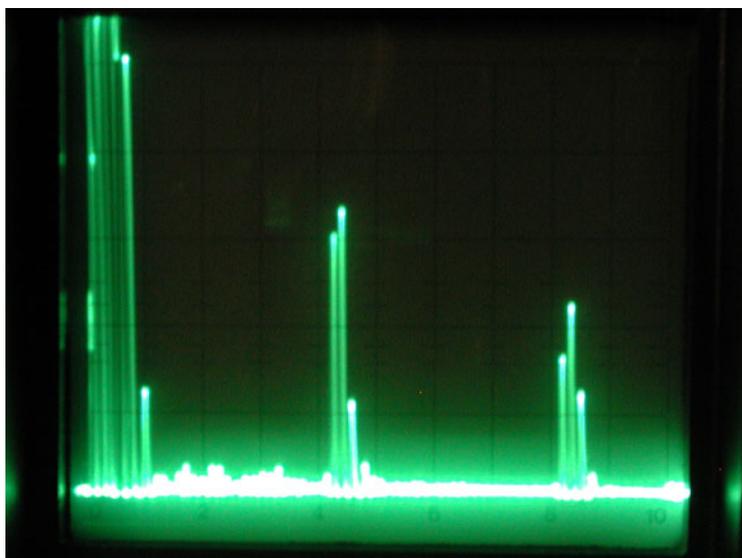


ENSAYO NO DESTRUCTIVO POR MÉTODO DE ULTRASONIDO



Cátedra: ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Autores: Claudio Rimoldi, Luis Mariano Mundo

INTRODUCCIÓN

Este método se basa en la medición de la propagación del sonido en el medio que constituye la pieza a analizar y tiene aplicación en todo tipo de materiales.

Sus distintas técnicas permiten su uso en dos campos de ensayos no destructivos: Control de calidad y Mantenimiento preventivo, siendo en esta última especialidad muy utilizados en la aeronáutica por su precisión para determinar pequeñas fisuras de fatiga en, por ejemplo, trenes de aterrizaje, largueros principales, blocks de motores, bielas, etc. La manifestación de estas y otro tipo de fallas es la INTERPRETACION, generalmente en un osciloscopio, lo cual lo distingue de otros métodos, ya que no nos presenta un cuadro directo de las fallas, como en el caso de las películas radiográficas. Esto trae aparejado que los resultados de este ensayo no constituyan de por si un DOCUMENTO OBJETIVO sino una INFORMACION SUBJETIVA, cuya fidelidad no puede comprobarse sin recurrir, a menudo, a otros medios. Por lo tanto requiere un conocimiento profundo, tanto de las bases del método como del dominio de la técnica, por parte del operador.



Figura 1 – Medición de espesor en tuberías.



Figura 2 – Búsqueda de fisuras en control de calidad de engranajes.



Figura 3 – Mantenimiento: búsqueda de fisuras en superficie de control de materiales compuestos.

NOCIONES ACÚSTICAS

Con el fin de obtener una mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en el ensayo no destructivo de ultrasonido se citarán algunos términos y principios básicos de la física que comprende la acústica:

Primeramente debe destacar que no se utilizará la suposición de que los cuerpos son perfectamente rígidos, con lo cual se utilizará el siguiente modelo: *La materia se encuentra formada por pequeñas moléculas cuya forma de distribución y fuerza de atracción depende del estado en que se encuentra dicha materia.* Estos estados son los siguientes:

Sólido: Está formado por moléculas fuertemente atraídas entre sí y que se encuentran distribuidas en forma regular y geométrica en posiciones de equilibrio. Estas fuerzas de atracción son del tipo elásticas, es decir, que mientras no se sobrepase el llamado “Limite de Elasticidad”, las deformaciones que se produzcan no serán permanentes.

Líquido: Cuando al suministrar calor a un sólido se rompe su estado de equilibrio entre sus moléculas esta pasa a estar en un estado líquido. Las moléculas en el estado líquido ocupan posiciones al azar que varían con el tiempo. Las distancias intermoleculares son constantes dentro de un estrecho margen.

Gaseoso: Al seguir suministrando calor, las moléculas se aceleran y dejan el líquido formando el gas. Este estado de la materia no tiene forma ni volumen propio. Su principal composición son moléculas no unidas, expandidas y con poca fuerza de atracción, haciendo que no tengan volumen y forma definida, provocando que este se expanda para ocupar todo el volumen del recipiente que la contiene.

Si tomamos ahora un sólido y provocamos en él una perturbación (golpe por ejemplo) produciremos una agitación en sus moléculas que se propagará por el sólido hasta sus extremos, la llamaremos ONDA. Dicha onda puede ser estudiada a una distancia cualquiera de la fuente.

Este tipo de ondas puede ser provocada en cualquier medio que sea ELÁSTICO, o sea, que cumpla con la ley de Hooke.

Cabe destacar *que las ondas solo provocan la propagación de energía y no de materia*, y eso se debe al acoplamiento de las partículas del medio en que viaja.

PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA ACÚSTICA (TÉRMINOS)

Oscilación (ciclos): Es el cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.

Onda: Es una propagación de una oscilación y sucede cuando las partículas de un material oscilan transmitiendo su vibración a la adyacente.

Periodo (T): Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación.

Frecuencia (f): Es la inversa del período.

Amplitud (A): Es la máxima desviación de oscilación, si esta es constante en el tiempo la oscilación se considera como desamortiguada (para materiales perfectamente elásticos), en cambio si esta decrece con el tiempo, la oscilación se considera como amortiguada, en este caso la disminución de dicha amplitud se debe a la disipación de energía (cuando los materiales no son perfectamente elásticos).

Amortiguación o Atenuación: es el decremento en el tiempo de la amplitud de una oscilación.

Velocidad de propagación: Es la velocidad a la que se propaga la onda que, en nuestro caso, es la *velocidad del sonido (C)*, esta depende de las propiedades del material que hace de medio (las cuales se verán más adelante).

Longitud de onda (λ): Es la distancia entre dos puntos adyacentes de condición de oscilación equivalente mirando en la dirección de propagación.

SI el fenómeno se propaga con una velocidad V entonces se tiene que:

$$\lambda = V \cdot T$$

O teniendo en cuenta la frecuencia:

$$\lambda = v/f$$

La siguiente imagen presenta una onda senoidal arbitraria con algunas de sus características principales.

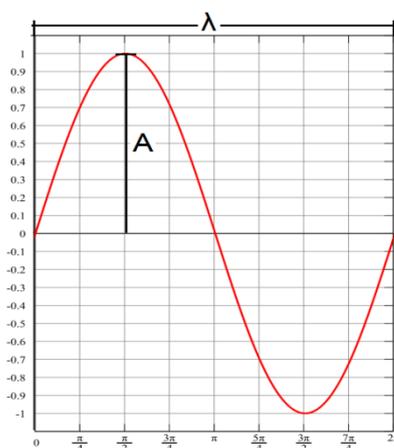


Figura 4 – Onda senoidal.

Frente de onda: Es el lugar geométrico en que los puntos del medio son alcanzados en un mismo instante por una determinada onda. Dada una onda propagándose en el espacio o sobre una superficie, los frentes de ondas pueden visualizarse como superficies o líneas que se desplazan a lo largo del tiempo alejándose de la fuente sin tocarse.

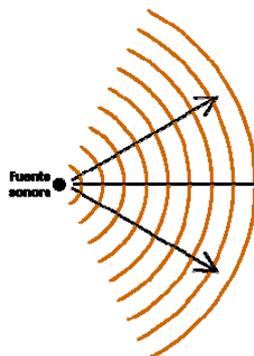


Figura 5 – Frente de onda.

TIPOS DE ONDAS

Las ondas pueden ser propagadas de distintas maneras, correspondiendo cada una de ellas al movimiento particular de los elementos del medio:

Ondas longitudinales: En este tipo de ondas el movimiento de las partículas en el medio es paralelo a la dirección de propagación. Por ejemplo la propagación en un resorte y la propagación del sonido:

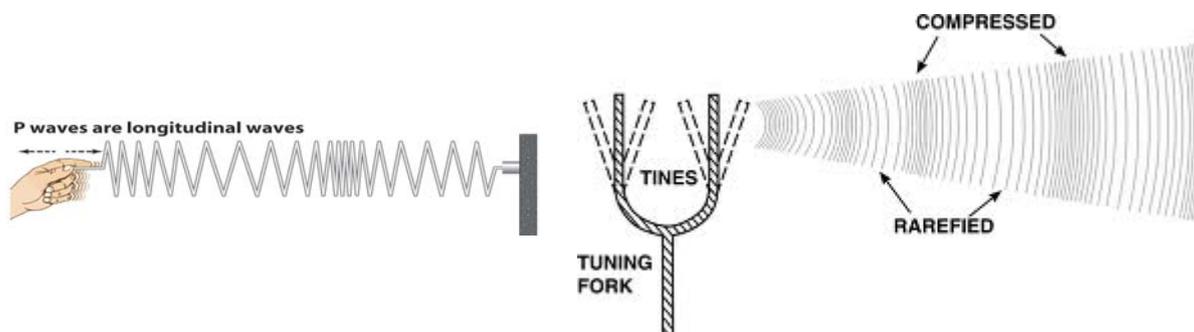


Figura 6 – Movimiento de un resorte.

Figura 7 – Propagación del sonido.

Estas son las ondas más utilizadas en ultrasonido porque, además de propagarse en cualquier medio, son fácilmente generadas y detectadas. Pueden ser orientadas y localizadas en un haz concentrado y poseen alta velocidad.

Ondas Transversales: En este caso el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de la propagación de la onda, ejemplo el movimiento de una soga al agitarla o el agua ante una perturbación:

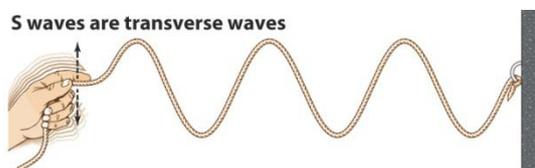


Figura 8 – Movimiento de una sogá.



Figura 9 – Perturbación en superficie de líquidos.

Ya que los líquidos y gases no ofrecen ninguna resistencia a los esfuerzos de corte, las ondas transversales no pueden ser propagadas en estos medios, entonces **solo las ondas longitudinales pueden propagarse en líquidos y gases**. Sin embargo en los sólidos pueden propagarse tanto las ondas transversales como las longitudinales y sus combinaciones.

Ondas superficiales o de Raileigh: Son ondas que se propagan sobre las superficies de los sólidos de espesores relativamente gruesos penetrando aproximadamente una longitud de onda. Estas poseen la particularidad de que el movimiento de las partículas es una combinación de movimiento transversal y longitudinal realizando una elipse la cual el mayor ejes es el perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Estas ondas son utilizadas en el método de ultrasonido porque son particularmente sensibles a defectos en la superficie y son capaces de copiar posibles curvas que dichas superficies posean.

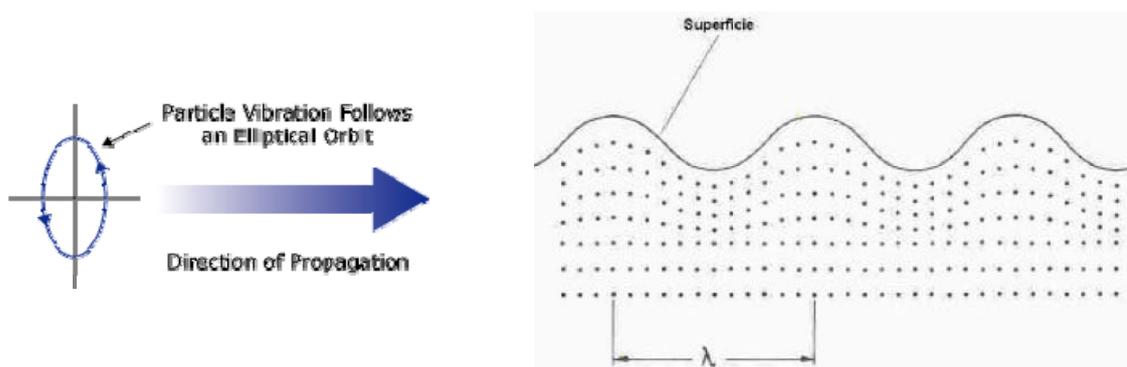


Figura 10 – Ondas Superficiales.

Ondas de LAMB: Las ondas de Lamb aparecen en cuerpos cuyo espesor es del mismo orden que una longitud de onda, por ejemplo en chapas delgadas. Estas se propagan paralelas a la superficie a través de todo el espesor de material. Son muy influenciadas por el espesor del material y la frecuencia de movimiento.

Se generan cuando ingresan en el material a un ángulo de incidencia en el cual la componente de la velocidad paralela a la superficie de la pieza es igual a la velocidad de propagación del sonido en el mismo material, pudiendo viajar distancias de metros en el acero.

Son utilizadas, generalmente, para escanear chapas, alambres y tubos.

