

Eduardo Gómez de León

Ultrasonidos

Nivel II

E N D

Ensayos No Destructivos

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

ULTRASONIDOS

NIVEL II

AEND

Asociación Española de Ensayos No Destructivos

Eduardo Gómez de León

END. Ultrasonidos. Nivel II

Autor: Eduardo Gómez de León
Nivel 3 en U.T. según la UNE EN 473
Certificado N° 001688-UT-3-MSA-0
Asociación Española de Ensayos no Destructivos

Edita:

© FUNDACIÓN CONFEMETAL
Príncipe de Vergara, 74, 28006 Madrid.
Tfno.: 91 782 36 30 - Fax: 91 563 17 41
www.fundacionconfemetal.com
editorial@fundacionconfemetal.es

ISBN: 84-92735-06-8
Depósito Legal: M-28248-2009

Impreso en España - *Printed in Spain*

Maquetación e impresión:
QENTA NOVA

Queda prohibida toda reproducción total o parcial de la obra por cualquier medio o procedimiento sin autorización previa.

ÍNDICE

GENERALIDADES E HISTORIA APLICACIONES

1. ULTRASONIDOS

- 1.1. Naturaleza de los ultrasonidos
- 1.2. Producción y transmisión de las ondas sonoras
- 1.3. Propagación de las ondas sonoras
- 1.4. Parámetros de las ondas sonoras
- 1.5. Emisión sónica

2. MODOS DE VIBRACIÓN O TIPOS DE ONDAS

- 2.1. Onda longitudinal o de compresión
- 2.2. Onda transversal o de corte
- 2.3. Onda de superficie o de Rayleigh
- 2.4. Ondas de chapa u ondas de Lamb
- 2.5. Impedancia acústica
- 2.6. Intensidad acústica
- 2.7. Presión acústica
- 2.8. Presión reflejada en una discontinuidad
- 2.9. Atenuación de las ondas sonoras
 - 2.9.1. Dispersión
 - 2.9.2. Absorción

3. REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN DE ONDAS

- 3.1. Incidencia normal
 - 3.1.1. Incidencia normal en superficie límite única
 - 3.1.2. Incidencia normal en superficie límite múltiple
- 3.2. Incidencia angular

4. GENERACIÓN Y RECEPCIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS.

- 4.1. Magnetoestricción
- 4.2. Piezoelectricidad
- 4.3. Características de los cristales piezoeléctricos

5. CAMPO ULTRASÓNICO DE UN OSCILADOR

- 5.1. Campo próximo y lejano de un oscilador continuo
- 5.2. Campo ultrasónico de un oscilador por impulsos
- 5.3. Eco y sombra de un obstáculo en el campo ultrasónico

6. PALPADORES

- 6.1. Construcción de los palpadores
- 6.2. Características respecto a frecuencia y diámetro del cristal
- 6.3. Diferentes tipos de palpadores
 - 6.3.1. Palpadores de contacto
 - 6.3.2. Palpadores de inmersión
 - 6.3.3. Palpadores focalizantes
- 6.4. Palpadores especiales

7. TÉCNICAS DE EMISIÓN Y RECEPCIÓN DE LOS ULTRASONIDOS

- 7.1. Técnica de resonancia
- 7.2. Técnica de transmisión
- 7.3. Técnica de impulso-eco
 - 7.3.1. Medida del tiempo de recorrido (T)
 - 7.3.2. Medida de la intensidad acústica y tiempo de recorrido (IT)
- 7.4. Detección de discontinuidades

8. EQUIPO PARA MEDIDA DE LA PRESIÓN ACÚSTICA Y TIEMPO DE RECORRIDO

- 8.1. Sistema de sincronismo
 - 8.1.1. Generador de voltaje de deflexión horizontal
 - 8.1.2. Emisión de impulsos eléctricos de alta frecuencia
 - 8.1.3. Luminosidad del pincel luminoso
- 8.2. Generador de alta frecuencia
- 8.3. Amplificador
- 8.4. Monitores
- 8.5. Sistemas de representación
 - 8.5.1. Representación de tipo A
 - 8.5.2. Representación de tipo B
 - 8.5.3. Representación de tipo C

