

4. INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Las pruebas e inspecciones que normalmente se practican a los materiales se pueden dividir de diferentes formas. Una de las clasificaciones más usadas es la siguiente:

- Ensayos Destructivos (ED)
- Ensayos No Destructivos (END)

El objetivo principal de los ED es determinar cuantitativamente el valor de ciertas propiedades de los materiales, como la resistencia mecánica, la tenacidad o la dureza. La ejecución de los ED involucra el daño del material, la destrucción de la probeta o pieza empleada en la determinación correspondiente, por lo que podemos concluir que los ED son la aplicación de métodos físicos directos que alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material, parte o componente sujeto a inspección.

Este tipo de pruebas siempre ha sido necesario para comprobar si las características de un material cumplen con lo especificado durante el diseño. Debe observarse que estas pruebas no se pueden aplicar a todas las partes o componentes, ya que serían destruidos y perderían su utilidad.

Sin embargo, la optimización de los productos o los requisitos de seguridad, como en el caso de la industria aeroespacial, impusieron también nuevas condiciones de inspección, en las cuales se estableció la necesidad de verificar hasta en un 100% los componentes críticos. Este hecho planteó una severa dificultad a los departamentos de

calidad, hasta que iniciaron el empleo de otras técnicas de inspección, diferentes a la visual, con las cuales se medía la integridad de los componentes sin destruirlos. Esto fue posible al medir alguna otra propiedad física del material que estuviera relacionada con las características críticas del componente sujeto a inspección. Es decir, se inició la aplicación de los END.

Los END son la aplicación de métodos físicos indirectos (la transmisión del sonido, por ejemplo) que tienen la finalidad de verificar las piezas examinadas. No obstante, cuando se aplica este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de las piezas, sino verificar su homogeneidad y continuidad. Por lo tanto, estas pruebas no sustituyen a los ensayos destructivos, sino que más bien los complementan.

Los END, como su nombre indica, no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material. Por ello no inutilizan las piezas que son sometidas a los ensayos y tampoco afectan de forma permanente las propiedades de los materiales que las componen, no perjudicando así su posterior uso.

Los principales tipos de END son los siguientes:

- Ensayo visual
- Ensayo con líquidos penetrantes
- Ensayo con partículas magnéticas
- **Ensayo por ultrasonidos**
- Ensayo por radiología industrial

A partir de este punto nos centraremos en un determinado tipo de END, la *Inspección por Ultrasonidos*, método de aplicación en el presente proyecto.

El método de *inspección por ultrasonidos* se basa en introducir en los materiales ondas ultrasónicas, las cuales se propagan a través de éstos y se reflejan, difractan y atenúan, haciendo posible la detección de heterogeneidades.

Si se compara el ensayo por ultrasonidos con otros END, sus principales ventajas son:

- a) *Alto poder de penetración*: Se considera un ensayo que aporta información de todo el volumen de la muestra, con capacidad de ensayar grandes espesores.
- b) *Alta sensibilidad*: Permite detectar defectos muy pequeños.
- c) La *posición de los defectos* internos se determina con precisión. La estimación del tamaño, orientación y forma de la heterogeneidad resulta igualmente posible.
- d) El *resultado* de la inspección es instantáneo (tiempo real) ya que todo el proceso de generación y recepción de la señal se controla electrónicamente.
- e) *Sin riesgos* para el operador o para las personas que puedan estar cerca de la zona de ensayo.

Entre las desventajas del ensayo por ultrasonidos cabe destacar:

- a) Los ensayos manuales requieren *personal altamente cualificado* debido a la gran cantidad de decisiones críticas que tiene que tomar el operador.
- b) Las *muestras irregulares o rugosas* son difíciles de inspeccionar.
- c) La calibración del sistema de ensayo y la determinación de ciertas características de los defectos requiere el uso de *muestras patrón o de referencia*.
- d) Es necesario el uso de un *medio de acoplamiento* entre el palpador y la muestra a inspeccionar.

4.2

DEFECTOLOGÍA

Los diferentes objetivos que se pretenden conseguir cuando se realiza un ensayo por ultrasonidos en una estructura o componente se pueden clasificar en tres grupos:

- *Defectología*: incluye los ensayos orientados a la detección, identificación y evaluación de discontinuidades, heterogeneidades, impurezas, etc., producidas en la fabricación o en servicio.
- *Metrología*: abarca las técnicas relacionadas con la medida de espesores en tuberías, recipientes, etc., muy extendidas en aplicaciones de control de la corrosión.
- *Caracterización*: estos ensayos permiten extraer conclusiones acerca de la naturaleza o estado del material por medio de la medida de parámetros como la velocidad acústica o la atenuación.

En el caso del presente proyecto, el objetivo de aplicar la inspección por ultrasonidos a las piezas de fibra de carbono tras su fabricación es esencialmente detectar, identificar y evaluar posibles defectos resultantes del proceso de producción. Se considera defecto a toda aquella discontinuidad o imperfección que pueda afectar al comportamiento satisfactorio de la pieza durante su puesta en servicio.

Los defectos característicos que se pueden localizar en componentes de fibra de carbono vienen determinados por su estructura laminar y por el proceso de fabricación. A continuación se describen los más comunes.

- *Delaminación*: Es el defecto más típico. Se puede considerar como una falta de unión entre dos capas sucesivas. Puede ser debida a impactos durante el manejo del apilado.

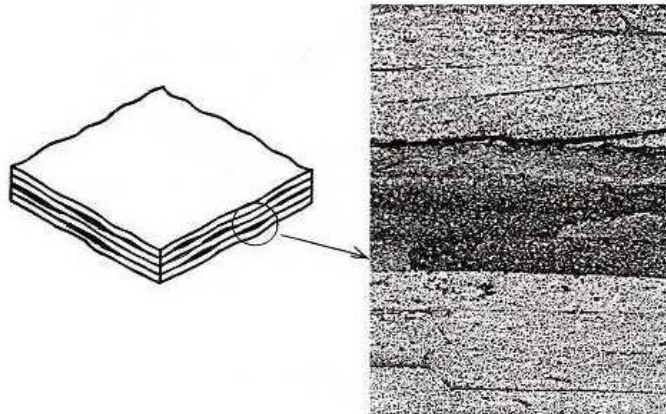


Fig. 4.1. Delaminación

- *Porosidad en capa*: Es una acumulación de pequeñas discontinuidades, muy próximas entre sí, cuyo origen suele estar asociado al movimiento relativo de las dos capas consecutivas cuando, ya iniciado el proceso de curado, no queda suficiente resina para rellenar los espacios entre ellas.
- *Porosidad generalizada*: Afecta a toda la pieza y es consecuencia de una presión escasa durante el proceso de curado.

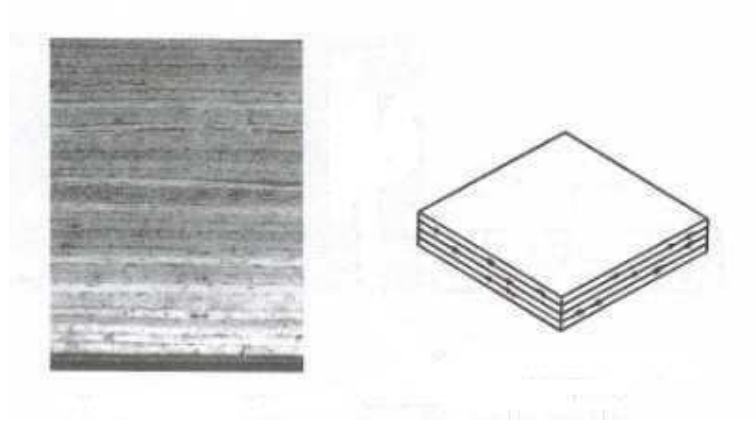


Fig. 4.2. Porosidad

- *Objeto extraño:* Con esta denominación se agrupa una serie de defectos caracterizados por la presencia interlaminar de una inclusión que, en general, procede de alguna de las láminas plásticas con que vienen protegidos los tejidos.

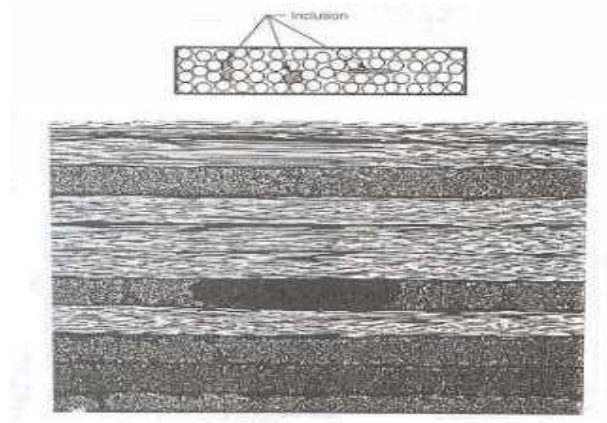


Fig. 4.3. Inclusión

4.3 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS

Para llegar a comprender el mecanismo de funcionamiento de la inspección por ultrasonidos, a continuación se hace una breve descripción de sus fundamentos físicos.

4.3.1 Naturaleza y propiedades de las ondas ultrasónicas

4.3.1.1 Generalidades

El sonido se transmite por medio de ondas a través de un medio elástico. En un espacio vacío el sonido no es posible, ya que no existen partículas de materia que puedan vibrar. En el aire, por ejemplo, una onda sonora desplaza un volumen discreto de aire hacia delante y hacia detrás alrededor de su posición neutra. Estos movimientos mecánicos en la materia, repetidos de forma periódica y durante un cierto tiempo, se caracterizan según el número de oscilaciones de una partícula dada de dicho material por segundo, es decir, su frecuencia (en ciclos/ segundo o Herzios).