El movimiento de las partículas es similar al movimiento en elipse mencionado anteriormente generando dos modos principales de vibración, el llamado *Simétrico* o *Modo extensional* (moviéndose paralelas a la superficie simétricamente respecto al plano medio) y el *Anti simétrico*, o llamado *Modo Flexional*, el mayor movimiento de las partículas es perpendicular a la superficie, en este modo la placa se flexiona. Las siguientes imágenes presentan los movimientos antes descritos.

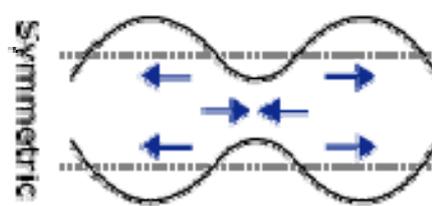
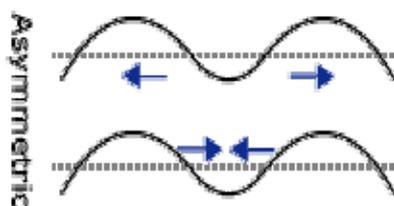


Figura 11 – Ondas de Lamb Asimétrica.

Figura 12 – Ondas de Lamb Simétrica.

Ondas de torsión: Este tipo de ondas puede propagarse en cuerpos con forma de barras, estas son oscilaciones rotacionales alrededor del eje longitudinal de la barra y la dirección de propagación se sitúa en la dirección del eje de la barra.

ONDAS SONORAS

Propagación del sonido

El sonido, como se lo conoce habitualmente, se propaga en forma de ondas. Una diferencia de importancia de estas ondas, producidas por medios elásticos, y las llamadas electromagnéticas (luz, rayo X, Gamma, etc.) es que las ondas sonoras necesitan de un medio para transportarse (sea sólido, líquido o gaseoso), mientras que las últimas no. Ambas tienen propiedades en común: transportan energía de un punto a otro del espacio.

Cuando un cuerpo en el aire (cuerda tensa, voz humana, etc) perturba el aire que lo rodea, de una manera tal que su dirección es la misma que la propagación estamos en presencia de ONDAS LONGITUDINALES.

Impedancia acústica

Como ya se ha mencionado el sonido viaja a través de los materiales por medio del movimiento de las moléculas unidas elásticamente. Por lo tanto se define a la *Impedancia Acústica (Z)* como a la resistencia que opone el medio a la propagación de las ondas, siendo igual al producto de la densidad del medio por la velocidad de la onda en dicho medio. Por lo tanto, un material que posea baja impedancia acústica significa que posee baja resistencia a las deformaciones elásticas producto de las ondas sonoras.

Esta es una propiedad o constante de los distintos materiales.

$$Z = \rho \cdot V \text{ [gr/cm}^3 \cdot \text{cm/seg]}$$

ρ : Densidad del material.

V: Velocidad del sonido en el material.

La *Impedancia Acústica* es importante en:

- La determinación de la transmisión y reflexión acústica en la superficie de contacto de dos materiales que poseen distintas propiedades.
- El diseño de los cabezales ultrasónicos.
- Evaluación de la capacidad de absorción de sonido de un medio.

Frecuencias

Más allá de todas las divisiones que puedan ser hechas se sabe que no todo el rango de frecuencias es audible para el oído del ser humano. Solamente es un cierto rango el cual puede diferir entre individuos y que puede variar con la edad. El límite inferior de audibilidad se halla alrededor de 16Hz y el superior alrededor de 20KHz. Los rangos de interés son:

Subsónico: $f < 16\text{Hz}$, en este rango no se escucha ningún tono, solo se notará presión.

Sónico: $16\text{Hz} \leq f \leq 20\text{KHz}$, rango audible por el ser humano.

Ultrasónico: $f > 20\text{KHz}$.

Las frecuencias utilizadas en los ensayos ultrasónicos se encuentran en el rango de 0,5 a 25 MHz.

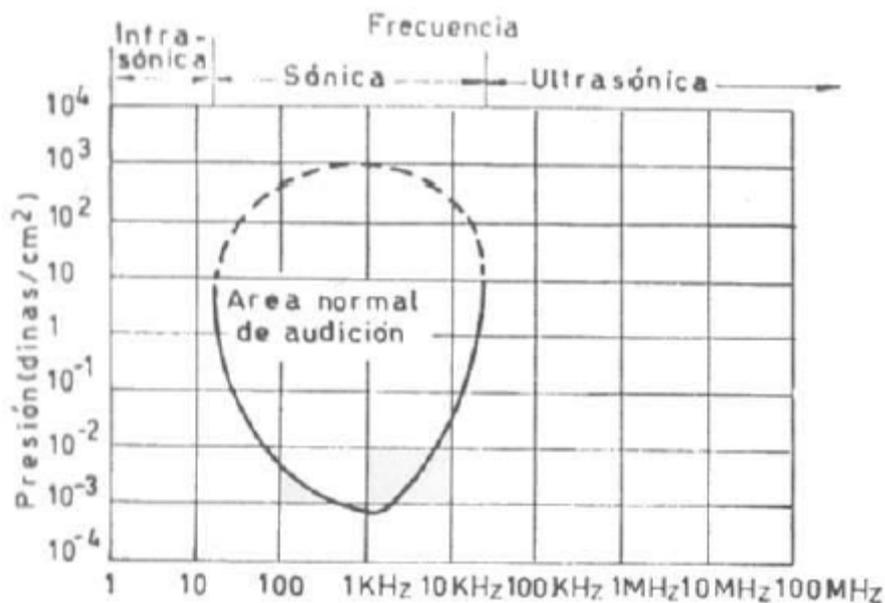


Figura 13 – Espectro acústico.

Velocidad de propagación

La velocidad de propagación de estas ondas (velocidad del sonido) es constante en todo el sólido, y depende del modulo de elasticidad a tracción (o de young) y de la densidad del medio. Partiendo de la ecuación diferencial de una onda longitudinal:

$$\frac{d^2 y}{d^2 t} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{d^2 y}{d^2 x}$$

Con, E: modulo de elasticidad del material; ρ : Densidad del material. Se llega a la velocidad de la onda longitudinal:

$$V = \sqrt{E / \rho}$$

Considerando la relación de Poisson:

$$V = \sqrt{\frac{e}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}}$$

Por lo tanto se llega a la conclusión de que la velocidad el sonido no depende de la amplitud ni de la frecuencia, sino del medio en que se propaga.

Para una onda transversal, su velocidad es aproximadamente la mitad de la de las ondas longitudinales y está dada por:

$$V_t = \sqrt{G / \rho}$$

Siendo ρ : Densidad del material; G: Modulo de corte.

En cuanto a las ondas superficiales, siendo estas un caso especial de las transversales, es aproximadamente:

$$V_s = 0,9.V_t$$

La velocidad de propagación de las ondas de Lamb y las de torsión dependen no solamente de las constantes del material dadas anteriormente, sino que también de las dimensiones del mismo, del tipo de onda y de su frecuencia.

Energía específica

La Energía Específica (E) de una onda sónica se define a:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{\rho \cdot V^2}$$

Donde “p” es la amplitud de la onda sónica (presión del sonido).

Intensidad del sonido

La intensidad del sonido (I) es la cantidad de energía que transporta la onda por unidad de área en una unidad de tiempo y está dada por:

$$I = E \cdot V$$

O utilizando $Z = \rho \cdot V$

$$I = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{Z}$$

Descomposición de ondas

Las ondas sonoras, dentro de un medio, sufren los siguientes fenómenos:

1- Al incidir sobre una superficie de propiedades elásticas distintas al medio en que se propagan, parte de su energía es reflejada por esa superficie en dirección que forma, con la normal a la superficie, el mismo ángulo que formaba la onda incidente. Este fenómeno es llamado REFLEXION y es el causante del eco en el instrumento de ensayo.

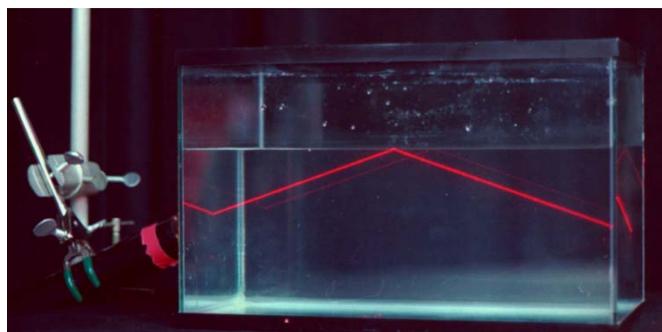
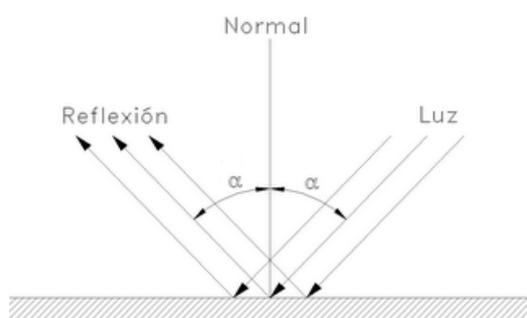


Figura 14 – Reflexión de una onda.

2- La parte restante de la onda penetra en el segundo medio (que comienza a vibrar a la misma frecuencia) con dirección distinta a la de la onda incidente, pero tal que la relación entre los senos de los ángulos, respecto a la normal, que forma el rayo incidente y el que penetra sea constante, este fenómeno se denomina REFRACCIÓN.

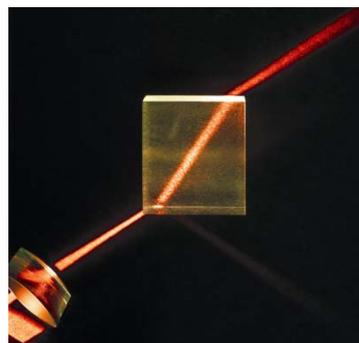
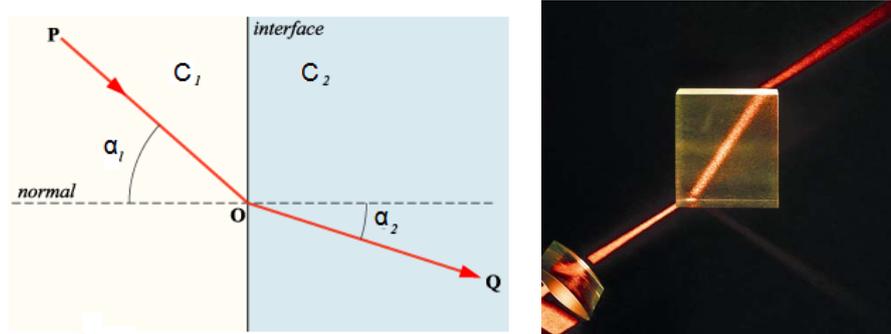


Figura 15 – Refracción de una onda.

Existe una ley, similar a la aplicada en óptica, que relaciona el ángulo de la onda incidente con el de la onda refractada directamente con las velocidades del sonido en ambos medios, esta se conoce como la Ley de Snell y es aplicable a todo tipo de ondas independientemente de si se está trabajando con la componente reflejada o refractada.

$$\frac{\text{sen } \alpha_1}{\text{sen } \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

Donde:

α_1 : Ángulo de incidencia de la onda incidente.

α_2 : Ángulo de incidencia de la onda refractada.

C1: Velocidad del sonido en el medio de la onda incidente.

C2: Velocidad del sonido en el medio de la onda refractada.

En el caso particular de analizar el ángulo de una onda que se refleja, como el medio en el que se refleja es el mismo que el de incidencia, la relación entre los senos de los ángulos es igual a 1, por lo que el ángulo de la onda reflejada es igual al ángulo de la onda incidente.

3- Cuando una onda sonora incide en un cuerpo pequeño o una abertura que posea dimensiones del orden de la longitud de onda ciertos puntos del frente de onda pueden convertirse en fuentes secundarias de onda, este fenómeno es conocido como DIFRACCION. Esta puede darse por dos motivos:

- Cuando la onda a su paso se encuentra con un cuerpo de tamaño comparable con la longitud de onda, y lo rodea.
- Cuando el frente de onda se encuentra con un pequeño orificio, relativo a la longitud de onda.

