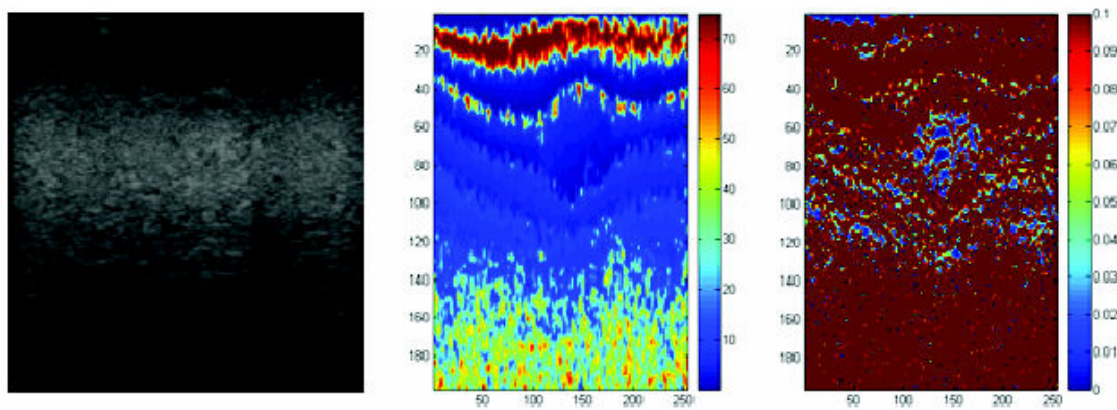


MASTER UNIVERSITARIO DE ESTRUCTURAS 2010-2011

EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA

TECNICAS DE INVESTIGACIÓN POR ULTRASONIDOS



Imágenes de ecografía tradicional (izquierda), desplazamiento (centro) y elastograma de deformación unitaria (derecha) pertenecientes a una captura real de un fantoma de mama.

INDICE

1. Onda. Definición y criterios de clasificación.....	1
2. Ultrasonido.....	3
3. Velocidad de propagación de ondas.....	4
3.1. Factores que afectan a la velocidad de propagación.	
3.1.1. Densidad. Módulo de Young. Coeficiente de Poisson. Módulo de rigidez.	
3.2. Refracción, reflexión e interferencias.	
3.3. Atenuación.	
3.4. Atenuación y amplificación de señales.	
3.5. Impedancia.	
4. Equipo de ultrasonido. Técnicas.....	10
4.1. Clasificación de equipos.	
4.2. Componentes.	
4.3. Transductores.	
4.3.1. Transductor dual.	
4.3.2. Transductor angular.	
4.3.3. Transductor transversal.	
4.3.4. Transductor de inmersión.	
5. Medidas.....	15
5.1. Velocidad ultrasónica en los materiales.	
5.2. Medición de la atenuación ultrasónica.	
5.3. Cálculo de las longitudes de onda características.	
6. Medida y caracterización de las propiedades mecánicas titulares.....	17
7. Aplicaciones de técnicas de ultrasonidos.....	19
8. Referencias.....	19

1. INTRODUCCIÓN

La definición más general establece que la onda consiste en una perturbación que se propaga en el espacio y en el tiempo. Esa perturbación transporta energía de un lugar a otro sin transferencia de materia.

Aunque todas las ondas tienen unas características generales comunes, se pueden agrupar atendiendo a distintos criterios.

Atendiendo a su naturaleza podemos distinguir:

Mecánicas o materiales: requieren de un medio material para su propagación (ejemplo sonido, ondas en cuerdas...)

Electromagnéticas: no requieren de un medio material para su propagación (por ej. la luz se puede propagar en el vacío).

Dependiendo de cómo se generan: Periódicas o No Periódicas.