Pero no todas las ondas pueden ser apreciadas por el oído humano. Cuando la frecuencia es superior a 20 KHz las ondas se denominan ultrasónicas y no son audibles por las personas.

Así pues, los ultrasonidos son ondas de la misma naturaleza que las ondas sónicas, transmitiéndose por tanto a la misma velocidad en el mismo medio, pero que tienen una frecuencia mayor, por lo que resultan no audibles. La banda de frecuencias utilizada en control de calidad de materiales se extiende entre 0,2 y 25 MHz, aunque la mayoría de los ensayos se hacen entre 2 y 5 MHz.

Si un cuerpo elástico, cuyas partículas individuales se mantienen en su posición mediante fuerzas elásticas, se somete a esfuerzos de compresión o de tracción por debajo de su límite elástico, se comportará como un péndulo. Si se excitan colectivamente todas las partículas de un extremo de dicho cuerpo con una fuerza sinusoidal, de manera que todas las partículas del primer plano oscilen con la misma amplitud (longitud de oscilación) y frecuencia (número de oscilaciones por segundo), las fuerzas elásticas transmitirán las oscilaciones a las partículas del segundo plano. Éstas, a su vez, transmitirán el movimiento oscilatorio al tercer plano y así sucesivamente, de modo que se genera un movimiento de onda.

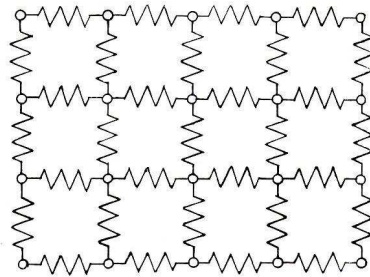


Fig. 4.4. Modelo de un cuerpo elástico

Cada partícula oscila sólo alrededor de su posición neutra en una cierta cantidad. Es decir, meramente la condición de oscilación se propaga a lo largo de la dirección de propagación de la onda. Sólo la energía, y no el cuerpo que vibra, se transporta.

Si todos los puntos estuvieran conectados rígidamente, iniciarían su movimiento al mismo tiempo y permanecerían siempre en un estado de movimiento coincidente. En el caso del material elástico, el movimiento requiere un cierto tiempo para ser transmitido y los planos sucesivos alcanzan sus posiciones con un retardo de fase en relación con los anteriores. El cambio de fase va creando zonas donde las partículas se aproximan entre sí, de forma particularmente densa, alternándose con zonas menos densas.

4.3.1.2 Parámetros físicos de las ondas

Definiremos algunos parámetros de las ondas:

- *Frecuencia (f)*: número de oscilaciones de una partícula dada por segundo. Dentro de una misma onda, es la misma para todas las partículas. Se mide en c/s o Hz.
- *Longitud de onda (λ)*: es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento. Se mide en m.
- *Velocidad acústica (c)*: es la velocidad de propagación de la onda para una condición dada. Esta velocidad es una característica del material y, en general, es constante para un material dado, para cualquier frecuencia y cualquier longitud de onda. Se mide en m/s.

Las tres magnitudes antes mencionadas se relacionan entre sí mediante la expresión:

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

Dado que la velocidad acústica es una constante característica del medio de transmisión, la frecuencia y la longitud de onda se comportan de manera inversa.

- *Amplitud de oscilación (A)*: es el desplazamiento máximo de una partícula de su posición cero. Se mide en m.
- *Presión acústica (P)*: indica la densidad de partículas. En los puntos de gran densidad de partículas la presión es mayor que la presión normal (sin onda acústica), mientras que en las zonas dilatadas es menor. La desviación máxima en relación con la presión normal se denomina amplitud de la presión acústica (P). Se mide en N/m².
- *Impedancia acústica (Z)*: resistencia que el material opone a la vibración. Si un medio posee una impedancia baja, sus elementos de masa vibrarán a gran velocidad. La impedancia se mide en Kg/ m²s y viene dada por:

$$Z = \rho \cdot c$$

Donde ρ es la densidad del material medida en Kg/m³ y c la velocidad acústica definida anteriormente. Esto indica que Z es una constante del material. La impedancia en los cuerpos sólidos es en general mayor que en los líquidos y, en éstos, mayor que en los gases. En el anexo I de esta memoria se incluyen varias tablas con las impedancias de diversos materiales sólidos, de líquidos y del aire.

- *Intensidad acústica (I)*: es la cantidad de energía transmitida por unidad de superficie y de tiempo. Se mide en W/ m². Su relación con la presión acústica viene dada por:

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

4.3.1.3 Tipos de ondas

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

- *Ondas longitudinales o de compresión*

En este tipo de ondas, las partículas oscilan en dirección paralela a la de propagación de la onda. Todas las moléculas que están situadas a la misma distancia del extremo al que se le ha aplicado la vibración se moverán al unísono, alejándose y acercándose al mismo. Sin embargo, la compresión y la expansión de cada fila se irá alejando de dicho extremo. De este modo, se generan zonas con una distancia entre partículas más pequeña y zonas con una distancia mayor.

La distancia entre dos estados similares de compresión o de expansión es la longitud de onda (λ).

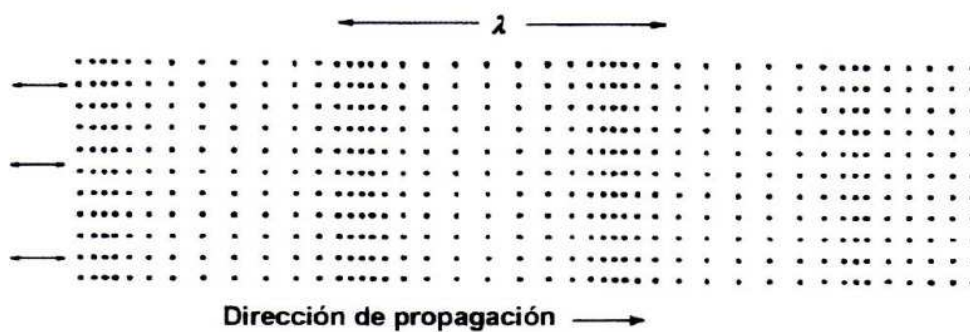


Fig. 4.5. Onda longitudinal

La velocidad con que se mueven las compresiones y dilataciones en la dirección de la propagación de la onda longitudinal es la velocidad del sonido (C_L) que, como ya se definió en el apartado 4.3.1.2, es una constante característica del material.

□ *Ondas transversales o de corte*

En este caso las moléculas vibran transversalmente a la dirección de propagación de la onda. Aunque la onda se transmite longitudinalmente alejándose del extremo sometido a vibración, las moléculas vibran transversalmente. La longitud de onda también queda determinada por la distancia entre dos planos en los que las partículas están en similar estado.

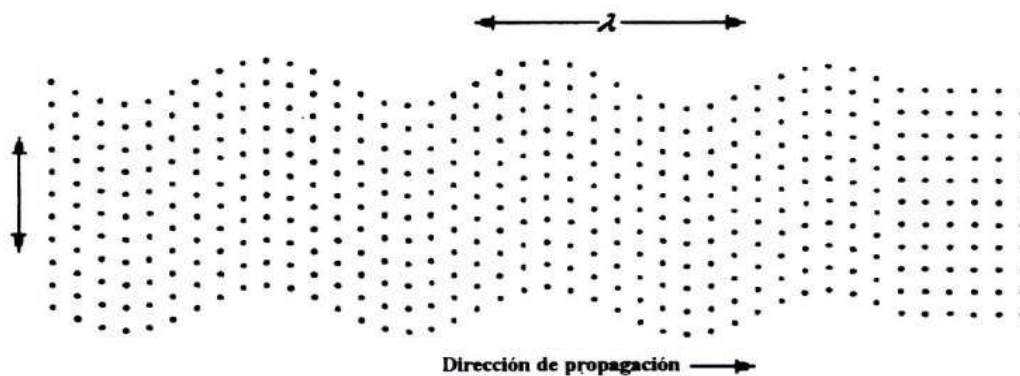


Fig. 4.6. Onda transversal

Este tipo de onda sólo puede propagarse en la materia sólida. Esto es debido a que en la materia sólida la densidad es muy alta comparada con los líquidos y los gases, es decir, la distancia entre los átomos o moléculas es muy pequeña. Además, están dispuestos en una estructura reticular cristalina y las fuerzas elásticas entre ellos son especialmente fuertes.

Si comparamos los dos tipos de ondas explicados anteriormente, la transmisión de energía de las ondas transversales es inferior a la de las ondas longitudinales debido a la oscilación transversal de los átomos. Igualmente, la velocidad de propagación de las ondas transversales (C_T) es inferior a la de las ondas longitudinales (C_L).

□ *Ondas de superficie*

Las ondas de superficie o de *Rayleigh* son ondas transversales que se producen solamente en la superficie del cuerpo elástico. Son paralelas a dicha superficie. Tienen una cierta profundidad de penetración, que está en el orden de una longitud de onda. La velocidad de las ondas superficiales, C_S , es menor que la velocidad de las ondas transversales en el mismo medio ($C_S \approx 0,9 \cdot C_T$).

En planchas finas una onda de superficie no se puede propagar si el espesor de la plancha es menor que la longitud de onda. En el caso de chapas muy finas las ondas superficiales se transforman en un tipo especial de ondas llamadas *ondas de chapa* u *ondas de Lamb*.