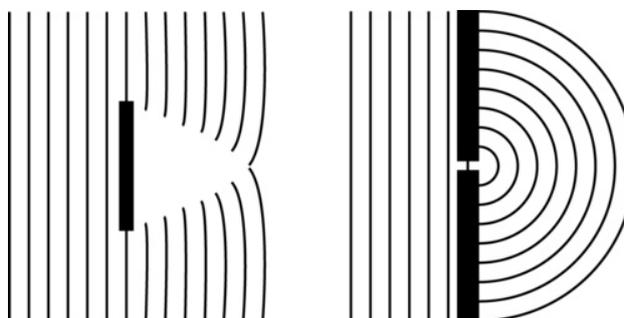
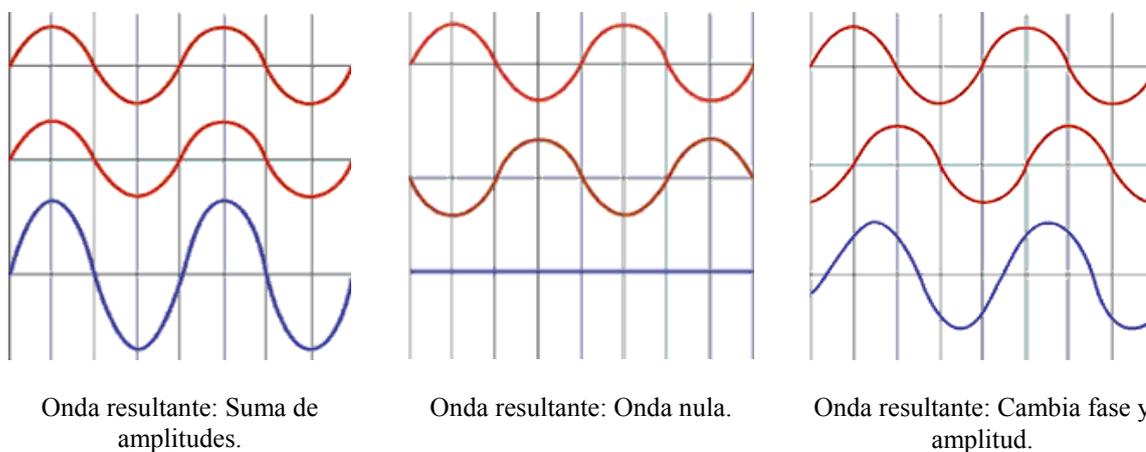
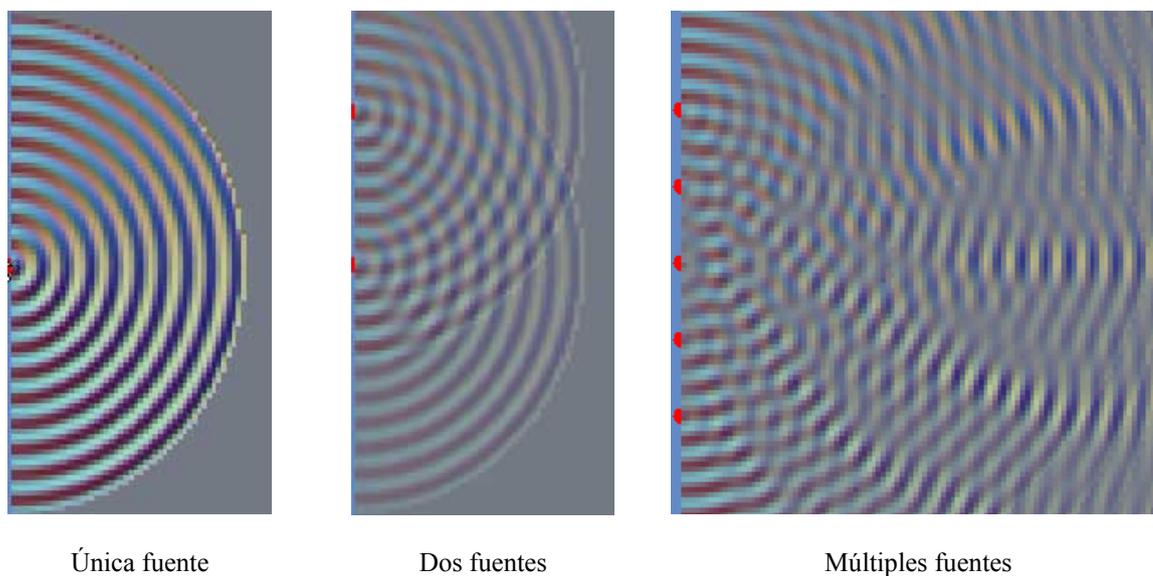


Figura 16 – Efecto de difracción.

4- Cuando las ondas de sonido se originan simultáneamente desde distintos puntos, distintas fuentes, ocurre un "solapamiento" de las diferentes ondas creando el fenómeno de INTERFERENCIA el cual significa una onda resultante distinta a las originadas. las siguientes figuras ilustran el fenómeno.

**Figura 17 – Efecto de interferencia.****Figura 18 – Efecto de interferencia en ondas de sonido.**

5- Parte de la energía acústica disminuye debido a las pérdidas por fricción convirtiéndose en calor, este es el fenómeno denominado como ABSORCIÓN. Dicha “fricción interna” crece con la frecuencia. Materiales con alta fricción interna, igual a alta absorción, se utilizan como amortiguadores acústicos.

Existen coeficientes de atenuación acústica que indican la cantidad de atenuación sónica por unidad de longitud de recorrido del sonido, para un determinado material. La atenuación sónica, además del material, también depende de la frecuencia y del tipo de onda.

GENERACION DE ULTRASONIDO

Existen numerosos medios de producción de ondas ultrasónicas, aprovechando diversos fenómenos físicos, algunos de los cuales sirven para los END, dependiendo de la frecuencia requerida y del rendimiento a obtener. El concepto básico es el de la conversión de pulsos eléctricos a vibraciones mecánicas y el retorno de vibraciones mecánicas a energía eléctrica.

Estos métodos se pueden dividir en:

Procedimientos mecánicos

En principio son los mismos que los que se emplean para generar sonido audible. Son dispositivos capaces de oscilar que se construyen de tal manera que posean una frecuencia propia correspondientemente alta. Este procedimiento no se utiliza en la rama de ensayos no destructivos.

Efecto magnetostrictivo

Consiste en aprovechar la propiedad que tiene algunos materiales ferro magnéticos (especialmente el Níquel, además del acero) de contraerse o expandirse en determinada dirección cuando están sometidos a la influencia de campos magnéticos en condiciones especiales. Este efecto es recíproco, lo que permite a su vez emisión y recepción de las ondas ultrasónicas.

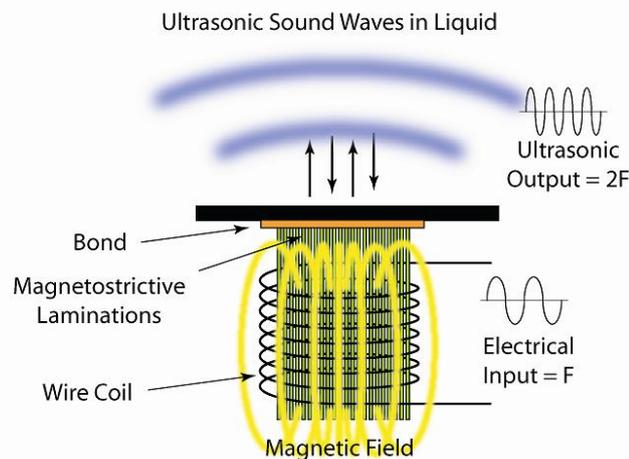


Figura 19 – Esquema de generación por método magnetostrictivo.

Efecto piezoeléctrico

Este efecto es aprovechado casi universalmente para el ensayo no destructivo de materiales. Los elementos utilizados son, básicamente, una pieza de material polarizado (en cierta parte las moléculas se encuentran cargadas positivamente mientras que en otra parte las moléculas se encuentran cargadas negativamente) con electrodos adheridos a dos de sus caras opuestas. Cuando un campo eléctrico es aplicado a lo largo del material las moléculas polarizadas se alinearán con el campo resultando un dipolo inducido en la estructura cristalina. Esta alineación de las moléculas causará un

cambio dimensional, llamado *electrostricción*. A su vez puede darse la acción opuesta, es decir, producir un campo eléctrico cuando cambian de dimensión.

Entre los materiales más conocidos en la utilización de cristales para los transductores se encuentran los siguientes:

Cuarzo: Fue el primer material utilizado. Tiene características muy estables en frecuencia, sin embargo es pobre en la generación de energía acústica y, comúnmente, reemplazado por materiales más eficientes.

Sulfato de Litio: Es muy eficiente como receptor de energía acústica, pero es muy frágil, soluble en agua y su uso es limitado a temperaturas debajo de los 75 °C.

Cerámicas sintetizadas: Producen generadores de energía acústica más eficientes pero tienen tendencia a desgastarse.

Generalmente el espesor del elemento activo (cristal) utilizado es determinado por la frecuencia de utilización del transductor. Cuanto más altas son las frecuencias requeridas, más delgados serán los cristales utilizados.

El método de generación de ultrasonido permite alcanzar frecuencias de hasta 25 Megaciclos por segundo (25MHz).

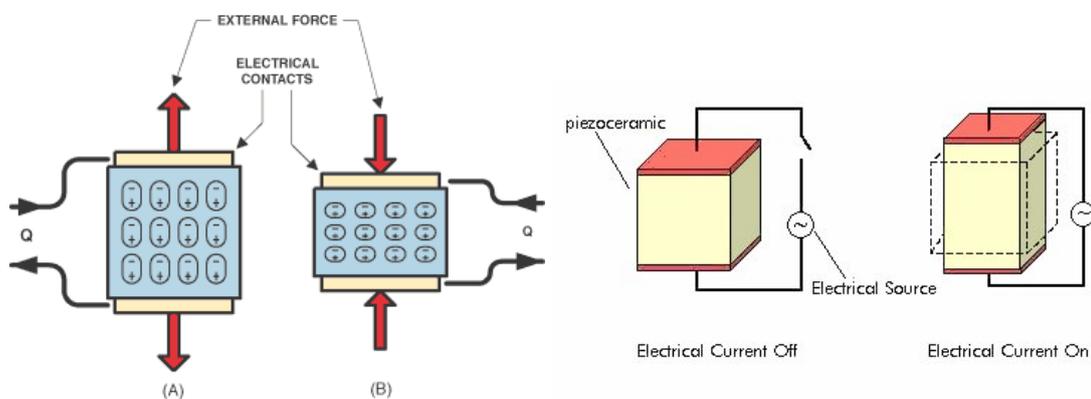


Figura 20 – Esquema de elementos piezoeléctricos.

CARACTERÍSTICAS DEL CABEZAL

El cabezal es una parte muy importante del instrumento de ultrasonido. Como se comentó anteriormente, es el que contiene el elemento piezoeléctrico que convierte la señal eléctrica en vibraciones mecánicas (Emisión) y las vibraciones mecánicas en energía eléctrica (Recepción). Algunos factores, como la construcción mecánica y eléctrica, afectan el comportamiento del cabezal. La construcción mecánica incluye parámetros como la superficie de radiación, el amortiguamiento propio, el encapsulado, el conexionado, entre otros.

La siguiente figura presenta un corte típico de un cabezal:

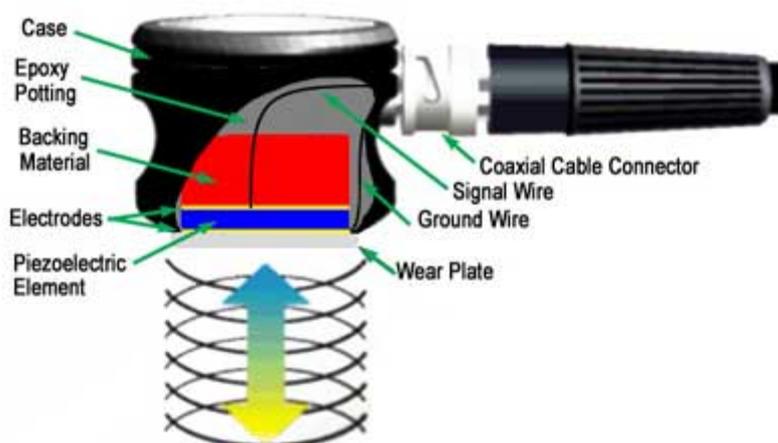


Figura 21 – Esquema de cabezal ultrasónico.

El elemento piezoeléctrico es cortado a la mitad de la longitud de onda deseada. Para obtener la mayor energía de salida posible se coloca una lámina de $1/4$ de la longitud de onda con una impedancia determinada entre la cara del cabezal y el cristal piezoeléctrico. Esta lámina genera que todas las ondas que salen del cabezal lo hagan en fase.

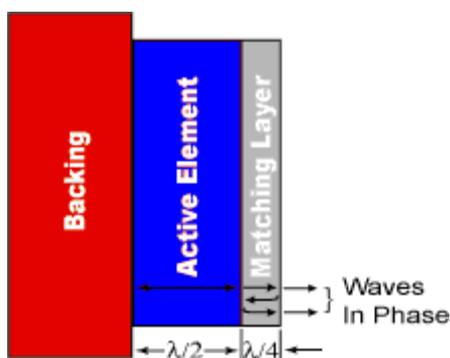


Figura 22 – Esquema de láminas de protección del cabezal.

Los cabezales de contacto incluyen una lámina que protege los elementos internos de ralladuras.