9. PUESTA A PUNTO DEL ENSAYO

- 9.1. Condición de la superficie del material
 - 9.1.1. Acabado superficial
 - 9.1.2. Rugosidad de la superficie
 - 9.1.3. Curvatura de la superficie
- 9.2. Medio de acoplamiento
- 9.3. Diámetro y frecuencia del palpador
- 9.4. Bloques de calibración y de referencia
 - 9.4.1. Bloque de calibración V1
 - 9.4.2. Bloque de calibración V2
 - 9.4.3. Bloque ASME
- 9.5. Comprobaciones del equipo-palpador
 - 9.5.1. Relación señal-ruido
 - 9.5.2. Zona muerta
 - 9.5.3. Poder de resolución
- 9.6. Comprobaciones de los palpadores
 - 9.6.1. Isobara de -20 dB
 - 9.6.2. Determinación del punto de salida de un palpador angular.
 - 9.6.3. Determinación del ángulo real de salida

- 9.7. Comprobaciones en el equipo
 - 9.7.1. Linealidad horizontal
 - 9.7.2. Linealidad vertical

10. CALIBRACIONES Y AJUSTES PREVIOS AL ENSAYO

- 10.1. Ajuste de la base de tiempo
 - 10.1.1. Ajuste en recorrido del sonido con palpador normal
 - 10.1.2. Ajuste en recorrido del sonido con palpador angular
 - 10.1.3. Ajuste con bloque de calibración V2
 - 10.1.4. Determinación de la situación de un reflector
- 10.2. Ajuste en distancia de proyección
- 10.3. Ajuste en distancia de proyección acortada
- 10.4. Ajuste de la sensibilidad
 - 10.4.1. Técnica del reflector simple
 - 10.4.2. Técnica de la curva “amplitud-distancia” (CAD)
 - 10.4.3. Técnica del “tamaño-distancia-amplitud” (DAT)
 - 10.4.4. Escalas AVG

11. ENSAYO DE UNIONES SOLDADAS

- 11.1. Defectos en uniones soldadas
 - 11.1.1. Defectos internos
 - 11.1.2. Defectos externos
- 11.2. Técnicas de inspección
 - 11.2.1. Técnica con incidencia normal
 - 11.2.2. Técnica con incidencia angular
- 11.3. Realización del ensayo

12. ENSAYOS EN MATERIALES METÁLICOS

- 12.1. Productos macizos como: lingotes, barras, palanquillas, desbastes y brutos de forja
 - 12.1.1.Lingotes
 - 12.1.2.Desbastes y brutos de forja
 - 12.1.3.Barras
 - 12.1.4.Palanquillas
- 12.2. Piezas moldeadas
- 12.3. Piezas forjadas, prensadas o estampadas
- 12.4. Productos laminados y extruídos
 - 12.4.1.Ensayo de chapas
 - 12.4.2.Ensayo de tubos
- 12.5. Ensayo de ejes y vástagos
- 12.6. Diferentes ensayos de mantenimiento
 - 12.6.1.Ejes de ferrocarril
 - 12.6.2.Raíles de ferrocarril
 - 12.6.3.Bulones y tornillos
 - 12.6.4.Elemento estructural aeronáutico

13. ENSAYO DE MATERIALES NO METÁLICOS

- 13.1. Materiales compuestos de fibra de carbono
 - 13.1.1.Ensayo por contacto
 - 13.1.2.Ensayo por inmersión
- 13.2. Detección de agua en estructuras de panal de abeja (honey-comb)
 - 13.2.1.Ensayo por contacto
 - 13.2.2.Ensayo por inmersión

14. ENSAYOS ESPECIALES

- 14.1. Ensayos de inmersión
- 14.2. Técnicas de ensayo
 - 14.2.1.Impulso-eco
 - 14.2.2.Transmisión
 - 14.2.3.Placa reflectante

- 14.2.4. Automático con representación C
- 14.3. Medidores de espesores
 - 14.3.1. Bloques de calibración
 - 14.3.2. Calibración con equipos analógicos y digitales
 - 14.3.3. Medida de espesores en superficies curvas

15. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO Y FORMA DE UN REFLECTOR