4.3.2. Generación, propagación y recepción de ondas ultrasónicas

Como ya se comentó al comienzo del capítulo 4, el método de inspección por ultrasonidos se basa en la introducción en los materiales de ondas elásticas de alta frecuencia, las cuales se propagan a través de éstos y sufren distintos fenómenos tales como reflexión, refracción o atenuación. A continuación se verán los mecanismos para generar y captar estas ondas, así como el modo en el que se propagan a través del material.

4.3.2.1 Efecto Piezoeléctrico

Las ondas ultrasónicas se generan debido al *efecto piezoeléctrico*. Este fenómeno consiste en que existen materiales que al deformarse mediante la aplicación de una fuerza exterior producen cargas eléctricas en su superficie. Inversamente, ese material cambia de forma si se le aplica un potencial eléctrico entre sus caras.

Se denomina *palpador* a la pequeña pieza que sirve para la aplicación de los ultrasonidos al material a investigar. Para ello se usa el fenómeno de la piezoelectricidad. Estos palpadores contienen cristales piezoeléctricos que se encuentran íntimamente ligados a electrodos, mediante los cuales reciben descargas de corriente alterna que les deforman, produciendo vibraciones ultrasónicas. Es el llamado *efecto piezoeléctrico inverso*. Es decir, cuando se aplica a los electrodos un potencial eléctrico, el cristal vibra, generando pulsaciones ultrasónicas. Estas ondas son transmitidas a la pieza a investigar a través de un *medio acoplante*. El palpador y el medio acoplante son descritos más ampliamente en el apartado 4.6.

De igual forma, cuando los electrodos están desactivados y el cristal en reposo, puede recibir las ondas transmitidas a través del material. El impulso acústico que llega

al cristal produce deformaciones que inducen una tensión eléctrica en las caras del material piezoeléctrico. Esta tensión tiene carácter alterno, igual que la deformación mecánica, y su amplitud es proporcional a la energía de la onda incidente. Es el *efecto piezoeléctrico directo*.

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

Los materiales piezoeléctricos que más se utilizan para la construcción de palpadores son: Cuarzo, Sulfato de Litio, Titanato de Bario y Metaniobato de Plomo.

4.3.2.2 Propagación

En principio, las ondas ultrasónicas pueden propagarse a través de cualquier medio material, es decir, donde haya átomos o moléculas capaces de vibrar. Por el contrario, no podrán propagarse en el vacío.

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

La *atenuación* es la pérdida de energía del haz acústico a su paso por el material. Es debida a dos fenómenos: *Dispersión* y *Absorción*.

- *Dispersión*

Es consecuencia de la interacción de las ondas con las irregularidades propias del material, que nunca es estrictamente homogéneo: pequeños poros, inclusiones, segregaciones, fases diferentes, etc. Ocurre especialmente en los límites de grano, sobre todo cuando éstos están orientados al azar.

La dispersión aumenta cuando aumenta el tamaño del grano (en relación a la longitud de onda). En tamaños que van desde 1/10 hasta el valor total de la longitud de onda, la dispersión es tan grande que el ensayo puede resultar imposible de realizar. En tales casos se debería seleccionar una frecuencia más baja.

- *Absorción*

Es la pérdida de energía acústica por transformación directa en calor como consecuencia del rozamiento al vibrar las partículas del material. En general, la absorción se puede visualizar como un efecto de freno de las oscilaciones de las partículas. La absorción aumenta cuando aumenta la frecuencia. Sin embargo, su efecto es despreciable a las frecuencias normales de ensayo de materiales (1 a 10 MHz).

La atenuación es una de las dificultades principales encontradas en el ensayo por ultrasonidos. En algunos materiales esta atenuación es tan fuerte que resultan no aptos para este tipo de inspección.

Ya ha sido descrito el mecanismo de propagación de las ondas por el interior del material. A continuación se explicará qué ocurre cuando estas ondas ultrasónicas llegan a la superficie límite de separación entre dos medios diferentes.

Se pueden diferenciar dos casos: que la incidencia sea *perpendicular* o que sea *oblicua*.

□ INCIDENCIA PERPENDICULAR

En el caso en que un haz ultrasónico (I), ya sea longitudinal o transversal, incida perpendicularmente sobre una superficie límite plana que separa dos medios diferentes, parte de la energía incidente se *refleja* (R) y vuelve en la misma dirección, y otra parte se *transmite* (T) al otro medio manteniendo su dirección y su sentido.

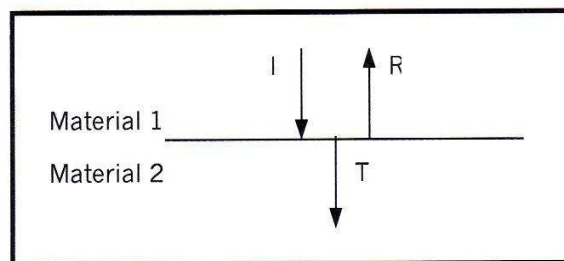


Fig. 4.7. Incidencia perpendicular

Realizando los balances de energía y de presión en la interfase (Anexo I.4 de esta memoria) se obtienen las siguientes conclusiones:

- Cuando las impedancias son iguales en ambos medios, la onda atraviesa la superficie límite sin ser perturbada (no se refleja nada).
- Cuando ambas impedancias difieren mucho, como en el caso del aire y de los gases en contacto con sólidos o líquidos (ver tablas I.1, I.2 y I.3 en anexo I de esta memoria) la onda se refleja prácticamente en su totalidad.

- Dado que la velocidad acústica en los líquidos y en los gases es nula para las ondas transversales, cuando la onda incidente sea de este tipo se reflejará totalmente cuando el medio sea un sólido en contacto con un líquido o un gas.

□ INCIDENCIA ANGULAR

Si una onda acústica incide oblicuamente en una superficie que separa dos medios, se producen ondas reflejadas y transmitidas. Pero en este caso las ondas transmitidas se denominan también ondas *refractadas* ya que su dirección cambia en relación con la dirección de incidencia.

En este caso hay que añadir un nuevo fenómeno llamado *conversión de modo*, consistente en que un tipo de onda puede transformarse en otro, es decir, las ondas longitudinales en transversales y viceversa. En la figura 4.8 se aprecia el desdoblamiento que sufren, tanto la onda reflejada como la transmitida, en una onda longitudinal y en otra transversal, resultando que una sola onda incidente da origen a cuatro ondas:

1. Haz longitudinal reflejado (rL)
2. Haz longitudinal refractado (tL)
3. Haz transversal reflejado (rT)
4. Haz transversal refractado (tT)

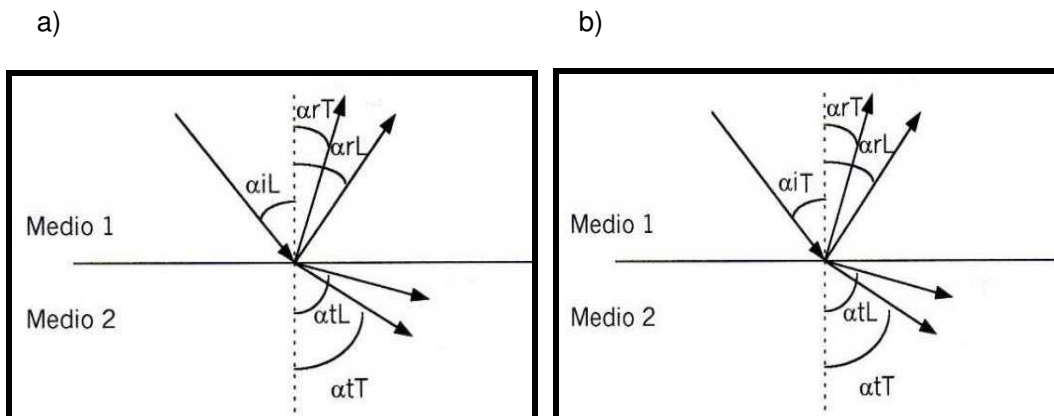


Fig. 4.8. Incidencia oblicua de onda longitudinal (a) y transversal (b)

Las direcciones de las ondas reflejadas y transmitidas vienen dadas por la *ley de Snell*:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

Donde 1 y 2 son dos ondas arbitrarias, ligadas por un proceso de reflexión o de refracción, con velocidades acústicas C_1 y C_2 .

Aplicando la ley de Snell a las cuatro ondas anteriores (Ver Anexo I.5 de esta memoria) se pueden obtener las siguientes conclusiones para el caso en que una onda ultrasónica incide de forma oblicua en la superficie límite de separación entre dos medios:

- En el medio 1, si la onda incidente y la reflejada son del mismo tipo (ambas longitudinales o ambas transversales), forman el mismo ángulo con la normal.
- Dado que la velocidad de las ondas transversales es menor que la de las longitudinales, los ángulos de reflexión o de refracción de las ondas longitudinales serán mayores que los ángulos respectivos de reflexión o de refracción de las ondas transversales.
- El proceso es más simple si tiene lugar, parcial o totalmente, en líquidos o en gases, pues en ese caso no se propagan ondas transversales.
- Se puede simplificar el ensayo haciendo desaparecer la onda longitudinal refractada en el medio 2, transmitiéndose exclusivamente la onda transversal. Esto se consigue cuando el ángulo de la onda incidente es mayor que el *ángulo límite* (Ver anexo I.6 de esta memoria).

4.4. MÉTODOS DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS

Los métodos de inspección por ultrasonidos pueden clasificarse de dos formas: según la técnica utilizada o según el modo de acoplamiento.

4.4.1 Técnicas de Inspección

Las dos técnicas principales de inspección por ultrasonidos son *Transmisión* y *Pulso-eco*.

4.4.1.1 Pulso-Eco

Esta técnica se basa en el estudio de los fenómenos de reflexión que sufren las ondas ultrasónicas en las interfaces de las piezas inspeccionadas y en las discontinuidades que éstas pueden presentar.