El material de apoyo (Señalado en rojo en la figura anterior) tiene una gran influencia en las características de amortiguamiento del cabezal. Utilizar un material de apoyo con una impedancia similar a la del elementos piezoeléctrico producirá un amortiguamiento lo más eficiente posible, por lo que el cabezal tendrá un ancho de banda de trabajo más amplio y una mejor sensibilidad. Cuando la

diferencia de impedancia entre ambos materiales aumenta la penetración aumenta pero la sensibilidad se reduce.

Los cabezales están contruidos para soportar cierto maltrato, pero se recomienda manipularlos con cuidado ya que un mal uso, como golpes puede quebrar la lámina de protección o el material de apoyo, daño que será evidente en la lectura del ensayo.

Longitud de onda y detección de defectos

En un ensayo de ultrasonido en usuario tiene que decidir qué frecuencia utilizar y, como ya se vio antes, un cambio en la frecuencia de la onda produce un cambio en la longitud de onda del sonido, ya que la velocidad es constante. Por otro lado, la longitud de onda del ultrasonido utilizado tiene un efecto significativo en la probabilidad de detectar discontinuidades. Una regla general es que una discontinuidad debe tener un largo de, por lo menos, la mitad de la longitud de onda para tener una probabilidad razonable de ser detectada.

La sensibilidad y la resolución son dos términos comúnmente utilizados en la inspección con ultrasonido. Sensibilidad es la capacidad de localizar pequeñas discontinuidades en el ensayo, esta, generalmente, se incrementa al incrementar la frecuencia (disminuye la longitud de onda). Resolución es la capacidad del sistema de detectar fisuras que se encuentran muy próximas o muy cerca de los bordes, este parámetro también aumenta cuando se incrementa la frecuencia.

Pero el aumentar la frecuencia puede afectar la capacidad del instrumento de forma adversa debido a que las ondas de sonido tienden a dispersarse en materiales con estructura de granos gruesos como las piezas fundidas. A su vez, dicho aumento de frecuencia genera una reducción en el poder de penetración de la medición. Por lo tanto para seleccionar una óptima frecuencia de inspección se deben hacer un balance entre los resultados favorable y los desfavorables de la selección, antes de seleccionar dicha frecuencia se deben tener en cuenta el tamaño de grano, el espesor de la pieza, el tipo de discontinuidad, tamaño y probable localización.

Cabe destacar que hay otros parámetros que también influyen en la capacidad del equipo, estos son: la longitud del pulso aplicado, el tipo y voltaje aplicado al cristal, las propiedades del cristal, el material y el diámetro del cabezal, el circuito de procesamiento de datos del instrumento.

Eficiencia, ancho de banda y frecuencia del cabezal.

Algunos cabezales son contruidos con mayor eficiencia para transmitir y otros con mayor eficiencia para recibir. A menudo un cabezal con un buen rendimiento para una aplicación no es el adecuado para otras aplicaciones.

Es importante entender el ancho de banda o rango de frecuencias de un cabezal. Todos los cabezales poseen una frecuencia central que depende principalmente del *material de apoyo* y del cristal utilizado. Cabezales con alto amortiguamiento responderán a una amplia gama de frecuencias con un

alto poder de resolución, en cambio, cabezales con menor amortiguamiento tendrán un rango estrecho de frecuencias y pobre poder de resolución, pero mayor penetración.

La frecuencia central define las capacidades del cabezal, frecuencias bajas, del orden de 0,5 MHz a 2,25 MHz proveen mayores energías y penetración en el material, mientras que para cristales de altas frecuencias, del orden de 15 MHz a 25 MHz se reduce la penetración pero poseen gran sensibilidad para detectar pequeñas discontinuidades.

Campo de radiación del cabezal

El sonido emitido por un cabezal piezoeléctrico no se origina desde un punto sino que se origina desde la superficie del elemento piezoeléctrico.

El campo de sonido emitido por un transductor típico se presenta en la siguiente figura, puede observarse cualitativamente la intensidad del sonido con la ayuda de la gama de colores en la cual los más claros corresponden a intensidades más altas.

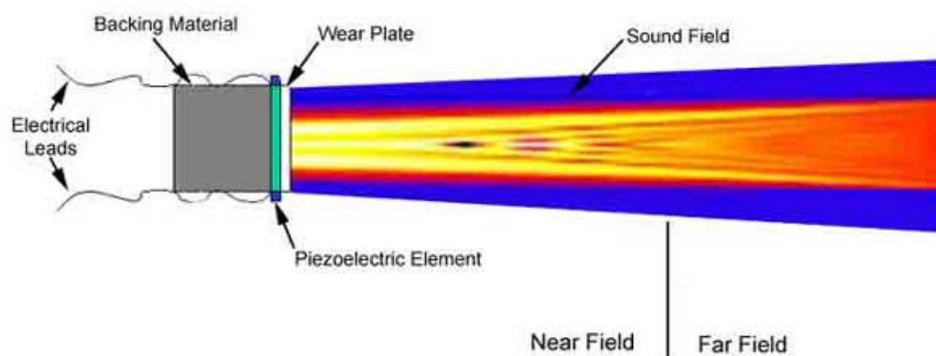
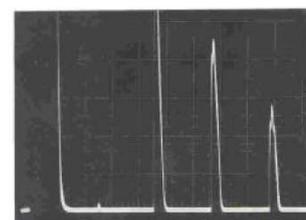


Figura 23 – Esquema cualitativo de intensidades de sonido emanadas por un cabezal piezoeléctrico.

Dado que las ondas de ultrasonido se generan desde un número de puntos en el plano del elemento piezoeléctrico la intensidad es afectada por efectos de interferencia entre dichos puntos, como se mencionó en apartados anteriores. Esta interferencia genera fluctuaciones que se extienden en el campo cerca del cabezal, esta zona es llamada *Campo Cercano o ZONA MUERTA* y puede ser extremadamente difícil detectar discontinuidades en el material.

Las ondas de presión se convierten en uniformes hacia el final del campo cercano. Esta zona del haz más uniforme recibe el nombre de *Campo Lejano* y la transición ocurre a una distancia N en la que la amplitud de las ondas varía significativamente a un patrón mucho más suave.



1.- Pulso de transmisión
2.- Eco del acoplante
3.5.- Ecos de fondo

Figura 25 – Cabezal de contacto.

Accesorios

Con el fin de eliminar la, denominada en el apartado anterior, ZONA MUERTA, se utiliza un elementos separadores (señalado como DELAY LINE en la siguiente figura) que alejan la fuente de ultrasonido de la superficie de la pieza dejando dicha zona. Otra ventaja de este tipo de separadores es generar un retardo de tiempo entre la generación de la onda de sonido y la llegada de la onda reflejada mejorando la lectura en las zonas cercanas a la superficie del material en el que se encuentra en contacto el cabezal. Estos los hace especiales para el uso en medición de espesores con gran precisión y verificación de delaminación en materiales compuestos.

A su vez, para aplicaciones en las que se necesita realizar un ensayo en superficies con elevada temperatura se utiliza una interfase de material cerámico.

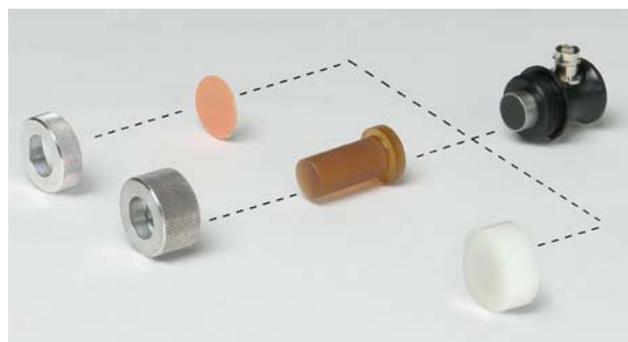
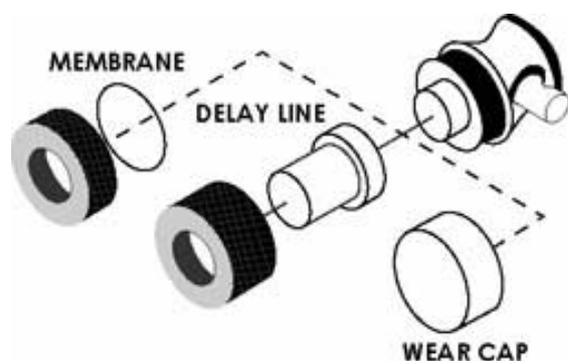


Figura 26 – Elementos separadores.

Cabezales para Superficies curvas

Los cabezales planos mostrados en las figuras anteriores son utilizados para superficies planas. Si la superficie a analizar es curva se utilizan interfases curvas para una mejor adaptación a dichas formas.

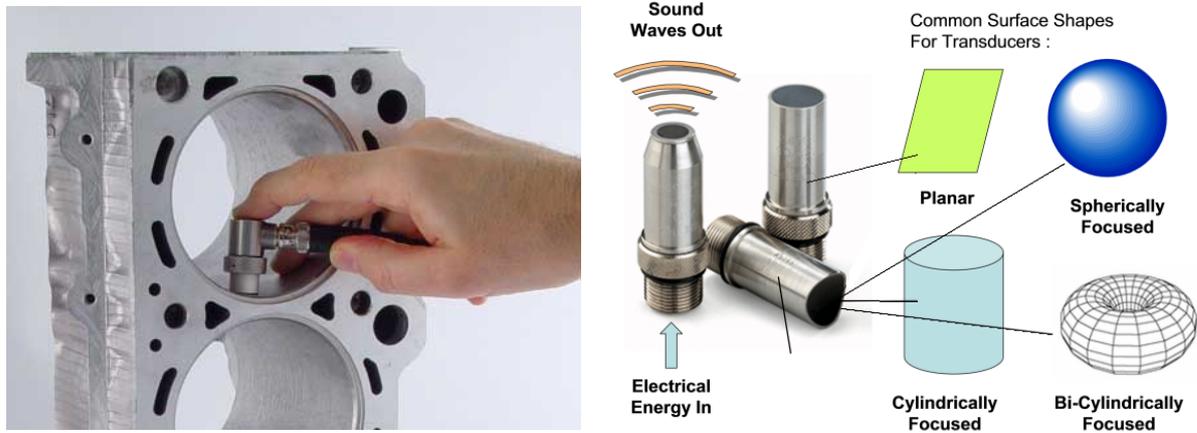


Figura 27 – Distintos tipos de cabezales de contacto.

Cabezales de doble cristal

Poseen dos cristales piezoeléctricos independientes en la misma carcasa. Uno de los elementos transmite la señal ultrasónica y otro la recibe. Ambos elementos pueden diferenciarse entre sí al buscarse las mejores características de emisión en el “Emisor” y las mejores características de recepción en el “Receptor”. Una barrera acústica entre ambos cristales evita la transmisión de uno al otro. Ambos cristales se encuentran dispuestos en ángulo generando haces cruzados en el material.

Estos cabezales son muy utilizados para medir espesores en piezas delgadas.

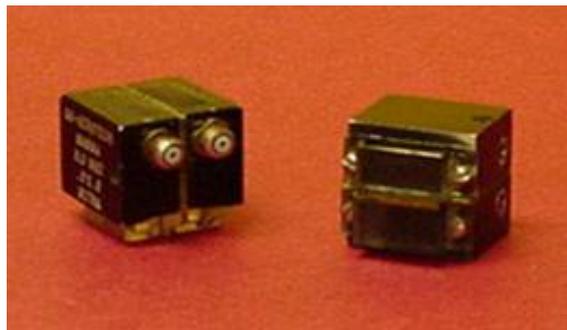
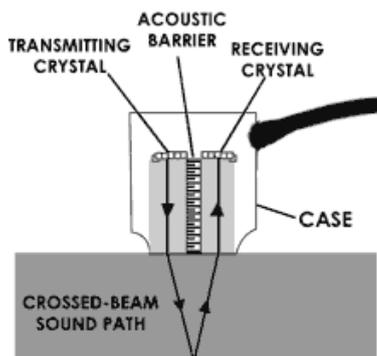


Figura 28 – Cabezales de doble cristal.

Cabezales angulares

Los cabezales angulares utilizan una interfase en forma de cuña la cual genera un ángulo entre el haz emitido y la normal a la superficie analizada. Esto introduce ondas refractadas de corte en el material al mismo tiempo que dichas ondas son reflejadas en las paredes de la pieza mejorando la

detección de imperfecciones en cordones de soldaduras. También son utilizados para generar ondas de superficie para detectar defectos superficiales.

Pueden ser adquiridos con diferentes ángulos fijos o en versiones ajustables. Hay que prestar especial atención que los que poseen ángulos fijos el ángulo de refracción de la onda cambiará según el material utilizado.

