando el oscilador es acoplado a la frecuencia de resonancia de la chapa que se mide se produce un aumento en la amplitud de oscilación.

Este incremento a la amplitud de oscilación de la chapa producirá una carga adicional en el cristal de la sonda que se traducirá en un incremento de la corriente de placa de la válvula osciladora. Este aumento de corriente puede ser indicado en un instrumento de aguja o bien mediante una señal audible.

El equipo puede estar calibrado de manera que en vez de leer la frecuencia de resonancia para la cual se produce el desplazamiento de la aguja o la señal audible, se da el valor de espesor correspondiente al metal para el cual se calibró.



Fig.38 : Equipo de medición de espesores por resonancia con indicación en tubo de rayos catódicos

En otro tipo de instrumentos la presentación de la indicación se hace en un tubo de rayos catódicos. El cambio de frecuencia para encontrar las condiciones de resonancia se hace automáticamente mediante un capacitor manejado con un motor o mediante un inductor variable eléctricamente. En ambos casos el cambio de frecuencia está sincronizado con el barrido horizontal del tubo de rayos catódicos que representa por lo tanto el rango de frecuencia. Si en este rango de frecuencia están contenidas frecuencias de resonancia la línea será deflektada verticalmente. Escalas de plástico transparentes calibrados, colocados sobre la pantalla del tubo de rayos catódicos permite leer la posición de la deflección directamente en espesor del material. En la fig. 38 se ha esquematizado este tipo de equipo.

9. CALIBRACION DE LOS SISTEMAS DE ENSAYO ULTRASONICO
POR REFLEXION (Pulso-Eco)

A los fines de que la información que se obtiene mediante el ensayo ultrasonico sea comparable y repetitiva es necesario calibrar y fijar las condiciones de funcionamiento y sensibilidad del sistema de ensayo que se emplea.

Un sistema de ensayo ultrasonico está compuesto por un número de componentes cuyo comportamiento debe ser evaluado en su funcionamiento conjunto. Estos componentes son:

- Aparato electrónico o "equipo de ultrasonidos" que genera, recibe y presenta las señales eléctricas correspondientes a las ondas ultrasonicas del ensayo. Debe ser identificado por su marca, modelo y número de serie.
- Palpador de ultrasonidos, que genera y recibe las ondas ultrasonicas. Debe ser identificado por su tamaño, tipo, clase de cristal piezoeléctrico, frecuencia y técnica de ensayo a que está destinado (contacto o inmersión).
- Cables de interconexión, incluido si corresponde impedancias de acoplamiento.
- Elementos auxiliares tales como: tanque para ensayo por inmersión, manipuladores para el barrido de la pieza a examinar, medio de acoplamiento para ensayo por contacto.

Al efectuar los ensayos se debe tener la seguridad de que el equipo utilizado (instrumento electrónico y sonda ultrasonica) está operando en condiciones de sensibilidad determinadas y reproducibles de manera tal que las informaciones obtenidas (altura y posición de ecos) puedan ser directamente comparables.

Esto es particularmente importante luego de efectuar reparaciones en el equipo electrónico (ajustes, reemplazo de válvulas, etc.), o cuando durante la inspección se debe cambiar de equipo o se usan varios de ellos en distintos lugares.

Es además importante tener la posibilidad de hacer verificaciones periódicas de las condiciones de funcionamiento del equipo en el lugar de trabajo para asegurarse que su sensibilidad no ha variado o no es afectada por alteraciones en la tensión de alimentación, por variaciones en la emisión de las válvulas, por desgaste o modificaciones de montaje del cristal del palpador. Verificar también el mantenimiento de la linealidad de la base de

tiempo del equipo electrónico.

Finalmente puede ser necesario controlar el ángulo y posición de salida del haz ultrasónico en sondas angulares.

Se debe tener presente que estas calibraciones se hacen para obtener referencias en la operación del equipo y permitir comparaciones de sensibilidades relativas pero que nunca deben ser utilizadas como elemento de juicio para evaluación de defectos en forma absoluta.

9.1. Calibración y Ajuste utilizando el Bloque de Calibración IRAM-723

La norma IRAM 723 define un bloque de calibración para equipos de ultrasonido que utilizan las técnicas por reflexión de pulsos. Este bloque, que se describe en la figura 39, está basado en los bloques de referencia propuestos por el International Institute of Welding (Documento V-461-71/0F) y adoptado por la International Organization for Standards (ISO/TC 44-Sec 345-44, F). En dicha norma se establecen las características del material, las dimensiones y tolerancias de fabricación.

La norma IRAM-CNEA Y 500-1002 (en trámite) fija el procedimiento que debe seguirse para calibrar y ajustar las condiciones de funcionamiento y sensibilidad de los equipos (incluidos palpador y correctores) utilizados en el ensayo de materiales por la técnica de reflexión, de manera que dichas calibraciones y ajustes sean reproducibles y comparables.

De acuerdo con dicha norma las verificaciones a efectuar son las siguientes:

- Linealidad de la base de tiempo del osciloscopio
- Calibración de las escalas fijas o adicionales usadas para indicar el alcance o rango de medida. Esto incluye la corrección del punto cero debido al retardo de vibración del cristal y al retardo producido por la cuña de plástico en palpadores angulares.
- Estimación de la zona muerta.
- Ajuste de la sensibilidad de trabajo del conjunto equipo electrónico-palpador.
- Estimación del poder de resolución.
- Determinación del punto de salida del haz y determinación del ángulo de refracción verdadero en palpadores angulares.

- Medición de la distancia de reflexión y ajuste de la indicación en distancias proyectada.

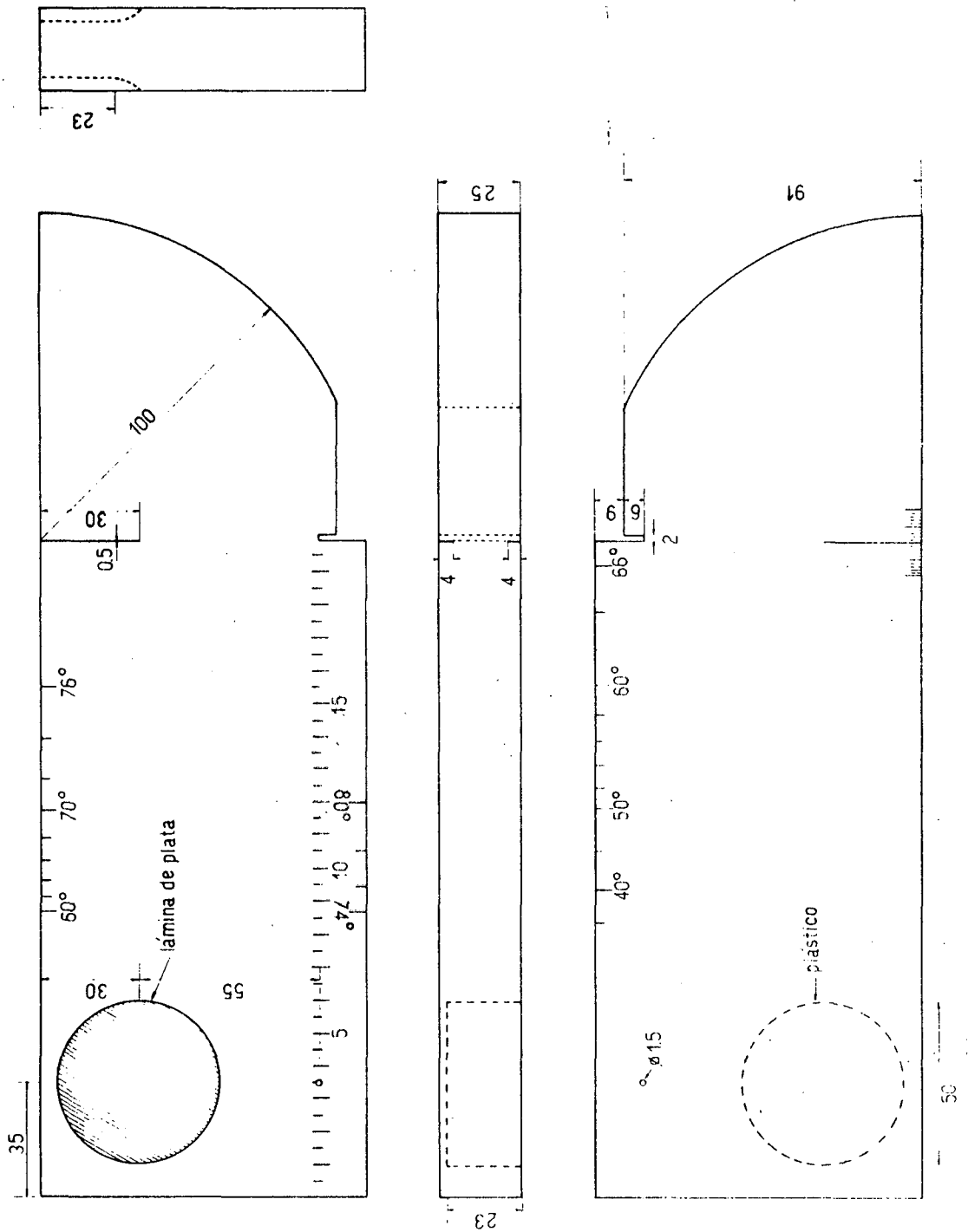


Figura 39 - Bloque de calibración para equipos de ultrasonidos, Norma IRAM 723.

9.1.1. Comprobación del equipo

Para la comprobación del equipo electrónico la norma indica las siguientes determinaciones:

Linealidad horizontal, de acuerdo al procedimiento que se transcribe a continuación:

- Fijar el rango de la escala horizontal en 100 mm y apoyar la sonda sobre el bloque patrón, con un medio de acople adecuado sin ejercer excesiva presión, en la posición que corresponde a un espesor de 25 mm (Fig.40).
- Observar en la pantalla la sucesión de ecos de fondo y verificar si la distancia entre los mismos se mantiene constante.
- La escala se debe considerar lineal cuando no existen diferencias en las distancias entre los distintos ecos, aún cuando haya alguna diferencia pequeña respecto a la distancia entre el pulso de entrada y el primer eco.
- Si no existe linealidad se debe proceder a repetir la verificación usando otra sonda para discriminar si el defecto es del equipo electrónico o debido a la sonda.

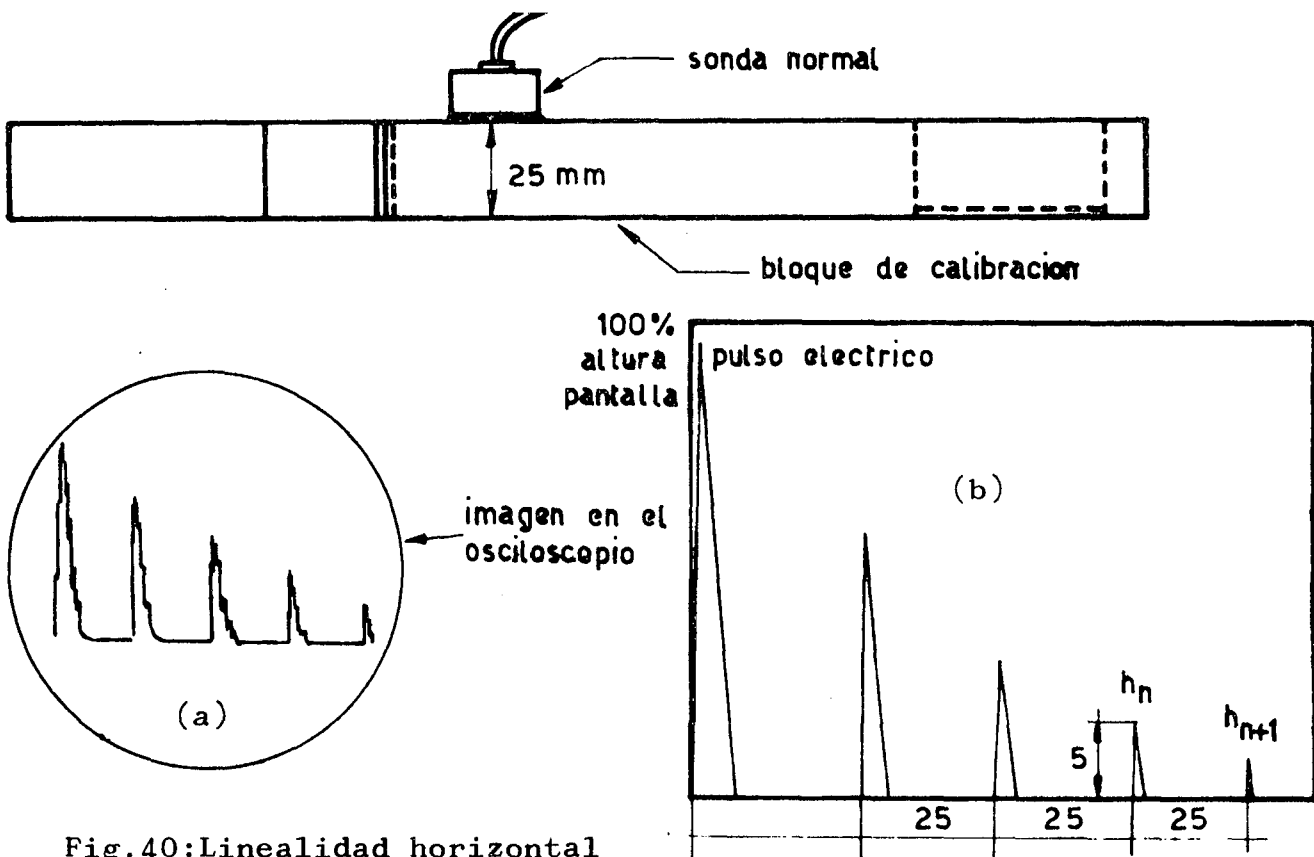


Fig.40: Linealidad horizontal

Linealidad Vertical: trabajando con el mismo rango de escala y posición de la sonda en el bloque que en el punto anterior se obtiene una representación en la pantalla de 4 ecos separados 25 mm uno del otro (Fig.40).

Con el mando de amplificación por pasos se lleva la altura del anteúltimo pulso, llamado h_n , a un valor aproximado de 5 mm. Luego se lee la altura del pulso siguiente, h_{n+1} , y se realiza el cociente de las alturas de los ecos: h_n y h_{n+1} (Fig.40b). Aumentando un paso la ganancia, leer nuevamente las nuevas alturas de los ecos y realizar su cociente. Repetir periódicamente este procedimiento hasta que la altura del eco h_n llegue al 100% de altura de pantalla.

El equipo tiene linealidad vertical si el cociente entre las alturas en cada paso de amplificación añadida es un valor constante e igual.

Si el valor de los cocientes de altura de los ecos varía a partir de un determinado paso de amplificación, el sistema es linealmente vertical hasta la altura de pantalla igual a la altura del eco h_{n+1} , para el cual el cociente de altura de ecos todavía es constante.

Estimación de la zona muerta: colocar la sonda normal en la posición indicada en la figura 41a). Si se obtiene eco se debe colocar la sonda en la posición indicada en la figura 41b). Si se obtiene eco la zona muerta tiene un valor entre 5 y 10 mm. Si no se obtiene eco será mayor que 10 mm.

El valor de la zona muerta depende de la duración de los pulsos y del tiempo entre ellos.

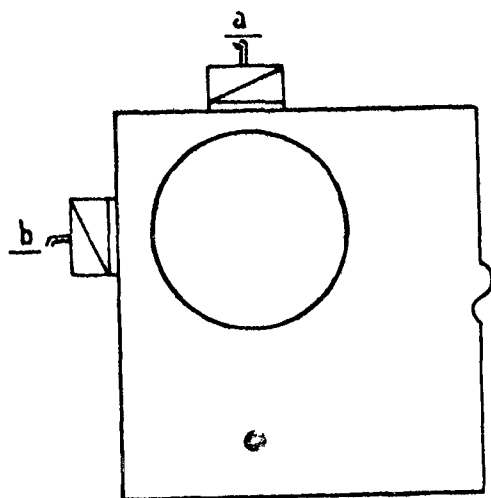


Figura 41.- Determinación de zona muerta

9.1.2. Uso de sondas normales (ondas longitudinales)

Se utiliza un cabezal o sonda que emite el haz ultrasónico en dirección normal a su superficie. La propagación se efectúa a través del material en forma de ondas longitudinales.

Calibración de la escala y verificación de su linealidad: encontrándose el equipo electrónico en régimen de funcionamiento conectar la sonda normal y proceder de acuerdo a las siguientes indicaciones:

- fijar el rango de la escala en el valor inmediato superior al espesor que se ha de ensayar.
- apoyar el cristal sobre el bloque patrón, con un medio de acople adecuado, sin ejercer excesiva presión, en la posición de 25 mm de espesor, Fig.42a), si el rango es menor que 200 mm o en la posición de 10 mm, Fig.42b), si el rango es mayor que 200 mm.
- observar en la pantalla la sucesión de ecos de fondo obtenidos. La constancia en la separación entre ecos indica la linealidad de la base de tiempo.
- actuando sobre los controles del equipo ajustar la distancia entre dos ecos de fondo sucesivos de manera que coincida con el espesor recorrido en el bloque de calibración (25 o 100 mm, según corresponda). Este ajuste debe hacerse sobre el control que adecúa la base de tiempo a la velocidad del sonido en el material.
- si la distancia entre ecos es correcta pero no coincide con las indicaciones de la escala efectuar el corrimiento hasta lograr la coincidencia actuando sobre el ajuste de cero del equipo.

Lograda esta coincidencia para los distintos ecos se podrá observar que el impulso de entrada se encuentra desplazado a la izquierda del cero. Esto es debido al defasaje de tiempo que existe entre la aparición del eco en la pantalla y el momento en que el haz de ultrasonido emerge del cristal ("retardo de vibración del cristal").

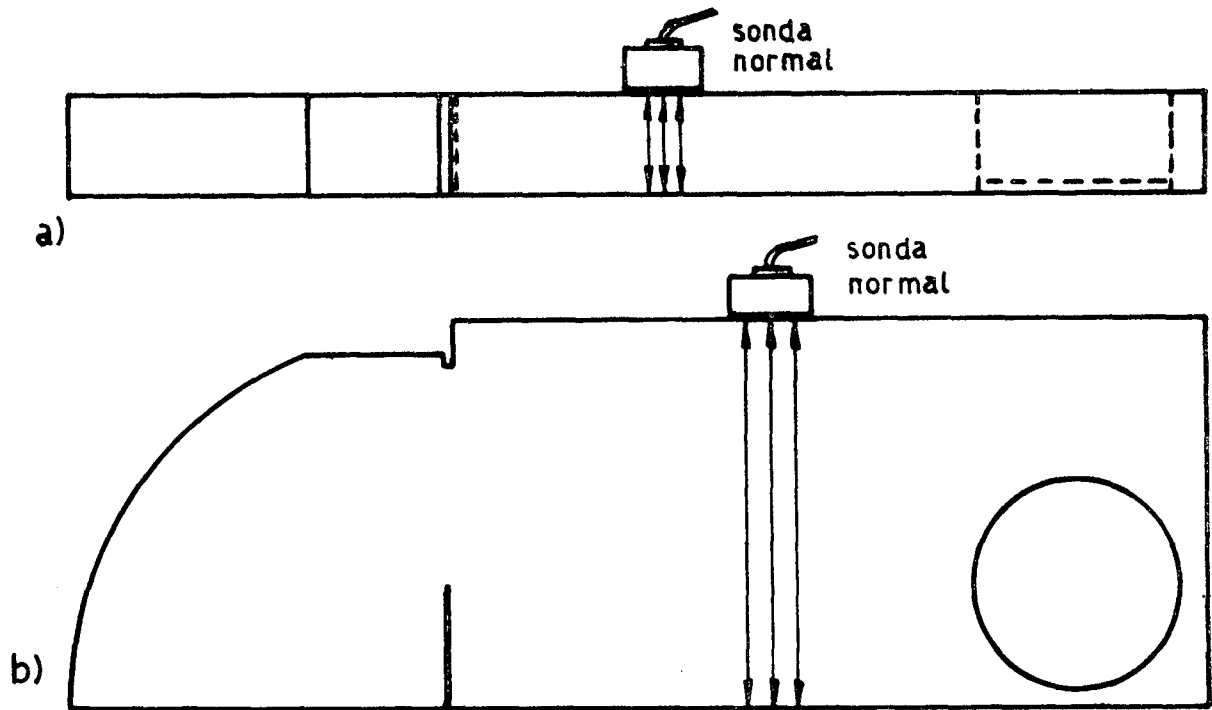


Figura 42 - Calibración de escala con sonda normal

Verificación de la sensibilidad de trabajo: Esta verificación se realiza a fin de obtener datos de referencia que permitan comprobar, mediante las posteriores verificaciones, si se mantiene la sensibilidad de trabajo del equipo durante el transcurso de los ensayos. No debe utilizarse para la evaluación de sensibilidad de indicación por cuanto esta última no puede ser verificada mediante el uso del bloque en consideración.

El procedimiento de ajuste depende de que se deba trabajar con alta o con baja ganancia.

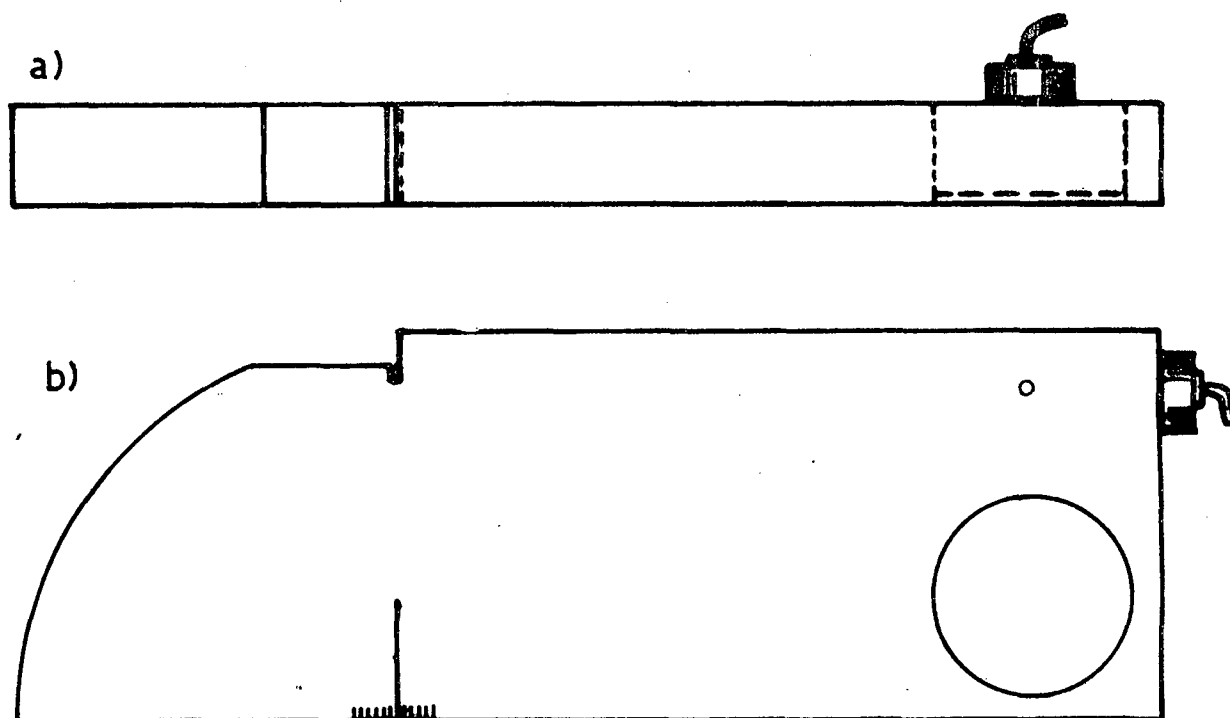


Figura 43 - Ajuste de Sensibilidad con sonda normal

Verificación con alta ganancia

- Fijar la sonda en la posición indicada en la Fig.43a), sin ejercer presión excesiva y usando líquido acoplante adecuado.
- calibrar la escala en el rango de 200 mm.
- hacer coincidir el primer eco con la división 50 mm ya que el espesor de plástico equivale a dicha distancia en acero.
- Registrar el número de ecos, la altura del último de ellos visible en la pantalla y la ganancia de trabajo.

Verificación con baja ganancia

- Fijar la sonda en la posición indicada en la Fig.43b).
- Desplazar el cabezal hacia arriba y hacia abajo hasta conseguir la máxima altura en el eco proveniente del agujero de 1,5 mm.
- Ajustar la ganancia al valor requerido.

- Registrar los datos correspondientes a la altura del eco y la ganancia de trabajo.

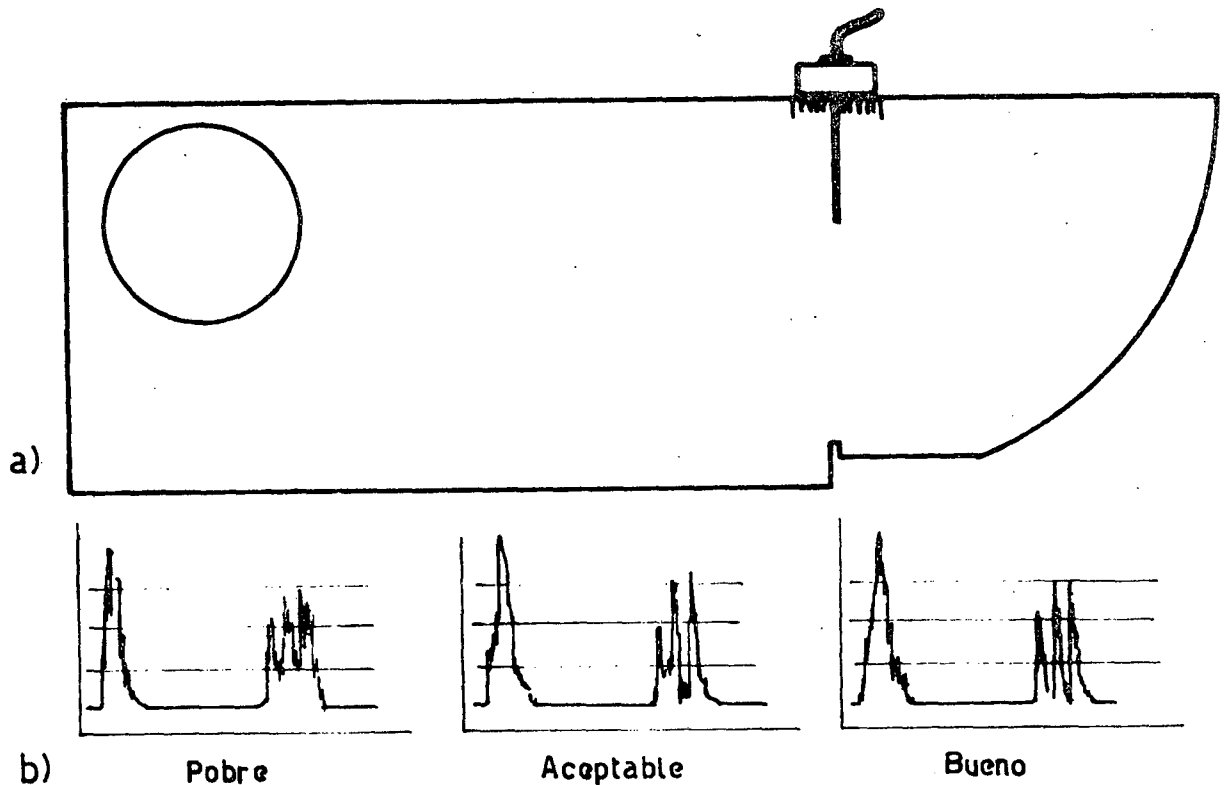


Figura 44 - Estimación de resolución con sonda normal.