Según la dirección de la vibración asociada:

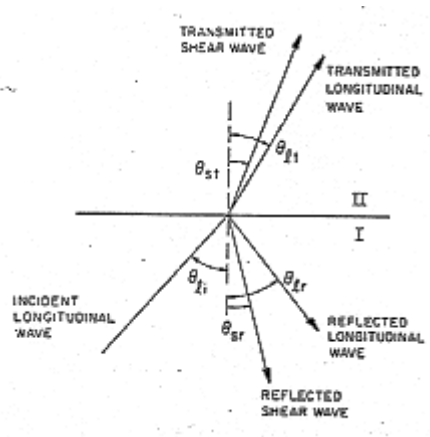
Transversales: la vibración asociada a la perturbación tiene lugar en una dirección perpendicular a la de propagación de la onda.

Longitudinales: la vibración asociada a la perturbación tiene lugar en la misma dirección a la de propagación de la onda.

Ondas de superficie (Rayleigh) tienen un movimiento elíptico de las partículas y viajan a través de la superficie del material. Su velocidad es aproximadamente del 90% de la velocidad de las ondas transversales en el mismo material y la profundidad de penetración es aproximadamente igual a una longitud de onda.

Ondas Lamb tienen una vibración compleja y ocurren en materiales donde el espesor es menor que la longitud de onda del ultrasonido introducido en él, (placas).

Las ondas elásticas, dependiendo del medio en que se propaga, pueden ser de ambas clases. Por ejemplo el sonido es producido por variaciones de presión transversales y longitudinales en sólidos, pero solo longitudinales en líquidos y gases. Cuando cualquiera de estas ondas se enfrenta a un fenómeno de reflexión/refracción puede ocurrir la conversión de un modo de propagación a otro



Un **ultrasonido** es una onda acústica o sonora cuya frecuencia está por encima del espectro audible del oído humano (aproximadamente 20.000 Hz).

Los ultrasonidos son utilizados habitualmente en aplicaciones industriales (medición de distancias, caracterización interna de materiales, ensayos no destructivos y otros); en ingeniería civil, para detectar posibles anomalías y en medicina:

- 1-Control de calidad de los materiales estructurales (END)
- 2-Detección de heterogeneidades
- 3-Determinación de propiedades (caracterización)
- 4-Medida de espesores (metología)

Las vibraciones ultrasónicas tienen las siguientes características:

- Viajan largas distancias en materiales sólidos
- Viajan en haces de sonido bien definidos
- Su velocidad es constante en materiales homogéneos
- Las ondas de vibración son reflejadas en interfases donde las propiedades físicas y elásticas cambian.
- Las ondas de vibración pueden cambiar su modo de vibración o estar sometidas a la conversión del modo en interfases del material.

Para facilitar la comprensión de la técnica de ultrasonidos, resulta imprescindible realizar un repaso a la mecánica de ondas.

2. ULTRASONIDO

Los ultrasonidos son aquellas ondas sonoras cuya frecuencia es superior al margen de audición humano, es decir, 20 KHz aproximadamente. La posterior transmisión de estas ondas depende, en gran medida, del medio.

El sonido no se transmite solo en el aire, sino en cualquier otro material, sea gas, líquido o sólido, pero no se puede propagar en el vacío. Viajan con facilidad en sólidos uniformes y en líquidos de baja viscosidad. Vacíos o gases como aire, los atenúan rápidamente. Generalmente, el sonido se mueve a mayor velocidad en líquidos y sólidos que en gases.

La velocidad con que se propaga depende del material que sirve como medio de transporte. Cualquier alteración de las propiedades del material, como su temperatura, densidad, etc., hace variar la velocidad de propagación, por tanto un aspecto muy importante es caracterizar la velocidad del sonido en el material para poder facilitar el procedimiento de inspección del mismo, (determinar la posición de posibles defectos en el interior del material, propiedades mecánicas, físicas, diferencias en su estructura...).

La inspección por ultrasonido se define como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo mecánico, lo que se busca es establecer relaciones entre los diferentes parámetros de las constantes de propagación y la existencia de posibles defectos en un material. Se obtienen lecturas digitales instantáneas mediante la transmisión del sonido desde un solo lado del material, no requiriéndose, por lo tanto, cortar o destruir las piezas en aquellas situaciones en las que el lado opuesto es de difícil acceso o en las que los micrómetros u otras herramientas de inspección no puedan realizar la medición.