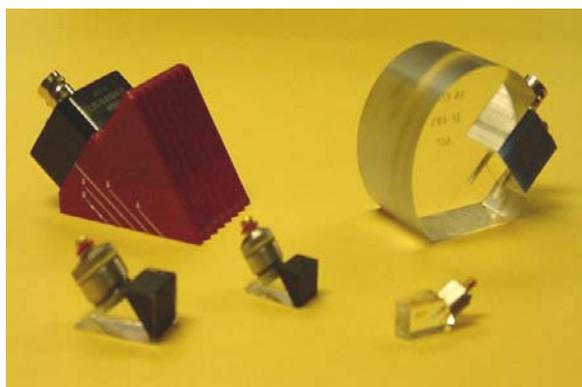
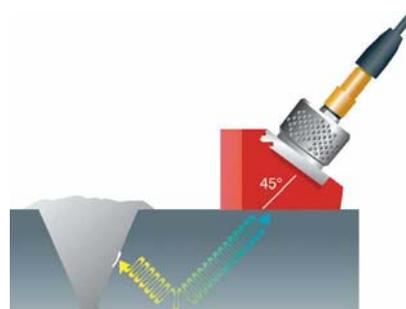
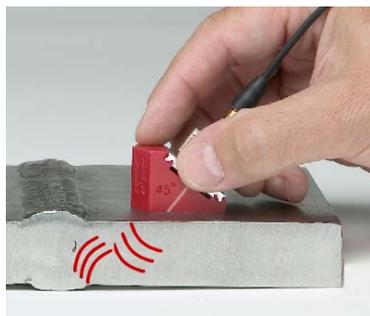
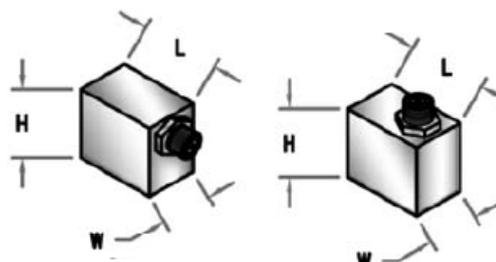


Figura 29 – Configuraciones de cabezales angulares.

Micro cabezales

Con carcasas cuyas dimensiones son del orden de milímetros son ideales para inspecciones de soldaduras en tubos de pequeños diámetros o donde la introducción de ondas transversales se debe realizar con un sondeo muy pequeño.



Transducer Housing Dimensions
Sub-Miniature: 0.375 in. L x 0.425 in. H x .0325 in. W
Ultra-Miniature: 0.375 in. L x 0.375 in. H x 0.250 in. W

Figura 30 – Configuraciones de micro cabezales.

Cabezales de rodillos

Estos cabezales son utilizados para inspeccionar junta de elementos tanto metálicos como no metálicos, por ejemplo: uniones de maderas, concreto, soldaduras metálicas o plásticas y vidrios entre otros. Permiten realizar un escaneo rápido sin la necesidad de utilizar la técnica de inmersión.

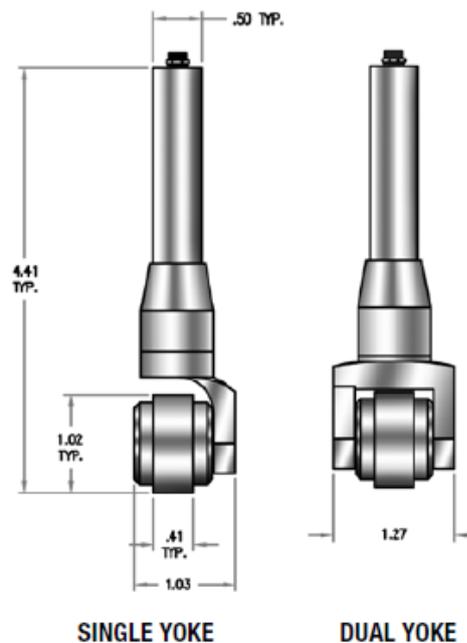


Figura 31 – Configuraciones de cabezales de rodillo.

Cabezales del tipo lápiz

Entre las aplicaciones típicas de estos cabezales se encuentra la inspección de alabes de turbinas, tubos de pequeños diámetros y aéreas cóncavas en pequeñas piezas. Poseen una pequeña área de inspección.



HC-876-RA-L Right Angle Type



HC-398-RDL Straight Pencil Type

Figura 32 – Configuraciones de cabezales del tipo lápiz.

Cabezales del tipo brocha

Este tipo de cabezales son utilizados para escanear áreas extensas reduciendo los tiempos de ensayo. Están constituidos por una matriz de pequeños cristales piezoeléctricos cuidadosamente colocados para minimizar la variación de performance y mantener una sensibilidad uniforme en toda el área.



Figura 33 – Configuraciones de cabezales del tipo brocha.

Cabezales de inmersión

Estos cabezales no entran en contacto con la pieza a analizar. Están diseñados para operar dentro de un medio líquido y poseen todas sus conexiones estancas para evitar el deterioro de los componentes. Se pueden adquirir con haz plano o foco cilíndrico o esférico dependiendo de la utilidad, la ventaja que poseen los cabezales con foco es que mejoran la sensibilidad y la resolución axial al concentrar la energía del sonido en una pequeña área.

Este tipo de cabezales son utilizados generalmente dentro de un tanque de agua el cual es parte de un sistema de escaneo. Las siguientes figuras presentan los tipos de cabezales descriptos y su utilización.

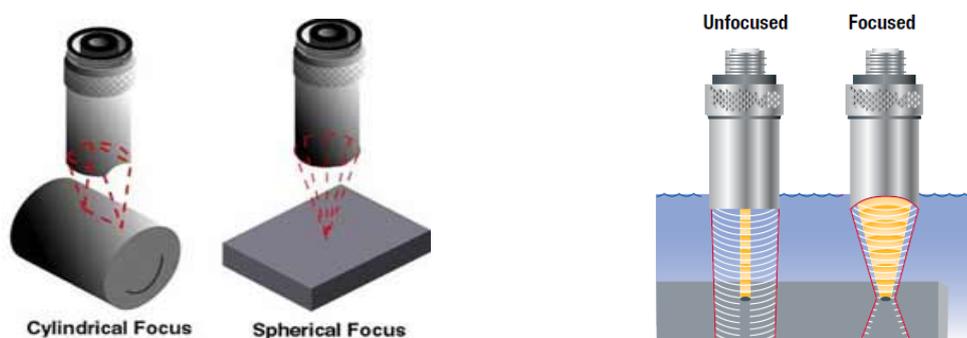


Figura 34 – Tipos de cabezales de inmersión.

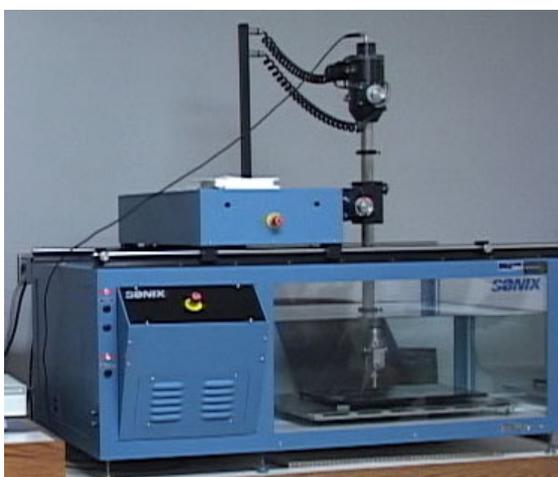
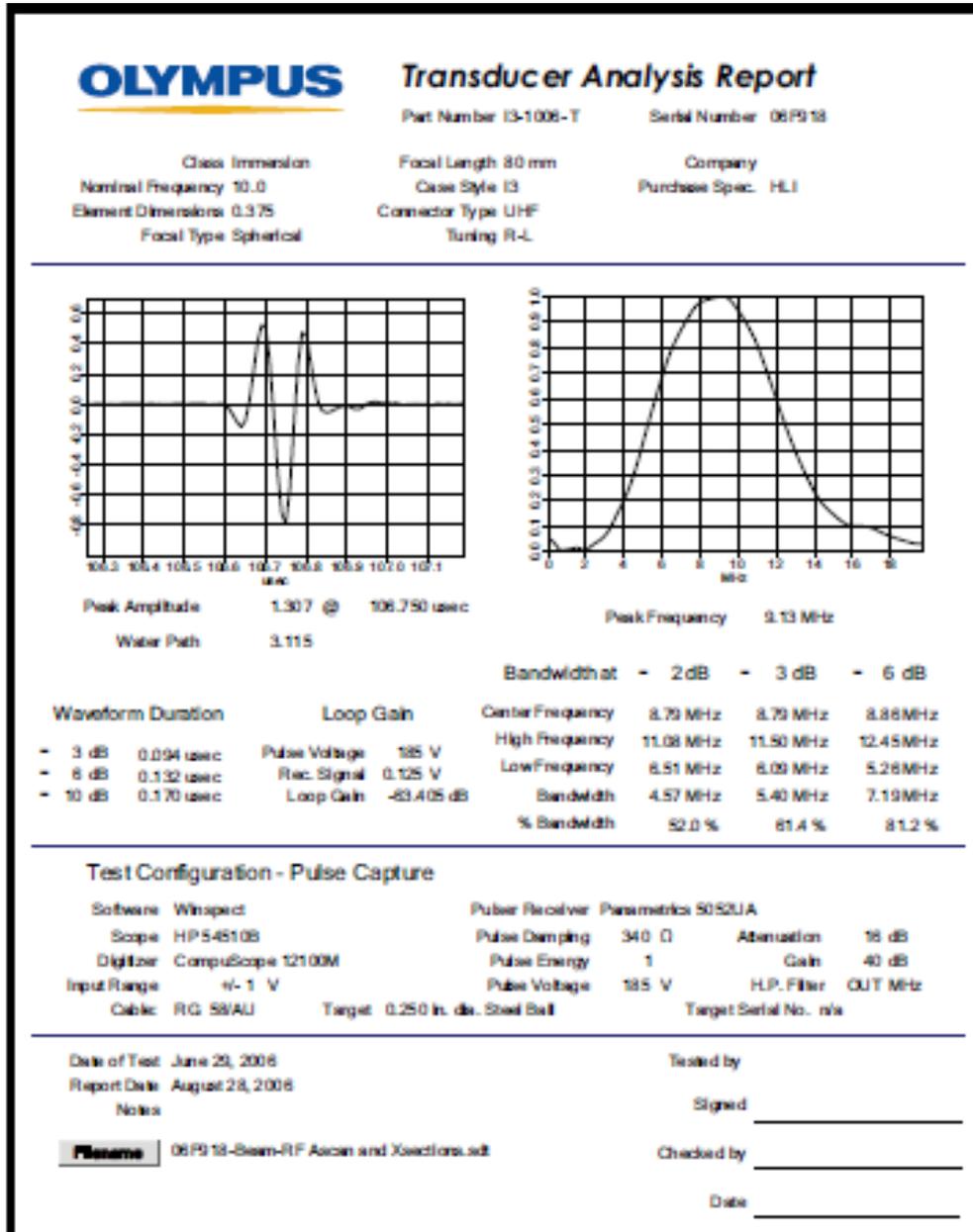


Figura 35 – Maquina de ensayo de inmersión.**Testeo de los cabezales**

Algunos de los fabricantes más grandes de transductores han liderado el desarrollo de técnicas de caracterización y han participado en la creación de las normas que permiten estandarizar estos productos, como por ejemplo la ASTM-E 1065 Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units. Otros fabricantes realizan sus caracterizaciones según las normas AWS, ESI y algunas otras tanto industriales como militares, como la MIL-C-45662A Calibration System Requirements.

Como parte del proceso de documentación el fabricante emite una hoja de datos que contienen características de la onda, espectro, alineamiento y perfil de haz emitido, entre otras, para cada cabezal. La siguiente imagen presenta un ejemplo de una hoja de datos típica.



REPRESENTACIÓN DE DATOS

Los datos obtenidos por el equipo de ultrasonido pueden ser visualizados en diferentes formatos. A continuación se presentarán los tres más conocidos en la aplicación en END, la Representación tipo A, la Representación Tipo B y la Representación Tipo C. Los equipos más modernos pueden presentar las tres inspecciones simultáneamente.

Representación Tipo A

Esta representación muestra la cantidad de energía recibida como función del tiempo. Las cantidades relativas de energía son presentadas en el eje vertical mientras que el tiempo transcurrido es presentado en el eje horizontal.

En este sistema el tamaño relativo de la discontinuidad puede ser estimado comparando la amplitud de la señal hallada con la obtenida mediante la implementación de un patrón.

En la siguiente figura se puede observar la representación mencionada. Se presentan las diferentes lecturas superpuestas que se obtendrían al escanear la pieza de izquierda a derecha.