Estimación del poder de resolución

- Ubicar la escala en el rango calibrado de 200 mm.
- Fijar la sonda en la posición de la Fig. 44a).
- En la posición indicada se obtendrán en la pantalla del instrumento los ecos correspondientes: al espesor de 100 mm, parte más ancha del bloque, el espesor de 85 correspondiente a la ranura y al espesor de 91 mm correspondiente al rebaje.
- Se ajusta la altura del mayor de los ecos de manera que alcance los $\frac{2}{3}$ de la altura de la pantalla, actuando sobre el control de la ganancia y se observa la apariencia de las señales comparándolas con los esquemas de la Fig. 44b).
- De acuerdo a la comparación efectuada la resolución debe ser calificada como: buena, aceptable o pobre.

9.1.3. Uso de sondas angulares

Las sondas angulares para ondas transversales usan una cuña de material plástico (acrílico) para obtener el ángulo de refracción correspondiente.

Al usar estas sondas además de la comprobación del equipo deben hacerse las siguientes verificaciones:

Determinación del punto de salida del haz y calibración de la indicación de distancia: fijar la sonda sobre la ranura fresada del bloque de calibración, con el haz orientado hacia la cara curva, como se indica en la figura 45. Desplazar hacia atrás y adelante la sonda hasta conseguir en la pantalla el eco de altura máxima.

En la posición de eco máximo marcar en la sonda el punto que coincida con la ranura del bloque de calibración. Dicho punto es el punto de salida del haz de ultrasonido.

Para ajustar la indicación de distancia cubrir con el primer eco la marca 100 mm. de la escala del osciloscopio. El segundo eco procedente de la ranura fresada debe coincidir con la marca 200 mm. en la misma escala. Este ajuste de indicación de distancia sólo sirve para aceros con una velocidad de onda de $3255 \text{ m/s} \pm 15 \text{ m/s}$.

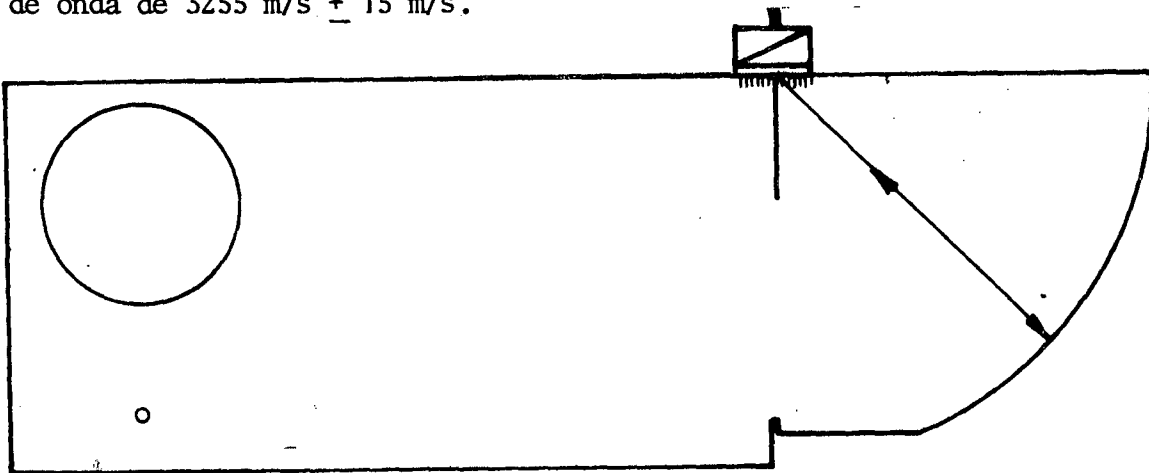


Figura 45 - Punto de salida del haz

Ajuste de la indicación de distancia usando sonda normal: en casos especiales (por ejemplo, cuando se desea una sucesión más densa de los ecos de comprobación) puede ampliarse la distancia de 91 mm. del bloque de calibración, utilizando una sonda normal de ondas longitudinales, ya que el tiempo de recorrido del impulso para ondas longitudinales en una distancia de 91 mm. es

igual al tiempo de recorrido para ondas transversales en una distancia de 50 mm.

En primer lugar, entonces, se coloca la sonda normal en la posición indicada según la figura 46a). La representación de ecos en la pantalla corresponde a la indicada en la figura 46b).

Logrado esto se procede en similitud a lo indicado en 9.1.2., ajustando la separación entre ecos al valor de 50 mm.

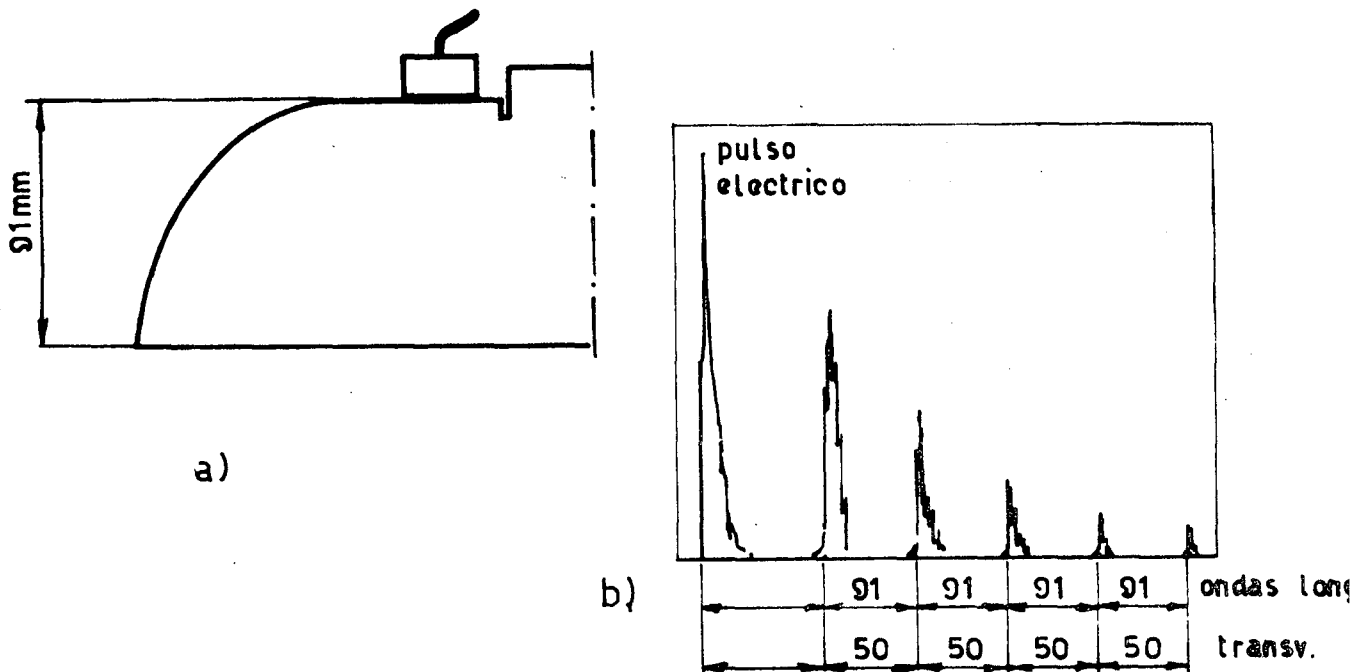


Figura 46. - Ajuste de indicación de distancia con palpador normal de ondas longitudinales

Determinación del ángulo de refracción verdadero

- Fijar la sonda con el punto de salida del haz en coincidencia con la marca del bloque de calibración correspondiente al ángulo nominal de la misma y con el haz orientado hacia el disco plástico como se indica en la figura 47a) para ángulos entre 35° y 65°. Si el ángulo está comprendido entre 60° y 75° se debe ubicar la sonda según se indica en la figura 47b) usando como reflector al disco de plástico.

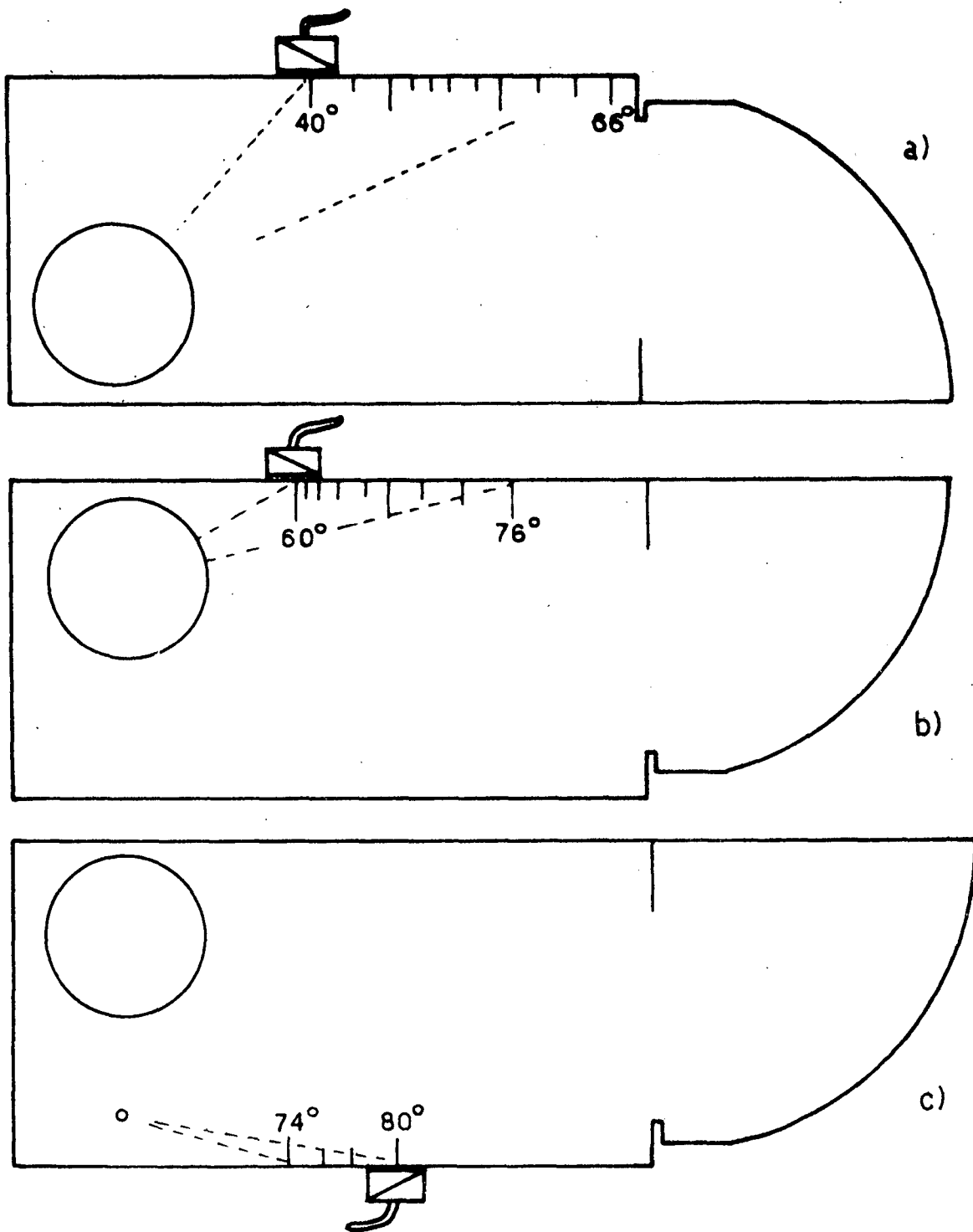


Figura 47 - Angulo de refracción

- Para ángulos entre 75° y 80° la sonda se debe posicionar como se indica en la figura 47c), con el haz orientado hacia el orificio de 1,5 mm de Ø.

- En la posición que corresponda, desplazar hacia atrás y hacia adelante la sonda hasta obtener en la pantalla el eco máximo.
- El valor del ángulo, marcado en el bloque de calibración que coincide con el punto de salida del haz en la sonda en el momento de eco máximo corresponde al ángulo de refracción verdadero.

Medición de la distancia de reflexión: La distancia de reflexión o de salto corresponde al camino realmente recorrido por el pulso de ultrasonido entre el punto de salida desde sonda angular en contacto con una placa y el punto en que el sonido, reflejado en la cara inferior, vuelve a incidir en la cara superior.

Para determinar la distancia de reflexión o de salto en el bloque de comprobación se ubica la sonda angular como muestra la figura 48 (espesor de 25 mm.) y se desplaza hacia atrás y hacia adelante en forma paralela a la escala graduada hasta que se alcance el eco máximo. En la escala calibrada del osciloscopio se puede leer el valor correspondiente. En la posición de la figura 48a) la indicación de un eco máximo corresponde a la distancia mitad de reflexión o salto.

Con la sonda angular de 60° esta determinación no puede hacerse con suficiente precisión debido a transformaciones perturbadoras entre ondas longitudinales y transversales.

Ajuste de la indicación en distancia de proyección

La distancia de proyección es la medida de la distancia de reflexión en su proyección normal sobre la superficie de la placa en ensayo. Si se ha de ajustar el aparato en distancias de proyección se procederá de acuerdo a lo indicado en el punto 6.4.1. pero ajustando los ecos primero y segundo sobre los valores $100 \text{ mm. } \sin \alpha$ y $200 \text{ mm. } \sin \alpha$ respectivamente, siendo α el ángulo de refracción verdadero determinado según vimos anteriormente.

Este ajuste sólo se puede efectuar en forma muy poco aproximada cuando el ángulo de refracción es de 60° por las razones ya expuestas al tratar modos de conversión en el punto 2.5 pag.16 y solo es válido para aceros con velocidad para ondas transversales de $3255 \text{ m/s} \pm 15 \text{ m/s}$.

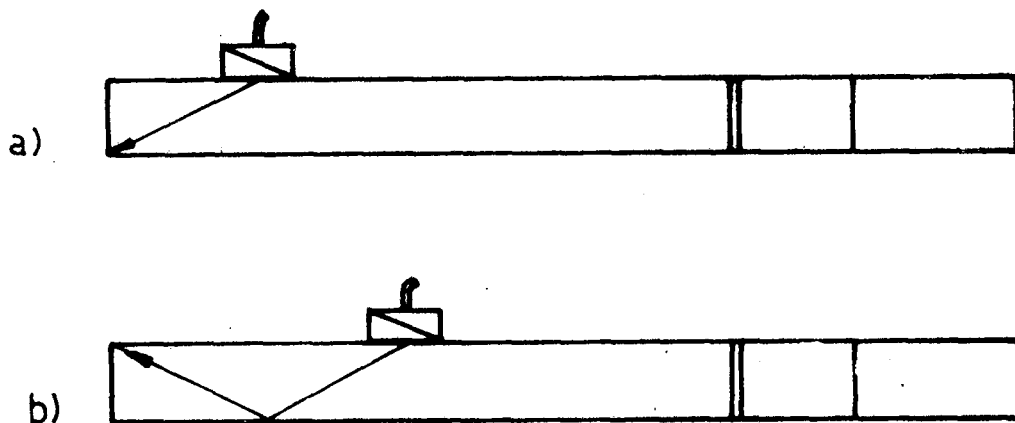


Figura 48 - Definición de distancia de reflexión o de salto.

Verificación de sensibilidad de trabajo: se coloca la sonda angular en la posición indicada en la figura 45 buscando la máxima indicación del primer eco que se hace coincidir con la división 100 mm. Conseguido esto anotar la ganancia y la altura del último eco observable en la pantalla. Alternativamente se puede anotar la ganancia requerida (en dB) para llevar la altura del primer eco al 100% de la escala.

La verificación de sensibilidad de trabajo puede ser realizada también con sondas angulares empleando el orificio de 1,5 mm. del bloque. Para ello se ubica la sonda según lo indicado en la Figura 49, desplazándola hasta obtener el eco máximo. Se anotará la ganancia (dB) con que se trabaja, la altura de eco obtenido y la posición de la sonda sobre el bloque.

Como se ha dicho, este ajuste de sensibilidad de trabajo sólo se aplica para verificar el mantenimiento o variación de sensibilidad de un mismo equipo en el transcurso de un ensayo.

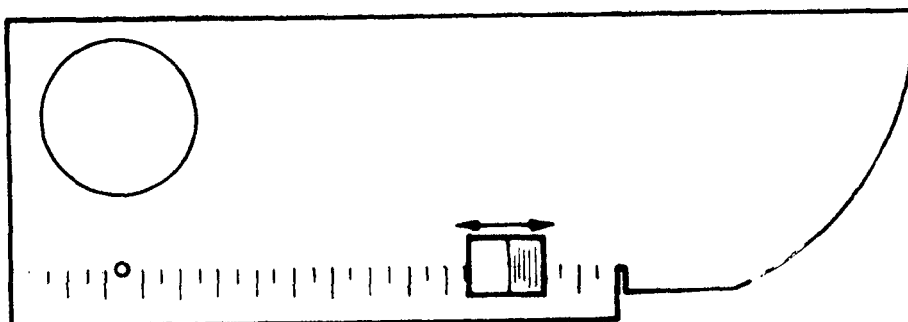


Figura 49 - Ajuste de sensibilidad de trabajo con sonda angular.

9.2. Evaluación de sistemas de ensayo ultrasónico por reflexión de acuerdo a la norma ASTM E-317-68

La norma ASTM E-317-68 describe la práctica recomendada para determinar características del comportamiento que fijan la capacidad de un sistema de ensayo por reflexión (pulso-eco) en el cual la indicación se presenta en barrido A mediante tubo de rayos catódicos.

Este procedimiento puede ser aplicado a la evaluación de cualquier combinación de instrumento, correctores y palpador que emplee ondas longitudinales pulsantes en técnica de contacto o por inmersión. No es aplicable en la evaluación de sistemas que empleen dos palpadores en técnica por transmisión, palpadores angulares o haces ultrasónicos focalizados.

La norma describe las condiciones que deben reunir los aparatos y accesorios utilizados incluyendo los bloques de referencia.

Para determinar las características de linealidad vertical y horizontal describe un bloque de referencia de forma rectangular, cuadrada o circular cuya dimensión mínima en la cara de entrada del haz no debe ser inferior a 50 mm y su espesor debe estar entre 5 y 10 mm (Figura 50). Ambas caras (de entrada y de reflexión) deben ser paralelas entre sí en $\pm 0,025$ mm, planas dentro de $\pm 0,0051$ mm y su rugosidad inferior a 30 min. rms.

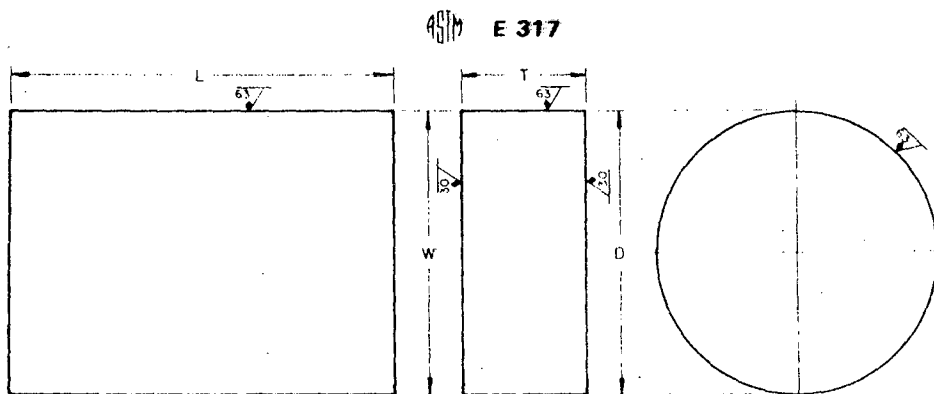


Figura 50 - Bloque de referencia norma ASTM E-317.

Para determinar características de sensibilidad y resolución se emplean bloques de aluminio preparados de acuerdo a la norma ASTM E-127. Estos bloques forman una serie, con orificios de fondo plano dispuestos en la cara de reflexión de manera que actúen como reflectores de diámetro conocido situados a distancias fijas de la cara de entrada del haz. En la tabla VII

se dan las dimensiones para la serie de estos bloques a usar en esta práctica.

La norma fija las condiciones requeridas para usar las técnicas de contacto o de inmersión.

TABLE I ASTM Ultrasonic Standard Reference Blocks Recommended for Evaluating System Sensitivity Signal-to-Noise Ratio and Resolution.

Block No.	Hole Size, dia. in. (mm)	Metal Distance, in. (mm)
5-0012	$\frac{1}{16}$ (1.98)	0.12 (3.05)
5-0025	$\frac{1}{8}$ (1.98)	0.25 (6.35)
5-0038	$\frac{1}{4}$ (1.98)	0.38 (9.65)
5-0050	$\frac{1}{2}$ (1.98)	0.50 (12.7)
5-0075	$\frac{3}{8}$ (1.98)	0.75 (19.1)
1-0300	$\frac{1}{16}$ (0.40)	3.00 (76.2)
2-0300	$\frac{1}{8}$ (0.79)	3.00 (76.2)

Tabla VII

9.2.1. Determinación de linealidad vertical

En forma resumida esta determinación puede ser descripta como sigue:

- Obtener una respuesta inicial del bloque N° 1-0300 posicionando el palpador de manera de conseguir la máxima respuesta del fondo del agujero y mediante el ajuste del barrido horizontal conseguir una indicación como la representada en la figura 51.
- Ajustar el control de ganancia hasta conseguir que la indicación del fondo del agujero (h en la figura 51) tenga una altura de 5 mm.

Nota: Si no se consigue indicación con el bloque 1-0300 se puede usar el bloque 2-0300 y operar de la manera descripta.

- Sin modificar el ajuste de ganancia realizado, llevar el palpador al bloque de referencia indicado en la figura 50 y ajustar el barrido horizontal hasta obtener un oscilograma como el indicado en la figura 52, acomodando el palpador de manera de obtener el máximo número de ecos.

Una vez logrado el máximo número de ecos fijar la posición del palpador en el bloque para mantener su posición constante durante la evaluación de linealidad horizontal y vertical.

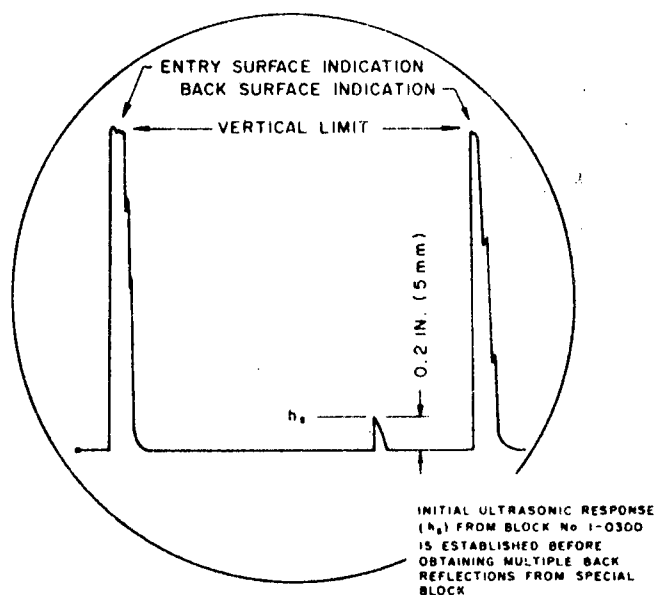


Figura 51 - Oscilograma típico obtenido de un bloque de calibración 1-0300.

Sin efectuar nuevos ajustes seleccionar uno de los ecos múltiples que tenga amplitud de aproximadamente 5 mm, h_n en la figura 52.

Con la misma ganancia medir y anotar la altura del eco siguiente $h_{(n+1)}$.

Aumentar la ganancia hasta conseguir que el eco h_n alcance la altura de 10 mm y medir y anotar la correspondiente altura del eco $h_{(n+1)}$.

Repetir el procedimiento para conseguir sucesivos incrementos de 10 mm en la altura de h_n , anotando los correspondientes valores de altura de $h_{(n+1)}$ hasta que no se puedan obtener más aumentos de la altura del eco h_n . Este punto es llamado "límite vertical" y puede ser alcanzado por las características electrónicas del sistema o porque el pulso h_n llega al 100% de la altura posible en el oscilografo.

La evaluación de la característica de linealidad vertical se obtiene de la graficación de los valores obtenidos según el procedimiento descrito, disponiendo en ordenadas los valores de amplitud para h_n con cada ganancia, y en abscisas las relaciones de amplitud $h_n/h_{(n+1)}$ correspondientes (Figura 53.)

ASTM E 317

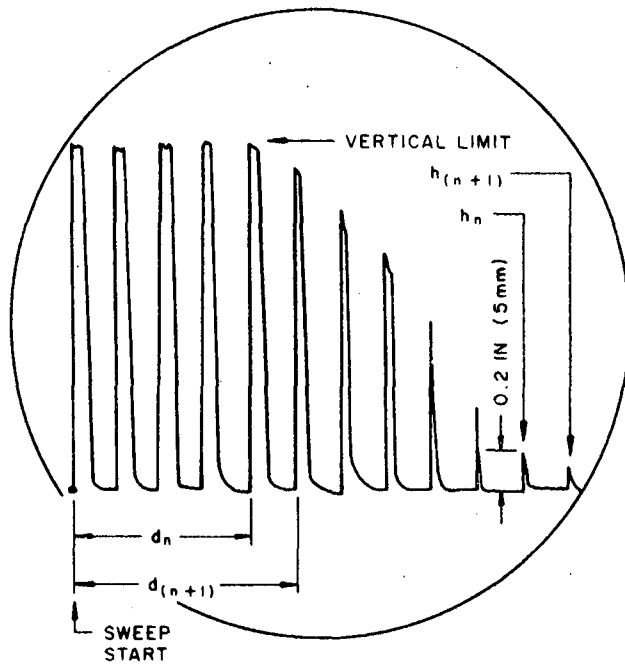


Figura 52 - Oscilograma correspondiente a los ecos múltiples obtenidos de un bloque de referencia ASTM E-317.