Con esta técnica de inspección, pueden realizarse estudios tanto en materiales homogéneos e isotrópicos como para materiales compuestos, donde resulta algo más complejo debido a que el sonido puede propagarse a distinta velocidad en diferentes partes del objeto de estudio en sí al estar formado por materiales de distintas propiedades elásticas.

Su estudio se rige por las ecuaciones de la elasticidad y la propagación de ondas.

La relación entre la frecuencia (f), longitud de onda (λ) y velocidad (v) viene dada por la ecuación

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

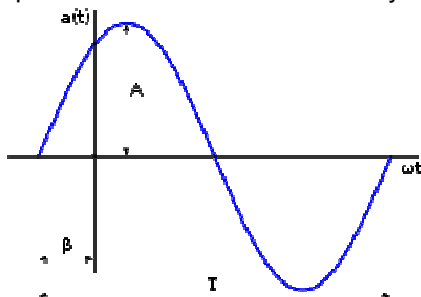
Una longitud de onda larga corresponde a una frecuencia baja, mientras que una longitud de onda corta corresponde a una frecuencia alta.

La frecuencia de una onda de sonido es una medida del número de vibraciones por segundo de un punto determinado. Puede calcularse midiendo el tiempo entre dos repeticiones (periodo) y luego calcular la frecuencia (f) recíproca de esta manera mediante la ecuación

$$f = \frac{1}{T}$$

T: periodo de la señal

La velocidad es la rapidez a la cual las vibraciones ultrasónicas pasan a través de los materiales. Depende de las propiedades elásticas del material y del modo de vibración.



3. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS

Como ya se ha indicado antes, la velocidad con que se propaga la onda ultrasónica va a depender del material y nos dará la información necesaria para determinar características y propiedades del mismo. Es por ello que debe hacerse una medición cuidadosa y ver los factores que le afectan.

3.1. Factores que afectan a la velocidad de propagación.

La velocidad del sonido varía de forma inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la elasticidad y de la densidad.

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

E : módulo de Young

ρ : densidad

3.1.1. Constantes elásticas. Módulo de Young. Coeficiente de Poisson. Módulo de Rigidez.

El módulo de Young o módulo elástico longitudinal: caracteriza el comportamiento de un material elástico según la dirección en la que se aplica una fuerza siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico. Para un material elástico lineal es una constante y su valor se define mediante el coeficiente de la tensión y de la deformación

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

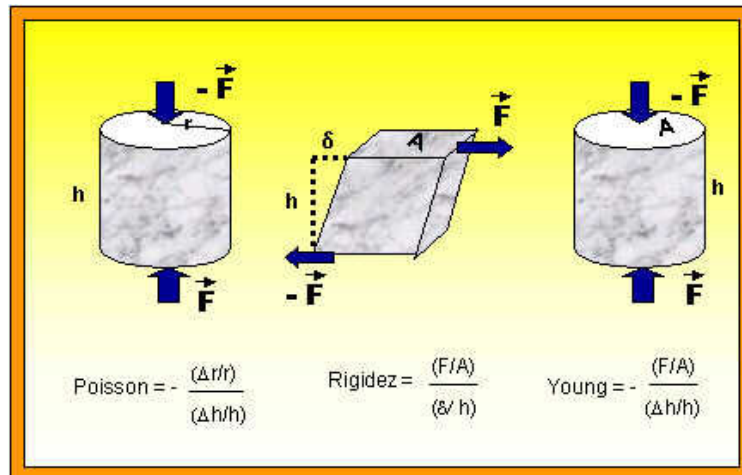
El coeficiente de Poisson proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. Para materiales isotropos, es la razón entre el alargamiento longitudinal producido dividido por el acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada.