- 15.1. Determinación de la forma. Ecodinámica
- 15.2. Determinación de un reflector mayor que la sección transversal del haz
 - 15.2.1. Determinación de la longitud
 - 15.2.2. Determinación de la anchura
 - 15.2.3. Determinación de la altura o profundidad
 - 15.2.4. Técnica TOFD para discontinuidades internas
 - 15.2.5. Técnica TOFD para discontinuidades abiertas a la superficie

ANEXOS

- ANEXO I. Densidad, velocidad e impedancia acústica en materiales metálicos
- ANEXO II. Densidad, velocidad e impedancia acústica en materiales no metálicos
- ANEXO III. Densidad, velocidad e impedancia en líquidos y en aire
- ANEXO IV. Senos trigonométricos de los ángulos
- ANEXO V. Ángulos de la onda transversal refractada en los materiales de prueba y ángulos incidentes en plásticos
- ANEXO VI. Ensayos por contacto: palpadores angulares. Ondas longitudinales
- ANEXO VII. Ángulos de incidencia en agua (longitudinal)
- ANEXO VIII. Ángulos de incidencia en agua (transversal)

BIBLIOGRAFÍA

GENERALIDADES E HISTORIA

La primera utilización importante conocida de los ultrasonidos fue realizada por Langevín durante la Primera Guerra Mundial, para sondeos subacuáticos.

En 1929 el profesor S. Sokolov descubre que las vibraciones ultrasónicas pueden penetrar en grandes espesores de metal, y ser transmitidas por alambres a grandes distancias.

Entonces pensó, que podrían utilizarse para descubrir imperfecciones en los metales. Esto le llevó a idear un instrumento que denominó Defectoscopio. Aplicó su aparato al estudio de las cualidades estructurales de los metales, y del temple de los aceros.

También lo utilizó para revelar la presencia de objetos contenidos en bloques opacos de material.

Para ello ideó un aparato que enviaba sobre una pantalla especial, la imagen de los objetos ocultos que podían encontrarse en los cuerpos metálicos.

Hasta 1942, con el descubrimiento y aplicación del sonar por Firestone, para localización de buques, y medida de profundidades marinas, no empezó el despegue en la utilización de los ultrasonidos en la detección de heterogeneidades en los materiales con la técnica de impulso-eco.

APLICACIONES

Son tantas las aplicaciones de los ultrasonidos, que la mejor clasificación que se puede hacer, es ateniéndonos a la gama de frecuencias:

- Frecuencias entre 30 y 100 KHz: se utilizan en procesos industriales como: comunicaciones, navegación y pesca, química, biología, soldadura, mecanizado, colada-moldeo.
- Frecuencias entre 100 KHz y 100 MHz: utilizadas en control de calidad, para ensayos de: defectología, metrología y caracterización.
- En construcciones navales y metálicas, para el control de productos semielaborados, y de uniones.
- En la industria metalúrgica, para el control de productos fundidos, forjados y laminados, como por ejemplo: chapas, tubos y alambres.
- En comunicaciones, para el control de material rodante, aeronáutico y vías de comunicación (raíles).
- En instalaciones de potencia, para inspección de recipientes solicitados por presión, y temperaturas elevadas.
- En la industria química, para inspección de instalaciones susceptibles de ser atacadas por sustancias químicas.

1

ULTRASONIDOS

1.1. NATURALEZA DE LOS ULTRASONIDOS

Los ultrasonidos son ondas del mismo tipo que los sonidos audibles, diferenciándose únicamente en la frecuencia de operación y forma de propagación. Los ultrasonidos operan con frecuencias por encima de la zona audible del espectro acústico.