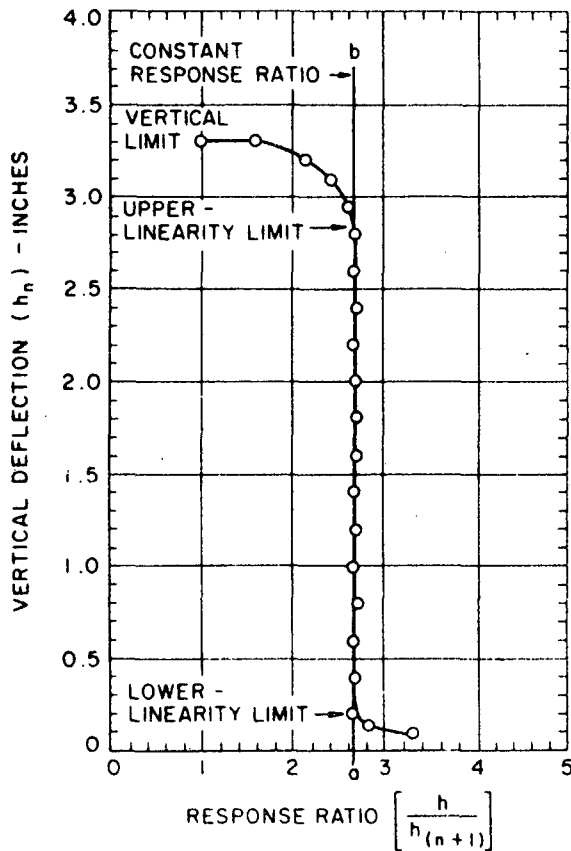


Figura 53 - Linealidad Vertical.

9.2.2. Determinación de linealidad horizontal

Se utiliza el bloque de referencia descrito en la misma norma procediendo de acuerdo a lo siguiente:

- Con el sistema ajustado de acuerdo a lo descrito para la evaluación de linealidad vertical se obtiene el oscilograma mostrado en la figura 52 y sobre el mismo se mide y anota la posición actual de cada eco, midiendo desde el arranque del eco inicial hasta el arranque de cada uno de los ecos siguientes.

Para evaluar la linealidad se construye un gráfico anotando en ordenadas la distancia entre cada par de ecos sucesivos ($d_{(n+1)} - d_n$) y en abcisas la distancia de cada eco (d_n) respecto del eco inicial (Figura 54). El rango de linealidad horizontal estará dado por la distancia en la cual todos los puntos de la curva se ubican en una recta paralela al eje de abcisas.

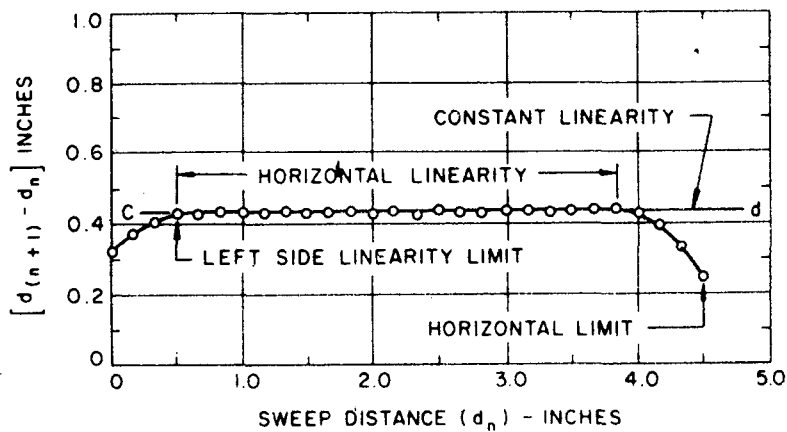


Figura 54 - Linealidad horizontal

9.2.3. Sensibilidad y ruido de fondo

Completado el ensayo de linealidad vertical y el ensayo de linealidad horizontal se aplica el palpador en el bloque de referencia 1-0300 y se ajusta la ganancia del equipo a su máximo valor.

Posicionando con cuidado el palpador, conseguir la máxima amplitud en la indicación h_1 del eco correspondiente al agujero de fondo plano, como se ilustra en la figura 55.

ASTM E 317

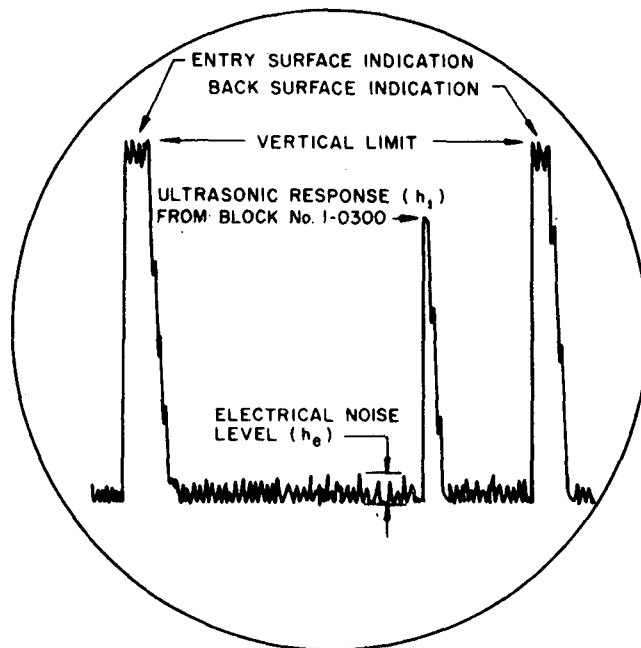


Figura 55 - Indicación correspondiente al eco de reflexión en el agujero del bloque 1-0300, con máxima ganancia en el equipo.

Medir la altura de esta indicación (h_1) que representa la sensibilidad ultrasónica del ensayo, en milímetros desde la línea de base de barrido horizontal y anotar el valor correspondiente si resulta igual o inferior al límite superior de linealidad medido anteriormente. Medir luego la máxima altura correspondiente al ruido de fondo en el oscilograma (h_e) como se indica en la figura 55. Debe cuidarse de medir realmente el ruido de fondo eléctrico sin la distorsión causada por el alto nivel de la indicación de entrada.

Si la altura de h_1 resulta mayor que el límite superior de linealidad se debe disminuir la ganancia hasta conseguir que la altura de h_1 sea igual al límite superior de linealidad. Anotar este valor como sensibilidad ultrasónica del ensayo y medir en estas condiciones de ganancia el valor del ruido de fondo h_e .

9.2.4. Resolución

Utilizando el bloque 5-0075 obtener la máxima reflexión del agujero

de fondo plano mediante el posicionado adecuado del palpador y ajustar el barrido horizontal para obtener una indicación como se muestra en la figura 56.

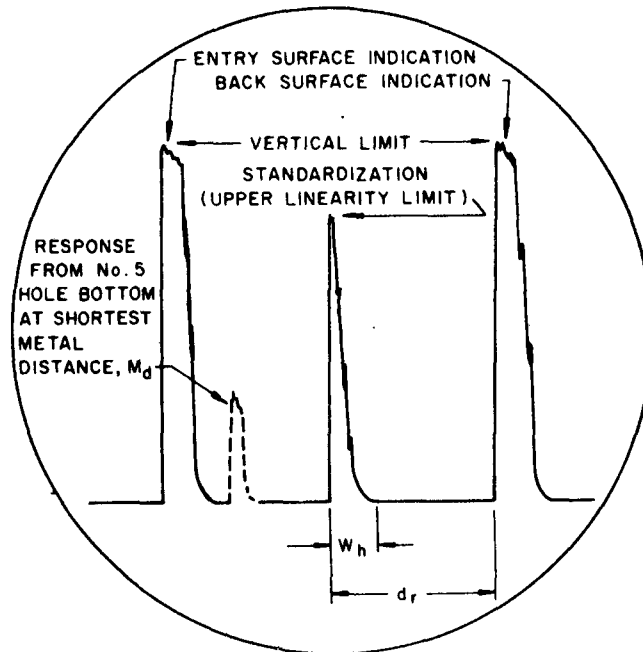


Figura 56 - Determinación de la resolución.

Logrado esto ajustar la ganancia hasta lograr que la amplitud de la indicación del agujero de fondo plano sea igual al límite superior de linealidad vertical. Manteniendo las condiciones del equipo obtener las máximas indicaciones del agujero de fondo plano de cada uno de los bloques de la serie indicada en la tabla VIII, que contengan el agujero de 7,94 mm de diámetro a una distancia M_d menor que 19,05 mm y entonces registrar la distancia M_d más corta para la cual sea posible obtener un eco claramente definido (Figura 56). Este valor indica la resolución en la superficie de entrada.

Para determinar la *resolución desde la cara de reflexión* se mide, sobre el oscilograma obtenido en la determinación de resolución de entrada, el ancho W_h de la indicación del agujero del bloque 5-0075 y la distancia de barrido d desde el arranque del eco del agujero hasta el arranque del eco de fondo como se indica en la figura 56. La *resolución desde la cara de reflexión* se expresa como la distancia de metal en el bloque de referencia de una indicación de discontinuidad impide la detección de otra discontinuidad cerca de la superficie posterior de reflexión. Este valor de resolución se computa

de acuerdo a la siguiente ecuación

$$R_b = (W_h/d_r) \times H_d \text{ mm} \quad (36)$$

donde

R_b = resolución desde la cara de reflexión, del material usado en el bloque de referencia.

W_h = ancho de la indicación del agujero, medido en la línea de barrido del oscilograma.

d_r = distancia de barrido entre la indicación del agujero y la indicación del reflejo de fondo.

H_d = profundidad del agujero de fondo plano en mm.

9.2.4. Penetración

La penetración es definida arbitrariamente como el máximo número de ecos de reflexión de fondo obtenidos del bloque de referencia indicado en la figura 50, cuando la ganancia del equipo se ha ajustado a su máximo valor.

10. ENSAYO ULTRASONICO DE SOLDADURAS

La inspección de soldaduras por fusión mediante el ensayo ultrasónico se realiza aplicando técnicas, de reflexión por pulso-eco con ondas transversales utilizando palpadores angulares.

En la figura 57 se ha esquematizado la disposición típica que corresponde al ensayo de soldaduras. El haz de ultrasonido, en forma de pulsos de corta duración, ingresa en la chapa soldada con un cierto ángulo, sufre una primer reflexión en la cara opuesta de la chapa atravesando luego la sección de la soldadura y sufriendo sucesivas reflexiones continúa su propagación en la chapa como se puede ver en la figura 57a), en la cual se ha representado a la izquierda la imagen que correspondería observar en la pantalla del equipo.

Si en la sección de la soldadura existe un defecto, parte o la totalidad de la energía ultrasónica, según la amplitud del defecto, es reflejada y vuelve al palpador que actuando como receptor recoge la señal y la transmite al equipo. El esquema de la marcha del haz ultrasónico en este caso se puede ver en la figura 57b), en la cual a la derecha se ha indicado la imagen que correspondería observar en la pantalla del equipo.

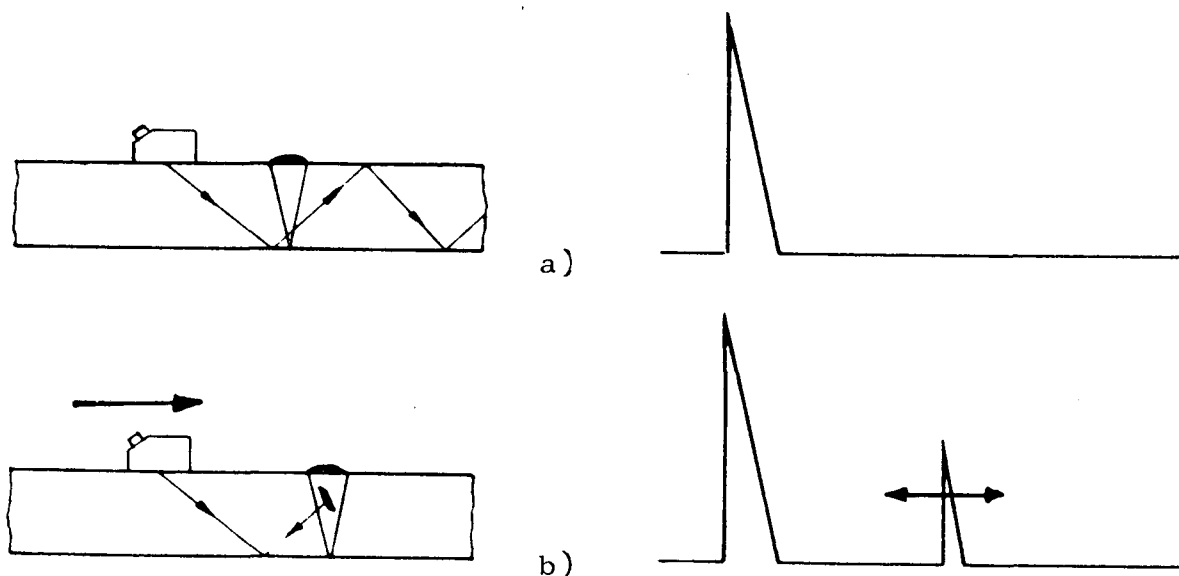


Fig. 57: Ensayo de soldaduras por reflexión

Para cubrir toda la sección transversal de la soldadura el palpador debe ser acercado y alejado del eje de la misma lo suficiente como para lograr que el haz barra la soldadura desde la raíz hasta la sobremonta. La distancia del eco de defecto al eco de transmisión en la pantalla del equipo es proporcional a la profundidad a que se encuentra el defecto en el cordón.

10.1. Preparación del ensayo

Antes de iniciar el ensayo es necesario hacer una observación visual de la soldadura a fin de determinar en lo posible las condiciones geométricas de la misma, especialmente el grado de penetración, tipo de raíz y sobremonta, socavaduras en los bordes del cordón, geometría de la pieza, diferencias de espesores en la chapa y toda aquella información referida a la terminación del trabajo, es decir, presencia de irregularidades en la superficie de la chapa tales como gotas de metal, inscrustaciones, rugosidades, rayaduras, etc.

Para asegurar un buen acoplamiento durante el ensayo y ahorrar tiempo en la inspección, siempre es conveniente hacer la preparación previa de la superficie en las zonas por donde debe desplazarse el palpador.

10.2. Frecuencia de ensayo

La frecuencia de ensayo en la inspección de soldaduras está comprendida generalmente entre 2 y 5 MHz según las condiciones del material y la sensibilidad requerida.

Una frecuencia baja facilita el acoplamiento en superficies rugosas y disminuye el efecto de atenuación que producen las estructuras metalográficas de grano grueso.

Frecuencias más elevadas permiten una mayor sensibilidad de detección y una mayor exactitud en la determinación de la extensión de los defectos.

10.3. Angulo de ensayo

La selección del ángulo de ensayo, dado aproximadamente por el ángulo nominal del palpador, está condicionada por el compromiso entre dos condiciones principales: que la exploración del total de la sección de soldadura debe hacerse con el menor recorrido del haz y que el haz debe encontrar al plano del defecto con un ángulo lo más próximo a la normal.

En la figura 58 se indican los trayectos correspondientes a dos palpadores con diferente ángulo nominal. Se puede observar que para el caso expuesto, a pesar de que el trayecto que recorre el haz proveniente del palpador A, de menor ángulo nominal, es menor que el correspondiente al del palpador B, este último, de mayor ángulo presenta condiciones más favorables para la detección del defecto indicado. En efecto, en este caso el haz, debido a la preparación de la junta, incide casi normalmente al defecto de falta de fusión que se debe localizar, mientras que el haz proveniente de la sonda A saldría reflejado del defecto con una dirección que no le permite retornar al palpador.

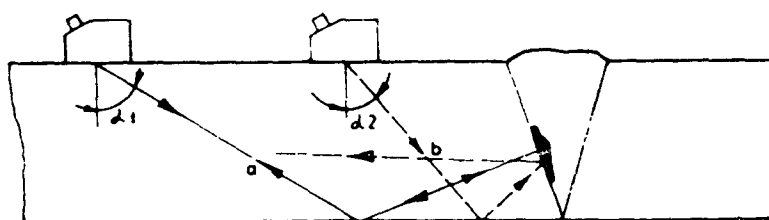


Figura 58 - Ángulo favorable para la detección de un defecto de falta de fusión.

En la tabla VIII se dan los valores aconsejados para la inspección de soldaduras por fusión en chapas de distintos espesores con juntas a tope. En la misma tabla se indican los valores de $\text{tg } \alpha$ y del camino proyectado, $s \cdot \text{tg } \alpha$, del haz ultrasónico.

Espesor	Angulo	tg.	s.tg
< 5 mm	80°	5,67	< 28 mm
5 ÷ 15 mm	70°	2,75	14 ÷ 40 mm
15 ÷ 30 mm	60°	1,73	26 ÷ 52 mm
30 ÷ 60 mm	45°	1	30 ÷ 60 mm
> 60 mm	35°	0,70	> 42 mm

Tabla VIII- Valores del ángulo nominal del palpador para el examen de soldaduras a tope en chapas de distintos espesores.

10.4. Dimensiones del palpador

La selección de las dimensiones nominales del palpador, y por lo tanto del cristal, debe hacerse teniendo en cuenta que:

- Palpadores de mayor diámetro permiten una mayor velocidad de inspección y dan un haz de menor divergencia pero que permite menos exactitud en la determinación de la posición y tamaño del defecto.
- Palpadores de menor diámetro permiten mejor adaptación a las superficies curvas y una mejor determinación de la posición y tipo de defecto, pero el haz tiene mayor divergencia y la energía disponible es menor.

10.5. Procedimiento de Exploración

Seleccionado el palpador que mejor se adapta al caso particular del ensayo, es necesario establecer qué desplazamientos se deben aplicar al palpador para asegurar la exploración de toda la sección de la soldadura.

10.5.1. Desplazamiento transversal del palpador

El primer movimiento fundamental que se imprime al palpador es en el sentido perpendicular al eje del cordón de soldadura. De esta manera se debe lograr que el haz explore toda la sección de la soldadura con una reflexión simple (Fig.59).

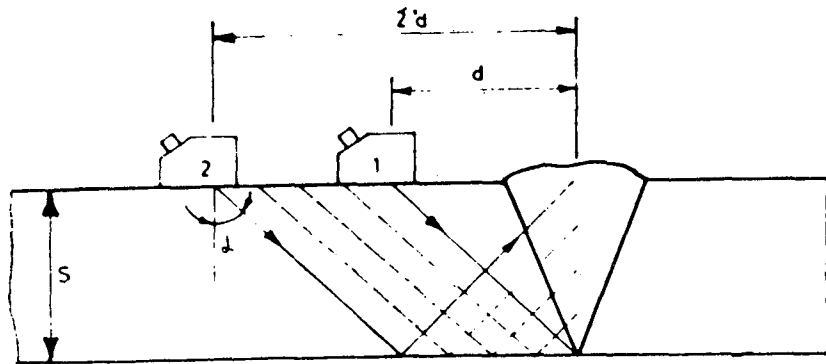


Figura 59 - Desplazamiento transversal del palpador respecto del eje del cordón de soldadura, en el ensayo por ultrasonido.

El palpador es desplazado en una faja cuya posición y ancho quedan determinados por el espesor de la chapa y el ángulo del palpador. Las dos distancias d y 2d indicadas en la Fig. 59 pueden ser determinadas analíticamente conociendo el espesor s y la tangente del ángulo del haz con la relación $d = s \cdot \text{tg } \alpha$.

Para calibrar el equipo se utiliza el bloque de calibración (IRAM 723).

Empíricamente la distancia d puede ser determinada observando la posición de máxima reflexión producida por un borde de la chapa como se indica en la Fig. 60. Apoyado el palpador en la proximidad de un borde de la chapa se obtiene la reflexión desde el canto inferior, esta reflexión se hace máxima cuando el haz incide exactamente en el mismo. La distancia del palpador en esta posición hasta el borde de la chapa equivale a la distancia d buscada.

Alejando el palpador del borde aparece a una distancia mayor, exactamente

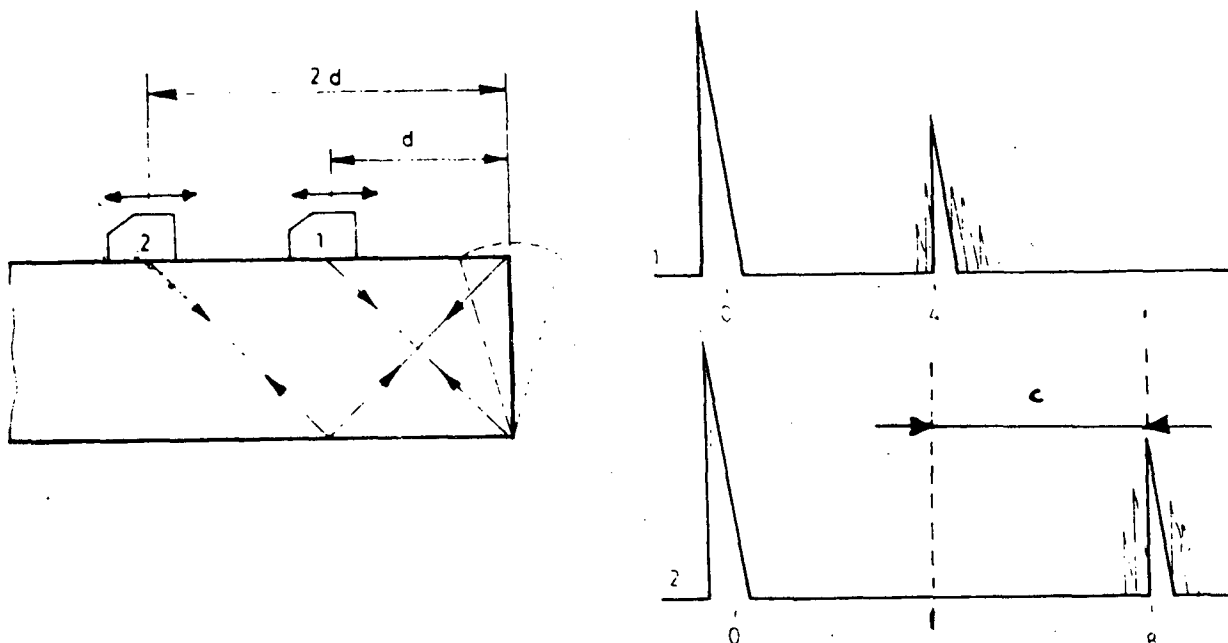


Figura 60 - Determinación práctica de la zona de exploración en el control de soldaduras por ultrasonidos.

al doble del valor de d , una nueva reflexión de máxima intensidad que corresponde al canto superior al cual llega el haz previa reflexión, como se indica en la figura 60.-

Esta operación que será posible siempre que se disponga de un trozo de chapa de espesor igual al que se debe examinar, permite determinar, sobre la pantalla del tubo de rayos catódicos, la zona de control. En esta zona aparecen todas las reflexiones de los eventuales defectos presentes en la soldadura cuando se procede a la inspección de la misma.

10.5.2. Desplazamiento longitudinal del palpador

El palpador debe ser desplazado además en forma paralela al cordón a fin de examinar toda la longitud de la soldadura. Este desplazamiento unido al transversal antes descripto da como resultante un desplazamiento

casi senoidal con un paso menor que la dimensión transversal del cristal (Fig.61).

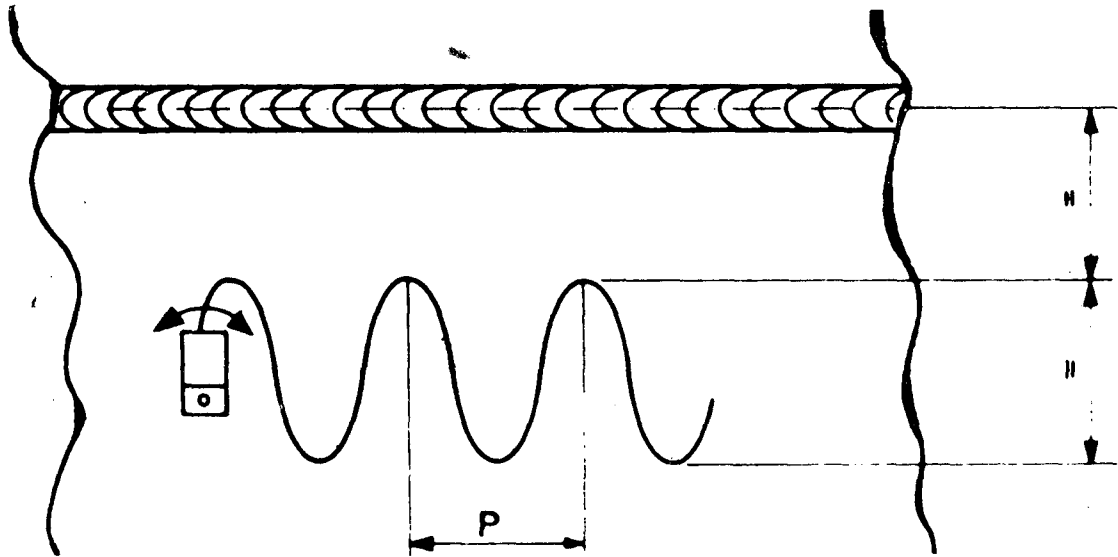


Figura 61 - Esquematización de los movimientos fundamentales a imprimir al palpador en el examen de soldaduras.

10.5.3. Rotación del palpador

Durante el desplazamiento senoidal o en zig-zag descrito se aconseja imprimir al palpador una ligera rotación alternativa de 15 a 20° para facilitar la detección de defectos de orientación particular, como por ejemplo fisuras e inclusiones.

Es necesario tener presente que con el tipo de desplazamientos descritos, aún con rotación, las fisuras transversales no serán detectadas, por lo cual si se prevee este tipo de defectos deben considerarse desplazamientos adicionales.

10.6. Examen de Soldaduras en ángulo o filete

En este tipo de soldaduras, se mantiene el mismo criterio de exploración descrito para soldaduras a tope. En la Fig.62 se han ilustrado dos soluciones de exploración para el control de soldaduras en ángulo. A la derecha se indica el caso correspondiente a filetes de penetración incompleta. A la izquierda se indica la exploración para el caso de filetes con penetración total.

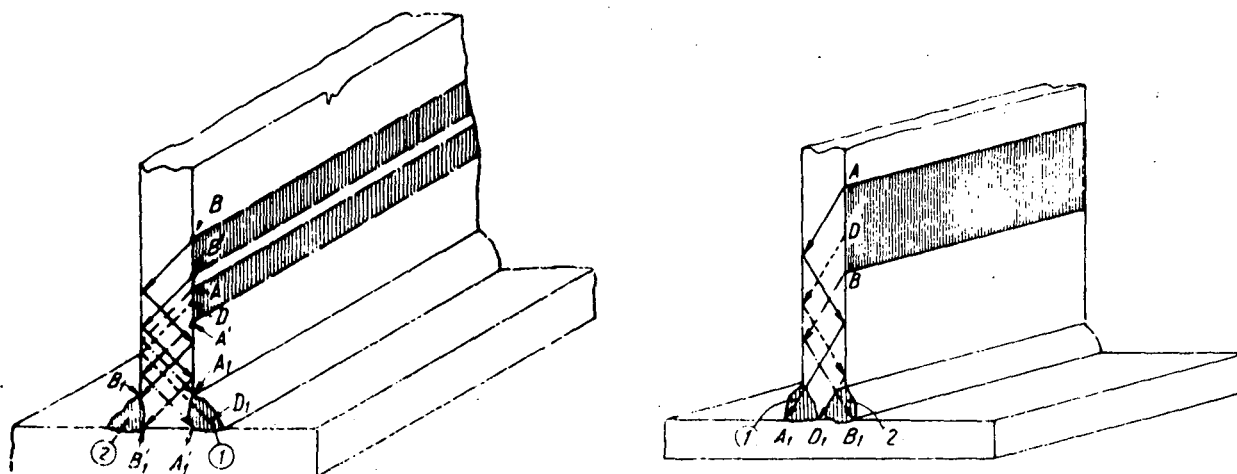


Figura 62 - Examen de soldaduras en ángulo. Esquema de exploración o barrido.