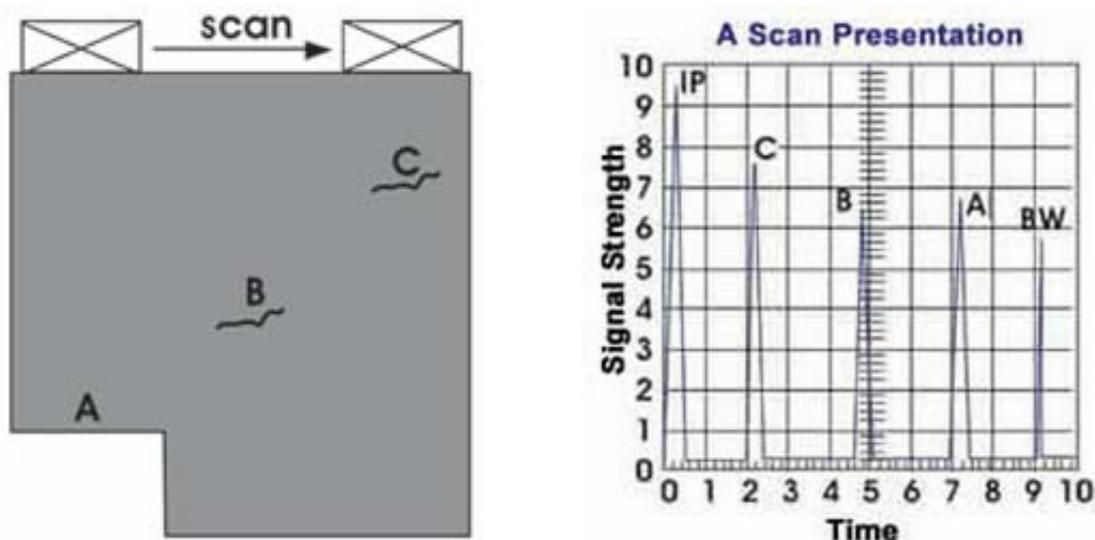


Figura 36 – Representación tipo A.

Cuando el cabezal se encuentra en el extremo izquierdo en el display se divisarán los pulsos IP (Correspondiente al rebote en la superficie del material) en el tiempo cero y el pulso A, correspondiente a revote en la superficie A. A medida que el cabezal se mueve hacia la derecha desaparecerá el pulso A y aparecerá el pulso BW (corresponde a la superficie inferior) más alejado en el visor debido a que la onda tuvo que recorrer mayor distancia hasta dicha superficie. Cuando el cabezal se encuentre en la misma vertical que la discontinuidad B aparecerá el pulso B en conjunto con el IP y el BW (y a una distancia proporcional a esta última), esto se debe a que parte del pulso

enviado se refleja en la discontinuidad y parte en la superficie inferior. Finalmente, cuando el cabezal pase por encima de la discontinuidad C, aparecerá el pulso correspondiente a dicha discontinuidad y desaparecerá el correspondiente a la discontinuidad B.

La siguiente imagen presenta una serie de posibilidades de visualización según las discontinuidades encontradas.

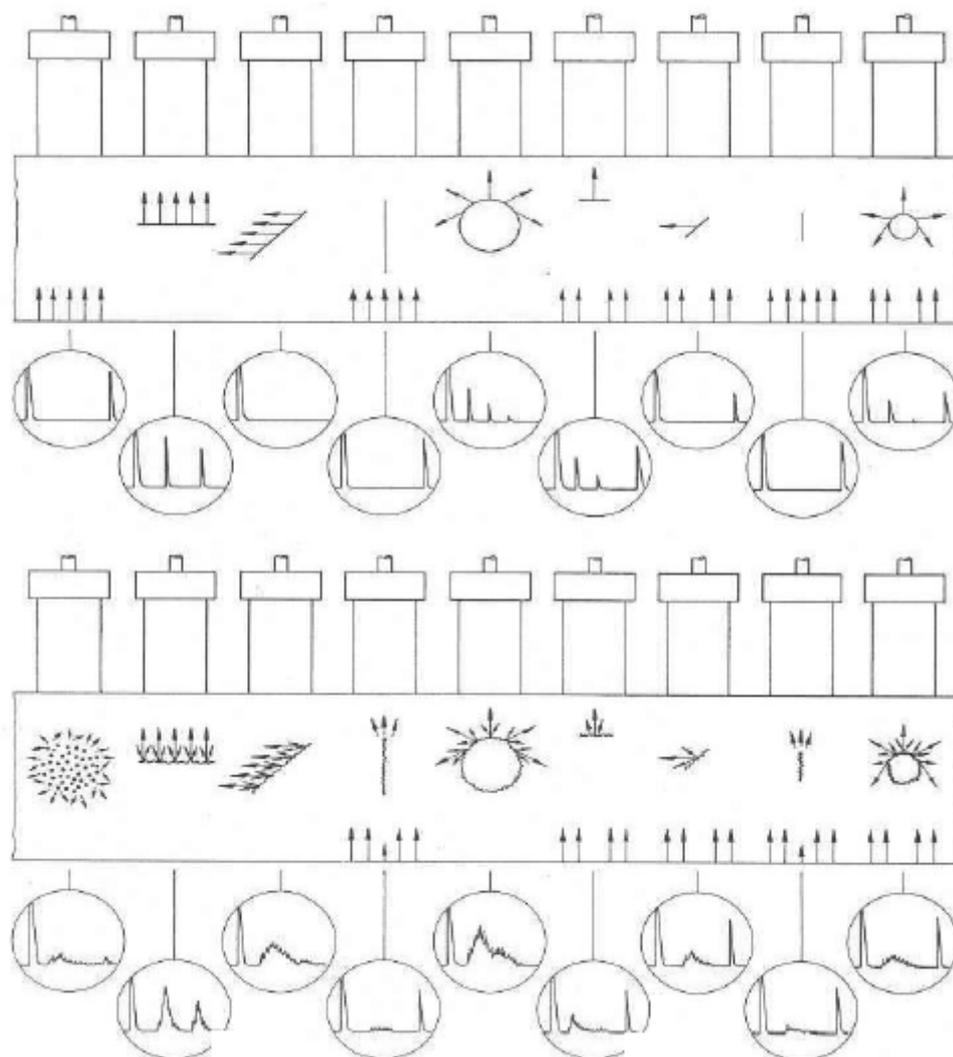


Figura 37 – Ejemplos de casos de visualización.

Representación Tipo B

La representación tipo B genera un perfil correspondiente a la sección transversal de la pieza que se está analizando. El tiempo de “viaje” de la onda (o su equivalente en profundidad) es visualizado en el eje vertical mientras que el la posición del cabezal es representada en el eje horizontal.

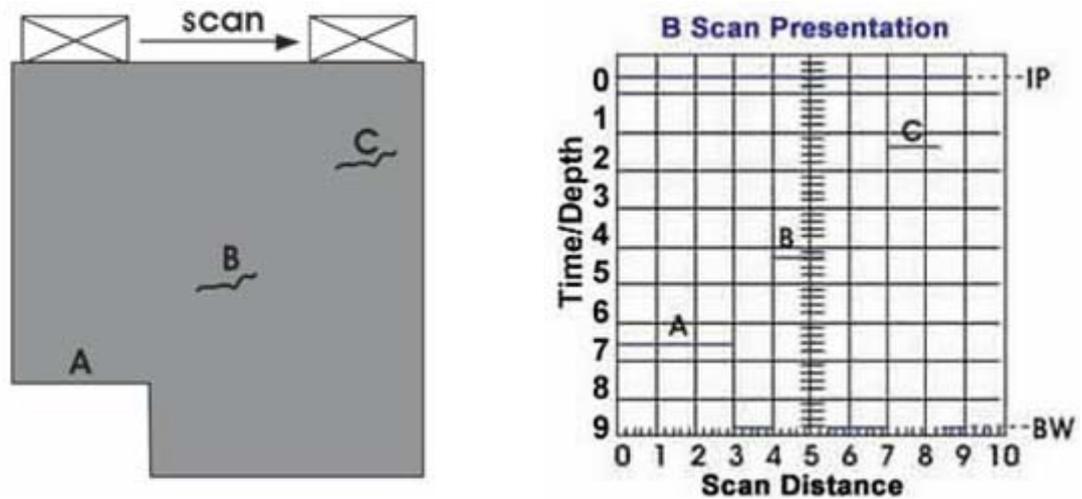


Figura 38 – Representación Tipo B.

La línea A se produce cuando el cabezal pasa por encima de la zona de reducción de espesor. Cuando el cabezal se mueve hacia la derecha van surgiendo sucesivamente las líneas BW, B, y C. La línea IP se encuentra en todo el recorrido debido al rebote de la onda en la superficie de la pieza.

Una limitación de esta visualización fallas cercanas a las superficies pueden ser enmascaradas por esta última.

Representación Tipo C

La representación tipo C presenta una vista del plano analizado de la pieza. Estas visualizaciones son producidas por sistemas de escáner automáticos como escaneos por inmersión controlados por computadora. La amplitud de la señal de la onda es censada a intervalos regulares al mismo tiempo que el cabezal es desplazado por toda la superficie a analizar. Dicha amplitud es presentada utilizando una escala de grises o de colores en cada posición proveyendo una imagen del las características reflejadas.

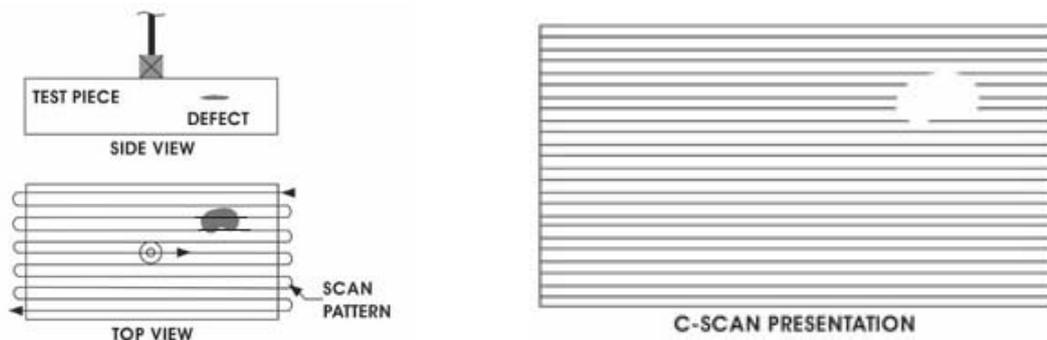


Figura 39 – Esquema de barrido en representación tipo C.

Los escaners de alta resolución producen imágenes muy detalladas.

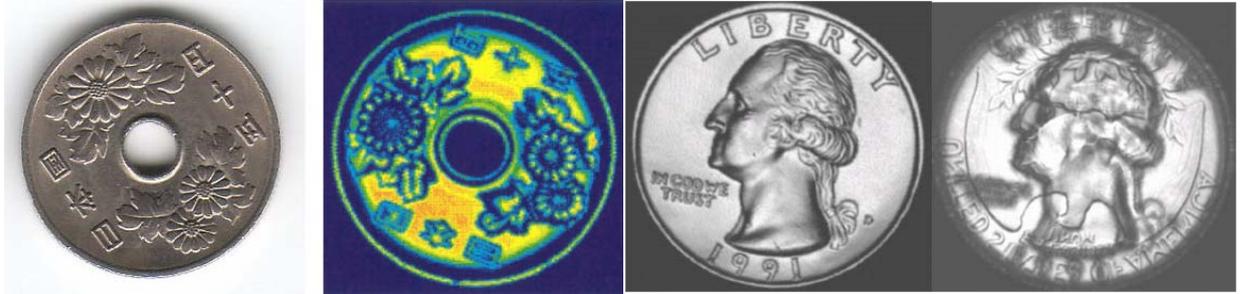


Figura 40 – Representación Tipo C en escala de colores y escala de grises.

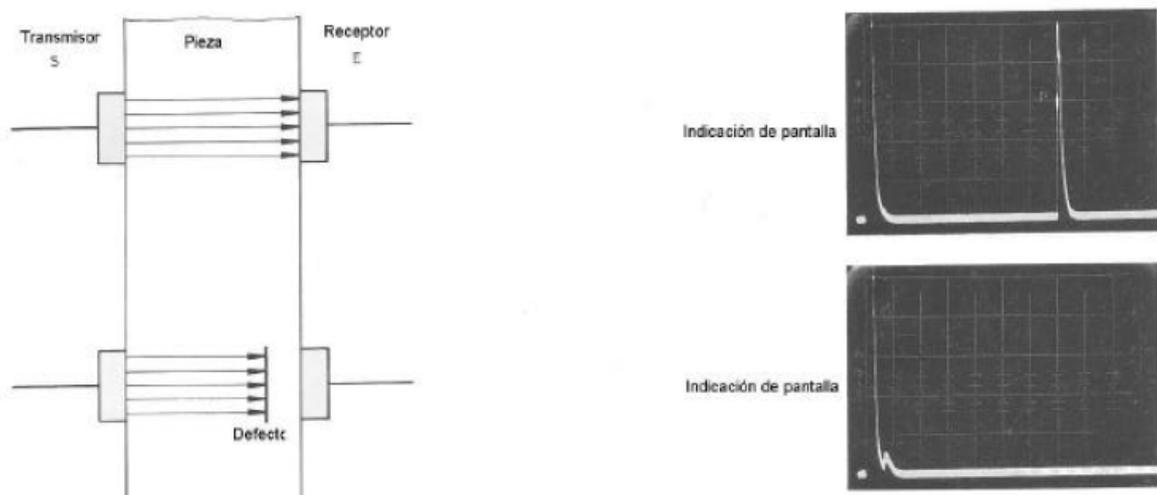
PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS DE ULTRASONIDO

Procedimiento de transmisión

Este procedimiento evalúa la parte del ultrasonido que se ha transmitido a través de la pieza a ensayar. A un lado de la pieza se aplica el emisor y al otro el receptor.