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}}$$

El módulo de cizalladura o de rigidez (o módulo de elasticidad transversal) caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico cuando se aplican esfuerzos cortantes. Para un material isótropo elástico lineal el módulo de elasticidad transversal está relacionado con el módulo de Young y el coeficiente de Poisson mediante la relación:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{\tau_{ij}}{2\varepsilon_{ij}}$$

τ_{ij} , ε_{ij} son respectivamente la tensión tangencial y la deformación tangencial sobre el plano formado por los ejes X_i y X_j .



El comportamiento de un material elástico homogéneo e isótropo (presenta el mismo comportamiento mecánico para cualquier dirección de estiramiento alrededor de un punto), queda caracterizado por sólo dos constantes elásticas. La relación entre estas constantes elásticas de un material isótropo lineal es la siguiente:

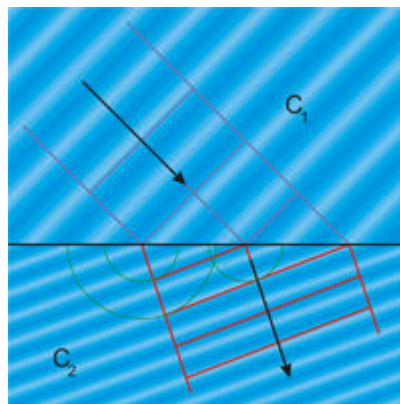
$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad E = 2G(1 + \nu) \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

La ecuación de comportamiento que relaciona la velocidad de propagación de onda con las características elásticas del material es

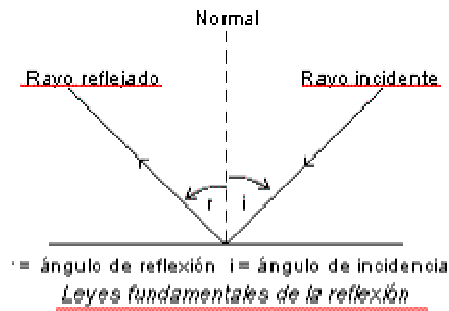
$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

3.2. Refracción, reflexión e interferencias

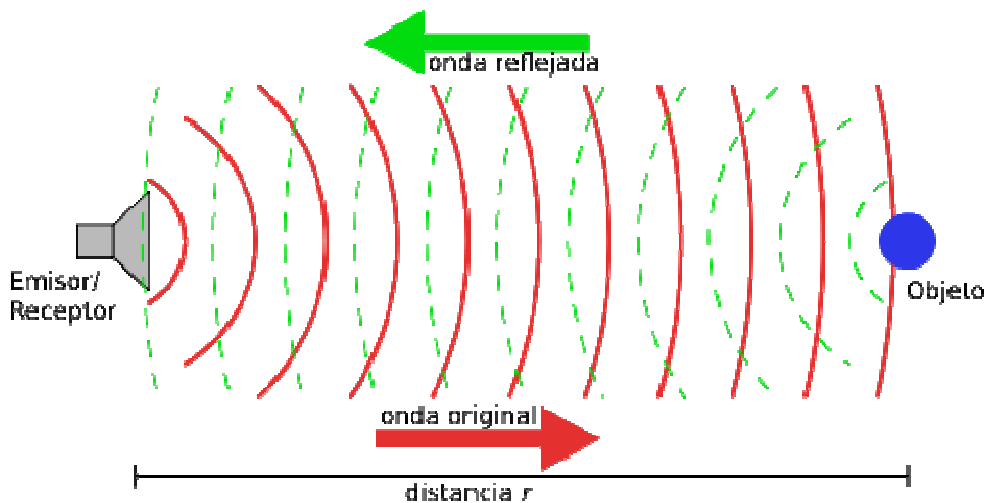
Cuando el sonido se desplaza en un medio de densidad uniforme, avanza en línea recta. Sin embargo, al pasar de un medio a otro se produce refracción, desviación de las ondas de su trayectoria original, el ángulo de refracción ya no es igual al de incidencia. La refracción también puede producirse dentro de un mismo medio, cuando las características de este no son homogéneas. Este fenómeno es debido a que al cambiar de medio cambia la velocidad de propagación del sonido.