10.7. Localización de los defectos

El examen se inicia con un desplazamiento rápido del palpador, de acuerdo con el programa de exploración calculado. Cuando se obtiene una señal de reflexión originada por un defecto, el palpador debe ser movido hacia atrás y hacia adelante y eventualmente rotado hasta conseguir la máxima señal.

La ubicación del palpador en la posición de máxima reflexión y el camino recorrido por el haz ultrasónico reflejado por el defecto permiten evaluar la posición del mismo, como se indica en la Fig.63.

10.8. Identificación del tipo de defecto

Encontrada la posición del palpador para la cual el defecto es indicado con la máxima señal se procede a identificar su tipo mediante movimientos adecuados del palpador. Estos movimientos, como se indica en la Fig.64

son: rotación (1), orbital (2), lateral (3) y transversal (4).

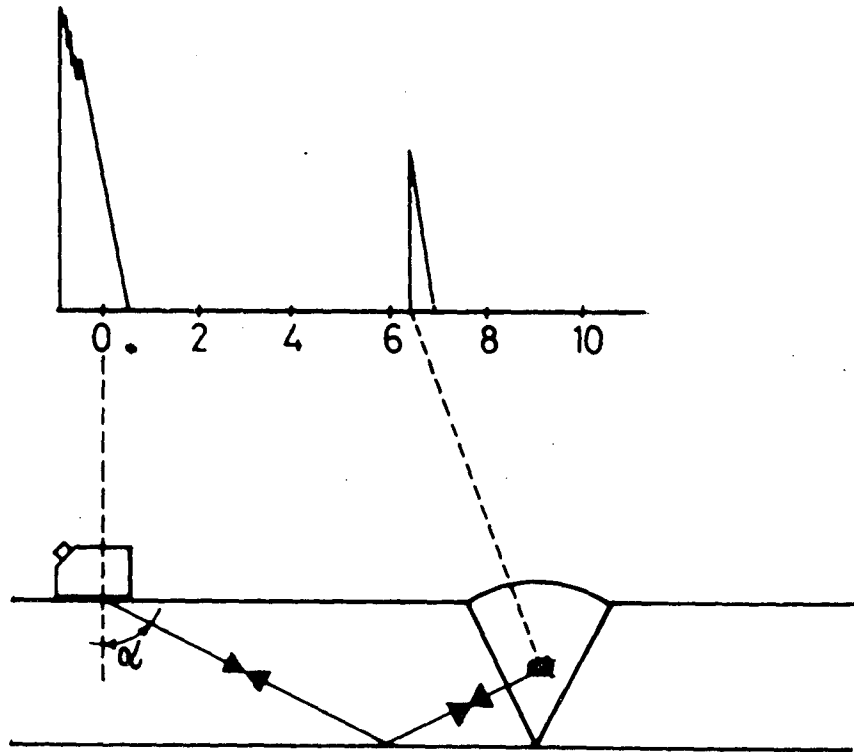


Fig. 63 - Localización de los defectos

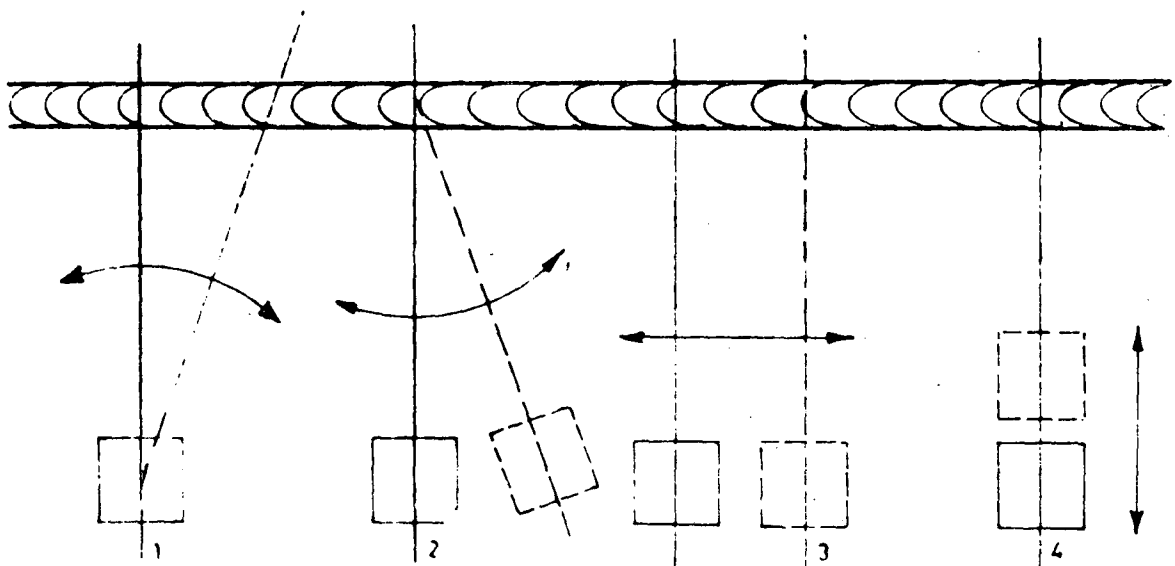


Figura 64 - Movimientos a imprimir al palpador para el reconocimiento de defectos.

Moviendo el palpador el defecto es interceptado por distintas zonas del haz ultrasónico y por lo tanto da origen a ecos de distintas amplitudes y en posiciones diversas. La sucesión de estos ecos en la pantalla determina la curva envolvente de dichos ecos, la cual por su forma y posición permite reconocer el tipo de defecto en cuestión.

Las figuras 65 y 66 ilustran esquemáticamente el comportamiento de las reflexiones para distintos movimientos con dos defectos típicos diferentes, uno lineal y otro esférico.

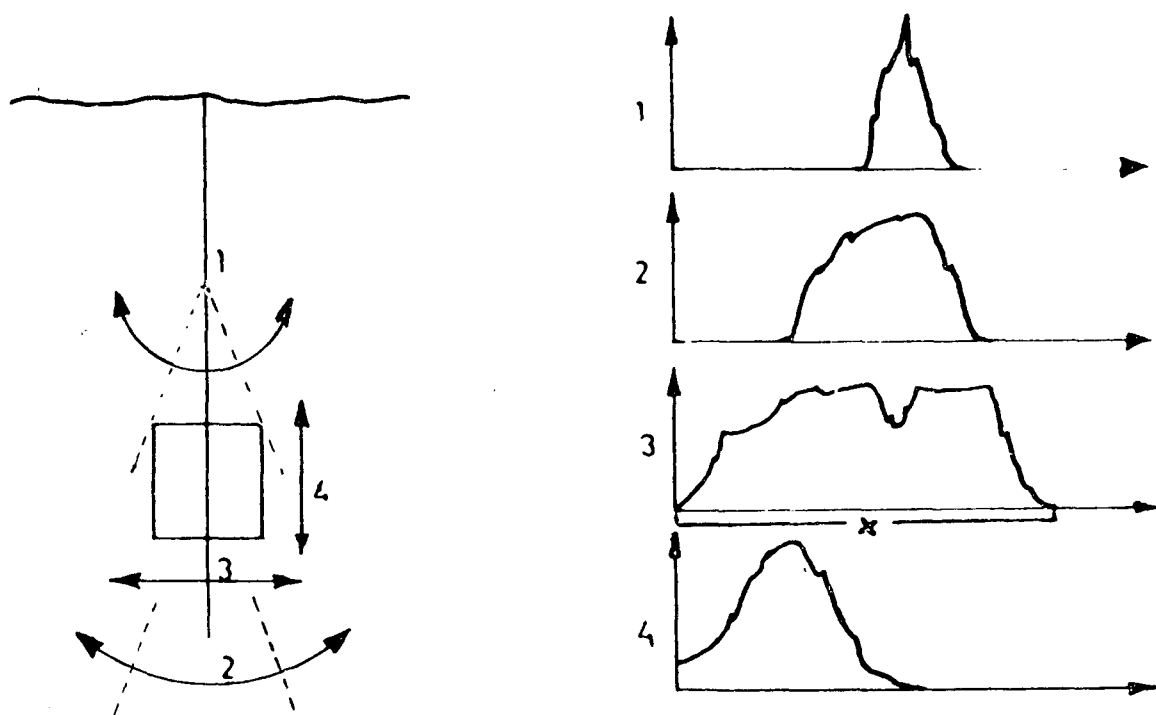


Figura 65 - Curvas envolventes para los cuatro movimientos básicos al explorar un defecto lineal.

En el caso de defecto lineal (Fig.65) al imprimir un movimiento rotacional (1), con centro en el palpador, la indicación decrece rápidamente aún para pequeñas rotaciones del palpador ya que el haz deja de incidir normalmente y la reflexión no llega al palpador.

Rotando el palpador con centro en el defecto (2) y movimiento orbital, la curva envolvente es bastante parecida a la anterior con ondulaciones irregulares y cae rápidamente. En efecto la fisura, para pequeñas rotaciones de la sonda puede presentar superficies elementales normales al haz incidente.

Con movimiento lateral (3) la reflexión permanece durante toda la extensión del defecto con ligeras variaciones debidas a irregularidades del mismo.

Con movimiento transversal (4), desde la máxima reflexión la señal disminuye irregular pero progresivamente.

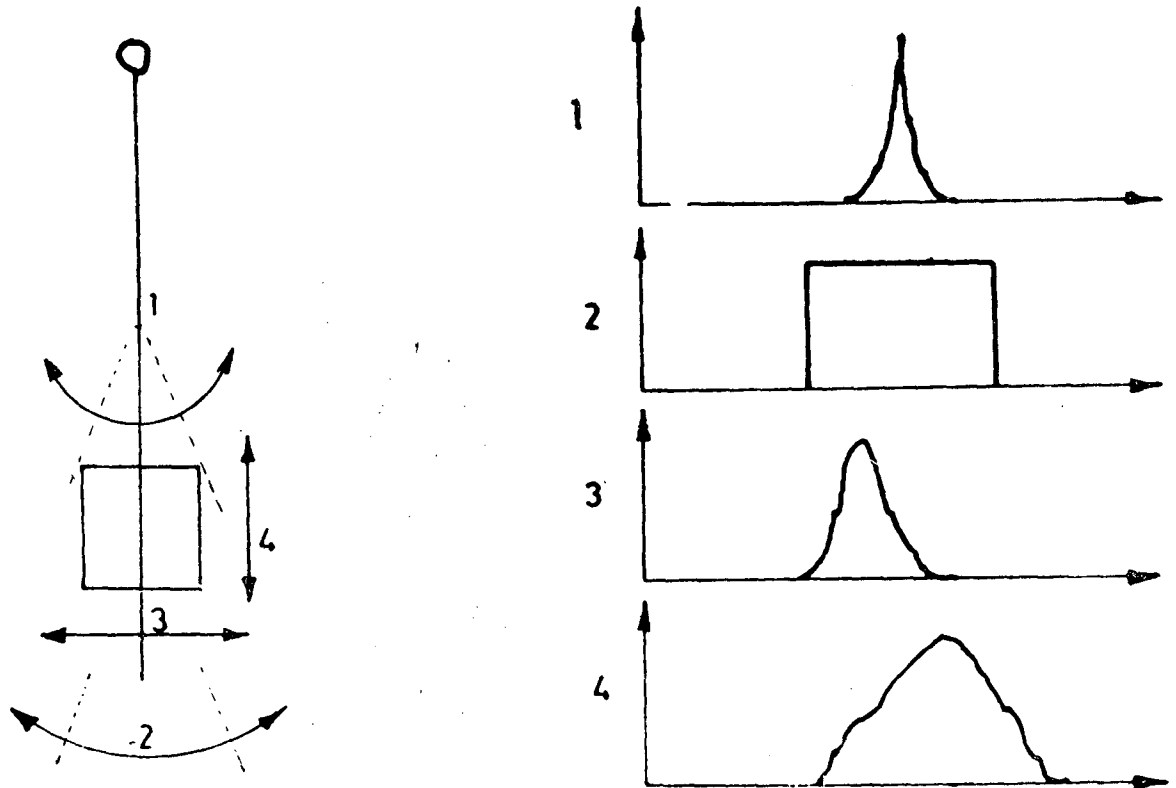


Figura 66 - Curvas envolventes para los cuatro movimientos básicos al explorar un defecto esférico.

Imprimiendo a la sonda un movimiento de rotación (1) la indicación cae inmediatamente, la curva envolvente es muy aguda.

Para el desplazamiento orbital (2) con centro en el defecto la curva permanece con amplitud constante ya que desde cualquier posición del palpador el defecto presenta una superficie semejante.

Con desplazamiento longitudinal (3) la curva envolvente es estrecha pero con su zona de máximo bastante roma, mientras que con desplazamiento transversal (4) se tiene desde la posición de máxima reflexión una disminución inicial lenta que luego se acelera hasta la extinción total.

10.9. Valuación de los defectos

Determinado el tipo de defecto se debe evaluar su identidad y extensión. Para ello se toma como referencia la amplitud que se obtiene con defectos patrones.

Cuando se trata de defectos tales como falta de penetración, falta de fusión o escorias lineales, la dimensión del defecto se determina mediante el desplazamiento longitudinal de la sonda.

La especificación del componente que se examina debe determinar el nivel de aceptación o rechazo de los defectos en función de la amplitud del eco de reflexión con relación a la amplitud de defectos patrones de referencia y a la extensión del defecto detectado.

11. Ensayo Ultrasónico de Caños y Tubos

En el presente capítulo, preparado por el Ing. NORBERTO CURTU, se dan los fundamentos básicos a tener en cuenta en el ensayo ultrasónico de caños y tubos y se describen las técnicas de aplicación para distintos tipos de defectos.

11.1. Introducción

El examen volumétrico de tubos y caños, que se realiza mediante el ensayo ultrasónico, permite detectar discontinuidades y defectos internos y superficiales sean estos volumétricos o planares siempre que se apliquen las técnicas apropiadas para cada caso específico.

En tubos y caños sin costura los defectos típicos son del tipo de fisuras incipientes, escamados en la superficie externa e interna, laminaciones, inclusiones y fallas de rechupe en la pared, introducidas durante el proceso de fabricación.

El diseño de las diferentes técnicas de inspección se hace teniendo en cuenta tres tipos generales de defectos:

- a) defectos longitudinales
- b) defectos transversales
- c) defectos laminares y variaciones de espesor.

En el caso de defectos volumétricos, tales como poros o inclusiones, será necesario utilizar la combinación de varias técnicas.

Las técnicas desarrolladas para la localización y evaluación de estos defectos producidos en el proceso de fabricación pueden ser aplicadas además para analizar defectos originados por fatiga, corrosión, etc.

El ensayo ultrasónico de tubos, caños y cuerpos cilíndricos en general, se hace mediante un haz de ondas transversales que se reflejan en las superficies interna y externa del tubo, en dirección normal al eje del mismo, siguiendo una trayectoria en zig-zag que le hace recorrer toda la sección de la zona cubierta por el ancho del haz.

El ensayo puede hacerse con palpadores angulares por contacto que se desplazan sobre la superficie del tubo en forma manual o automática o bien con palpadores normales de ondas longitudinales que, en un sistema por inmersión, orientados convenientemente, generan ondas transversales en el tubo.

En este capítulo veremos primeramente el fundamento general del ensayo, y luego las distintas técnicas de aplicación.

11.2. Fundamentos del ensayo con ondas transversales

Cuando se ensayan placas curvas o tubos, frecuentemente se usan ondas transversales que se propagan a lo largo de un camino en zig-zag tal como mostramos en la figura 67

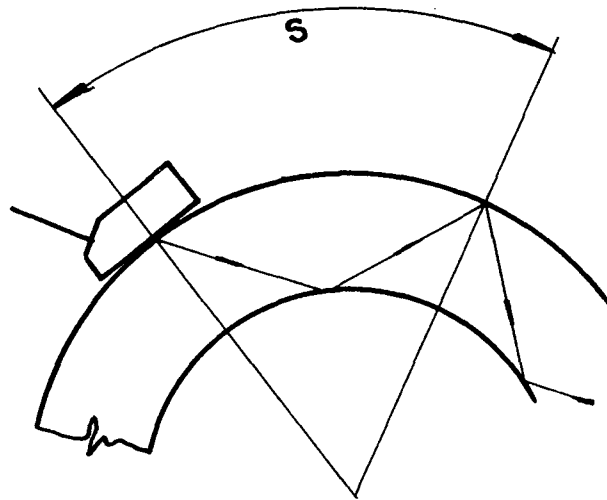


Figura 67.-

Camino del haz ultrasónico en una sección curva

Comparadas con las ondas longitudinales su principal ventaja es que si inciden a ángulos más grandes que 33° en acero (30° en aluminio) ellas son reflejadas totalmente sin ser divididas.

En tales condiciones estas ondas pueden viajar largas distancias, siempre que la rugosidad de la superficie sea pequeña comparada con la longitud de onda usada, tal que las pérdidas por dispersiones no tengan lugar o sean mínimas. Este efecto de la rugosidad superficial, a menudo disminuye a medida que el ángulo de incidencia se va haciendo más grande. Adicionalmente la amplitud del eco de rebote disminuye solamente de acuerdo con la ley de la distancia y con la atenuación del material para ondas transversales.

Cuando se usa el método de zig-zag la sección transversal de la pieza puede examinarse totalmente si el cristal es desplazado una distancia S sobre la superficie de la pieza.

De esta manera ambas superficies (externa e interna) pueden inspeccionarse en cuanto a la existencia de fisuras y además se inspecciona el espacio comprendido entre ellas de cualquier otro defecto.

Un eco como el correspondiente a una incidencia normal a la superficie, se obtiene solamente en un borde límite en el cual el camino en zig-zag de las

ondas incide justamente (reflección angular). Si el cabezal se mueve alejando y acercándose a este borde, se van produciendo ecos de la parte inferior o superior de este borde. De acuerdo con la divergencia del haz, estos ecos alcanzan un máximo y luego desaparecen, describiendo una curva como las indicadas en la figura 68, donde la altura de su máximo depende del camino recorrido hasta encontrar el borde donde se refleja perfectamente y los demás valores que forman esas curvas envolventes corresponden a máximos relativos provenientes de la reflexión del haz en el mismo borde pero no alcanzado por rayos de máxima energía (zona central del lóbulo) sino por rayos laterales.

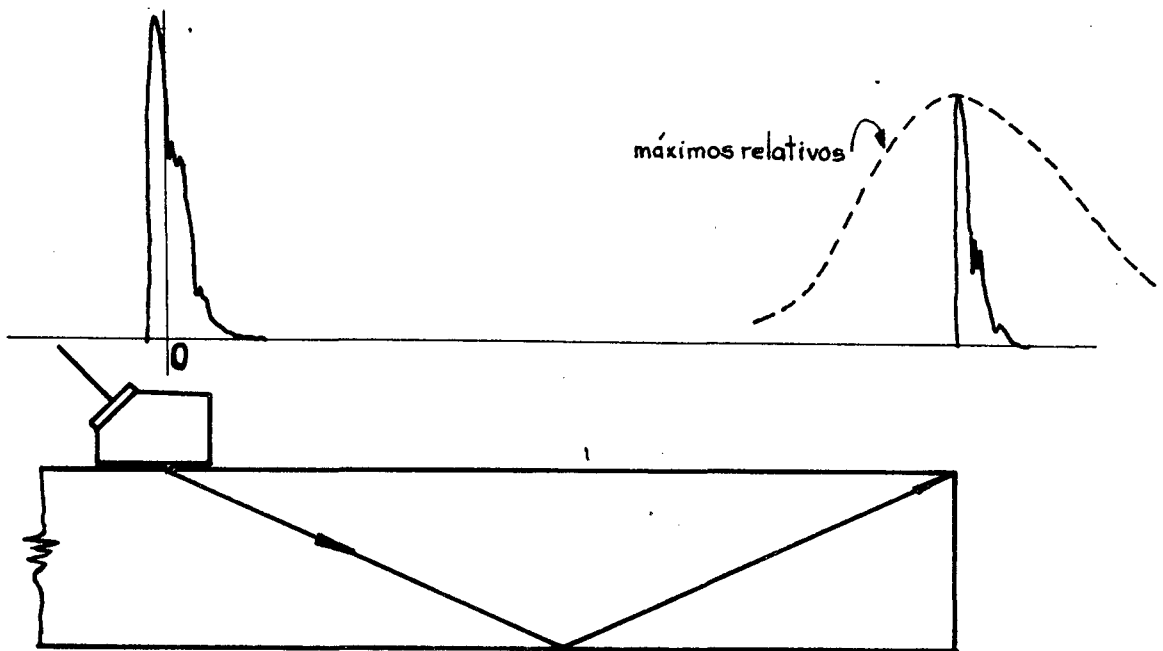


Figura 68.-

Para caminos cortos en placas gruesas solamente es visible un eco a la vez, figura 68, mientras que para caminos más largos o placas más delgadas las curvas envolventes son más anchas, superpuestas y se tiene desde los bordes como desde una falla varios ecos producidos simultáneamente, provenientes de los caminos en zig-zag de diferente inclinación. Esto, que se muestra en la figura 69, puede hacer difícil a un inspector inexperto interpretar y localizar fallas, puesto que él está acostumbrado a ver los ecos estando el cristal estacionario.

Las alturas de los ecos están dadas en función del ángulo de incidencia (zona del haz a la que pertenecen) y camino recorrido (absorción).

Con caminos más largos y secciones transversales delgadas, los ecos a lo

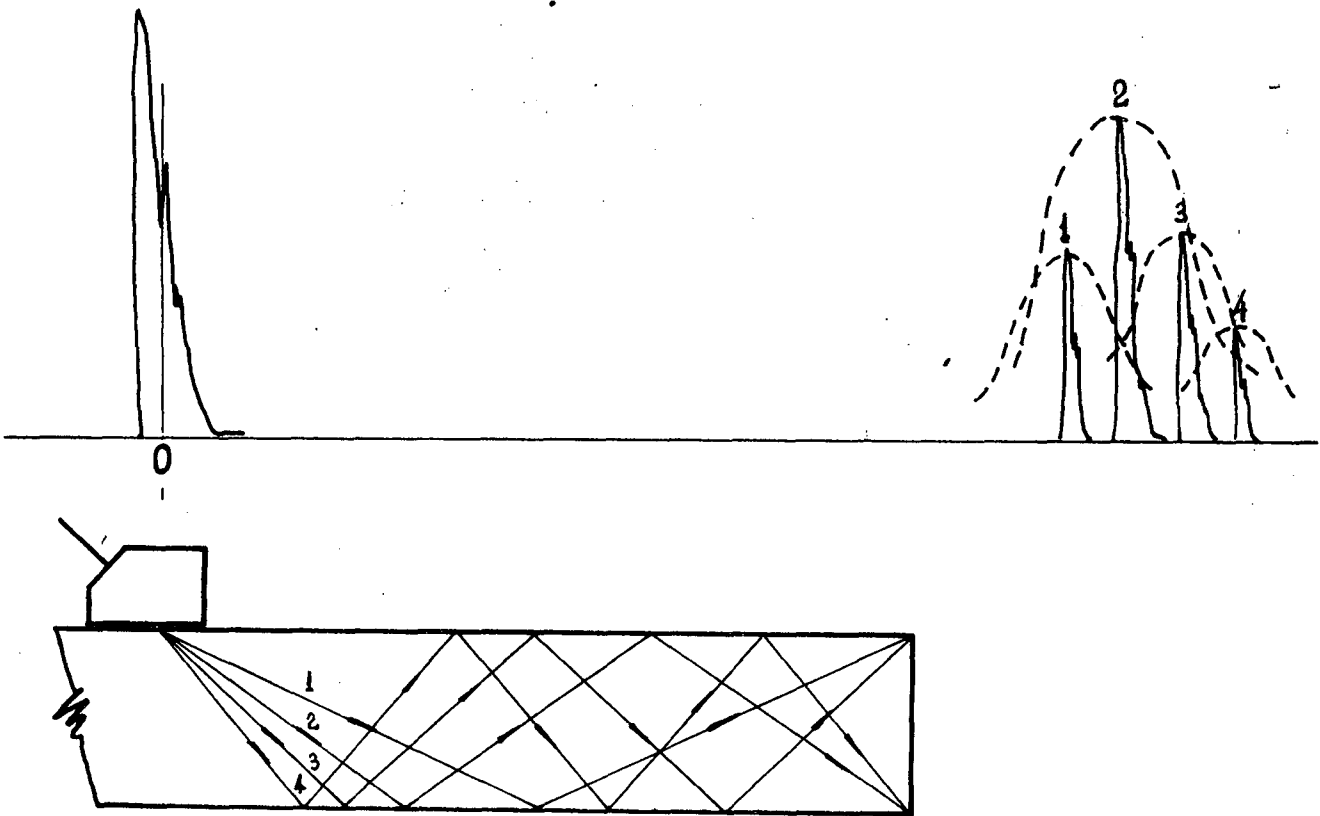


Figura 69.-

largo de varios zig-zag forman un grupo denso en una fisura incipiente en un caño. En este caso la exacta localización al igual que la diferenciación entre fallas ubicadas muy cerca, es verdaderamente dificultosa.

Para trazar el camino en zig-zag y el origen de los ecos, puede usarse el "ensayo del dedo", en el cual sigue el siguiente proceso, si uno toca con un dedo aceitado, el punto de reflexión de una onda transversal incidente en forma oblicua, la altura del eco puede fluctuar en el caso de acero en mucho más que $1/3$. En el caso de ondas longitudinales, a menudo, la fluctuación es muy pequeña y en el caso de ondas transversales que inciden en forma normal, la fluctuación prácticamente es nula. La localización de fallas por medio del método del camino en zig-zag, se facilita si uno marca en la pantalla del instrumento indicador, los puntos de reflexión en las dos superficies extremas entre las que se mueve el sonido, valiéndose para ello de los indicadores que se proveen con los instrumentos.