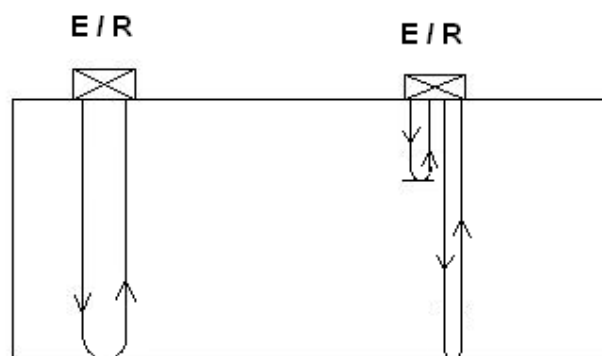


Fig. 4.9. Técnica de Pulso-Eco

El control y seguimiento de estas reflexiones a lo largo de la pieza inspeccionada, representadas en la pantalla del equipo de ultrasonidos mediante ecos, nos aporta información del estado de calidad de ésta:

- La intensidad (altura) del eco está relacionada con las características del reflector.
- El tiempo que tarda en recibirse el eco desde que se produce la emisión del impulso ultrasónico está relacionado con la posición (profundidad) del reflector que lo ha originado.

La interferencia de las ondas emitidas con las reflejadas impide la utilización de ondas continuas, por lo que se utiliza la excitación por impulsos. De esta forma resulta posible el uso de palpadores que sean a la vez emisores y receptores de la señal ultrasónica. Este hecho facilita la operación debido a que sólo se requiere acceso por un lado de la pieza a inspeccionar.

4.4.1.2 Transmisión

En este método el palpador emisor genera un haz de ondas ultrasónicas que es recibido por otro palpador receptor colocado al otro lado de la pieza.

Cuando el haz de ondas ultrasónicas es interceptado por un obstáculo, disminuye la intensidad acústica del haz ultrasónico captado por el receptor y de la apreciación de dicha reducción de señal se puede deducir la magnitud del obstáculo interceptado. Es decir, se evalúa la parte del haz que ha sido transmitida.

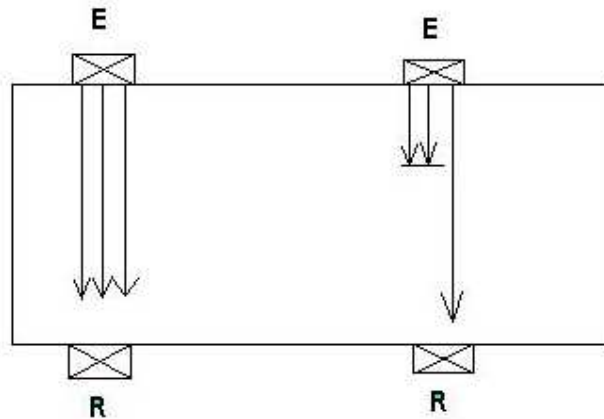


Fig. 4.10. Técnica de Transmisión

La diferencia principal con el método de pulso-eco es que en transmisión sólo se mide la amplitud de la señal captada por el receptor, y no el tiempo, por lo que no se puede saber la posición del defecto. Además, los palpadores son de excitación continua, pues el emisor y el receptor están separados, no habiendo por tanto problemas de interferencias entre las ondas.

El ensayo por transmisión se utiliza con menos frecuencia y sólo cuando el ensayo por pulso-eco no es posible. Esto ocurre, por ejemplo, cuando la atenuación del material de la muestra es muy elevada. Si se ensaya por transmisión, el recorrido a través de la muestra es sólo la mitad que si se aplica pulso-eco. Es el caso de componentes fabricados con estructuras en *panal de abeja*, muy utilizados actualmente en la industria aeroespacial.

A su limitación fundamental de dar únicamente información de amplitud, se une el hecho de que la variación de la amplitud de la señal recibida puede ser debida a factores que nada tienen que ver con el estado de la muestra, como son el riguroso enfrentamiento de los palpadores. Además, requiere el acceso por las dos superficies de la muestra, lo que es otra limitación con relación a la técnica de pulso-eco.

4.4.2 Modos de Acoplamiento

Como ya se comentó en la sección 4.3.2.1, la transmisión de las ondas ultrasónicas desde el palpador hasta la pieza a inspeccionar se realiza a través de un medio acoplante. En función de cómo se realice este acoplamiento, el ensayo por ultrasonidos se puede llevar a cabo de tres formas:

4.4.2.1 Por contacto

Es el modo de acoplamiento más utilizado en inspección manual. El operario mueve el palpador manualmente sobre la superficie de la pieza, en contacto directo con ella.

Este tipo de ensayo se realiza mediante contacto entre la superficie activa del palpador y la superficie de la pieza a través de una película de material acoplante para conseguir la transmisión acústica en la interfase. Esto es debido a que la fina capa de aire, que siempre quedaría entre el palpador y la muestra, posee una impedancia muy diferente a la del material, lo que implica un coeficiente de transmisión acústica prácticamente nulo.

Los factores que afectan a la transmisión en este tipo de ensayos son, principalmente, el medio de acoplamiento y el acabado superficial de la pieza.

El operador debe preocuparse en todo momento de que el acoplamiento palpador-muestra sea correcto. De lo contrario, se puede estar perdiendo información esencial. El uso de acoplantes constituye uno de los inconvenientes del ensayo por ultrasonidos.

El acoplante es, normalmente, alguno de los siguientes: aceites, grasas, geles acoplantes, etc. En cualquier caso, el acoplante utilizado debe ser compatible con la muestra y se debe lograr una película uniforme y un buen contacto entre el palpador y la muestra.

Otro aspecto de gran importancia es el acabado superficial de la pieza. En los ensayos por contacto directo cualquier partícula (arena, viruta, óxido) o resalte (irregularidades, rugosidad) puede perturbar el acoplamiento o el movimiento del palpador. Es, por tanto, totalmente necesario eliminar la suciedad, cascarilla suelta o salpicaduras. Así, en los casos de eliminación de suciedad se utilizan trapos secos o impregnados en disolvente. Del mismo modo, las superficies más rugosas pueden ser preparadas mediante lijado.

4.4.2.2 Por inmersión

Si el modo de acoplamiento por contacto es característico de los ensayos manuales, la inmersión lo es de los automáticos. La inmersión tiene varias ventajas:

- es más fácil de reproducir que el ensayo por contacto
- la exploración de la muestra es más rápida
- un solo palpador basta para ensayar con cualquier ángulo de incidencia

Existen dos variantes: la *inmersión total* y la *inmersión local*.

En la *inmersión total* la pieza a inspeccionar y el palpador se sumergen completamente en el líquido de acoplamiento que, casi siempre, es agua con los aditivos adecuados para que no produzca daños por corrosión.

La *inmersión local* se aplica a grandes piezas sin necesidad de recurrir a la inmersión total, que puede resultar muy costosa o inviable en ciertos casos. En este

caso, el acoplamiento ultrasónico se produce a través de un chorro o columna de agua. Esta técnica se aplica extensamente en la inspección por transmisión de materiales compuestos para aplicaciones aeronáuticas.

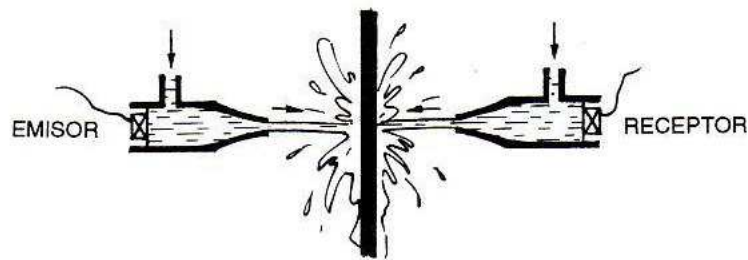


Fig. 4.11. Transmisión por chorro de agua

Una vez realizada una breve descripción de los métodos que existen para llevar a cabo la inspección por ultrasonidos nos centraremos en nuestro caso concreto.

Para la inspección de materiales compuestos la técnica más ampliamente utilizada es la *transmisión por chorro de agua*, como ya se ha comentado anteriormente. Esta técnica se aplica a estructuras de tamaño medio y grande, y/o de geometría compleja. Es la técnica más ampliamente usada para la inspección de los grandes componentes aeronáuticos como, por ejemplo, los estabilizadores horizontales. Para esta técnica se usan equipos automáticos, con dispositivos móviles que realizan el barrido a lo largo de la pieza.

En el caso de piezas de pequeñas dimensiones, suele usarse la técnica de *pulso-eco por contacto*. La inspección se realiza manualmente, pero tiene la ventaja de

que la instrumentación requerida es mucho más sencilla y menos costosa que en el caso anterior. Otra ventaja fundamental de este método es que proporciona información sobre la distancia a la que se encuentra el defecto. Por este motivo, suele aplicarse como complemento de la transmisión en la inspección de grandes piezas para determinar la posición de un determinado defecto.

Debido a que, tal como se ha comentado en secciones anteriores, EIS se dedica a la fabricación de paneles de pequeñas dimensiones y de geometría sencilla, y añadido al hecho de que la producción actual es pequeña, se procederá a utilizar la técnica de pulso-eco por contacto en el proceso de inspección. A pesar de tener el inconveniente de que incluye la componente subjetiva del ensayo manual, las ventajas, ya citadas anteriormente, son numerosas.

4.5 TÉCNICA DE PULSO-ECO

Aunque ya se hizo una breve descripción de esta técnica en la sección anterior, debido a que será el método que se empleará en el proceso de inspección en EIS, a continuación se procederá a realizar una descripción más detallada con el propósito de llegar a entender sus principios y fundamentos.