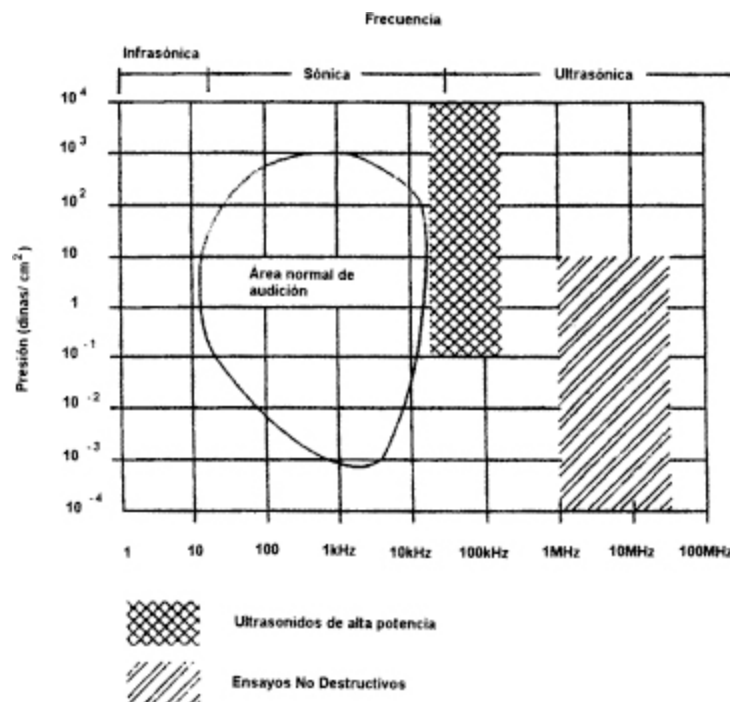


Figura 1.1

En la figura 1.1 se observan tres zonas perfectamente diferenciadas en el espectro acústico:

- **INFRASÓNICA** o sonidos no audibles por el oído humano. Corresponden a esta zona, las oscilaciones cuya frecuencia es menor de 16 Hz/seg.
- **SÓNICA** o sonidos audibles, comprendida en la gama de frecuencias de oscilación, de 16 a 20.000 Hz/seg.

- Una onda acústica dentro de esta gama de frecuencia pudiera no ser audible al no tener el mínimo de presión acústica necesaria para ser registrada por el oído, o por sobrepasar la presión máxima soportable por los mecanismos físicos del oído.
- Para conocer cuando una onda sonora se aproxima al máximo de frecuencia soportable por el oído (20 KHz), es el momento en que el sonido empieza a molestar en el oído: “Umbral del dolor”.
- ULTRASÓNICA, es aquella donde la frecuencia de las oscilaciones es superior a 20 KHz.

Las frecuencias más altas logradas hasta el momento son del orden de 1.000 MHz.

Las frecuencias utilizadas en los ensayos para el control de heterogeneidades en ensayos de materiales metálicos se realizan con frecuencias generalmente comprendidas entre 1 y 25 MHz.

1.2. PRODUCCIÓN Y TRANSMISIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

Cuando un medio elástico es perturbado por una acción instantánea o continua, hace que esta perturbación se propague a través del referido medio, mediante lo que se llama movimiento ondulatorio u onda.

Esta propagación no supone traslación real de la materia, sino transmisión de energía. Así, cada partícula afectada por la perturbación (figura 1.2), se desplaza de su posición de equilibrio, tendiendo a volver a la posición de reposo, y

sobrepasando la misma pendularmente en un movimiento vibratorio armónico.

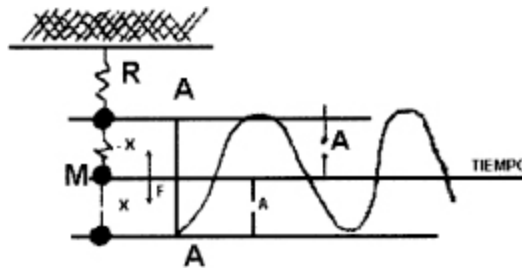


Figura 1.2

Como se ve en la figura tenemos una masa (M), sujeta a un punto fijo mediante un resorte R.

Si aplicamos a la masa una fuerza (F), haciendo que dicha masa se separe de su posición de equilibrio (punto 0), se producirá un desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza.

La relación entre el desplazamiento y la fuerza aplicada, viene expresada por la ley de Hooke:

$$F = - k X$$

donde:

F = fuerza deformadora.

K = constante elástica.

X = desplazamiento del punto de equilibrio.

Una vez conseguido el desplazamiento, y cesada la acción de (F), vemos que la masa (M) vuelve, y aún rebasa su posición de equilibrio hasta una distancia (-X), debido a la inercia de (M).