En algunos casos los puntos de reflexión está indicados automáticamente en la pantalla si la superficie es un poco rugosa. Esto es debido a que aparecen en los puntos correspondientes a esas reflexiones unos "montículos de pasto", los cuales, si movemos el cristal, mantienen su posición (puesto que aunque avancemos o retrocedamos el cristal, figura 69, el camino reco-

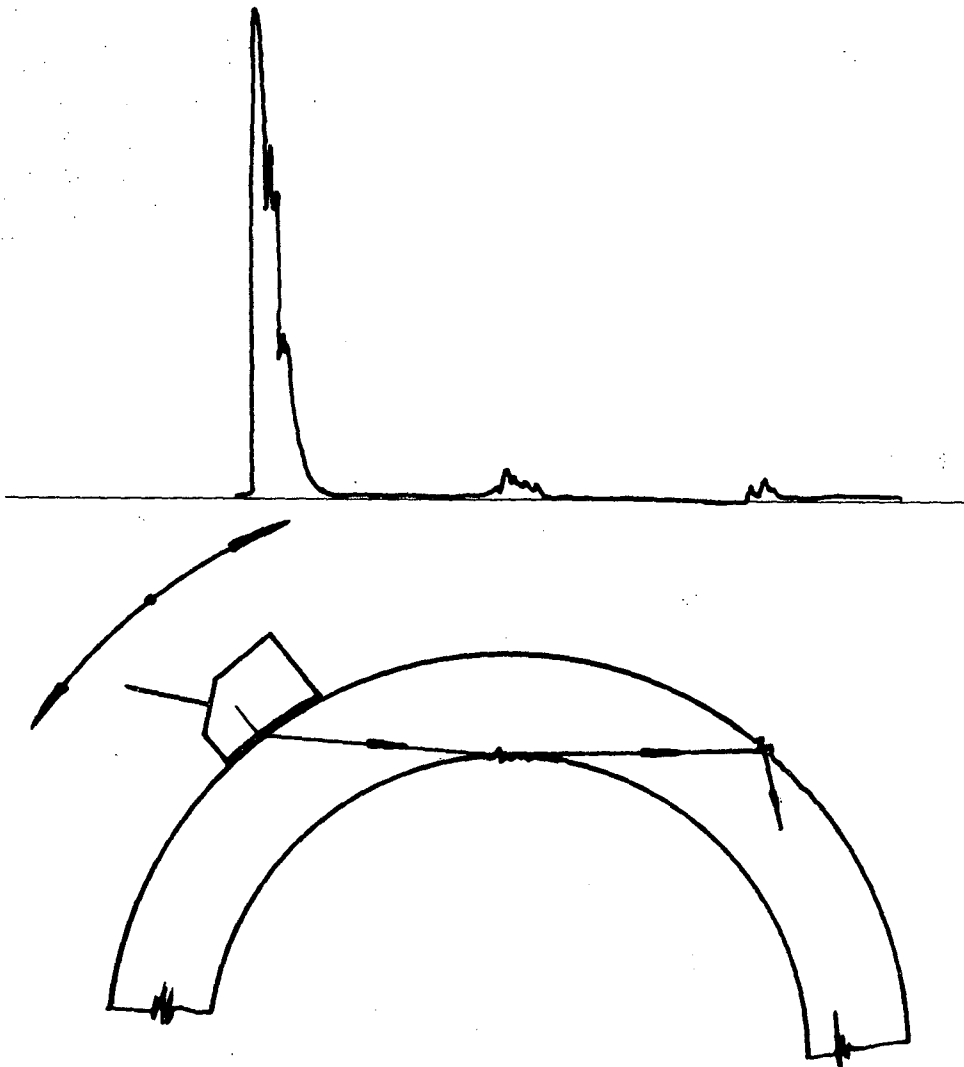


Figura 70.-

rrido por el haz es siempre el mismo) mientras que ecos pequeños viajan continuamente sobre ellos (son los correspondientes a las distintas rugosidades, las cuales no se mantienen constantes y provocan por ello reflexiones de distinta intensidad). Por ejemplo si el eco de una falla alcanza el máximo de su curva envolvente exactamente en el punto medio de la distancia existente entre las indicaciones citadas, la falla estará localizada a mitad de camino entre las caras de la pieza y su distancia hasta el cristal puede ser calculada. Luego podemos decir, que la falla ha quedado perfectamente localizada.

Con el fin de comprobar la sensibilidad de un ensayo con camino en zig-zag, se considera adecuado utilizar un block rectangular como el de la figura 71, o a menudo un pedazo de chapa con un borde recto. Como sabemos, la altura del eco en el caso de una reflexión angular (reflección en esquinas), a menudo puede usarse como eco de referencias solamente teniendo ciertas precauciones, puesto que en el caso del acero, por ejemplo la reflexión total,

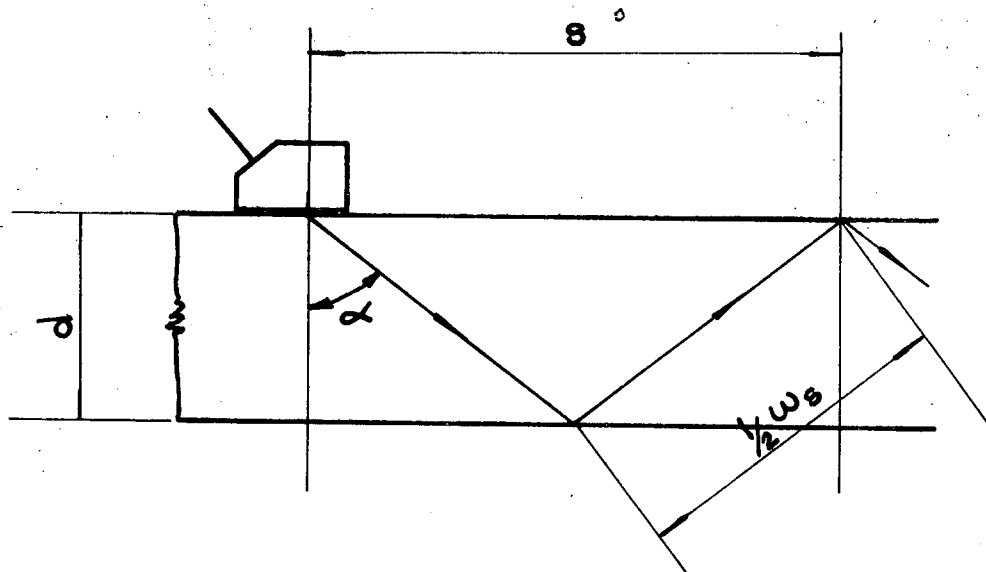


Figura 71 .-

ocurre solamente entre 33° y 57°, y una reflexión muy pequeña, por ejemplo a los 60°. Esto es también importante cuando se comprueba el ángulo de un haz, así en el caso de un cabezal de 60°, los rayos periféricos del haz, son reflejados fuertemente a 57° lo cual haría que, si uno pretende realizar el ajuste del cabezal con máxima altura del eco, proveniente del borde angular, se podría cometer el error de ajustarlo a ángulos menores que el deseado. Para medir o comprobar los ángulos de 60° o mayores se utiliza un agujero taladrado normalmente al eje del haz y paralelo a las superficies de la pieza de ensayo. Un ejemplo de esto puede verse en el patrón de calibración.

Para localizar la ubicación de una falla cuando se aplica un método de camino oblicuo o en zig-zag fórmulas sencillas como las siguientes son las que se emplean.

De acuerdo con la figura anterior la distancia S vale

$$S = 2.d.tg\alpha$$

puesto que

$$\cotg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = tg\alpha = \frac{1}{2} \frac{S}{d} = \frac{S}{2d}$$

y el camino del sonido correspondiente a esa distancia S valdrá

$$\cos\alpha = \frac{d}{\frac{1}{2} \omega_S}$$

$$\cos\alpha = \frac{2d}{\omega_S}$$

luego

$$\omega_s = \frac{2d}{\cos \alpha}$$

En el caso de tubos la distancia S o "distancia de salto" y el camino del sonido ω_s asociado a ella, se multiplican por un factor f_s y f_ω respectivamente, los cuales dependen del diámetro D del tubo y del espesor de pared d . En la figura 72 pueden encontrarse los valores de estos factores, representados en función de la relación d/D para distintos valores de α .

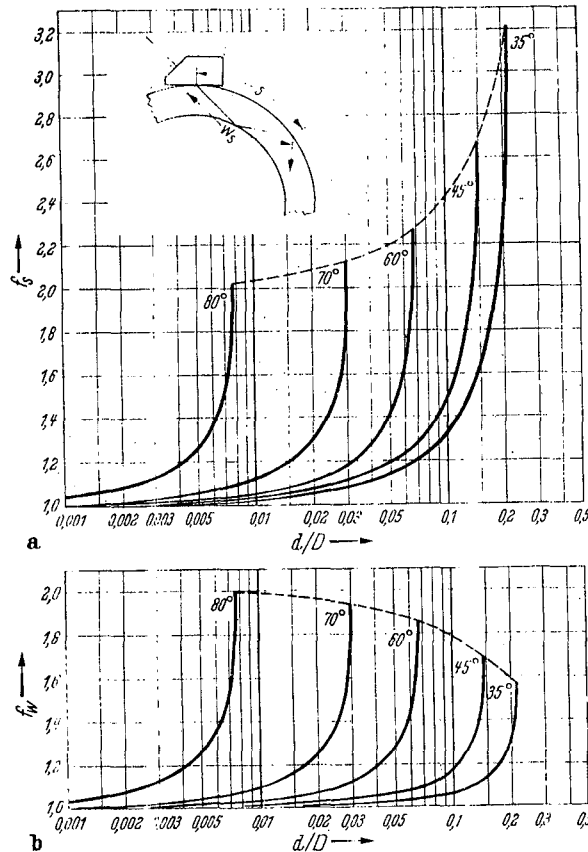


Figura 72.-

Para aquellos valores de d/D en correspondencia con los cuales las tangentes a esas curvas es vertical, significa que los valores de los factores f_s y f_ω de allí en más valdrán con lo cual estamos diciendo que la pared interna del tubo ya no será tocada más por el haz incidente, si es que para un dado ángulo α se sobrepasa la relación d/D límite.

Quiere decir que si quiero inspeccionar un tubo, el cual tiene ya una d/D fija, debemos elegir el ángulo de incidencia en base a que la normal levantada por d/D corte a su curva a la izquierda de la tangente vertical.

Las figuras 73 y 74 muestran que solamente puede cubrirse una máxima profundidad d^* (o espesor de pared d en tubos) cuando se ensaya un tubo de diámetro exterior D y con un ángulo α de incidencia dado: Pensando esto podemos ver que se van a presentar tres casos diferentes.

α es tal que el haz incidente alcanza sin problemas la pared interior del tubo, o sea que el espesor máximo alcanzado será igual al espesor total del tubo. Es decir que levantando una normal por la abcisa correspondiente a este d/D cortará a la curva de α a la izquierda del punto límite, con lo cual se reafirma que puede inspeccionarse sin inconvenientes de no alcanzar la pared interna.

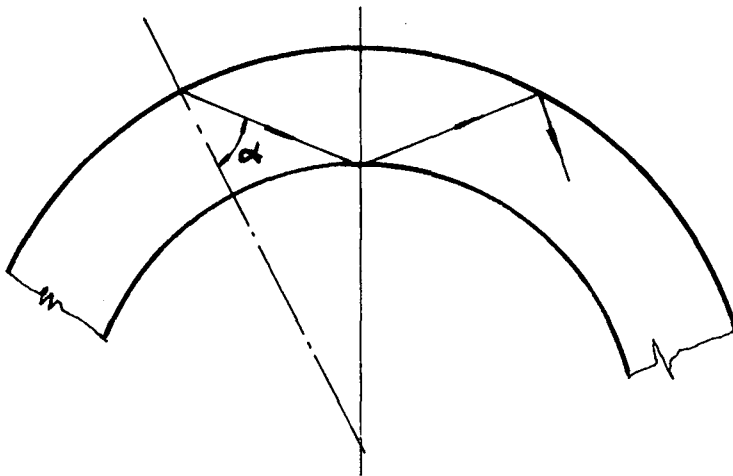


Figura 73.-

b En cambio si ahora, manteniendo d/D constante comenzamos a aumentar α , va a llegar a un valor de éste para el cual el rayo incidente es tangente a la superficie interna. Lo mismo ocurriría si dejáramos α constante y aumentamos la relación d/D , mediante el aumento de d ó la disminución de D . Para calcular ese límite conociendo el valor de d/D o viceversa podemos poner en el triángulo ABC que

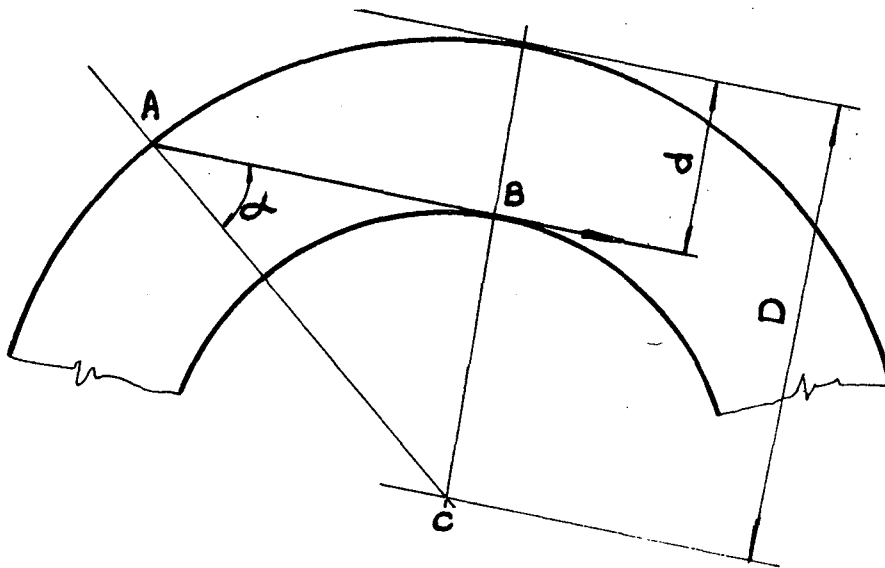


Figura 74. -

$$\text{sen } \alpha = \frac{\left(\frac{D}{2} - d\right)}{\frac{D}{2}}$$

$$\text{sen } \alpha = 1 - 2 d/D$$

$$2 d/D = 1 - \text{sen } \alpha$$

$$d/D = 0.5 (1 - \text{sen } \alpha)$$

Si de acuerdo con lo dicho, por ejemplo, damos valores a α , podremos calcular los valores de d/D para los cuales la tangente a las curvas es vertical, así será que tendremos

α	35	45	60	70	80
d/D	0.21	0.15	0.067	0.030	0.0076

Tabla IX.-

O sea vemos nuevamente que para un dado tubo (un dado d/D) puede conocerse el ángulo máximo que puede emplearse para que sea inspeccionable la superficie interior. Puesto que si aumentamos α con d/D constante o aumentamos d/D con α constante vamos a tener un caso como el de la figura 75.

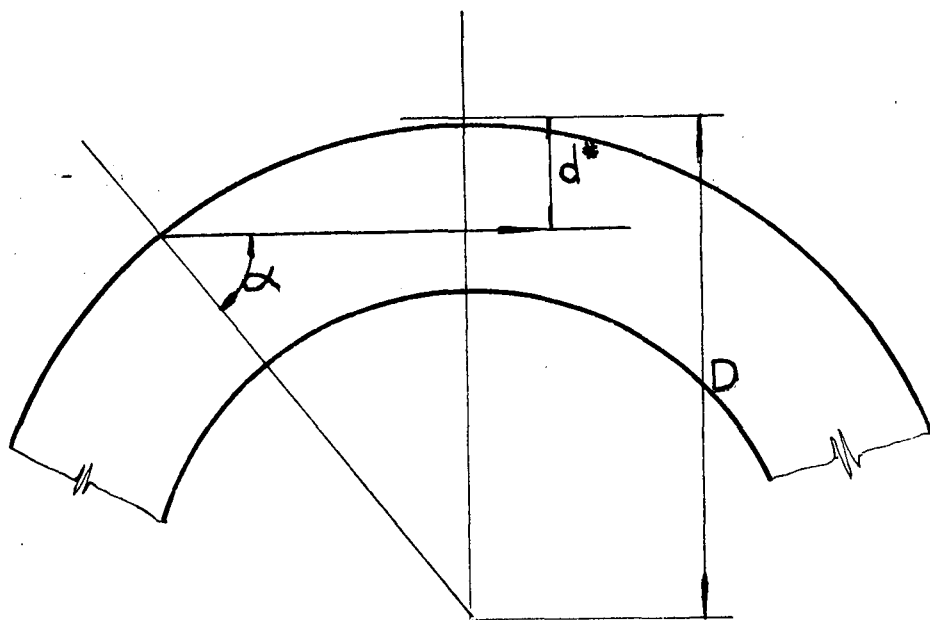


Figura 75.-

Puede calcularse también aquí

$$\frac{d^*}{D} = 0.5 (1 - \text{sen } \alpha)$$

$$d^* = 0.5 D (1 - \text{sen } \alpha)$$

que nos da la profundidad máxima inspeccionable para esas condiciones.

Puesto que para ondas transversales que se mueven en el acero en dirección oblicua, solamente pueden considerarse ángulos de refracción por encima de los 33°, observando las curvas de una de las figuras anteriores y los valores de d/D que en ellas tenemos relacionados con los ángulos de refracción, podemos decir que la relación máxima que se puede inspeccionar será

$$\frac{d^*}{D} = 0.22$$

correspondiendo a un

$$\alpha \approx 33^\circ$$

y decimos la relación máxima, puesto que si vamos (como corresponde) aumentando α vemos que d/D disminuye, lo que nos está diciendo que para un dado diámetro exterior D a medida que se aumenta el α , menor es el espesor d* inspeccionable del tubo.

Como conclusión diremos que el espesor máximo a inspeccionar en relación al D del tubo sale de

$$\frac{d^*}{D} = 0.22$$

o sea que es

$$d^* = 0.22 D$$

$$\boxed{d^* = \frac{1}{5} D}$$

(Recordar que d* es la distancia inspeccionada, aunque puede coincidir en el límite con el espesor de pared del tubo), lo cual es conseguible como ya se dijo con un α de 33°.

Teniendo en cuenta todo lo visto respecto a la inspección de tubos con un haz ultrasónico que se mueve entre las superficies límites recorriendo un camino en zig-zag, podemos construir un diagrama que nos permita elegir convenientemente el ángulo de refracción una vez conocidos el diámetro exterior del tubo y el espesor de pared d que queremos inspeccionar.

Para ello debemos recordar que con un dado ángulo α es posible inspeccionar

relaciones de d/D que van teóricamente desde 0 hasta un valor límite en el cual el haz es tangente a la superficie interna del tubo y una vez superada esta relación la superficie interior deja de ser inspeccionable para esas condiciones viéndose esto en las curvas de la figura 72, donde la situación límite está indicada con la tangente vertical en la curva de ese ángulo. Geométricamente vimos también que esa situación límite puede escribirse con la expresión

$$\frac{d}{D} = 0.5 (1 - \text{sen } \alpha)$$

quiere decir que si damos valores a α , o leemos las abcisas de las tangentes verticales vamos a tener expresiones como las siguientes:

$$\frac{d}{D} (35^\circ) = 0.21$$

$$\frac{d}{D} (45^\circ) = 0.15$$

$$\frac{d}{D} (60^\circ) = 0.067$$

$$\frac{d}{D} (70^\circ) = 0.030$$

$$\frac{d}{D} (80^\circ) = 0.0076$$

las cuales representadas en un sistema de ordenadas d y abcisas D , serán rectas de distinta inclinación como puede verse en la figura 76.

Esto nos está diciendo que cualquier relación d/D como la indicada que caiga en la zona rayada puede ser inspeccionada perfectamente con ese ángulo.

Para ángulos mayores las rectas se inclinan o acuestan más (punteada) y vemos allí que las zonas aptas de cada ángulo en parte se superponen, de manera que si el punto determinado por d/D cae allí, podría ser inspeccionado por cualquiera de esos ángulos adoptándose como criterio, el de tomar el mayor posible dado que así aumenta la detectabilidad de defectos internos.

La forma definitiva del diagrama se ven en la figura 77.-

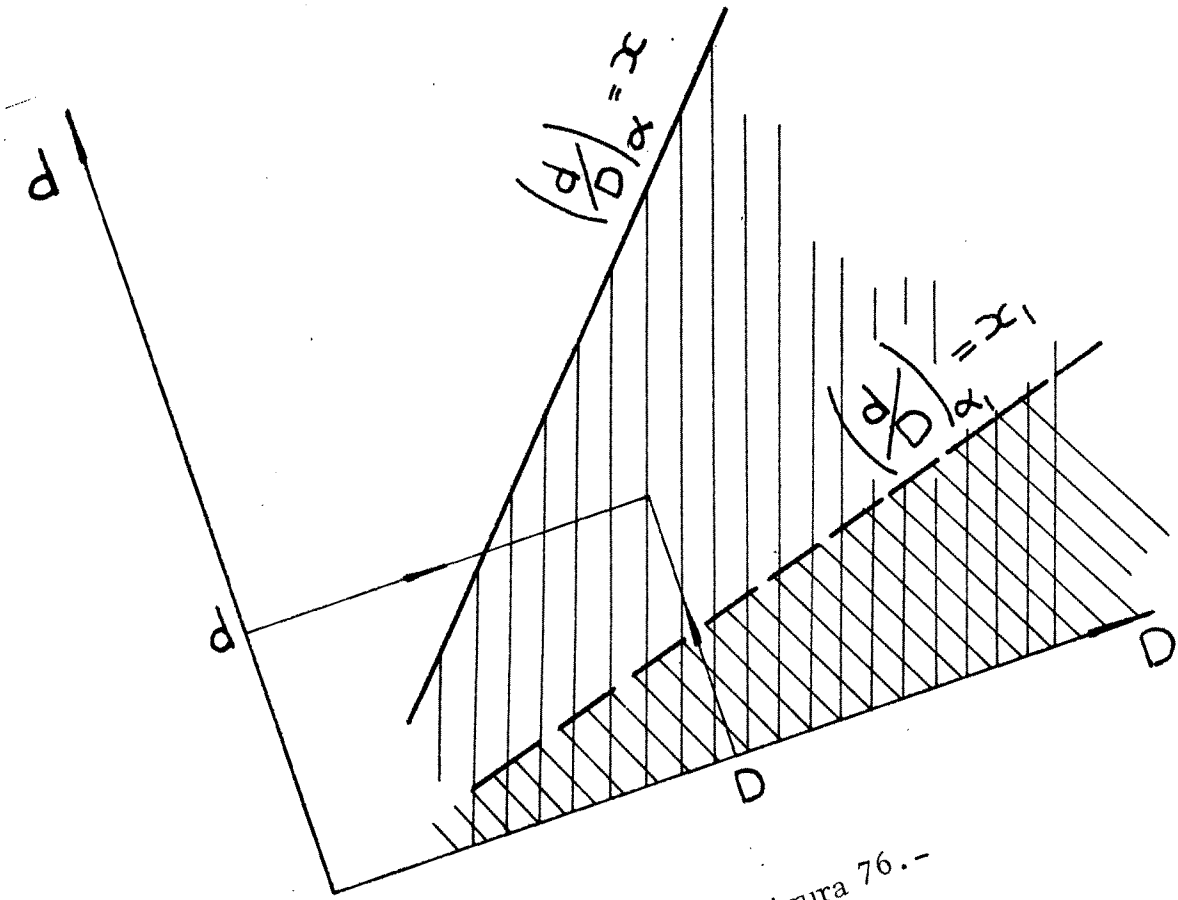


Figura 76.-

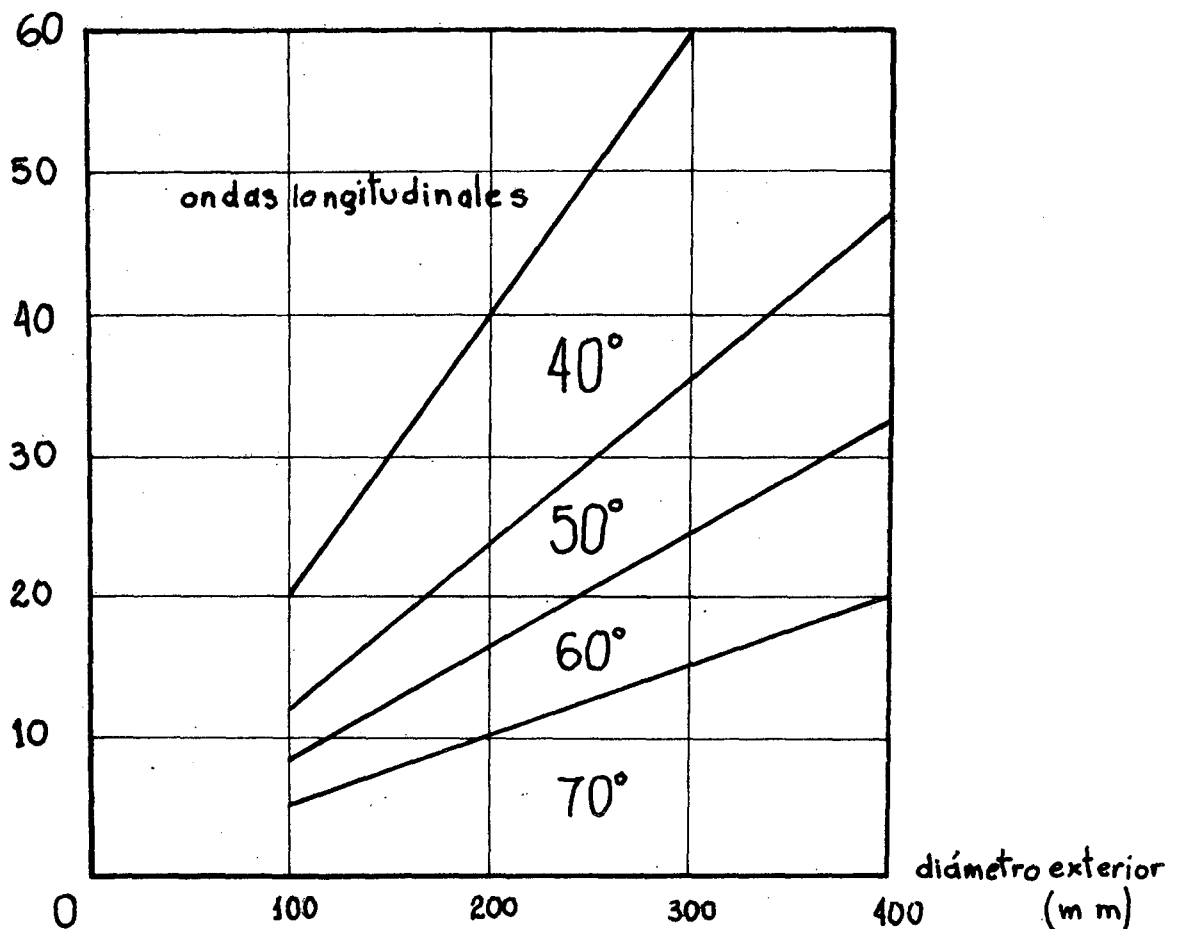


Figura 77.-

11.3. Técnicas para la detección de defectos longitudinales

Presentadas estas técnicas para la detección de los diferentes tipos de defectos, se puede decir que la usada para detectar defectos orientados longitudinalmente depende principalmente del diámetro exterior (d.e).