Como principio fundamental, la técnica de pulso-eco se basa en la evaluación de la indicación que produce la reflexión de un haz ultrasónico al incidir sobre una discontinuidad.

Cuando el haz de ultrasonidos que se transmite por el interior del material encuentra una superficie exterior de fondo, se refleja casi en su totalidad. Igualmente se reflejará cuando encuentre un obstáculo reflector.

El palpador actúa alternativamente como emisor-receptor y recoge los ecos de las distintas discontinuidades de la pieza, transformándolos en indicaciones en una pantalla que proporciona información sobre la distancia a la que se encuentra la discontinuidad y la cantidad de energía ultrasónica reflejada. Es decir, el control y seguimiento de estos ecos nos aporta información sobre el estado de calidad de la pieza:

- La intensidad del eco (incluso su ausencia) está relacionada con las características del reflector. Se mide en decibelios (dB's) o en tanto por ciento de la altura total de pantalla (% ATP).
- El tiempo que tarda en recibirse el eco desde que se produce la emisión del impulso ultrasónico se conoce como *tiempo de vuelo* y está relacionado con la posición (profundidad) del reflector que lo ha originado a través de la velocidad de propagación del sonido en el material:

$$p = \frac{ct}{2}$$

Donde, p = Profundidad (m)
 t = Tiempo de vuelo (s)
 c = Velocidad de propagación del sonido en el material (m/s)

El tiempo que tarda el impulso en recorrer la muestra y sus reflexiones (ecos) en la pared del fondo y en las posibles discontinuidades, se representan en la pantalla del equipo de ultrasonidos en una base de tiempos en forma de *deflexiones verticales* cuya altura es proporcional a la presión acústica del eco correspondiente.

Indicación del eco es la denominación para cada una de estas señales que se observan en la pantalla ya que, estrictamente hablando, tales señales son simplemente una representación de los auténticos ecos, es decir, de las reflexiones del impulso acústico en el interior de la muestra. Sin embargo, en la práctica, se llama simplemente *eco* a la indicación del eco, y así se hará en adelante.

Si el obstáculo es menor que la sección del haz emitido por el palpador, la porción del haz no interceptada seguirá su recorrido hasta reflejarse en la superficie opuesta. Esta reflexión llega al receptor más tarde que la procedente de la heterogeneidad por lo que su eco estará situado más a la derecha en la base de tiempos.

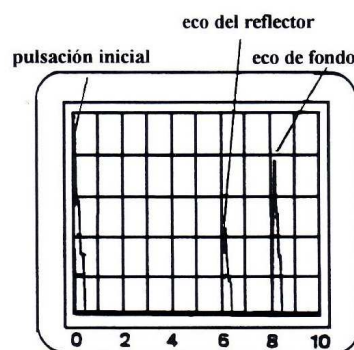


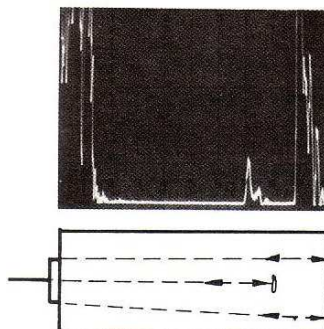
Fig. 4.12. Eco reflector y eco de fondo

Los ecos aparecen, pues, a distancias del origen de la base de tiempos proporcionales a su distancia al palpador y su altura es, como se ha dicho anteriormente, proporcional a la presión acústica reflejada por el obstáculo. La primera señal detectada en la pantalla es el denominado *eco de emisión* y tiene la forma de un pico muy pronunciado, el cual sirve de referencia para señalar el comienzo de la base de tiempos.

A continuación se reproducen los oscilogramas característicos de algunos ejemplos de ensayo de materiales por pulso-eco:

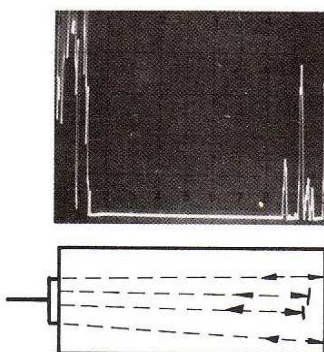
Caso 1:

Si la heterogeneidad es pequeña comparada con la sección del haz, se pueden obtener su eco y el de fondo.



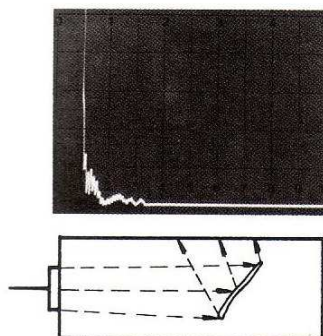
Caso 2:

Si se presentan varias heterogeneidades a diferentes distancias, se pueden obtener ecos diferentes siempre que las que están más próximas al palpador no oculten a las más alejadas.



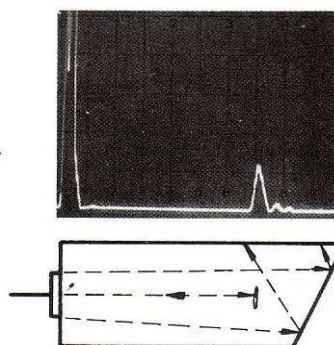
Caso 3:

Cuando la heterogeneidad se presenta inclinada respecto al haz de ultrasonidos y además intercepta todo el haz, no se obtiene eco de fondo ni de la heterogeneidad. En este caso se puede estimar el tamaño proyectado de ésta, pero no se obtendrá información sobre su orientación o posición, a menos que se realice otra exploración en dirección perpendicular a la anterior.



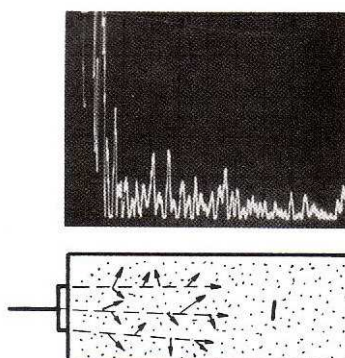
Caso 4:

El eco de fondo puede desaparecer también por el efecto de la falta de paralelismo entre las caras de la muestra.



Caso 5:

La microporosidad, así como otros estados del material que producen dispersión del haz ultrasónico, da lugar a oscilogramas caracterizados por la presencia de "césped" sin ningún eco diferenciado.



La reflexión es el origen de la mayor parte de los ecos útiles en el ensayo de materiales. Tal como se explicó en la sección 4.3.2.2, la reflexión se produce cuando la onda encuentra una interfase con diferencias de impedancia acústica. A este tipo de señal se le llama *reflexión especular*.

La amplitud de un eco se expresa en voltios, que es la unidad en la que se mide la tensión generada en el receptor por el efecto piezoeléctrico. Sin embargo, esto no se utiliza en la práctica de los ensayos de materiales, donde es más útil referirse a medidas relativas. Para ello se utiliza el tanto por ciento de la altura total de pantalla (% ATP). Así, es frecuente referirse al ajuste de la sensibilidad en un ensayo con un eco de referencia del 80% ATP. Una vez establecido ese nivel de comparación, las amplitudes de otros ecos se suelen expresar en *decibelios* (dB) que es otra forma de medida relativa. El dB es un valor adimensional que se emplea para comparar magnitudes relacionadas con la intensidad. Así, dos señales de intensidades I_1 e I_2 se dice que tienen una diferencia en dB de:

$$dB = 10 \log \frac{I_2}{I_1}$$

El cálculo de la relación en dB también se puede hacer tomando los valores de altura de los ecos (Ver anexo I.7):

$$dB = 20 \log \frac{H_2}{H_1}$$

4.6 MATERIALES Y EQUIPOS

A continuación se describirán las características de los materiales y equipos a utilizar.

4.6.1 Equipo de Ultrasonidos

El equipo utilizado será de tipo pulso-eco modelo USM 35X DAC de la firma Krautkramer. Posee una rango de frecuencia entre 0,2 y 20 MHz y un rango máximo de calibración de 10 m (en acero).

En la figura 4.13 se muestra el esquema del sistema del equipo.

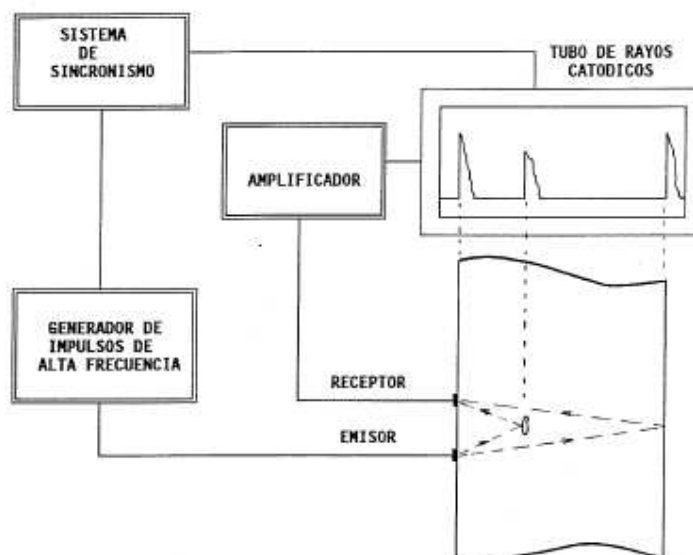


Fig. 4.13. Sistema de equipo de ultrasonidos

Básicamente, el funcionamiento del equipo es el siguiente: el impulso eléctrico procedente del generador excita al palpador emisor, lo que produce la emisión de un impulso acústico que pasa a la muestra a través del medio de acoplamiento. Al encontrar un obstáculo en su recorrido, la onda se refleja y vuelve al receptor. Éste, a su vez, genera un impulso eléctrico que, convenientemente amplificado, da lugar a la indicación del eco en la pantalla.