En presencia de un defecto la intensidad sonora en el receptor disminuye a causa de la reflexión parcial o se hace nula en caso de reflexión total. Lo mismo da que se emplee sonido continuo o impulsos de sonido para el ensayo ya que el emisor y el receptor se encuentran separados entre sí.

En este ensayo no se puede determinar la profundidad a la que se encuentra localizado el defecto de la pieza. Es necesaria una exacta alineación entre el emisor y el receptor



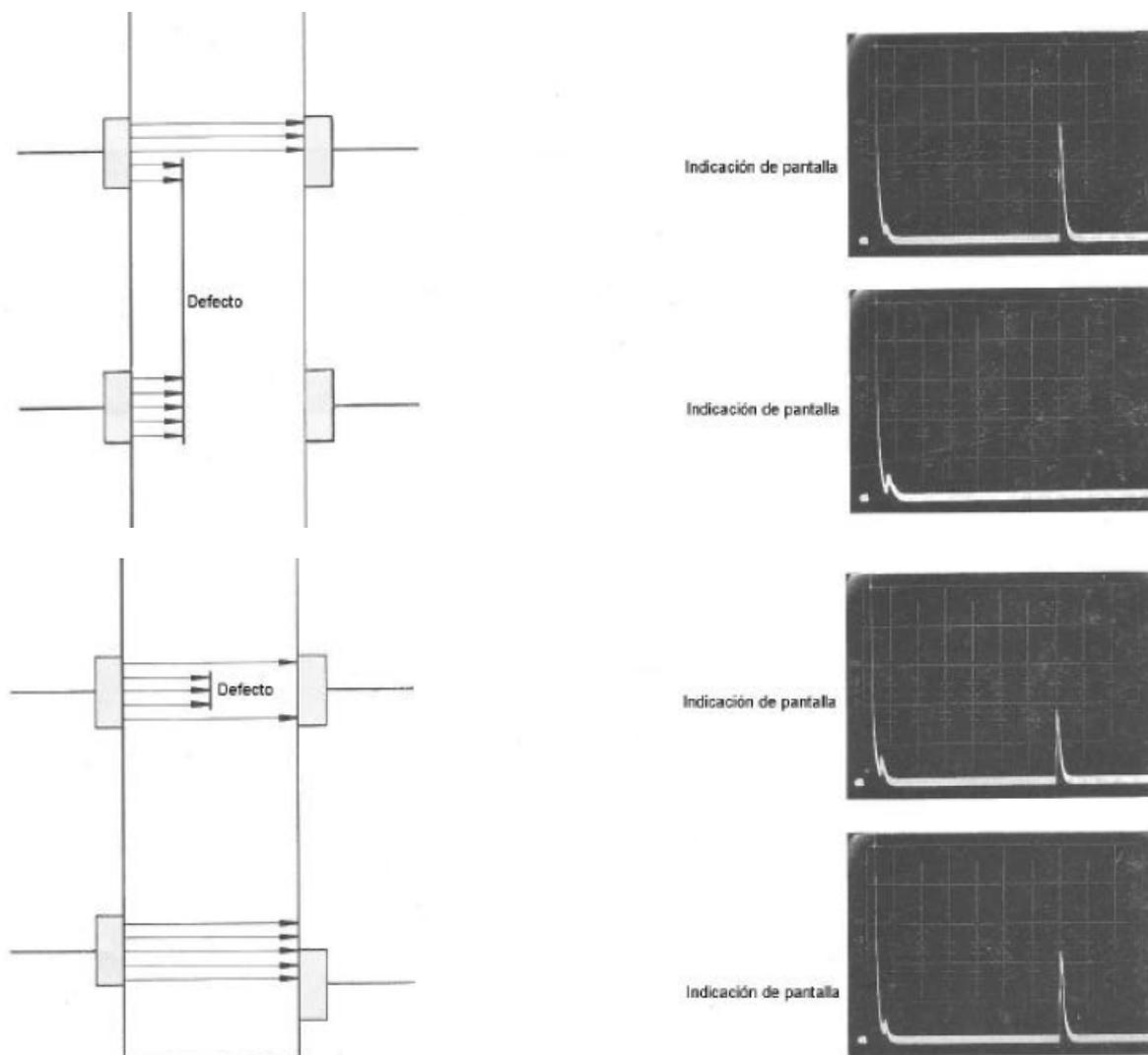


Figura 41 – Visualización en procedimiento de transmisión.

Procedimiento Pulso-Eco

Este procedimiento utiliza la porción reflejada del sonido para evaluar los defectos. El cabezal piezoeléctrico funciona tanto como emisor como receptor. Como la energía recibida es mucho más débil que a emitida, aquí no puede operarse sobre la base de sonido continuo, se emplean exclusivamente impulsos de sonido.

Un impulso eléctrico de cortísima duración genera una análoga onda ultrasónica, inmediatamente después, mientras aun se está propagando la onda el mismo oscilador está listo para la recepción. La onda penetra el material hasta que, como resultado de una superficie límite, tiene lugar una reflexión total o parcial.

Si la superficie reflectante se encuentra perpendicular a la dirección de propagación de la onda, esta se refleja en su dirección primitiva y, al cabo de un tiempo llega de vuelta al oscilador siendo reconvertida en un impulso eléctrico. Pero no toda la energía que regresa es reconvertida, sino que en la interfaz entre el cabezal y la superficie de la pieza tiene lugar una nueva reflexión, por lo que una parte menor del sonido vuelve a atravesar la pieza por segunda vez y así sucesivamente.

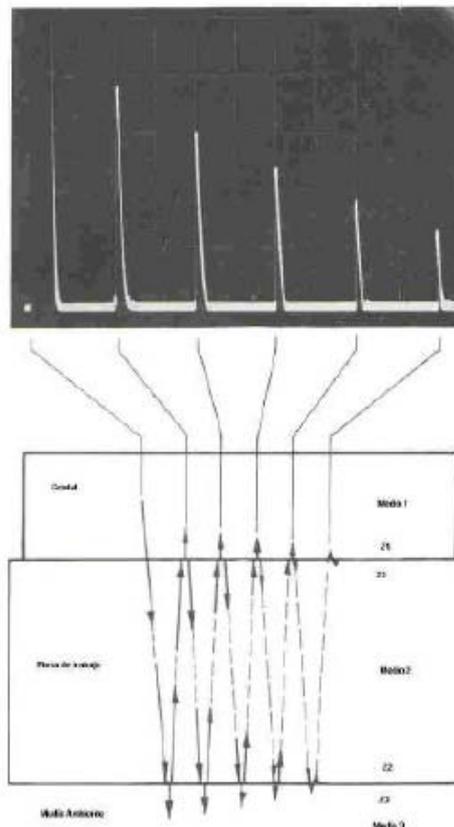


Figura 42 – Visualización en procedimiento pulso - eco.

Debe tenerse en cuenta que no solamente las superficies límites generan ecos múltiples sino que también los defectos lo hacen.

Puesto que se puede medir el tiempo de recorrido y se conoce la velocidad del sonido en el medio ensayado este método permite establecer la distancia que existe entre el cabezal y las superficies reflectantes, sean estas superficies de la pieza o discontinuidades internas. Por eso este método es muy utilizado, a la vez que solo existe una superficie de acoplamiento por lo que resulta mucho más sencillo mantener constante el acoplamiento.

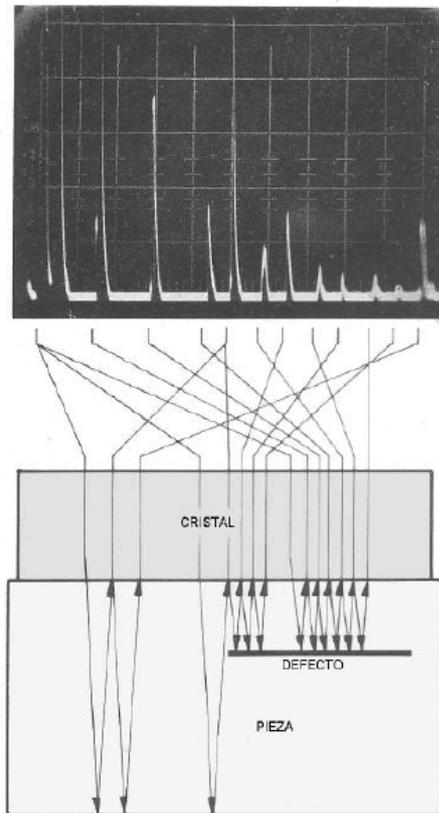
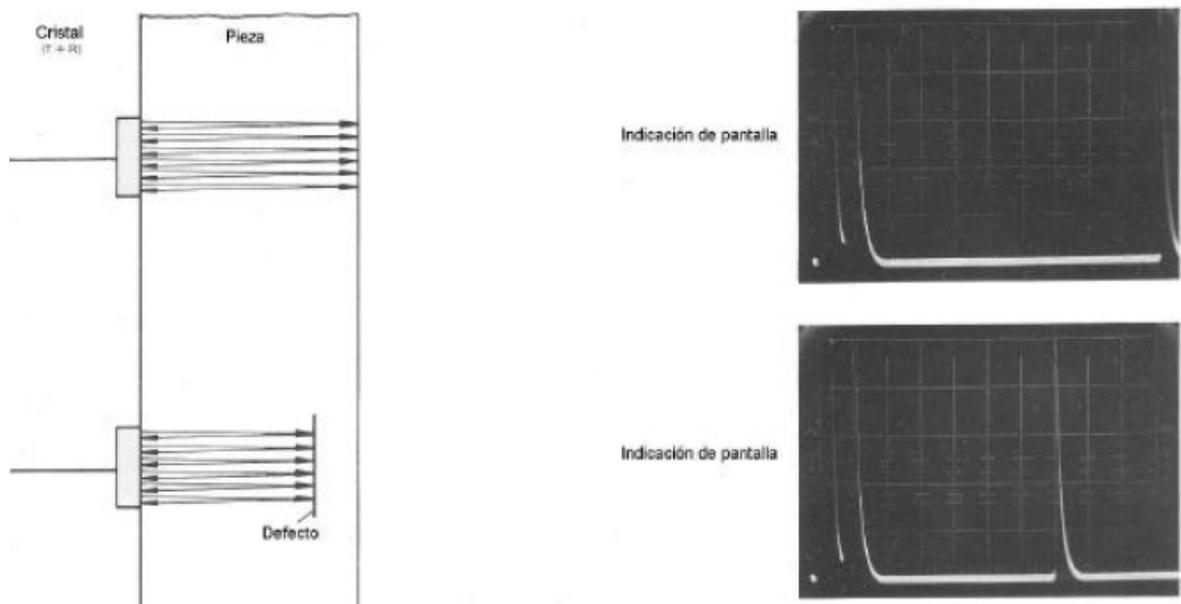


Figura 43 – Visualización en procedimiento pulso - eco con fisura.