El sonido también está afectado por la Reflexión, y cumple la ley fundamental de que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.



Una onda se refleja (rebota al medio del cual proviene) cuando se encuentra con un obstáculo que no puede traspasar ni rodear.



La reflexión no actúa igual sobre las altas frecuencias que sobre las bajas. La longitud de onda de las bajas frecuencias es muy grande (pueden alcanzar los 18 metros), por lo que son capaces de rodear la mayoría de obstáculos; en cambio las altas frecuencias no rodean los obstáculos por lo que se producen sombras detrás de ellos y rebotes en su parte delantera.

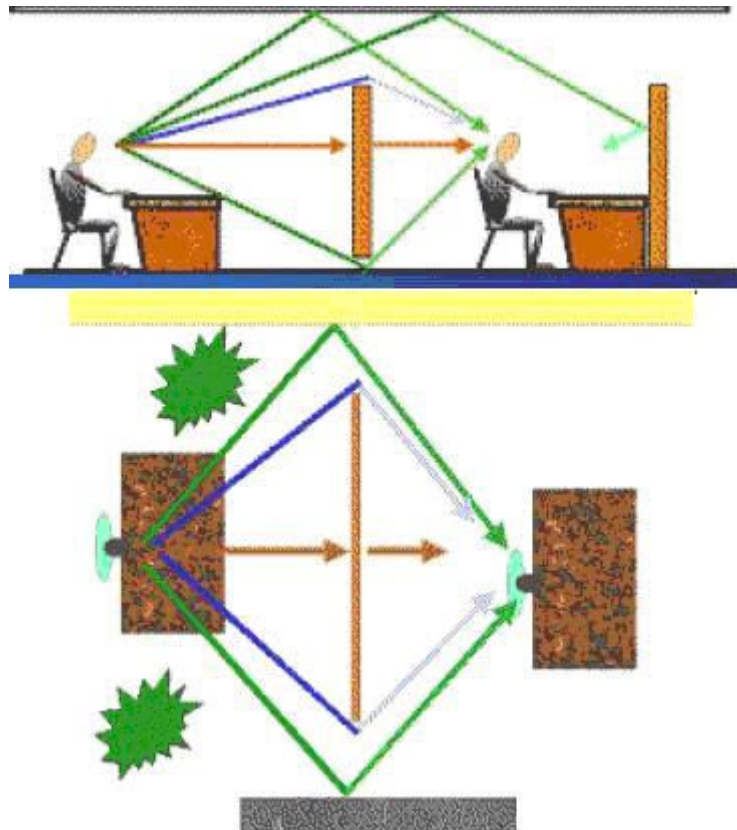
El tamaño del obstáculo y la longitud de onda determinan si una onda rodea el obstáculo o se refleja en la dirección de la que provenía. Si el obstáculo es pequeño en relación con la longitud de onda, el sonido lo rodea (difracción), en cambio, si sucede lo contrario, el sonido se refleja (reflexión).

La difracción se puede producir bien porque la onda sonora encuentra a su paso un pequeño obstáculo y lo rodea o bien porque tope con un pequeño agujero y lo atraviesa.

De acuerdo con el Principio de Huygens, cuando la onda incide sobre una abertura o un obstáculo que impide su propagación, todos los puntos de su plano se convierten en fuentes secundarias de ondas, emitiendo nuevas ondas, denominadas ondas difractadas.

La cantidad de difracción estará dada en función del tamaño de la propia abertura y de la longitud de onda.

- Si una abertura es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño. La onda se propaga en líneas rectas o rayos, como la luz.
- Cuando el tamaño de la abertura es menor en comparación con la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y el sonido se comporta como si fuese una luz que procede de una fuente puntual localizada en la abertura.