En función de este parámetro se han desarrollado una gran variedad de técnicas que se describirán a continuación.

11.3.1. Inspección manual por contacto

En este caso el tubo permanece estacionario y es inspeccionado manualmente en dirección circunferencial a lo largo de caminos separados o a lo largo de un camino en zig-zag. Los ángulos de incidencia empleados generalmente son 45° ó 60°.

Como ejemplo práctico de utilización tendríamos los tubos de almacenamiento de gas, o acumuladores de vapor en las calderas o cualquier otro tipo de tu bos que su diámetro tenga un valor (mayor de 400 mm) tal que una onda en zig-zag puede cubrir solamente una porción de la circunferencia debido a la absorción del material, lo que hace no aplicable a cualquiera de las técnicas tratadas más adelante.



Figura 78.-

Inspección manual por contacto en tubos de gran diámetro.

11.3.2. Inspección con cristales de emisión en oposición

El principio está ilustrado en la figura 79. Vemos allí que dos transductores operan simultáneamente como transmisores y receptores y que ambos se encuentran montados de modo tal que cada uno recibe el pulso ultra sónico del otro luego de viajar a lo largo de la circunferencia completa.

Con esta disposición y en presencia de un tubo sin defectos, en la pantalla del aparato de ultrasonido se obtiene un eco correspondiente a la recepción por parte de cada cristal del haz emitido por su opuesto, luego de recorrer en un camino de 360° . Su ubicación en la pantalla respecto del eco de entrada, correspondería a la señal proveniente de un defecto situado a 180° , puesto que el tiempo que la onda ultrasónica emplea en alcanzar este punto

y retomar al cristal, es similar al empleado por la onda que emitida por cada uno de los cristales tarda en alcanzar su opuesto.

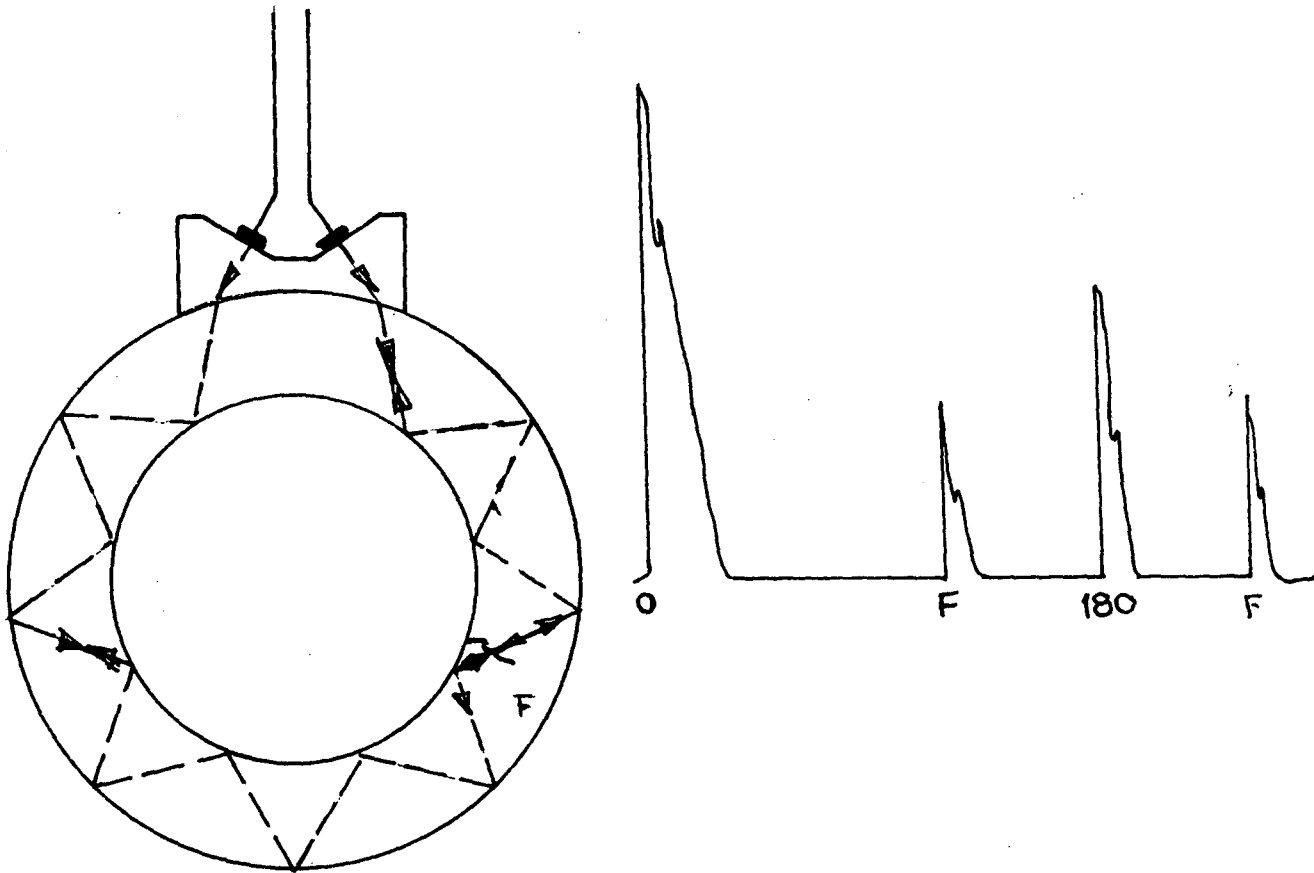


Figura 79.-

Esquema del ensayo con cristales en oposición

La utilidad de este eco es doble pues su desaparición es siempre una señal de alarma, ya sea porque estaría indicando que el acoplamiento es inadecuado o que ha habido un cambio en el camino del haz ultrasónico, como ser debido a la presencia de corrosión en las superficies externas o internas, lo cual da lugar a una gran atenuación comparada con una zona en buenas condiciones. O sea con él puede comprobarse el mantenimiento de una buena condición de acoplamiento conseguida con flujo continuo de agua adecuadamente suministrado.

Este eco estático en la pantalla se utiliza como referencia para la localización de defectos. Ello es debido a que la detección de uno da lugar a la aparición de dos señales simétricamente situadas a ambos lados de éste. El fundamento de la detección se ve en la figura anterior.

Si se lleva este eco de referencia al centro de la pantalla, obtendremos que la longitud de ésta sea equivalente a los 360° .

Lo que no puede decirse es si una dada indicación pertenece a la parte derecha o izquierda del tubo, si es que se mantiene estacionario el cristal, pero puede precisárselo inmediatamente si movemos a éste en forma circular. Lo cual se consigue porque si el eco de la falla colocado entre el eco de entrada y el de referencia, los cuales permanecen inmóviles, se mueve hacia el primero, significa que el cristal se está acercando a la falla y viceversa. Puesto que nunca es necesaria una exacta ubicación de las fallas en los ensayos de tubos y puesto que ello es muy dificultoso, se coloca al cristal de manera tal que el eco de la falla esté localizado a mitad de camino entre el pulso de entrada y el eco de referencia, con lo cual puede suponerse que la falla estará ubicada a aproximadamente un cuarto de circunferencia a partir del cristal.

Un tubo estacionario no debe ser barrido únicamente a lo largo de un camino longitudinal, porque la zona ubicada por debajo del cristal no será inspeccionada, dado que el eco de referencia puede enmascarar una falla que esté ubicada justo en ± 180 . Por esta razón y para claras indicaciones de las fallas el cristal se moverá a lo largo de un camino en zig-zag para el cual la distancia barrida entre los extremos de cada recorrido debe ser por lo menos igual al salto S con la finalidad de asegurar un barrido completo de las superficies externa e interna y el volumen comprendido entre ellas.

Es conveniente recordar que la anterior es la condición técnica para asegurar el éxito de una inspección, la cual al ser llevada a la práctica enfrenta serios problemas de factibilidad mecánica para conseguir esos desplazamiento relativo de zig-zag entre tubo-cabezales, más el necesario movimiento de translación del conjunto en sentido longitudinal.

Ante esto, surgen algunas soluciones prácticas entre las cuales podemos citar, aquella en la cual el tubo rota y se translada consiguiendo un movimiento relativo a los transductores, de trayectoria en espiral. Las ventajas de este sistema es lo experimentado del dispositivo de transporte (rodillos inclinados). Asegurando un paso de la hélice menor que el diámetro de cristal puede confiarse en un completo barrido del volumen del tubo, con lo cual se satisface la mínima condición teórica.

Otro de los métodos generalmente empleados consiste en dar un movimiento relativo de translación rectilínea entre cabezal y tubo a lo largo de 2, 3 o más generatrices separadamente. Con lo cual se busca solucionar los principales inconvenientes que se presentarían al realizar el ensayo desplazan-

do el cabezal únicamente a lo largo de una generatriz, o sea la existencia de una zona ciega debajo del cabezal de inspección el posible enmascaramiento de defectos en la zona ubicada a $+ 180$, la pérdida de sensibilidad por atenuación cuando los caminos del ultrasonido son muy largos y el hecho de no asegurar un barrido completo del volumen para aquellas zonas que en cada salto S no son alcanzadas por el haz ultrasónico. Respecto de este último punto debe decirse que el desplazamiento de los cabezales en generatrices distintas presentaría el peligro de no asegurar una inspección completa del volumen del tubo, dependiendo esto fundamentalmente de la relación entre la sección del haz y el espesor del tubo, para un dado ángulo de incidencia.

Para la detección de escamas, puede ser desventajoso observar ambas indicaciones del defecto en la pantalla simultáneamente, como en la figura anterior. Mientras que en el caso de incipientes fisuras, el eco de la derecha o sea el de mayor camino es comúnmente más pequeño que el eco de la izquierda, en el caso de las escamaduras esto puede ser exactamente de la manera contraria, dependiendo todo de la forma más o menos favorable en que ese defecto refleje el haz ultrasónico. Lo que ocurre fundamentalmente es que en el caso de las fisuras la reflexión del haz (al menos su zona central) se produce como una reflexión total sobre el camino que traía, lo cual no ocurre siempre con los escamados debido a sus orientaciones desiguales. Lo que se hace es eliminar el eco de la derecha, de la pantalla, mandando $+ 180^\circ$ al fondo de escala, evitando así los problemas de comparaciones y asegurándonos en el caso de tubos rotatorios que siempre obtendremos una buena indicación del defecto, pues al rotar, alguna vez seguro, ofrecerá una buena superficie de reflexión.

Respecto de los cabezales utilizados en estas técnicas puede decirse que en el mercado existe una gran variedad de montajes fijos o ajustables para distintas combinaciones de espesores y diámetros externos tales como se ilustra en la figura 80.

Esta técnica por sus características es aplicable a tubos de una gran variedad de diámetros comprendidos entre los 400 y 100 mm. Siendo especialmente útil para los mayores.

11.3.3. Inspección con un solo cristal emisor y receptor.

Cuando el sistema descrito en el punto anterior, resulta difícil de aplicar debido a que el diámetro exterior es inferior a 100 mm se emplea un solo cristal que introduce ondas transversales en el volumen del caño.

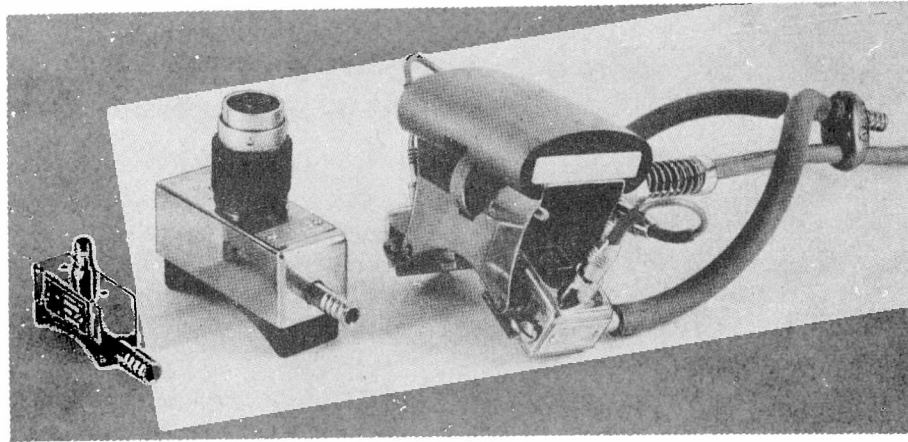


Figura 80

Palpadores con cristales en oposición

Las diferentes variaciones que pueden aparecer dentro de esta técnica, las podemos agrupar en función de la forma de lograr el acoplamiento entre cabezal y tubo. Así tendremos

- a) acoplamiento por contacto
- b) acoplamiento por inmersión

Comencemos ahora a tratar cada uno de ellos.

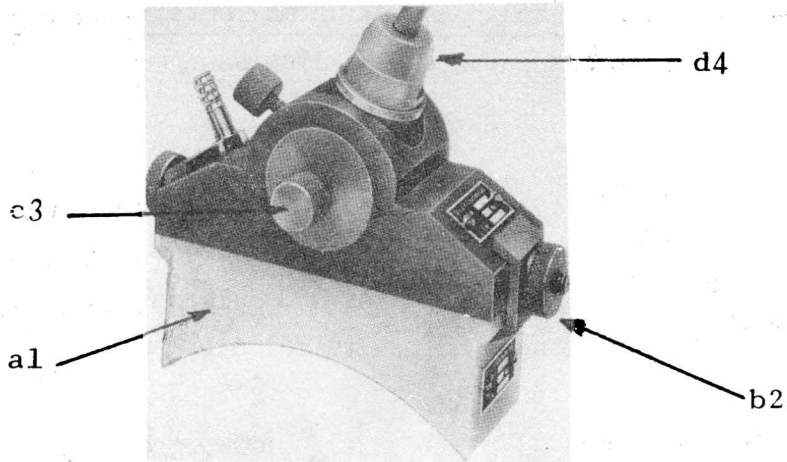
a) En este caso el cristal está montado sobre una zapata cuya apariencia general es la que aparece en la figura 81, la cual consiste en una montura (a1), dos guías (b2) y un soporte móvil (c3) el que presiona el transductor sobre el tubo. La curvatura del soporte generalmente coincide con la del tubo de modo que pueda deslizarse libremente sobre el mismo. Las guías sirven para mover el cristal en un plano perpendicular al eje del tubo.

Otra de las formas de montaje consiste en la utilización de una zapata rígida en forma de cuña, de un material adecuado como el lucite, en la cual se ubica el cristal de acuerdo como puede observarse en la figura 82.

El cristal usado es un cristal normal que consigue su acoplamiento con el tubo a través de una cubeta de agua construída por la forma particular de la montura en la cual se encuentra ubicado.

Esta disposición permite la introducción de ondas transversales en el tubo de acuerdo con lo visto en la introducción teórica.

Las dos formas de inspección descritas recién pueden llevarse a cabo tanto en forma manual como automática.



a1: montura

b2: guias

c3: soporte cristal d5: entrada liquido acoplamiento

Fig.81: Palpador para ensayo de tubos por reflexión con cristal emisor-receptor.-

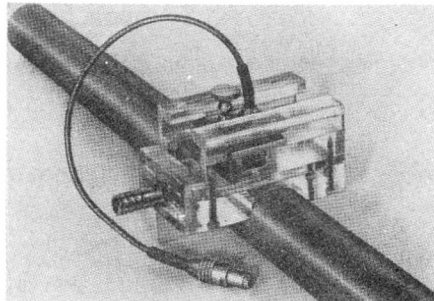


Fig.82: Palpador para ensayo de tubos por reflexión con cristal emisor-receptor, en montaje rígido

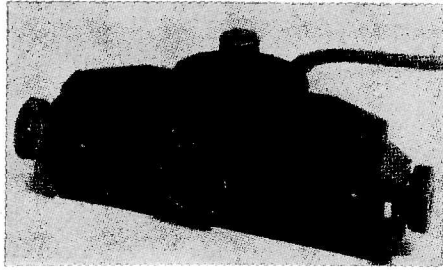


Figura 83.-

Dispositivo para ensayo con palpador normal emisor-receptor,
con cubeta para columna líquida

En la primera de ellas el tubo es inspeccionado en todo su volumen mediante un desplazamiento del montaje longitudinalmente combinado con un movimiento alternativo normal a éste. La amplitud de este desplazamiento transversal tiene que ser mayor que la distancia del salto del ultrasonido en el interior del tubo.

La automatización se consigue cuando se imprime al sistema tubo-cabezal un movimiento relativo de rotación y traslación de manera que se describa una espiral cuyo paso sea menor que el diámetro de haz.

b) Acoplamiento por inmersión

Esta forma de ensayo, por inmersión y en forma automática ha probado ser satisfactoria para tubos de diámetro menor que 160 mm. Especialmente cuando el diámetro exterior del tubo es menor que 25 mm este método es inquestionablemente superior al que utilizaba el acoplamiento por contacto. En este caso la zona del tubo a examinar debe estar completamente sumergida en agua, pero su interior debe permanecer vacío para evitar interferencias con las burbujas de aire que podrían formarse y aparecer indicados como defectos.

El movimiento relativo entre cabezal y tubo es el mismo que el descrito para contacto.

La diferencia con este caso es que ahora el cabezal es únicamente normal y su disposición de ensayo es la que aparece en la figura 84-

En sistemas comerciales en los cuales se examinan grandes longitudes de tubos se evita sumergirlo utilizando cubetas que abarcan pequeñas zonas.

O valiéndose de columnas de agua que inyectadas a presión aseguran el acoplamiento necesario.

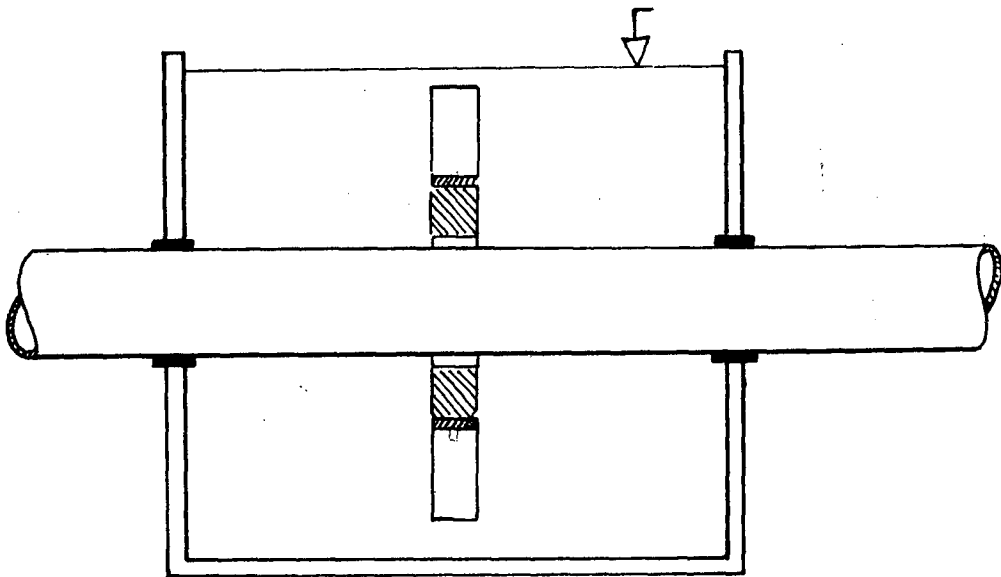


Figura 84.-
Esquema de la disposición para el ensayo por inmersión

En este último tipo generalmente se utiliza más de un cristal montado en ca bezales rotatorios dejando para el tubo el movimiento de traslación.

Su disposición esquemática se indica en la figura 85.-

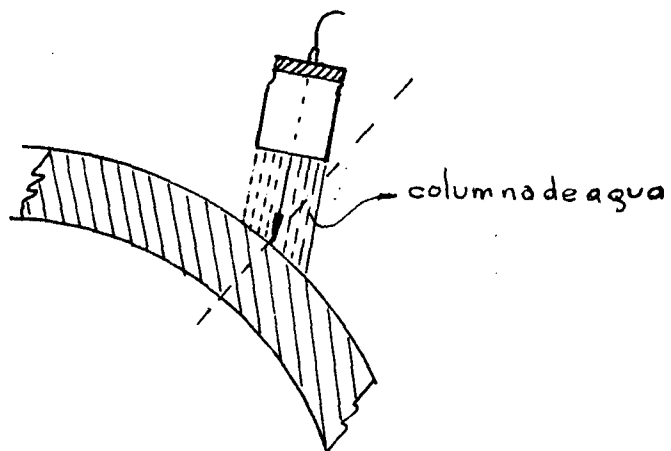


Figura 85.-
Esquema indicando la posición de palpadores con columna de agua

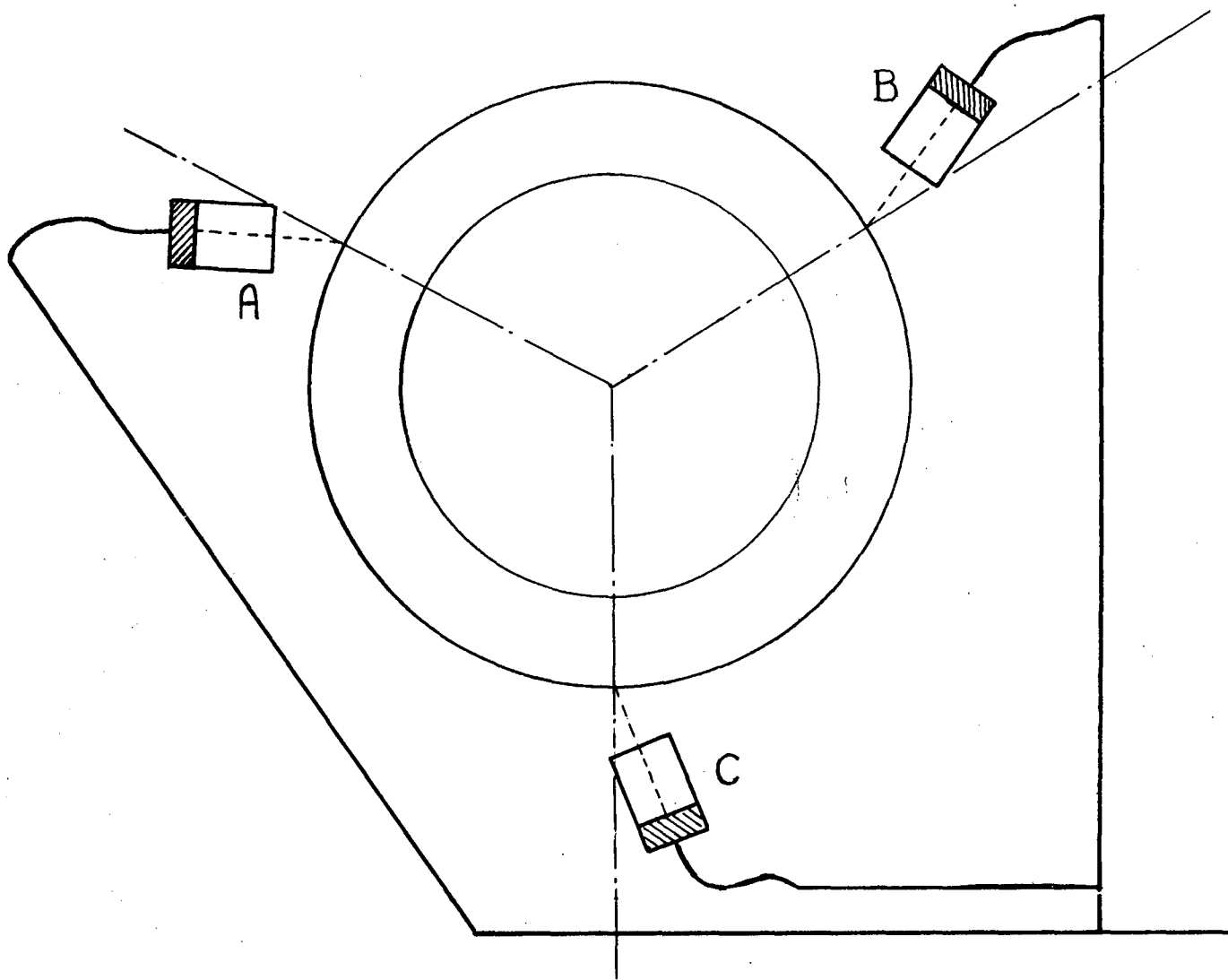


Figura 86.-
Disposición esquemática para el ensayo por inmersión
con sondas múltiples

Los tres cristales están conectados en paralelo o sea excitados por el mismo equipo de ultrasonido. Es decir que en la pantalla osciloscópica se registran las señales de ellos simultáneamente. La base de tiempo se calibra para abarcar el sector de 120° comprendido entre dos puntos de incidencia sucesivos A y B.

11.3.4. Inspección con cristales emisores y receptores separados

El rango de tubos comprendido entre 25 y 50 mm es precisamente el que incluye una gran cantidad de tubos para calderas y tubos de precisión donde un ensayo rápido y económico de grandes cantidades es el problema. Aquí las técnicas de inmersión se han mostrado como las más efectivas.

Con el propósito de evitar reflexiones desde la superficie del tubo cuando se usan haces oblicuos en la técnica de inmersión se utilizan emisores y receptores separados. Si un solo cristal se usa como emisor y receptor especialmente si la superficie del tubo es rugosa, el eco de entradas es ensanchado excesivamente y los ecos que resultan de pequeñas marcas pueden enmascarar cualquier eco de fallas.

Podríamos dar ahora algunos ejemplos de las disposiciones más comúnmente empleadas: así tenemos, como se ve en la figura 87a) dos cristales inclinados en un mismo ángulo en sentidos opuestos respecto de un plano normal del eje del tubo y al mismo tiempo contenido en un plano que no contiene al eje pero sí paralelo a él. Esto asegura ondas reflejadas, homogéneas, alcanzando el receptor. En el caso de superficies rugosas se utiliza una pantalla para impedir la llegada de los haces dispersos.

Otra forma de llevar a cabo el ensayo consistiría en un conjunto también de dos cabezales sumergidos como los del caso anterior situados en un plano perpendicular al eje de tubo como puede verse en la figura 87b.)

El haz del cabezal emisor alcanza la pared del tubo con un cierto ángulo produciendo ondas transversales que circulan en todo el volumen. El cabezal receptor está localizado generalmente opuesto a 180° al emisor, formando ángulos iguales con respecto al radio en el punto de incidencia y en el mismo sentido.

Con esta disposición el ajuste para distintos diámetros resulta relativamente sencillo pues sólo hay que desplazarlos paralelamente y en el mismo plano normal al eje.

En el caso de un tubo sin defectos el camino de la onda ultrasónica es tal que no es captada por el cabezal receptor. Sin embargo cuando existe un defecto longitudinal en el tubo, la onda se reflejará en el defecto y el eco incidirá en el receptor.

Esto ocurre solamente en el punto en el cual se satisfacen las condiciones geométricas de la reflexión función de la disposición de los cristales.