La misma fuerza del resorte comprimido, hace que (M) vuelva a su posición de equilibrio, y la rebase hasta (X), repitiéndose este proceso indefinidamente, aunque en la práctica,

y debido a la resistencia que opone el medio externo (rozamiento), cesa al cabo de un cierto tiempo.

El movimiento vibratorio armónico, se define por los parámetros: Amplitud (A), y Frecuencia (f).

Asimismo, los parámetros que definen la propagación real a través de un medio son: Longitud de onda (λ), y Velocidad acústica (C).

Todos estos parámetros tipifican el movimiento ondulatorio, y la transmisión sónica. Esta transmisión sónica, se realiza por la transmisión de energía de unas partículas a sus adyacentes, mediante sus enlaces elásticos; en la figura 1.3, vemos la imagen de un cuerpo elástico.

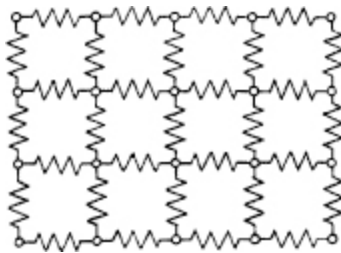


Figura 1.3

1.3. PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

Como hemos visto en el punto anterior, la transmisión sónica se realiza de unas partículas a sus adyacentes mediante sus enlaces elásticos, por tanto, es necesario un soporte material, que puede ser sólido, líquido, o gaseoso;

de lo cual se deduce que no existe transmisión sónica en el vacío.

Como caso sencillo de propagación de ondas, tenemos el ejemplo del diapasón (figura 1.4).

Cuando el mazo golpea el diapasón, éste vibra y genera una perturbación en el medio que le rodea, en este caso el aire (figura 1.4).



Figura 1.4

La perturbación se propaga por el aire hasta el oído del que escucha. La membrana del tímpano lo receptiona y transmite al cerebro, el cual lo convierte en señal sensitiva.

Análogamente, en el ensayo ultrasónico, un corto impulso de corriente eléctrica golpea a un vibrador (cristal), el cual vibra como lo hacia el diapasón (figura 1.5).

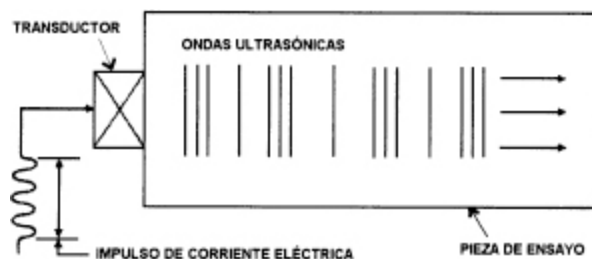


Figura 1.5

El haz sónico que sale del cristal, se transmite a través de un medio de acoplamiento (aceite, silicona, etc.), hasta la

parte frontal de la pieza en ensayo.

En la figura, vemos las ondas ultrasónicas propagándose por la pieza.

En el punto y figura 1.2, estudiamos el comportamiento de una partícula material o cuerpo simple. Ahora analizaremos el comportamiento de un grupo de partículas, átomos o moléculas mostradas en la figura 1.6.

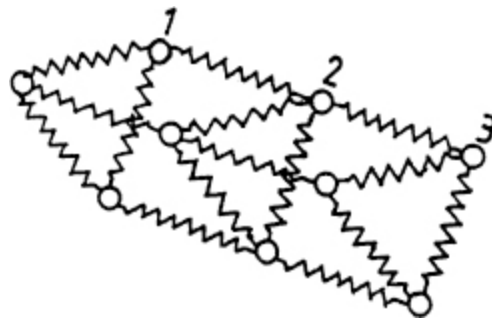


Figura 1.6

Tenemos tres partículas en cada uno de los planos 1, 2 y 3, unidas entre sí, y a su vez, con las del plano adyacente, mediante fuerzas elásticas.

A las partículas del primer plano, las sometemos a un esfuerzo de tracción o compresión por debajo de su límite elástico. Al estar unidas entre sí mediante fuerzas elásticas, cada una transmitirá a las del plano siguiente, el mismo esfuerzo de tracción o compresión.

Si la unión entre partículas fuera no elástica, comenzaría el movimiento al unísono, permaneciendo constantemente en el mismo estado de movimiento, o sea, en la misma fase.