Los elementos fundamentales del equipo son:

- sistema de sincronismo
- generador de impulsos
- amplificador
- sistema de representación

4.6.1.1 Sistema de sincronismo

Establece el *ritmo* de funcionamiento del conjunto. Produce la señal de sincronización para la emisión de los sucesivos impulsos eléctricos por parte del generador de alta frecuencia.

Contiene también un generador de barrido que produce un voltaje, el cual actúa sobre un tubo de rayos catódicos (TRC), haciendo que la señal luminosa de la pantalla recorra ésta de izquierda a derecha en forma de pincel electrónico. Es decir, el generador de barrido dibuja la base de tiempos en el TRC, lo que permite representar los ecos.

4.6.1.2 Generador de impulsos

Esta unidad genera impulsos eléctricos con el fin de que el palpador los transforme en impulsos ultrasónicos.

Al mismo tiempo que envía el impulso eléctrico al palpador, envía al amplificador una pequeña fracción de la energía de ese impulso eléctrico. De esta forma, se produce la *señal de emisión* en la pantalla, siendo el punto de arranque de esta señal el origen de la base de tiempo, que marca el momento en el que el cristal emisor recibe el impulso eléctrico.

La señal de emisión termina a la derecha del cero de la escala, es decir, dentro del material. Esa zona, en la que no es posible detectar ecos debido a que está ocupada por la señal inicial, se llama *zona muerta*. La zona muerta es consecuencia de la duración del impulso emitido por el palpador.

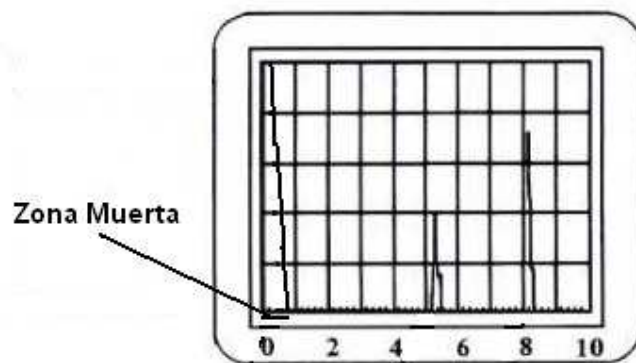


Fig. 4.14. Señal de emisión y zona muerta

4.6.1.3 Amplificador

Los impulsos acústicos llegan al receptor después de recorrer el material, generando impulsos eléctricos. El voltaje de estos impulsos eléctricos es menor que los valores requeridos para el funcionamiento del TRC, por lo que son amplificados de forma proporcional hasta los valores necesarios.

El amplificador permite variar las amplitudes de los ecos en la pantalla. Es de tipo lineal, es decir, todas las señales se multiplican por el mismo factor, que se puede variar con el *mando o control de ganancia*. El equipo dispone de dos controles de ganancia: uno para ajustes de grandes variaciones de ganancias, es decir, en pasos de 20 dB, y otro para ajustes de pasos de ganancia más pequeños, pasos de uno o dos dB.

Es importante nombrar aquí el sistema *Corrección Distancia-Amplitud (DAC)*. El equipo posee un dispositivo que permite al amplificador modificar automáticamente la ganancia en función del tiempo. Su finalidad es corregir el efecto atenuador que se produce en la señal ultrasónica debido al aumento de espesor. Así, las señales se amplifican tanto más cuanto más tardan en llegar. Por tanto, el eco de un reflector mostrará en pantalla una amplitud constante, independientemente de la distancia a la que se encuentre.

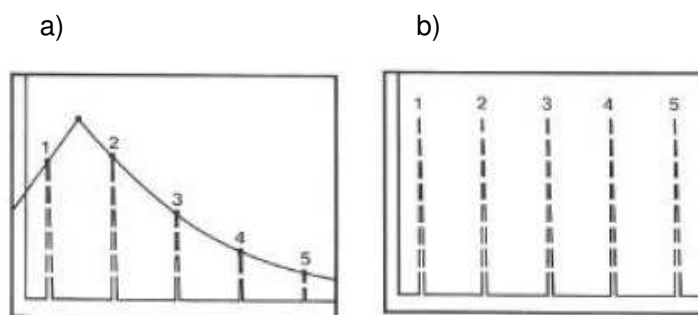


Fig. 4.15. Corrección DAC: a) alturas de los ecos producidos por reflectores del mismo tamaño situados a distinta profundidad, b) control DAC activado

4.6.1.4 Sistema de representación

El sistema de representación utilizado es un TRC con representación *A-scan*, en la que los ecos aparecen como deflexiones verticales de la base de tiempos. El eje horizontal indica tiempo (o profundidad) y el vertical indica amplitud. Cada "A-scan" es la representación completa de la señal ultrasónica en un determinado punto de la pieza, y contiene toda la información relativa a amplitud y posición de los diferentes ecos ultrasónicos en dicho punto.

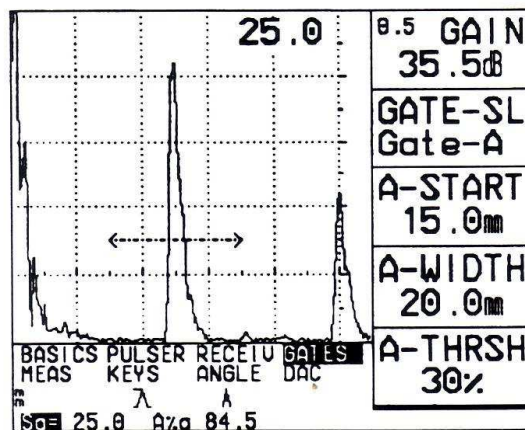


Fig. 4.16. Representación *A-scan*

La línea base de tiempos de la pantalla está dividida horizontalmente en cinco divisiones y a su vez, cada división en diez subdivisiones. El eje vertical está dividido en cinco espacios iguales a 1/5 (20%), 2/5 (40%), 3/5 (60%), 4/5 (80%) y 5/5 (100%) de la altura de la pantalla (ATP).

El equipo posee una opción de registro de datos que permite registrar y documentar lecturas de imágenes *A-scan*. También posee una interfase para la comunicación de datos con una impresora o PC.

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

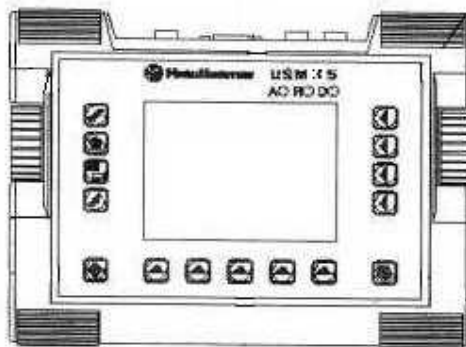


Fig. 4.17. Equipo USM 35 X DAC

4.6.2 Palpador

Como ya se comentó a modo de introducción en la sección 4.3.2.1, el palpador es la pieza que sirve para la aplicación de los ultrasonidos al material a investigar. Es un dispositivo que se construye utilizando como base un *transductor piezoeléctrico*, que es un convertidor de energía eléctrica en energía acústica o viceversa. Si la conversión de energía es en sentido eléctrico-acústico, recibe el nombre de *emisor*; si la conversión es en sentido opuesto, se le denomina *receptor*.

En el método de pulso-eco, el emisor y el receptor no precisan estar necesariamente separados, sino que el mismo transductor que emite los impulsos puede actuar como receptor mientras está en reposo entre dos impulsos consecutivos. Ésta es una característica fundamental de la excitación por impulsos.

4.6.2.1 Tipos de Palpadores

Existen principalmente tres tipos de palpadores:

- I. De contacto
- II. De inmersión
- III. Especiales

I. Palpadores de Contacto

Se aplican directamente a la superficie de la muestra, con una cierta presión, e intercalando un medio de acoplamiento. Se suelen emplear en ensayos manuales. Estos palpadores se clasifican en:

- a) *Palpador de incidencia normal*: Se caracteriza por emitir ondas longitudinales perpendiculares a la superficie de la pieza a inspeccionar. Las ondas se propagan por el interior de la pieza hasta encontrar una heterogeneidad, siendo nuevamente reflejadas hacia el cristal. Se usa para la detección de heterogeneidades paralelas a la superficie de entrada.
- b) *Palpador angular*: Se caracteriza por emitir sus haces de ondas longitudinales formando un ángulo distinto del recto con la superficie a inspeccionar. En estas circunstancias, el haz emitido sufre un cambio de modo, dando origen a un haz de ondas transversales. Este tipo de palpador se utiliza para la inspección de materiales cuyos defectos inherentes son de orientación inclinada.

- c) *Palpador bicristal*: Se caracteriza por poseer dos transductores separados eléctrica y acústicamente, de forma que uno actúa como emisor y el otro como receptor. Los dos cristales tienen una pequeña inclinación, de manera que se consigue un efecto focalizador que proporciona una máxima sensibilidad en las proximidades de la superficie a inspeccionar. Este tipo de palpador se utiliza para la medida de espesores muy pequeños.

II. Palpadores de Inmersión

Este tipo de palpadores se utilizan en el método de inspección por inmersión. Estos ensayos, bien sumergiendo la muestra en un tanque o mediante inmersión local, son particularmente indicados para inspecciones automáticas. La transmisión de los ultrasonidos entre el palpador y la muestra se efectúa a través de una columna de líquido, es decir, sin contacto directo.