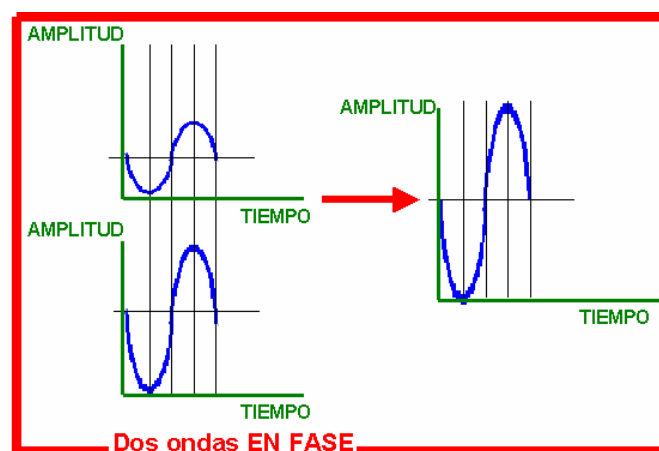


Línea azul representa la **difracción** del sonido; la verde, la **reflexión** y la roja, **refracción**.

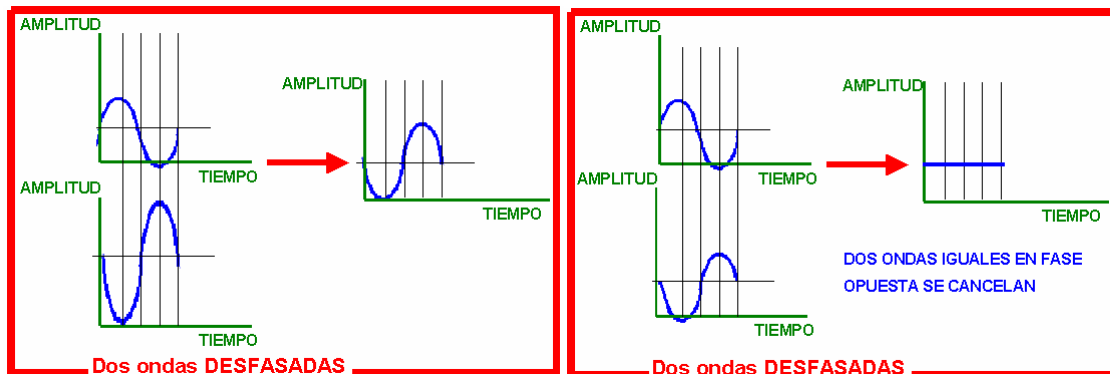
En mecánica de ondas, la interferencia es lo que resulta de la superposición de dos o más ondas, resultando la creación de un nuevo patrón de ondas.

Aunque la acepción más usual para interferencia se refiere a la superposición de dos o más ondas de frecuencia idéntica o similar. El principio de superposición de ondas establece que la magnitud del desplazamiento ondulatorio en cualquier punto del medio es igual a la suma de los desplazamientos en ese mismo punto de todas las ondas presentes. Esto es consecuencia de que la Ecuación de onda es lineal, y por tanto si existen dos o más soluciones, cualquier combinación lineal de ellas será también solución.

Si la cresta de una onda se produce en el punto de interés mientras la cresta de otra onda también está arriba de ese punto (es decir, si ambas ondas están en fase), ambas ondas se interferirán constructivamente, resultando en una onda de mayor amplitud.

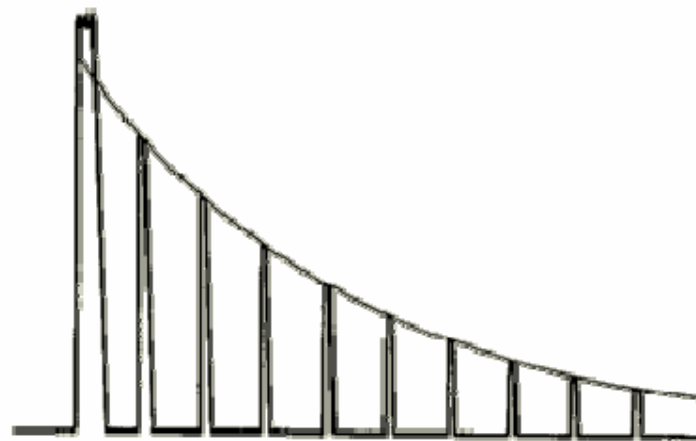


Si por el contrario, las ondas están desfasadas (es decir, los máximos no coinciden en el tiempo), ambas ondas se interferirán destructivamente, resultando en una onda con amplitud menor o incluso nula. En el caso más extremo, dos ondas de igual frecuencia y amplitud en contrafase (desfasadas 180°), que se interfieren, se anulan (interferencia destructiva).