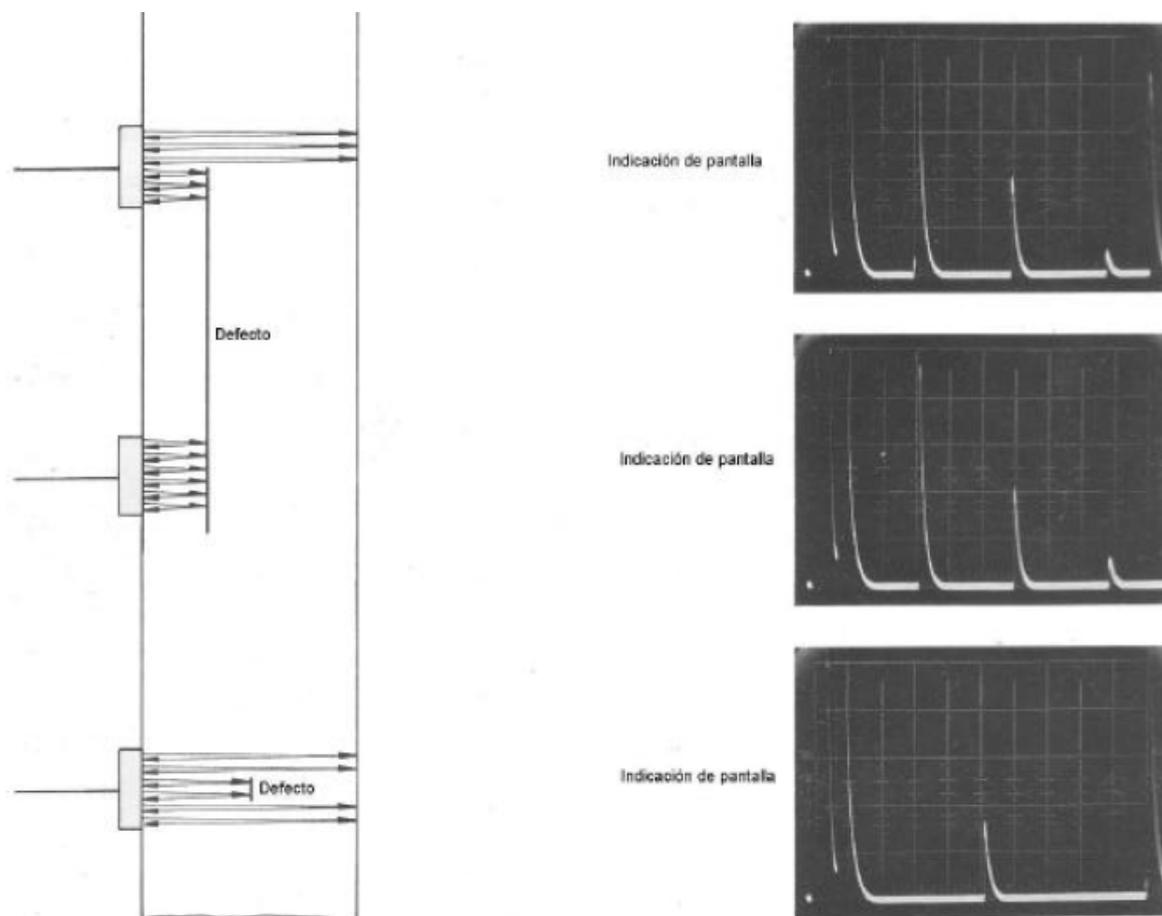


Figura 44 – Distintas posibilidades de visualización en procedimiento pulso - eco.

Método de Resonancia.

Este método se basa en la medida de la frecuencia de resonancia por reflexión (formación de ondas estacionarias) y se emplea principalmente para medición de espesores en piezas de superficies paralelas. Si en una muestra de superficies paralelas de determinado espesor “e”, se propaga un haz ultrasónico de excitación continua y de amplio espectro de frecuencias, las correspondientes oscilaciones cuya semilongitud de onda sea un submúltiplo del espesor de la muestra, se reforzarán al superponerse en fase, debilitándose las restantes, dando lugar a un fenómeno de resonancia, es decir, a la formación de ondas estacionarias. En consecuencia, las oscilaciones características se podrán definir por el número de semilongitudes de onda contenidas en el espesor de la pieza; por ejemplo, la oscilación característica fundamental o primera, como la correspondiente a una semilongitud de onda por espesor (parte a de la siguiente figura) y la oscilación característica de orden n, como la correspondiente a n semilongitudes de onda (por ejemplo, de orden 2 y 3, siguiente figura b y c respectivamente).

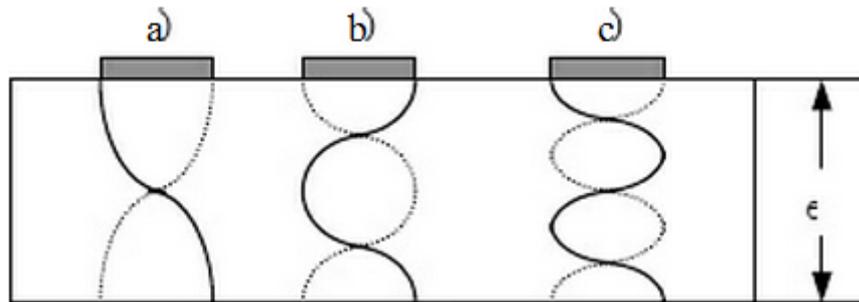


Figura 45 – Frecuencia fundamental y armónicos en ensayo por resonancia.

EL EQUIPO

El generador de pulsos induce al transmisor de pulsos el cual excita al cristal del cabezal, este corto pulso eléctrico normalmente tiene un voltaje pico de cientos de voltios. El mismo generador también activa la base de tiempos horizontal en el osciloscopio por medio de un circuito de tiempo de retardo. La deflexión vertical del osciloscopio (TCR, Tubo de rayo catódicos) se alimenta con un amplificador y un rectificador de pulsos recibidos desde la pieza. La longitud de la medición que se observa en la pantalla puede variar alterando la velocidad de la base de tiempo.

Las deflexiones verticales se producen cada vez que el cabezal está sujeto a una tensión eléctrica propia de la recepción.

Cuando se opera con cabezales de doble cristal el transmisor se encuentra separado del receptor, por lo tanto estos ambos cristales poseen cables y conexiones diferentes. En estos casos los equipos poseen circuitos de protección que aseguran que los altos voltajes del transmisor no dañen al receptor.

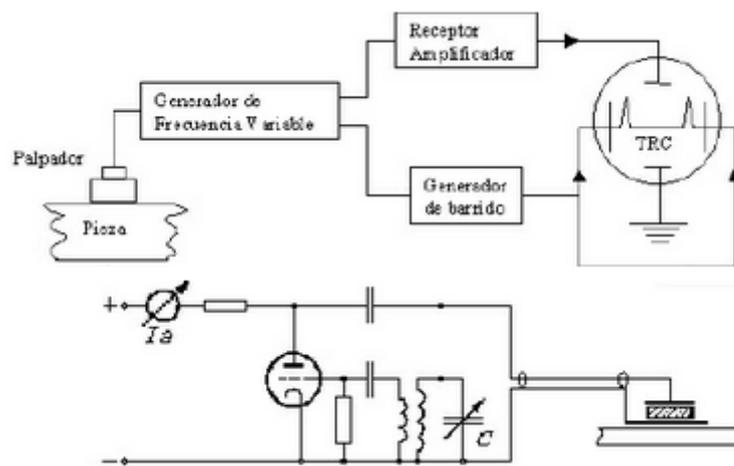


Figura 46 – Diagrama del equipo.

Hoy en día los equipos diseñados son cada vez más livianos y compactos, esto es favorable para la utilización en campo. A su vez la construcción modular permite intercambiar cabezales con distintos equipos y pantallas de visualización, así como la utilización de múltiples cabezales. Las siguientes figuras presentan distintas configuraciones de instrumentos de ultrasonido.



Figura 47 – Medición de espesores.



Figura 48 – Detección de delaminación en materiales compuestos.



Figura 49 – Equipos portátiles de medición de espesores



Figura 50 – Equipos con osciloscopios incorporados

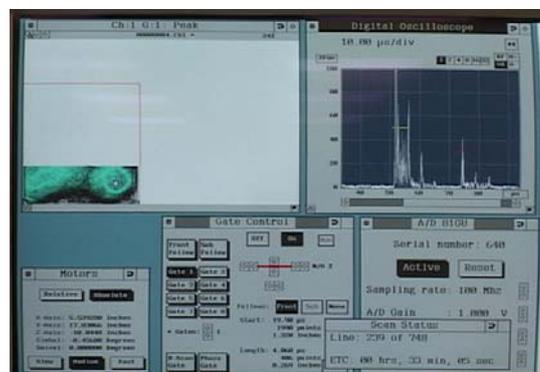
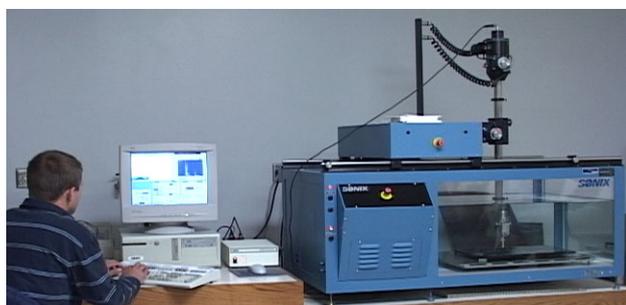
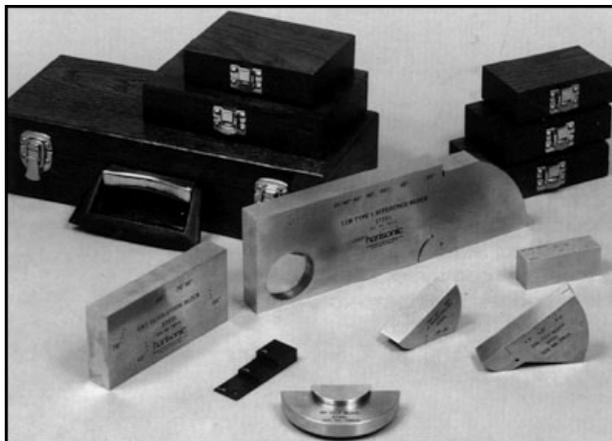


Figura 51 – Equipo automático controlado por computadora (técnica de inmersión).

PATRONES DE CALIBRACIÓN



La acción de calibración se refiere a un acto de evaluación y ajuste de la precisión de medida del equipo. En lo que respecta a ensayos ultrasónicos se utilizan variados métodos de calibración ya que es un ensayo que se basa en la comparación.

Primeramente la electrónica del equipo se debe calibrar para asegurar su funcionamiento y diseño. Esta operación generalmente es realizada por el fabricante ya sea en el proceso de fabricación como en el servicio post-venta.

Luego hay una calibración que se debe realizar por el usuario previo al ensayo. Esta calibración incluye el setup del equipo, el cabezal, y el testeo del setup para validar los niveles deseados de precisión.

En los ensayos de ultrasonido también existe la necesidad de estándares de referencia. Estos son utilizados para establecer un nivel general de consistencia en la medición y ayudar a interpretar y cuantificar la información adquirida. Son necesarios, también, para validar que el instrumento y el setup realizado provee resultados similares sin importar el tiempo y que, a su vez que se puede reproducir lo mismo con un sistema diferente.

También estos patrones nos ayudan a estimar el tamaño de las imperfecciones. En un ensayo pulso-eco la intensidad de la señal depende tanto del tamaño de la fisura como de la distancia entre el cabezal y esta. El usuario puede utilizar un patrón de referencia con una imperfección artificial inducida a aproximadamente la misma distancia del cabezal en el material para determinar el tamaño aproximado de dicha fisura, comparando ambas señales.

Como todas las imperfecciones realizadas en los patrones provienen de mecanizados, como pequeños agujeros o entallas (siendo entallas artificiales), las ondas de ultrasonido reflejadas se comportarán de manera distinta que las verdaderas entallas, este es otro de los motivos por los cuales solo se puede estimar el tamaño de las fallas reales.

Cabe destacar que el material del patrón a utilizar debe ser el mismo que el material a inspeccionar. A continuación se presentan algunos patrones de calibración como los mencionados.

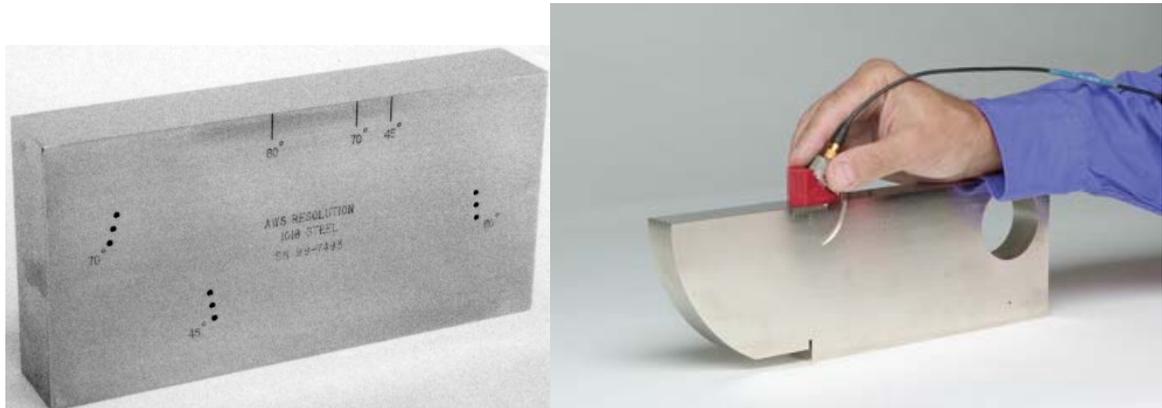


Figura 52 – Patrón de discontinuidades.

También existe patrones para calibrar la medición de espesores, estos se presentan a continuación.



Figura 53 – Patrón de medición de espesores.



Figura 54 – Calibración del instrumento.

REFERENCIAS

- http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm
- Ultrasonic Non Destructive Testing - Advanced Concepts and Applications (National Instruments). (Turoria).
- Automatic Inspection of Welded Pipes with Ultrasound. (Turorial).
- Ultrasonic Reference Blocks. (Catálogo de productos)
- Harisonic Ultrasonic Transducer Catalog.