En tubos de muy pequeño diámetro pueden aparecer pequeños ecos de interfe-

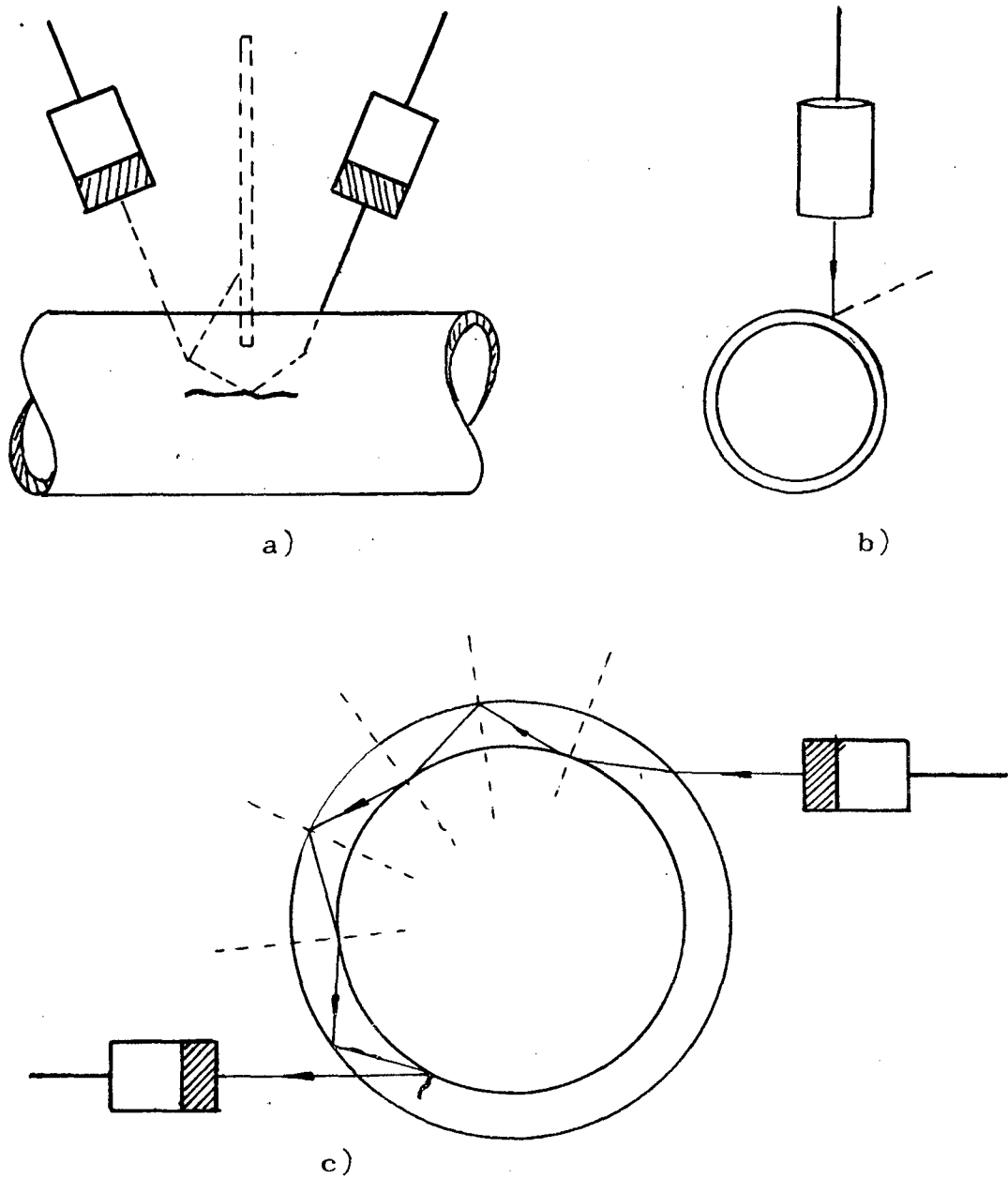


Figura 87.-
Esquema de las disposiciones usuales en el ensayo con
palpadores emisores y receptores separados

rencia en la pantalla producidos por la transmisión directa del ultrasonido entre los transductores, como resultado de la reflexión directa entre el tubo y los soportes de los cristales.

Comúnmente, dos de estos sistemas de cristales están montados uno detrás de otro en el sentido longitudinal del tubo y la dirección de propagación del sonido es opuesta en ambos planos. Podemos decir entonces que de esta forma se asegura la detección de defectos cuya orientación no es favorable a uno cualquiera de los sentidos de propagación.

La realización práctica de estas formas de ensayo lleva a la utilización de sistemas combinados de rotación y traslación similares a las descritas en casos anteriores.

Podría darse como dato ilustrativo de los sistemas comerciales actuales, que las velocidades de rotación oscilan entre 600 rpm para un solo par hasta 3000 rpm cuando se utilizan dos. Lo que permite velocidades de desplazamiento del tubo que van de 4 m/minuto para el primero a 20 m/minuto en el segundo. En algunas instalaciones la velocidad de ensayo más grande se alcanza al costo de una exactitud más baja.

11.3.5. Inspección desde la superficie interior

Se han desarrollado en los últimos tiempos ciertas técnicas para detectar defectos y medir espesores de pared en condiciones muy especiales, como las que se presentan en ciertos elementos de las plantas generadoras de potencia (convencionales o nucleares), tal como intercambiadores de calor, cuyas superficies exteriores son de difícil acceso.

Esas técnicas utilizan ondas transversales o longitudinales provenientes de cristales (uno o dos) montados en un cabezal capaz de deslizarse en la superficie interna del tubo, la disposición esquemática es la que podemos observar en la figura 88-

Estos dispositivos han sido probados en tubos de acero inoxidable Inconel de hasta 12,7 mm de diámetro y 1,5 mm de espesor de pared, demostrando su alta capacidad para la detección de defectos internos y externos.

11.4. Técnica para la detección de defectos transversales

Para la detección de defectos transversales se monta un cristal sobre un plano radial y formando un cierto ángulo con respecto a la superficie. Este ángulo se selecciona de un modo tal que el haz recorre un camino en zigzag, con un ángulo poco menor que 45° .

Asegurando que el paso de la espiral que es resultado del movimiento entre cristal y tubo sea menor que el diámetro del haz se asegura un barrido total de volumen del tubo.

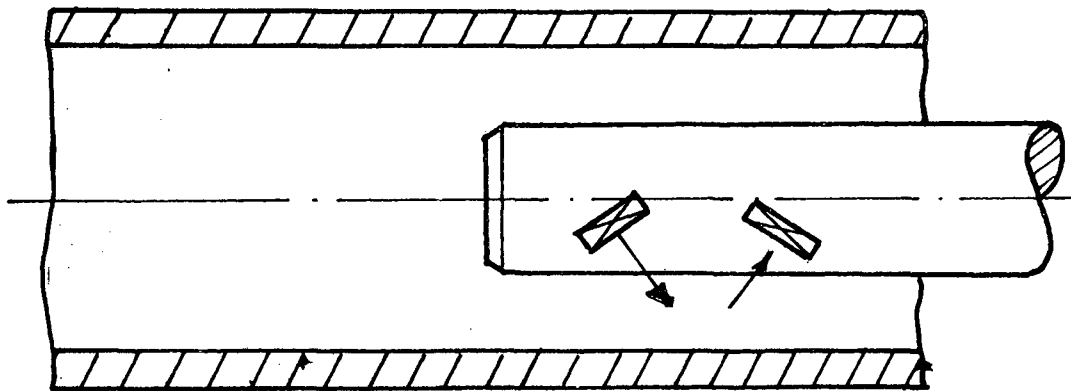
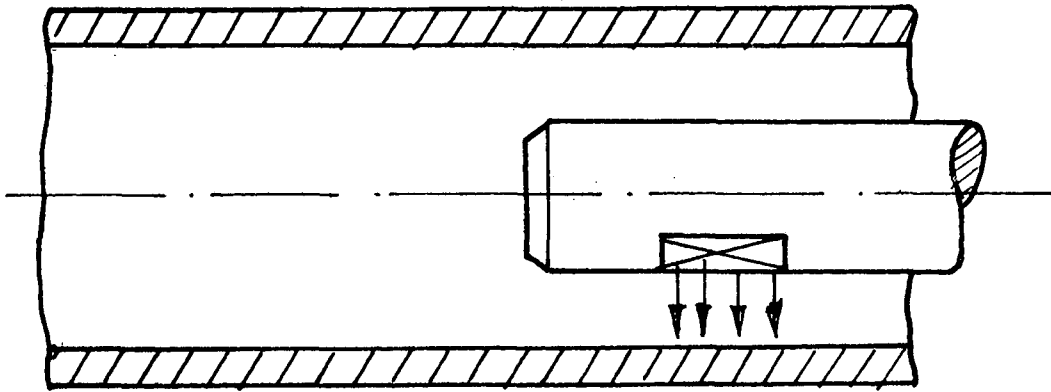


Figura 88.-
Esquema de la disposición para ensayo
desde la pared interior

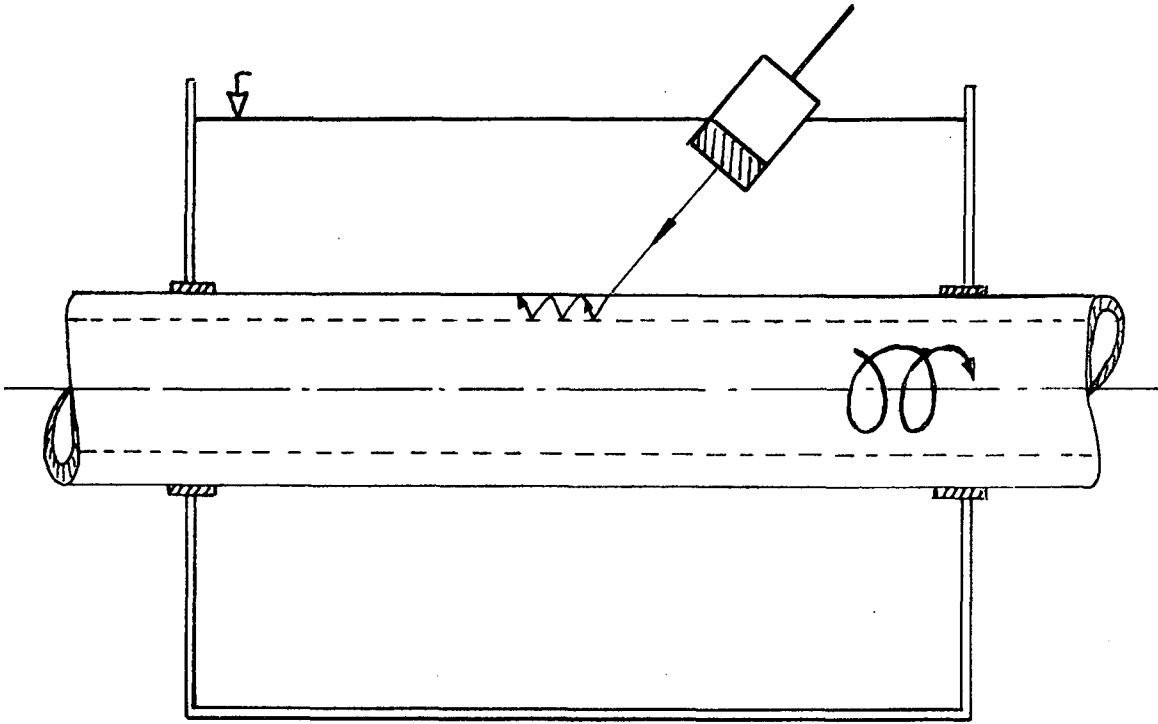


Figura 89.-
Esquema de la disposición para detección de
detección de defectos transversales por
inmersión

11.5. Técnica para la detección de defectos volumétricos

Existe cierto tipo de defectos que no presentan una orientación preferencial en ninguna de las dos direcciones anteriores, o sea no tienen una superficie reflectante principal que haga necesaria la elección de una dirección de propagación determinada. De allí que indistintamente pueden utilizarse cualquiera de los métodos mencionados anteriormente con igualdad de posibilidades de detección.

12. EXAMEN DE CHAPAS POR ULTRASONIDO

El examen de chapas mediante el ensayo ultrasónico se hace generalmente para detectar y evaluar defectos del tipo "laminación" que se producen a causa de rechupes en la cabeza del lingote durante la solidificación o a causa de sopladuras en el interior del lingote y defectos del tipo de "solapado" que se producen al laminarse lingotes y slabs con rebabas o defectos superficiales.

Ambos defectos son geométricamente bidimensionales y con su plano de desarrollo paralelo a las caras de la chapa y es lo que impide su detección por el ensayo radiográfico y facilita la aplicación del ensayo ultrasónico.

Las técnicas de ensayo ultrasónico que se utilizan para la detección de estos defectos son esencialmente tres: por reflexión (pulso-eco); por transparencia y por ondas de Lamb. La selección de estas técnicas depende del espesor a examinarse y de la sensibilidad que se desea. En ciertos casos se puede aplicar el ensayo por resonancia de acuerdo a lo que se describe en el punto 5.3.

En cuanto al examen de chapas para medir espesores se aplican las técnicas ya descritas en el punto 8., referido a medición de espesores.

12.1. Examen por Reflexión

El ensayo por reflexión con palpador emisor-receptor se utiliza para espesores mayores que 5 a 10 mm. Esta limitación se debe a la "zona muerta" característica de los palpadores de este tipo. Por esta razón, con esta técnica no pueden ser detectados defectos subsuperficiales es decir próximos a la superficie.

El ecograma (imagen de los ecos de reflexión múltiple en la pantalla del tubo de rayos catódicos) está constituido por una serie de ecos de amplitud decreciente regularmente espaciados. La presencia de una laminación u otro defecto provoca una disminución de los intervalos entre los ecos de cada reflexión.

En la figura 90 se muestran las indicaciones típicas correspondientes a distintos tipos de defectos laminares. En la izquierda los ecogramas correspondientes al ensayo por reflexión (contacto, pulso-eco) cuando el equipo presenta las indicaciones en un tubo de rayos catódicos.

Para espesores inferiores a 5 o 10 mm se puede utilizar como alternativa

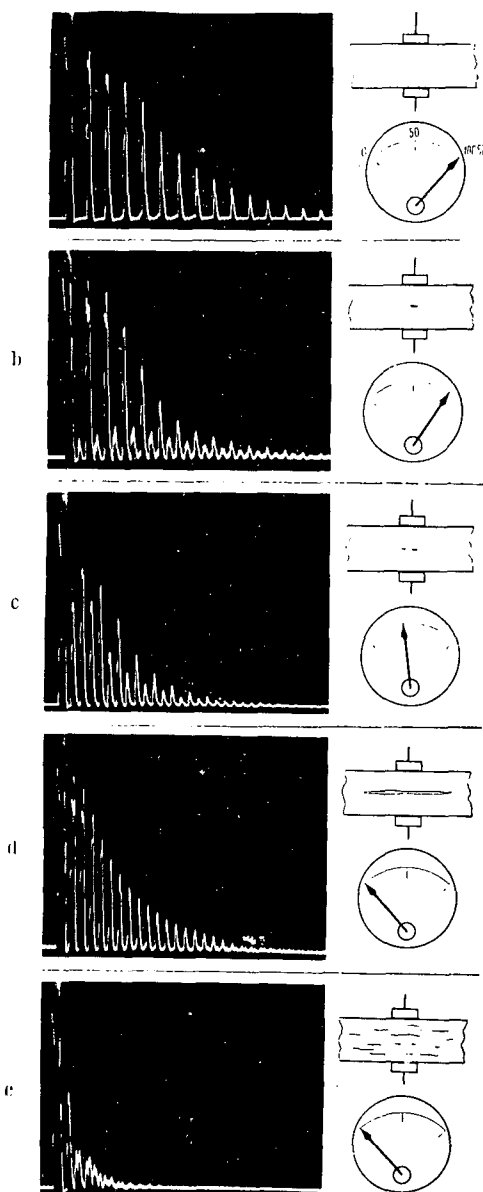


Figura 90 - Ensayo de chapas por reflexión y por transmisión.

apropiada un palpador doble como hemos visto en el punto 5.1. Aún en este caso, a pesar de que el palpador no presenta zona muerta, no se está en condición adecuada para relevar defectos subsuperficiales. Por efecto de la convergencia del haz se tiene una variación de la sensibilidad de detección según la profundidad del defecto.

La utilización de esta técnica en la práctica queda limitada a espesores entre 3 y 30 mm.

12.2. Examen por Transparencia

El ensayo por transparencia se basa en la medición de la intensidad del haz ultrasónico transmitido.

En la figura 90, se muestra la intensidad del haz ultrasónico transmitido a través de la chapa, medida en un instrumento de aguja, para distintos tipos de defectos. En dicha figura se observa que para chapa sin discontinuidades la indicación del instrumento calibrado debe corresponder al 100% de deflexión. A mayor importancia de las discontinuidades presentes corresponde una menor deflexión. En un equipo con presentación de la indicación en tubo de rayos catódicos la calibración se hace de manera que para la chapa sin defectos la altura del pulso transmitido alcance el 100% de la escala de deflexión vertical. La presencia de discontinuidades disminuye la altura de la indicación en forma correspondiente.

Es esencial que los palpadores se mantengan constantemente alineados y para obtener una sensibilidad adecuada las condiciones de acoplamiento deben mantenerse constantes. En este método el espesor de la chapa no condiciona la aplicabilidad del ensayo.

En la figura 91 se ilustra la realización de una instalación de control automático de chapa. En los sistemas automáticos el acoplamiento se obtiene mediante la inyección de agua entre el palpador y la chapa, estando rodeado el palpador de una cubeta de goma flexible que retiene permanentemente un volumen del líquido.

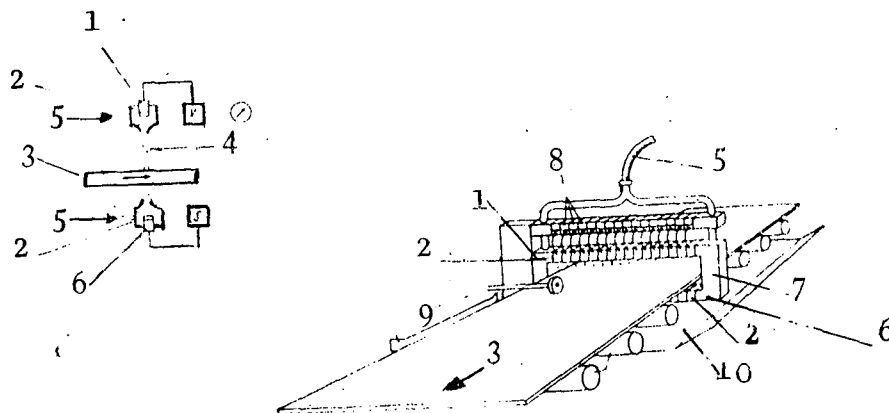


Figura 91 - Control automático de chapa por U.S. 1) Receptor; 2) cubeta; 3) chapa; 4) columna de agua; 5) entrada de agua; 6) emisor; 7) panel de control; 8) amplificadores; 9) marcador y 10) bandeja colector de agua.

12.3. Examen con ondas de Lamb

El examen de chapa mediante la técnica de las ondas de Lamb puede ser aplicado en pequeños espesores desde 0 a 15 mm.

Para obtener las ondas de Lamb se pueden utilizar palpadores de ángulo variable operando en contacto con la chapa o mediante palpadores normales, con acoplamiento mediante columna de agua, regulando el ángulo de incidencia del haz.

Una particularidad interesante de la técnica reside en la posibilidad de controlar la chapa en toda su sección. Para controlar simultáneamente ambos bordes de la chapa se pueden usar dos palpadores en forma simultánea como se indica en la figura 92. Para completar el ensayo de la chapa con la mayor sensibilidad en toda la sección se suele agregar en sistemas automáticos dos palpadores normales en ambos bordes.

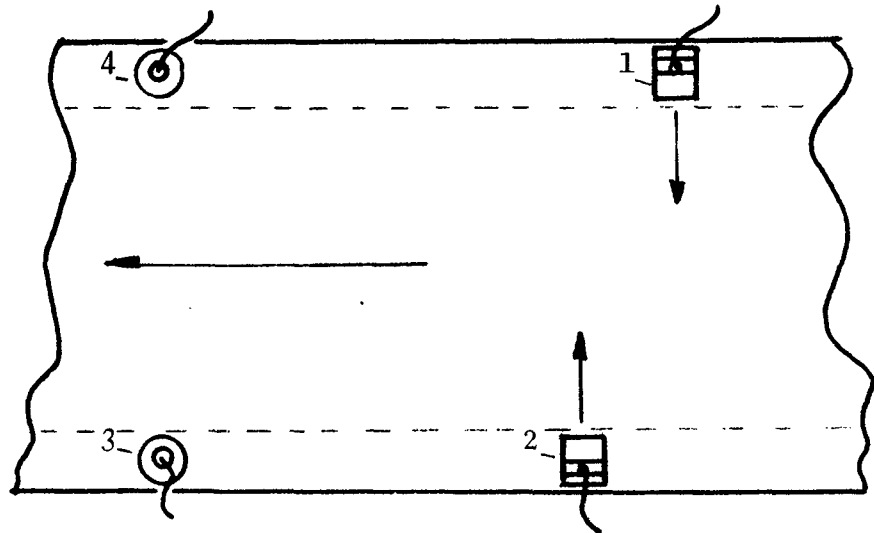


Figura 92 - Examen de Chapa con ondas de Lamb: 1 y 2 palpadores de ángulo variable para generar ondas de Lamb. 3 y 4 palpadores normales para ensayo por transparencia.

Las ondas de Lamb que se utilizan en el control de chapa son del tipo asimétrico por cuanto éstas permiten detectar laminaciones también en el centro de la chapa.

Se constata en la práctica que variando el producto KHz cm. (frecuencia del haz por espesor de la chapa) varía la sensibilidad del ensayo para defectos

internos respecto de los superficiales. Los valores aplicados son generalmente entre 500 y 700 KHz cm. Con valores de alrededor de 1000 KHz cm se detectan principalmente los defectos ubicados en la vecindad de la superficie de entrada del haz.

13. EXAMEN DE BARRAS, PALANQUILLA Y EJES

13.1. Examen de Barras redondas

En barras redondas se aplica el U.S. principalmente para detectar defectos en la región central antes que los superficiales.

Rechupes, inclusiones, óxidos, etc., distribuidos en el interior de la sección son los defectos que se detectan generalmente con el ensayo ultrasónico.

El examen de las barras se hace casi siempre en forma automática por la técnica de inmersión combinando el movimiento de rotación de la barra con el de traslación de los palpadores para cubrir la totalidad de la sección.

Los defectos más interiores se detectan mediante palpador normal de ondas (1) longitudinales centrado en el eje de la barra mientras que para detectar los defectos más exteriores se aplica palpador normal con ondas transversales, (2y3) desplazado respecto del eje de la barra, como se indica en la figura 93.

13.2. Examen de palanquilla y barras exagonales

Se aplica el ensayo ultrasónico para detectar únicamente defectos internos: inclusiones y rechupes o contracciones.

Para defectos superficiales, subsuperficiales se aplica generalmente el método de partículas magnéticas.

El ensayo ultrasónico de palanquilla se realiza con la técnica de reflexión (pulso-eco) mediante dos palpadores a 90°.

De esta forma se pueden detectar defectos internos cualquiera sea su orientación, como se indica en la figura 94.

En las barras exagonales se aplica la misma técnica pero el ángulo entre palpadores es de 120°.

En la figura 95. se muestra el esquema del dispositivo utilizado.

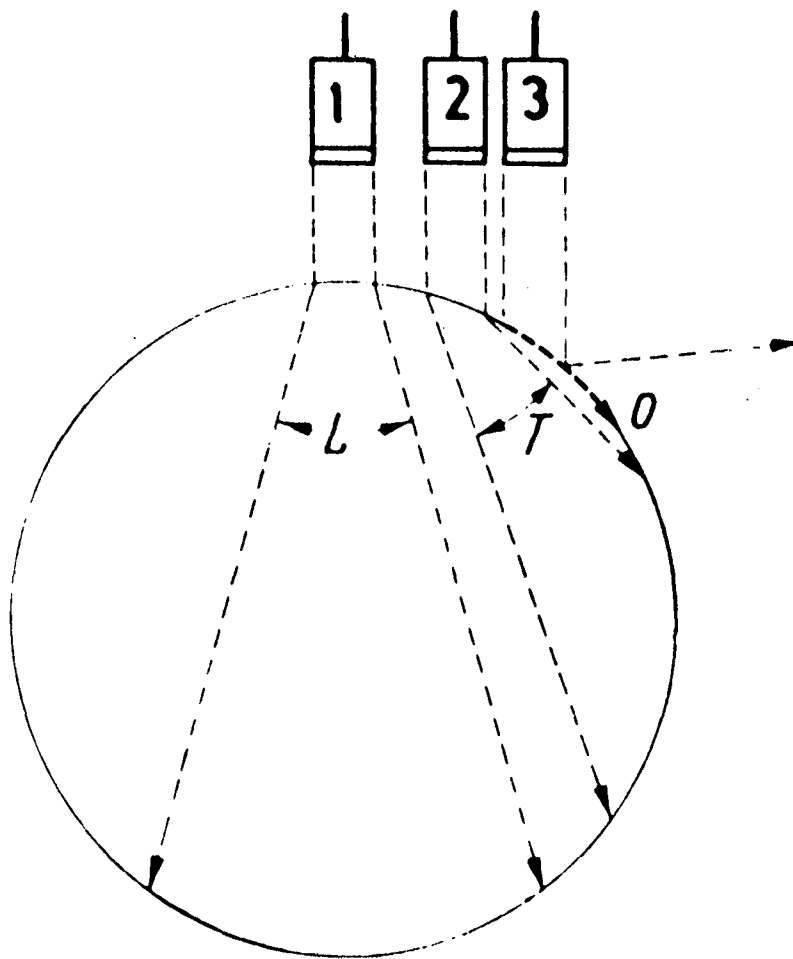


Figura 93 - Esquema del ensayo de barras con U.S.