3.3. Atenuación

La atenuación es la pérdida progresiva de la energía de la señal ultrasónica. Como consecuencia, en la técnica pulso-eco, el pico correspondiente a la reflexión en la superficie posterior será cada vez de una amplitud menor a medida que la onda realiza viajes de ida y vuelta.



Atenuación de la señal ultrasónica

El cambio de amplitud de una onda plana en decadencia viene dado por la expresión

$$A = A_0 * e^{\alpha z}$$

A_0 : es la amplitud de la onda propagada no atenuada en alguna posición.

A : es la amplitud reducida después de que la onda haya viajado una distancia z desde la posición inicial.

α : es el llamado coeficiente de atenuación de la propagación de la onda en la dirección z .

Las unidades de este coeficiente son neperes/metro (Np/m). Estas unidades se pueden convertir a decibelios/metro (dB/m) dividiendo por 0,1151. El decibelio es una unidad más común para relacionar las amplitudes de dos señales.

Generalmente, la atenuación es proporcional al cuadrado de la frecuencia del sonido.

Los valores fijados de atenuación son a menudo proporcionados por una frecuencia individual, o un valor medio de atenuación de muchas frecuencias.

El valor actual del coeficiente de atenuación para un material dado depende en gran medida de la manera en la que se fabrica el material. Por lo tanto, los valores dados de atenuación solo dan una vasta indicación de la atenuación. Por lo general, obtener un valor fiable de la atenuación solo es posible determinando experimentalmente evaluando las múltiples reflexiones de la superficie posterior interna.

Se mide el número de decibelios entre dos señales adyacentes y este valor se divide por el intervalo de tiempo que hay entre las dos. Este cálculo da un coeficiente de atenuación en decibelios por unidad de tiempo, U_t , valor que se puede convertir a nepers/longitud mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{0.1151}{V} U_t$$

v : velocidad en metros por segundo
 U_t : en decibelios por segundo.

Para medios homogéneos las mediciones de atenuación deben corregirse tomando en cuenta la difracción que experimenta el haz ultrasónico cuando se propaga a través del material bajo examen. Esta corrección debe incluir las pérdidas de energía que se producen en el medio empleado para acoplar la muestra al transductor.

Para medios no-homogéneos los mecanismos de dispersión son variados. Esta puede ser causada por:

- la presencia de las fronteras de la muestra (dispersión geométrica)
- la dependencia de las constantes del material, densidad, módulos elásticos, constantes dieléctricas, frecuencia...
- dispersión de las ondas por inhomogeneidades finas densamente distribuidas en el material
- la absorción o disipación de la energía de la onda en forma de calor u otro proceso irreversible
- la dependencia de la velocidad de la onda de la amplitud (dispersión no-lineal). Esta última forma de dispersión es propia de las ondas de gran amplitud y, en general, no se presenta en el caso de los ensayos no-destructivos.

El fenómeno de la dispersión trae consigo una dependencia de las velocidades de propagación de una onda con la frecuencia, en estas circunstancias es necesario definir dos tipos de velocidades:

velocidad de fase: la que tiene una onda monocromática desplazándose por el medio
velocidad de grupo: la velocidad con que se propaga la envolvente de un paquete de ondas.

Igualmente la atenuación debida a absorción, dispersión o divergencia del haz, hace que la señal de eco producida por una reflexión sea difícil de identificar en los casos en que, por su nivel o por la diferencia de impedancias acústicas entre el medio y la superficie reflectante, se confunde con rebotes espurios o no se distingue de la señal que conforma la zona ciega o zona muerta del transductor.