El diseño de un palpador de inmersión es similar al de un palpador normal de contacto directo, diferenciándose en que los palpadores de inmersión han de ser estancos al líquido que se va a utilizar en la técnica de inmersión, incluyendo sus conexiones de cableado.

Estos palpadores están montados sobre un soporte de modo que se orientan hacia la superficie de la pieza según el ángulo de incidencia deseado.

III. Palpadores especiales

Los palpadores descritos anteriormente son los de uso más frecuente en la inspección por ultrasonidos. Pero existen otros tipos de palpadores contruidos específicamente para determinadas aplicaciones. Es el caso, por ejemplo, de los palpadores para ensayar piezas de geometría compleja donde la zona de acceso no permite el empleo de palpadores convencionales. Del mismo modo hay palpadores especiales para soportar altas temperaturas o presiones.

Para el proceso de inspección en EIS el palpador a utilizar será de contacto, dado que el método que se empleará para la inspección será el de pulso-eco por contacto, siendo este tipo de palpador el usado en inspecciones manuales.

En cuanto a la dirección del haz ultrasónico, se elegirá de tal forma que los defectos esperados ofrezcan la máxima reflexión, esto es, que el haz ultrasónico encuentre a la superficie del defecto en dirección perpendicular a éste.

Debido al proceso de montaje de telas en la fabricación de los paneles de fibra de carbono, las posibles heterogeneidades que se van a encontrar en este tipo de componentes se van a situar de forma paralela a la superficie de entrada. Por este motivo, el palpador utilizado será de incidencia normal.

El inconveniente de la técnica de ensayo con palpadores de incidencia normal es que la llamada *zona muerta* (Ver 4.6.1.2) puede impedir la detección de heterogeneidades muy próximas a la superficie de apoyo del palpador o en piezas de pequeño espesor, como es el caso que nos ocupa, dado que los paneles que se fabrican en EIS tienen un espesor máximo de 7 mm.

Para solventar el inconveniente de la zona muerta, en la inspección de laminados de materiales compuestos se suelen usar palpadores de incidencia normal que llevan incorporado un *retardo*.

Este retardo es una pieza de metacrilato cuya longitud es del orden de 10 mm. La incorporación del retardo al palpador hace que la señal de emisión aparezca a la izquierda del origen de la base de tiempo, que es el que marca el comienzo de la pieza. Al comienzo de la base de tiempos aparecerá, en su lugar, el eco de interfase entre el retardo y la pieza a ensayar. Sin embargo, la amplitud de este eco es muy pequeña debido a que el metacrilato y el material compuesto de la muestra tienen impedancias acústicas muy próximas¹, por lo que sólo una pequeña porción del haz ultrasónico se reflejará. De esta forma, se elimina la zona muerta, posibilitando la inspección de piezas de pequeños espesores.



Fig. 4.18. Palpador de incidencia normal con retardo

¹ Tabla I.2 (Anexo I):
 Z (metacrilato) = $3,2 \cdot 10^6$ Kg / m² s
 Z (compuesto de fibra de carbono) = $2,8 - 3,7 \cdot 10^6$ Kg / m² s

4.6.2.2 Estructura del palpador de incidencia normal

En la figura 4.19 se representa un esquema de los principales elementos constructivos de un palpador de incidencia normal.

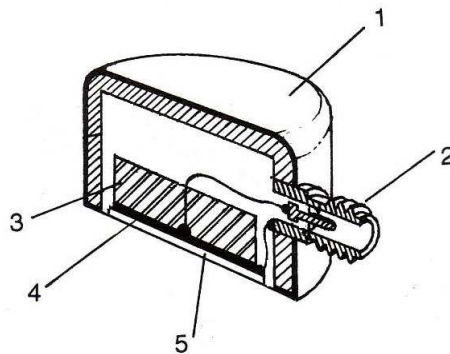


Fig. 4.19. Sección de un palpador de incidencia normal

1. *Carcasa*: Donde se aloja el cristal piezoeléctrico, el conector y el amortiguante, proporcionando la resistencia necesaria al conjunto.
2. *Conector*: Conecta el palpador al equipo de ultrasonidos
3. *Amortiguador*: Contribuye a reducir el tiempo de oscilación del cristal después del impulso eléctrico, es decir, acorta el impulso ultrasónico, mejorando así el poder de resolución. También debe absorber los componentes del impulso que son emitidos hacia atrás o reflejados en esa dirección.
4. *Cristal piezoeléctrico*: Es la parte fundamental del palpador. Su función es convertir los impulsos eléctrico en acústicos y viceversa. Los materiales más usados para los transductores ultrasónicos son: Cuarzo, Sulfato de Litio, Titanato de Bario y Metaniobato de Plomo, entre otros.

5. *Suela protectora*: Protege la cara de contacto del palpador para evitar el deterioro prematuro del cristal.

4.6.2.3 Características de un palpador

Entre las principales características de un palpador están:

- a) *Sensibilidad*: Es la capacidad del palpador para detectar discontinuidades pequeñas. El tamaño mínimo de defecto detectable viene dado por $\lambda/2$. Por tanto, cuanto menor sea la λ , mayor será la sensibilidad del palpador.
- b) *Poder de resolución*: Es la capacidad del palpador para detectar con ecos separados dos reflectores situados muy próximos entre sí. Un palpador tendrá un buen poder de resolución cuando las señales obtenidas sean angostas (estrechas).

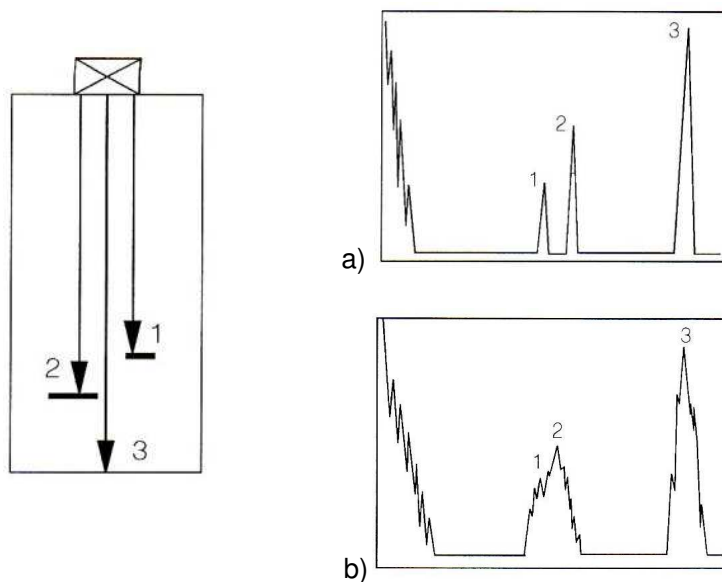


Fig. 4.20. Poder de resolución: a) Palpador de alta resolución
b) Palpador de baja resolución

Las variables a tener en cuenta a la hora de elegir el palpador son:

- a) *Tipo de cristal piezoeléctrico*: Los materiales piezoeléctricos más usados, así como algunos de sus parámetros más importantes, se muestran en la tabla 4.1.

	Cuarzo	Sulfato de Litio	Titanato de Bario	Metaniobato de Plomo
Impedancia Acústica Z (Kg/ m ² s.10 ⁶)	15,2	11,2	27	20,5
Factor de acoplamiento electromecánico K	0,1	0,38	0,45	0,4
Factor de acoplamiento para oscilación radial K _p	0,1	0	0,3	0,07

Tabla 4.1. Materiales piezoeléctricos más utilizados

- *Impedancia Acústica Z*: Como ya se definió, es la resistencia que el material opone a la vibración. Debido a que en los ensayos por contacto se requiere un acoplante líquido, con una impedancia baja, el material transductor debería tener una impedancia acústica del mismo orden para poder transmitir la máxima energía acústica posible.
- *Factor de acoplamiento electromecánico K*: Parámetro que mide la eficacia de la conversión de energía eléctrica a mecánica y viceversa.

- *Factor de acoplamiento para oscilación radial K_p* : Mide la aparición de oscilaciones radiales perturbadoras que hacen que las señales se ensanchen. Un poder de resolución satisfactorio requiere que K_p sea lo más bajo posible.

A la vista de los parámetros anteriores, es importante resaltar que no existe un material que sea ideal como material transductor. Hay que establecer compromisos y elegir el material que sea más adecuado para cada caso en concreto.

- b) *Frecuencia nominal*: Es la frecuencia de los impulsos que emite el palpador. Con la elección de frecuencias altas se obtiene mayor sensibilidad y mayor poder resolutorio. Sin embargo, al aumentar la frecuencia, disminuye la profundidad de penetración debido a que la absorción en el material aumenta. En el anexo I.8 de esta memoria se muestran los márgenes de frecuencia normalmente utilizados en el ensayo de diversos materiales.
- c) *Diámetro*: El diámetro del palpador va a influir en la longitud del campo próximo². Para la inspección de piezas de pequeño espesor o donde se espere encontrar defectos cerca de la superficie, la longitud del campo próximo debe ser lo menor posible, por lo que se utilizarán diámetros pequeños.

² *Campo próximo del palpador*: Debido a fenómenos de difracción y efectos de los bordes, se produce en la onda acústica, en su proximidad al cristal, un fenómeno de interferencias del campo ultrasónico. A esta zona se le denomina campo próximo. La evaluación de discontinuidades en esta zona podría no ser fiable debido a que las interferencias podrían falsear las señales. La longitud del campo próximo aumenta con el diámetro del palpador.