Cuando se trata de un material elástico (en mayor o menor grado, todos los materiales son elásticos), el movimiento

requiere un cierto tiempo para ser transmitido de un plano al siguiente, y de éste al siguiente; es decir, los planos sucesivos alcanzan el estado de movimiento con un retardo de fase.

En la figura 1.7 vemos la imagen instantánea de la sección en un modelo elástico, donde la onda se propaga de izquierda a derecha, y nos permite observar, como el cambio de fase en los distintos planos, crea zonas en donde las partículas están muy próximas unas a otras (zonas de compresión), y otras zonas donde las partículas están más separadas (zonas de dilatación).

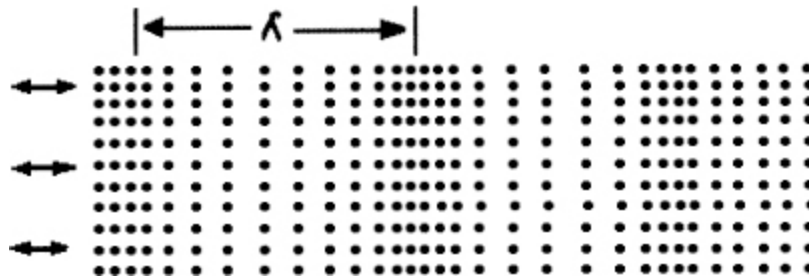


Figura 1.7

La figura nos muestra, las zonas de compresión consecutivas, al igual que las de dilatación, las cuales conservan una misma distancia (longitud de onda).

1.4. PARÁMETROS DE LAS ONDAS SONORAS

- Amplitud (A): es el desplazamiento máximo de la partícula de su posición de equilibrio.
- Frecuencia (f): es el número de oscilaciones completas que la partícula realiza por segundo. Se mide en ciclos/seg.

1 c/s = 1 Hertzio (Hz/s). En ultrasonidos, las frecuencias utilizadas son mucho más altas, por lo que se hace necesario utilizar los múltiplos del Hertzio:

Kilohertzio (KHz) = 1.000 Hz

Megahertzio (MHz) = 1.000.000 Hz

- Longitud de onda (λ): es la distancia entre dos planos de partículas que se encuentran en el mismo estado de movimiento (figura 1.7). La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia:
 $\lambda = C / f$.
- Velocidad acústica (C): es la velocidad de propagación de la onda acústica a través del medio. Es constante y característica de cada material, sea cual sea la frecuencia. En los metales sobre todo, podemos afirmar que es constante, ya que las mínimas variaciones debidas a temperatura y presión, son despreciables. No ocurre lo mismo en líquidos y gases, ya que en estos medios, la velocidad variará en función de la presión, y sobre todo de la temperatura.
- La velocidad acústica es igual al producto de la frecuencia por la longitud de onda ($C = f \cdot \lambda$).
- Velocidad máxima de vibración (V): es la velocidad propia de la partícula en su movimiento oscilatorio.
- Presión acústica (p): en los puntos de gran densidad de partículas, la presión es mayor que la normal, mientras que en las zonas dilatadas es menor. El símbolo de la presión instantánea es (p), mientras que al valor máximo de la presión se le designa por (P).

- Fase: es la condición instantánea dentro de una oscilación. Este concepto se comprende fácilmente cuando se comparan dos oscilaciones distintas, (figura 1.8), en la que aparece una diferencia de fase.