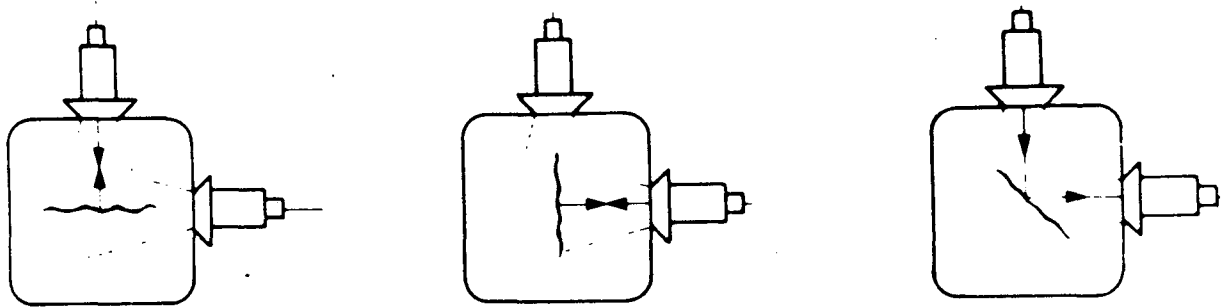


Figura 94: Ensayo ultrasónico de palanquilla

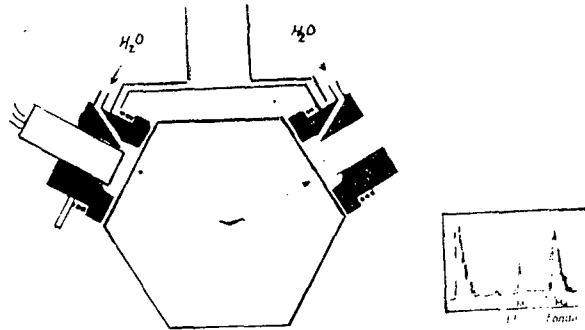


Figura 95 - Ensayo ultrasónico de barras exagonales

En ambos casos el examen se realiza en forma automática desplazando la palanquilla o la barra exagonal en forma longitudinal y manteniendo los palpadores en posición fija. El acoplamiento se asegura mediante la inyección con tinua de agua entre el palpador y la palanquilla o barra. La velocidad del ensayo es de 10 a 30 m por minuto.

13.3. Examen de Ejes

El examen de ejes mediante el ensayo ultrasónico tiene por objeto detectar fisuras de fatiga cuya ubicación y orientación puede ser prevista efectuando un análisis previo de esfuerzos y tensiones.

El ensayo se realiza mediante la técnica de reflexión por contacto, utilizando palpadores angulares y/o normales según la geometría del eje.

En la figura 96 se muestra un caso de examen utilizando tres palpadores angulares de 14° , 18° y 25° a fin de alcanzar las tres zonas de probable fisuración. Para cubrir la totalidad de la sección se hace rotar el eje o se rotan los tres palpadores en forma simultánea.

En la figura 97 se muestra un porta-sonda utilizado para el examen de ejes de vagones ferroviarios. En dicho accesorio, que puede ser aplicado directamente en el extremo del eje sin desmontar, se encuentran alojados los tres palpadores angulares a 120° uno de otro. Haciendo rotar el portapalpador se cubre con un movimiento toda la circunferencia del eje.

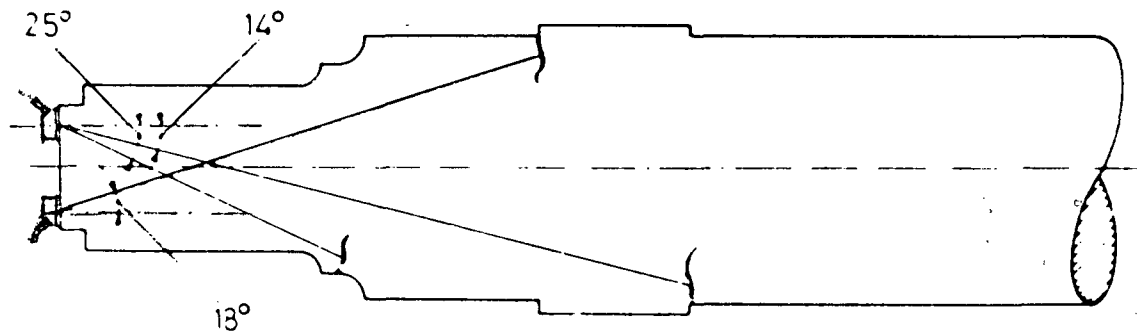


Figura 96 - Ensayo ultrasónico de un eje utilizando tres palpadores angulares.

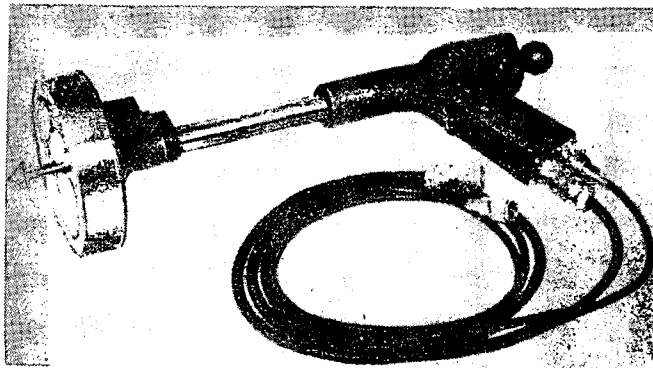


Figura 97 - Porta sonda para ensayo U.S. de ejes.

14. INDICACIONES ESPUREAS Y NO RELEVANTES

En el ensayo ultrasónico con presentación de la indicación en tubo de rayos catódicos es de fundamental importancia la capacidad y entrenamiento del operador para la evaluación correcta de las indicaciones ya que no queda registro de las mismas.

La presencia en el oscilograma de ecos espúreos debidos a reflexiones secundarias y conversiones del modo de propagación pueden originar en el operador dudas o errores de interpretación.

14.1. Interferencias propias del palpador

En el caso de palpadores dañados o de construcción inapropiada puede ocurrir una insuficiente aislación acústica que da origen a ecos de reflexión dentro del mismo palpador. En la figura 98 se muestra un ecograma con una indicación espúrea debida a una reflexión dentro del palpador.

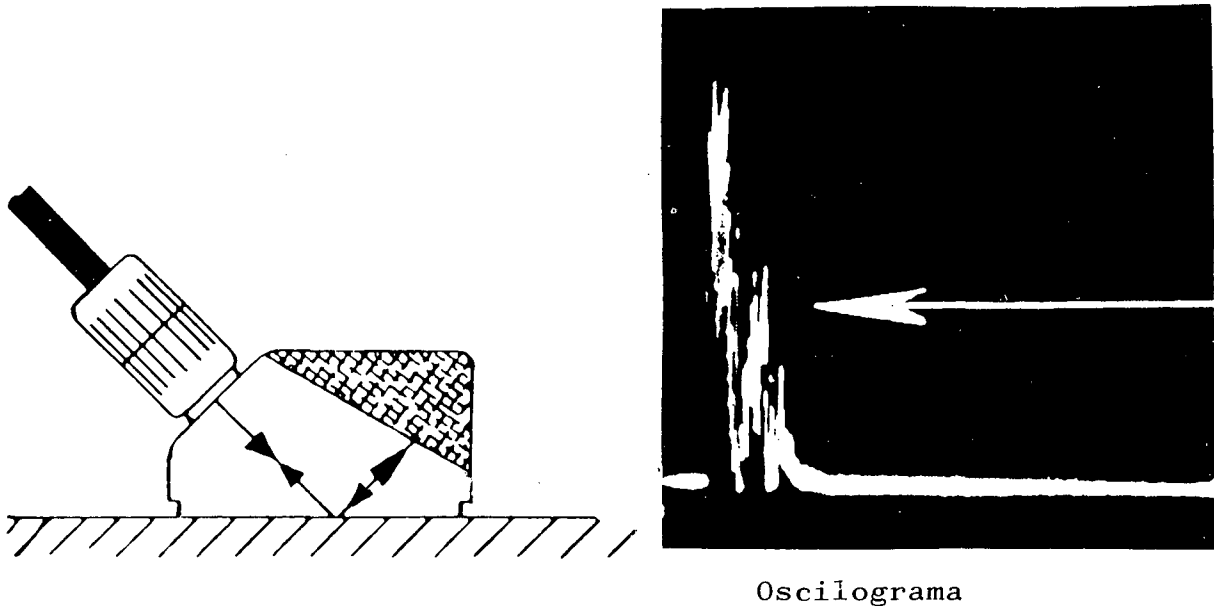


Figura 98 - Eco espúreo debido al palpador.

14.2. Indicaciones espúreas debidas a ondas superficiales

Al efectuar el ensayo con palpadores angulares próximos a 90° , se pueden originar en la pieza ondas superficiales. Estas pueden ser reflejadas por fisuras, por ranuras, gotas de soldadura o aún de líquido que se presenten en la superficie de la pieza y dar lugar un eco de difícil interpretación o no relevante. En la figura 99 se muestra una situación como la indicada.

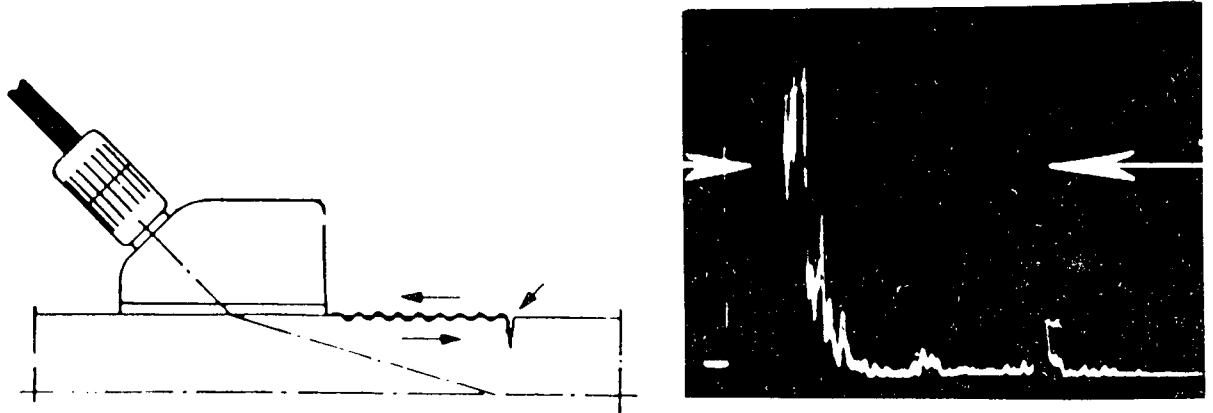


Fig.99.- Indicación espúrea debida a generación de ondas superficiales.-Reflexión en una grieta .-

Para reconocer la presencia de ese tipo de eco espúreo basta ejercer una ligera presión con el dedo sobre la superficie de la pieza, hacia adelante del palpador, con lo cual la señal de eco debe desaparecer.

14.3. Reflexiones espúreas debidas a la geometría de la pieza

En la figura 100, se muestra el caso de reflexiones en las paredes de bidas a la apertura del haz ultrasónico cuando se ensaya una pieza de geometría cilíndrica con diámetro relativamente pequeño. Estos ecos de reflexión confunden la interpretación ya que se agregan al eco de fondo.

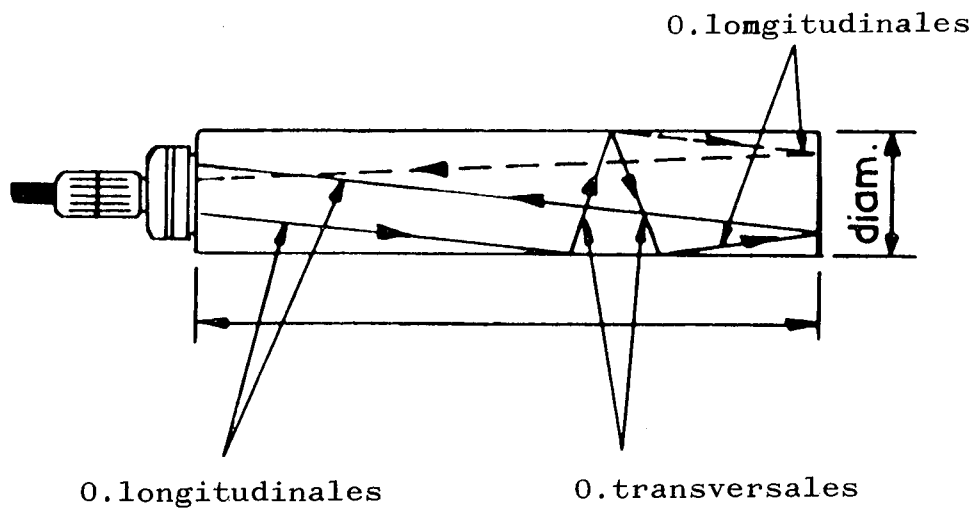


Figura 100 - Reflexiones por apertura del haz de U.S.

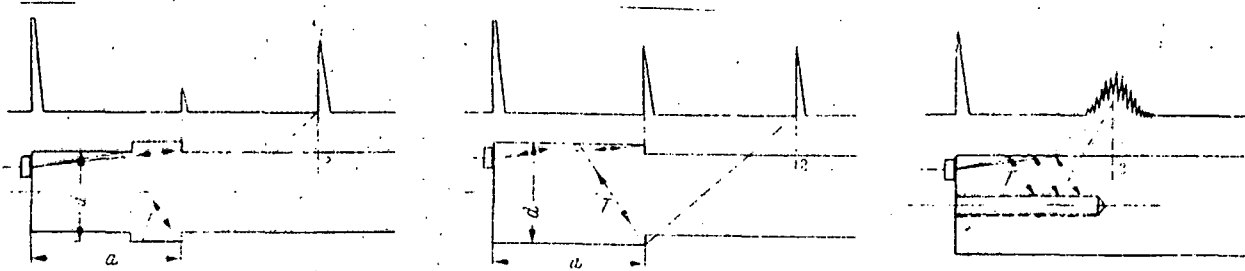


Figura 101 - Reflexiones por conversión de modo de propagación.

En la figura 101 se presentan casos de reflexiones espúreas debidas a conversión en el modo de propagación cuando se examinan piezas de geometría cilíndrica, desde un extremo, con ondas longitudinales.

En la figura 102 se muestran dos casos en que debido a la geometría de la pieza se producen reflexiones que pueden dar lugar a interpretación errónea. Estos casos indican claramente sobre la necesidad de que el operador conozca perfectamente la geometría de la pieza sobre la que realiza el ensayo.

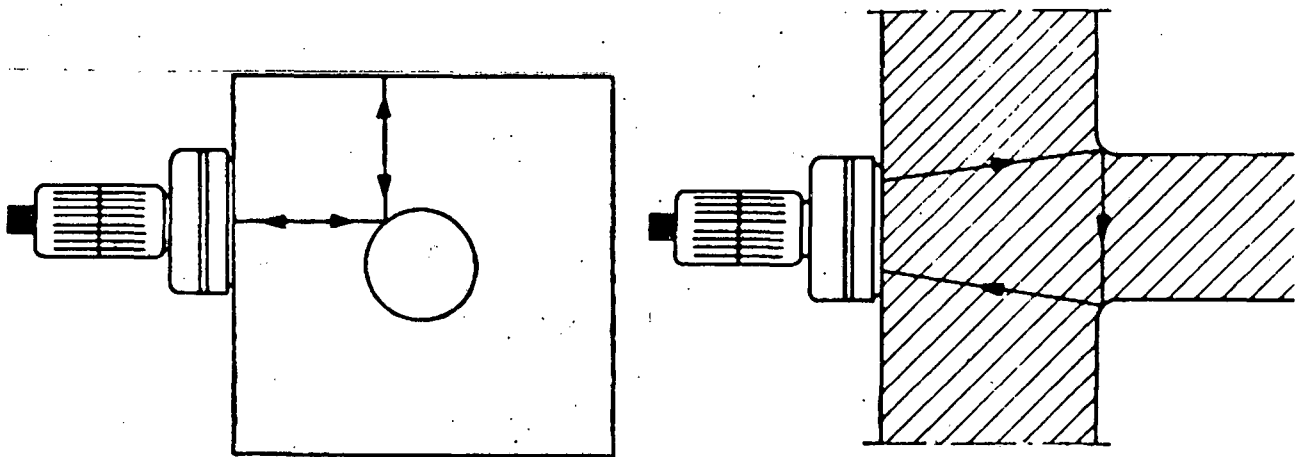


Figura 102 - Reflexiones debidas a la forma particular de la pieza.

Este tipo de reflexiones se puede presentar también en barras cilíndricas cuando se las examina desde una generatriz con ondas longitudinales. En estos casos se tiene lo que se conoce generalmente como "reflexión triangular"

y puede producirse sin conversión del modo de propagación o con conversión, de acuerdo a lo que se muestra en la figura 103.

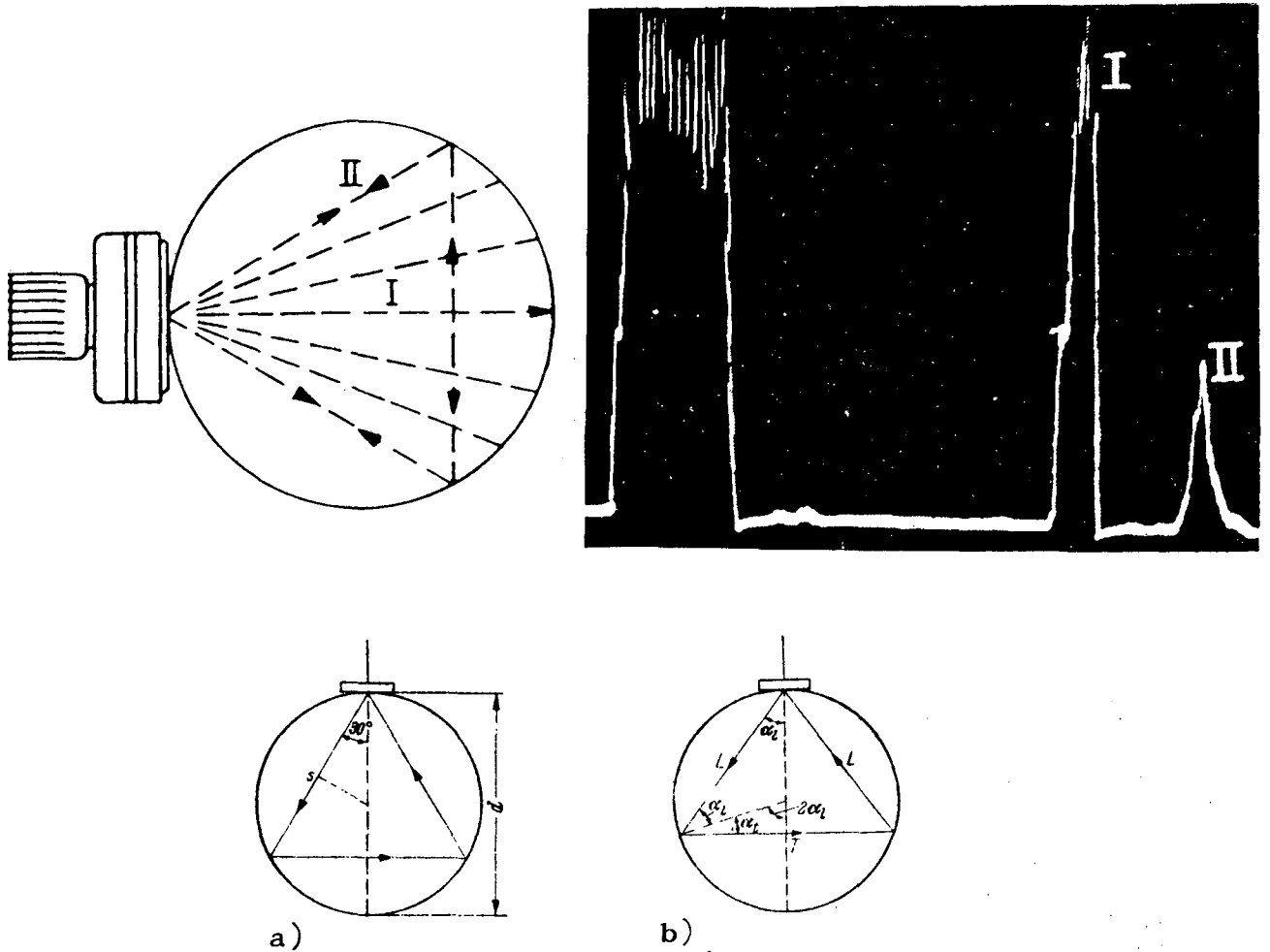


Fig.103 : Ecos espureos por reflexión triangular

a) sin conversión de modo ; b) con conversión de modo

14.4. Indicaciones falsas debidas al circuito eléctrico

Malos contactos, interrupciones en el circuito eléctrico, etc., generan impulsos de tensión que pueden ser detectados por el tubo de rayos catódicos. En los ensayos automáticos estos impulsos son señalados por el monitor como defectos.

Para reconocer estas interferencias en la señalización de defectos en el material bajo ensayo se debe repetir el control de la zona señalada como defectuosa para verificar la repetición de la indicación.

También suelen ocurrir interferencias y perturbaciones cuando dos o más aparatos operan en la vecindad con emisores no sincronizados y con cables coaxiales puestos a tierra en forma defectuosa.

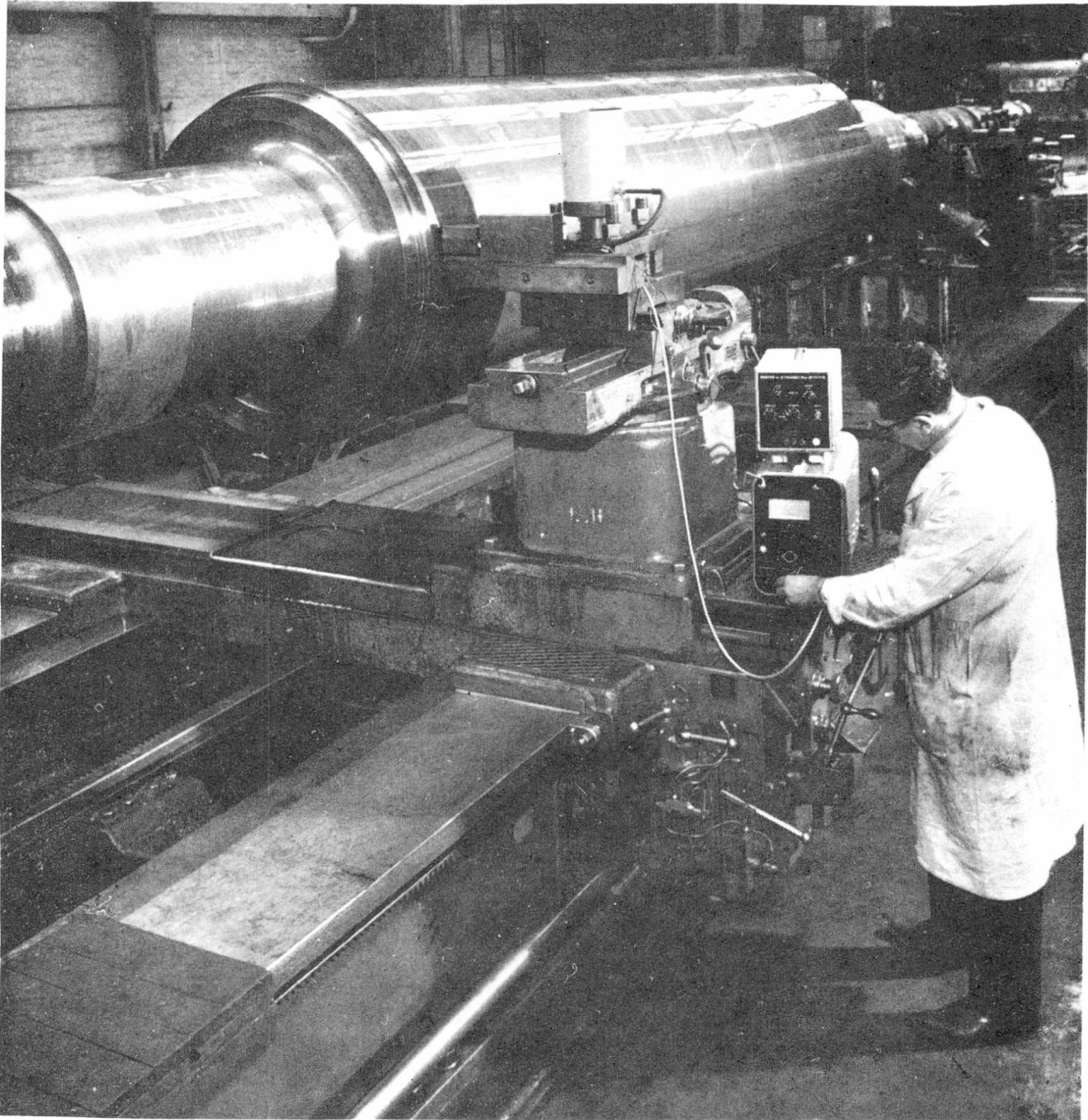


Fig.104: Ensayo ultrasónico de un rotor forjado

14.5. Perturbaciones debidas a la estructura del material
que se ensaya

En fundición gris y algunas aleaciones tales como el bronce se presentan numerosas reflexiones y ecos irregulares debidas a las interfases producidas por granos gruesos, láminas de grafito, segregaciones, estructura dendrítica, etc.

Una forma de disminuir estas interferencias consiste en emplear frecuencias bajas de manera que la mayor longitud de onda permita superar el obstáculo constituido por la estructura del material.

En ciertos casos, como en el de soldadura en aceros inoxidable austeníticos las modificaciones de estructura metalográfica que ocurren en el cordón de soldadura y en la zona del metal base afectada por el calor originan ecos y reflexiones espúreas así como absorción mayor del haz por dispersión, que en suma impiden el ensayo.

Una situación similar se presenta en piezas fundidas en acero inoxidable austenítico aunque en este caso es quizá más factible resolver el problema del ensayo ultrasónico que en el examen de soldaduras antes mencionado.

REFERENCIAS

- "Defectología o Controlli non Distruttivi" A.Gilardoni, C.Gilardoni, A.P.Gilardoni.- Edit.Gilardoni, Mandllo Lario (Italia), 1971.-
- "Ultrasonic Testing of Materials" J.Krautkrämer, H.Krautkrämer.- Springer-Verlag, Berlin/Heildeberg, (Alemania), 1969.-
- "Nondestructive Testing Handbook" R.C.McMaster.-The Ronald Press Co. New York (EE.UU.), 1963.-
- " Ultrasonido" E.Mundry.-Soc.Alemana de END, Berlin, 1961. Traducción al castellano por S.A.Delpech y H.Prevedel, INTI, 1968.-
- "ASTM Standards" Volumen 11, edición 1975.-
- "Ensaio Nao-Destrutivos dos Metais" P.G.de Paula Leite.-ABM, Sao Paulo, 1966.-

INDICE

	Pag.
1.- INTRODUCCION	1
2.- FUNDAMENTOS FISICOS DEL ULTRASONIDO	3
3.- SONDAS ULTRASONICAS	22
4.- ACOPLAMIENTO ENTRE SONDA Y ESPECIMEN	27
5.- TECNICAS DE ENSAYO	28
6.- EQUIPOS PARA EL ENSAYO POR ULTRASONIDOS	33
7.- UBICACION Y DETECCION DE DEFECTOS	41
8.- MEDICION DE ESPESORES	44
9.- CALIBRACION DE LOS SISTEMAS DE ENSAYO ULTRASONICO POR REFLEXION	55
10.-ENSAYO ULTRASONICO DE SOLDADURAS	77
11.-ENSAYO ULTRASONICO DE CAÑOS Y TUBOS	89
12.-ENSAYO ULTRASONICO DE CHAPAS.	116
13.-EXAMEN DE BARRAS, PALANQUILLAS, Y EJES	120
14.-INDICACIONES ESPUREAS	123
REFERENCIAS	129
INDICE	130