Para el proceso de inspección en EIS, el palpador utilizado será de incidencia normal, con un diámetro de piezoeléctrico de 6,35 mm (1/4 "). La frecuencia nominal será de 5 MHz. Llevará incorporado un retardo de metacrilato de 9,5 mm de longitud. Será un palpador modelo K 5 MN de la firma Krautkramer. En la figura 4.21 se muestra una imagen del palpador:



Fig. 4.21. Palpador K 5 MN

Todo palpador debe llevar un único número de serie que indique la frecuencia de trabajo, tamaño del transductor y ángulo, o un número de referencia a partir del que se pueda trazar esta información.

Asimismo, el palpador deberá ir acompañado de una hoja de características que proporcione información sobre su comportamiento. A continuación se detalla la información más relevante que debe suministrar el fabricante en dicha hoja de características:

- Nombre del fabricante
- Tipo de palpador
- Frecuencia nominal
- Peso y tamaño del palpador

- Tipo de conectores
- Material del transductor
- Forma y tamaño del transductor
- Material de la suela protectora

4.6.3 Acoplante

Es una sustancia que se utiliza para hacer posible la introducción de las ondas ultrasónicas producidas por el cristal piezoeléctrico en el interior del material a inspeccionar. Su finalidad es eliminar la delgada lámina de aire entre el palpador y el material a ensayar, en la cual sería imposible la transmisión del haz ultrasónico debido a la gran diferencia de impedancias entre el aire y el material.

Las características de un buen acoplante deben ser: humectabilidad (capaz de mojar la superficie y el palpador), viscosidad adecuada, baja atenuación (que el sonido se transmita al 100%), no tóxico, no corrosivo y que tenga una impedancia acústica adecuada.

Entre los acoplantes más utilizados están: geles, grasas y aceites de diverso grado de viscosidad. Cuanto mayor sea la rugosidad superficial de la pieza, mayor debe ser la viscosidad del acoplante. Esta sustancia debe formar una película fina, consistente y sin fluidez, y debe ser compatible con el material a examinar.

El acoplante utilizado en nuestro caso será un gel tipo ZG-F de la marca Krautkramer.



Fig. 4.22. Gel acoplante ZG-F

4.6.4 Bloques Patrón de Calibración y de Referencia

Se denominan así las piezas que se usan para comprobar el funcionamiento del equipo de ultrasonidos y del palpador, así como para efectuar la regulación del instrumento a fin de que éste se adapte a las condiciones del ensayo.

Los *bloques de calibración* son patrones normalizados que se emplean para realizar verificaciones periódicas del rendimiento del equipo de ultrasonidos. Estas verificaciones no pretenden establecer la aptitud del equipo para aplicaciones particulares, sino asegurar que éste posee unas características que le permiten realizar de forma fiable las inspecciones.

Para este propósito existen diversos bloques normalizados, pero uno de los más ampliamente usados, y el que será utilizado en el proceso de inspección de EIS, es el Bloque Patrón Nº 1 descrito en la norma UNE-EN 12223. El bloque debe ir acompañado de un certificado, emitido por el fabricante, donde se mencione que cumple con la Norma EN 12223.

Sobre dicho bloque debe aparecer marcada de forma permanente la siguiente información: EN 12223 y el número de serie del fabricante y marca comercial.

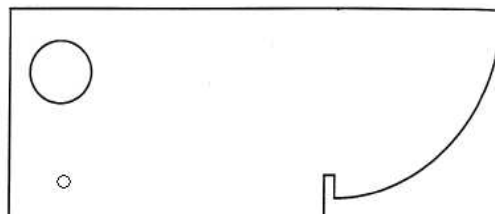


Fig. 4.23. Bloque Patrón N° 1 según UNE EN 12223

Por otra parte, el equipo de ultrasonidos debe ser siempre ajustado previamente a la inspección y de forma periódica para demostrar que los parámetros de inspección que se establezcan garantizan una adecuada detección de los defectos del tamaño mínimo detectable requeridos por los criterios de aceptación aplicables.

Para ello es necesario el uso de *bloques de referencia* cuyo comportamiento frente a los ultrasonidos sea similar al de las piezas a inspeccionar. Estos bloques serán representativos en materiales, configuración geométrica y método de fabricación de los elementos a inspeccionar, y contendrán defectos artificiales representativos de los tamaños requeridos por el correspondiente criterio de aceptación aplicable. Las características que debe poseer el bloque de referencia representativo de los paneles fabricados en EIS están descritas en el procedimiento Fabricación de Pieza Patrón (IU-PRC-002), incluido en el anexo IV de esta memoria.

Estas probetas patrón deben pasar por un proceso de certificación. Dicho proceso consiste básicamente en verificar que el material es de similares características acústicas que el de las piezas a ensayar y realizar un control dimensional en cuanto a la posición y tamaño de los reflectores usados como referencia. Dichas probetas de referencia deben estar certificadas según la norma específica del cliente.

4.7

PERSONAL

Dentro del campo de los END se definen tres niveles básicos de certificación para los inspectores de acuerdo a la norma UNE-EN 473. Esta norma establece un sistema para la cualificación y certificación del personal encargado de efectuar ensayos no destructivos en la industria. Para la industria aeroespacial es de aplicación la norma UNE-EN 4179:2000, basada en la UNE-EN 473 pero con los requisitos específicos añadidos de este sector industrial.

La certificación cubre la competencia en uno o varios de los métodos siguientes:

- Corrientes Inducidas
- Líquidos Penetrantes
- Partículas Magnéticas
- **Ultrasonidos**
- Radiología Industrial

Las capacitaciones generales de los tres niveles de cualificación son las que se describen a continuación.

Nivel I

El personal de Nivel I debe ser capaz, con ayuda de instrucciones escritas y con la asistencia de personal de Nivel II ó III, de realizar lo siguiente:

- Ajustar y calibrar el equipo
- Efectuar ensayos individuales
- Interpretar y evaluar a efectos de aceptación o rechazo, a condición de que esto figure en el procedimiento escrito y/o en la instrucción escrita
- Informar de los resultados

Nivel II

Además de cumplir con los requisitos de Nivel I, el personal de Nivel II debe ser capaz de realizar las siguientes actividades:

- Escoger la técnica a utilizar en el método de ensayo
- Conocer en detalle el alcance, el campo de aplicación y las limitaciones del método
- Comprender las normas y las especificaciones de la Inspección por Ultrasonidos y transcribirlas en forma de instrucciones prácticas de ensayo adaptadas a las condiciones de trabajo reales.
- Interpretar y evaluar los resultados en función de las normas, códigos o especificaciones aplicables.
- Supervisar los ensayos
- Supervisar todas las tareas del personal de Nivel I

- Formar o asistir al personal
- Organizar los ensayos mediante Inspección por Ultrasonidos e informar de los resultados
- Poseer conocimientos básicos sobre la tecnología de los productos, en este caso sobre los materiales compuestos.

Nivel III

El personal reconocido como Nivel III debe ser capaz de realizar lo siguiente:

- Asumir la responsabilidad técnica de las instalaciones y del personal de Inspección por Ultrasonidos
- Validar los métodos y técnicas utilizados
- Interpretar las normas, códigos, especificaciones y procedimientos
- Tener suficiente conocimiento y experiencia práctica acerca de la tecnología de los materiales compuestos para ayudar a establecer los métodos de ensayo a utilizar, así como los criterios de aceptación y rechazo
- Tener suficiente conocimiento de otros métodos de END asociados a su área de responsabilidad y conocer la utilización adecuada de éstos
- Auditar a una organización exterior para asegurar que cumple los requisitos de los procedimientos escritos

-
- Formar, examinar y otorgar aprobación a todos los niveles del personal de Inspección por Ultrasonidos

En las instalaciones de EIS, el personal encargado de la inspección por ultrasonidos de las piezas y de la aplicación de los criterios de interpretación y evaluación, así como del mantenimiento y calibración del equipo de inspección, deberá estar certificado como mínimo con Nivel II en Ultrasonidos según UNE EN 4179:2000 por un organismo certificador en END¹.

El personal no certificado sólo podrá realizar labores auxiliares, tales como preparación de las piezas, limpieza, marcado, etc., siempre bajo la supervisión de personal certificado.

El personal certificado debe estar en posesión de su certificado correspondiente, que debe contener, como mínimo:

- Nombre completo de la persona certificada
- Fecha de la certificación
- Fecha del fin de la validez de la certificación
- Nivel de certificación
- Organismo certificador
- Método/s de END
- Sector/es industrial/es correspondiente/s
- Firma de la persona certificada

¹ En España tiene un amplia aceptación como organismo certificador la Asociación Española de Ensayos No Destructivos (AEND).

El personal certificado debe ser sometido a un examen anual para la verificación de la vista. Este examen deberá ser realizado anualmente por personal médico cualificado.

El periodo de validez de la certificación para Niveles I y II es de tres años, mientras que para el Nivel III es de cinco años.

La certificación dejará de ser válida cuando se produzca uno o varios de los casos siguientes:

- Cuando el periodo de validez de la certificación haya caducado sin que ésta haya sido renovada o cuando la persona suspenda la prueba de renovación
- Cuando se produzca una interrupción notable² de la actividad relacionada con el método en el cual la persona obtuvo la certificación
- Cuando el individuo suspenda el examen anual

Con objeto de establecer la cualificación y requisitos del personal encargado de la Inspección por Ultrasonidos en EIS según la Norma UNE EN 4179, se ha desarrollado el procedimiento Cualificación del Personal para la Inspección por Ultrasonidos (GR-PRC-004), incluido en el anexo IV de esta memoria.

² Una interrupción notable significa una ausencia o un cambio de actividad que impide a la persona efectuar las tareas correspondientes a su nivel en el método en cuestión.