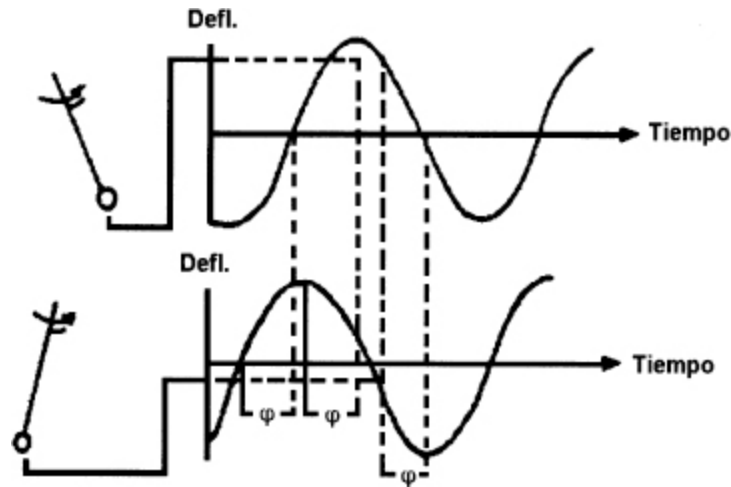


Figura 1.8

- Atenuación: es la disminución de la amplitud de una oscilación, en función del tiempo. La atenuación es debida a la suma de la Dispersión y la Absorción. En la figura 1.9 se aprecia la diferencia en una misma onda sin atenuar; débilmente atenuada; y fuertemente atenuada.

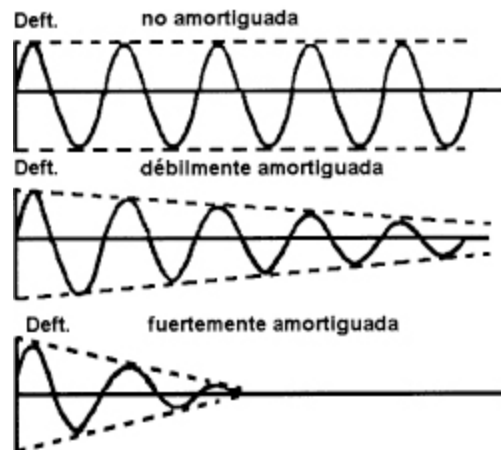


Figura 1.9

1.5. EMISIÓN SÓNICA

La emisión sónica se puede realizar continuamente o por impulsos.

La onda continua es aquella que se emite de una forma continuada, donde la partícula en cada instante tiene unas características de movimiento que varían de forma periódica con el tiempo (figura 1.10.a). Este tipo de onda se utiliza con las técnicas de Resonancia y Transparencia.



Figura 1.10

La onda por impulsos (figura 1.10.b), es la que se emite a intervalos variables de tiempo. Estos impulsos cortos tienen una duración del orden de microsegundos, y el tiempo que transcurre entre impulsos consecutivos es del orden de milisegundos.

De esto se deduce que el sistema de ensayo está listo para recibir señales la mayor parte del tiempo, ya que son unas mil veces más, el tiempo recibiendo, que emitiendo.

La onda por impulso se utiliza en las inspecciones por la técnica de impulso-eco. En la figura 1.11, están representadas las diferentes formas de la onda por impulsos.

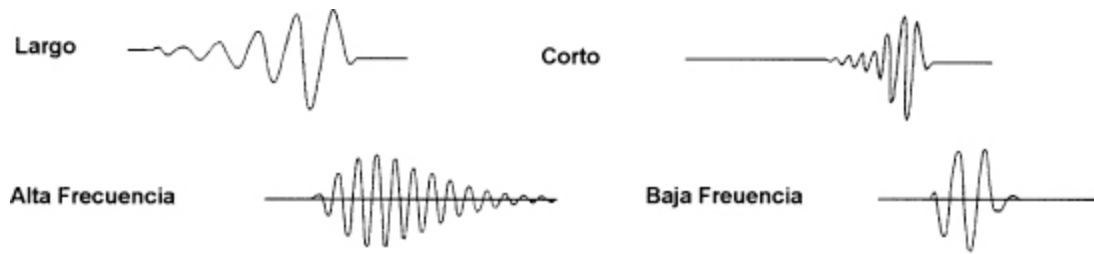


Figura 1.11

Si en un material introducimos por una cara una onda de emisión continua, y midiendo la cantidad de energía que llega a la cara paralela de dicho material después de ser atravesado por la onda, podremos determinar si dentro del material se encuentra algún tipo de discontinuidad, pero no se podrá determinar a la profundidad que se encuentra.

Si por el contrario introducimos una onda por impulsos, sí se podrá determinar el tiempo que tarda en ir y volver, lo cual nos permite no sólo detectar la existencia de cualquier discontinuidad dentro del material, sino medir la distancia a la que se encuentra desde la superficie de entrada.