3.4. Atenuación y amplificación de señales.

Si las intensidades de dos señales son I_1 e I_2 , la relación entre ellas se puede expresar como

$$\frac{I_1}{I_2} = 10 N_B \quad N_B = \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$$

N_B : es el número de belios.

El número de decibelios, NDB, es simplemente diez veces ese número:

$$N_B = 10 \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$$

3.5. Impedancia acústica

La impedancia acústica es la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica. La impedancia acústica de un material (Z) se define como el producto de su densidad (ρ) por la velocidad acústica (V)

$$Z = V * \rho$$

La impedancia acústica es importante para la determinación de la transmisión acústica y de la reflexión en el límite o frontera entre dos materiales que tienen diferentes impedancias. Es un aspecto importante para el diseño de transductores ultrasónicos y también para evaluar la absorción del sonido en un determinado medio.

$$D = \frac{4Z_1Z_2}{[Z_1 + Z_2]^2} \quad R = \left[\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right]^2$$

4. Equipo de ultrasonido

4.1. Clasificación de equipos

Sin ser estrictos, existen varios parámetros que clasifican tecnológicamente un equipo de ultrasonido. Estos parámetros son

- Potencia
- Frecuencia
- Longitud de la señal (Sistemas Continuo o Pulsado)

Según la potencia que generan, dan lugar a una clasificación en grupos de alta y baja potencia. Estas dos áreas relativas deben su división al hecho de si el ultrasonido cambia alguna propiedad del material (alta potencia) o sencillamente solo es utilizado para la medición o diagnóstico (baja potencia).

Frecuencia. Existe una zona de baja frecuencia, intervalo de 25 KHz hasta cercano al MHz. Intervalo medio, cubre de 1 MHz a 10 MHz, donde se ubican los equipos médicos de diagnóstico. Por encima de 10 MHz nos referimos a la alta frecuencia.

Longitud de la señal. Según el tipo de señal que generan los transductores, continua o pulsada. En una señal pulsada, los pulsos pueden tener diferentes longitudes.

4.2. Componentes

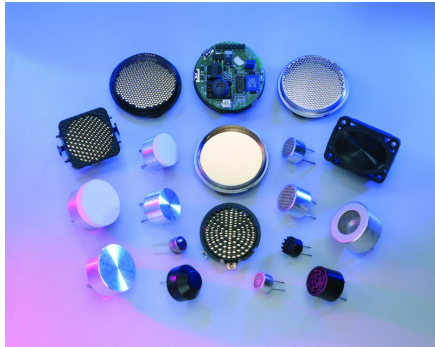
Generador: genera un pulso eléctrico.

Transductor: dispositivo que convierte un tipo de energía en otra, en este caso, energía eléctrica en mecánica y viceversa. Dependiendo del material y la propiedad que se pretenda analizar, se empleará un tipo de transductor u otro, (con una determinada frecuencia y diámetro). En el equipo ultrasónico seleccionamos la frecuencia del transductor que se va a utilizar o la que más se aproxime, para ampliar el sistema de filtro del equipo.

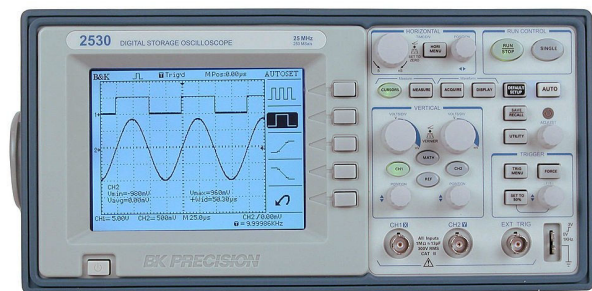
Medio acoplante para mejorar la transmisión de ondas ultrasónicas entre el transductor y el material.

La onda atraviesa el material y vuelve al transductor y éste genera una señal eléctrica. El pulso acústico se refleja parcialmente en el material y se va atenuando a medida que viaja a través del mismo.

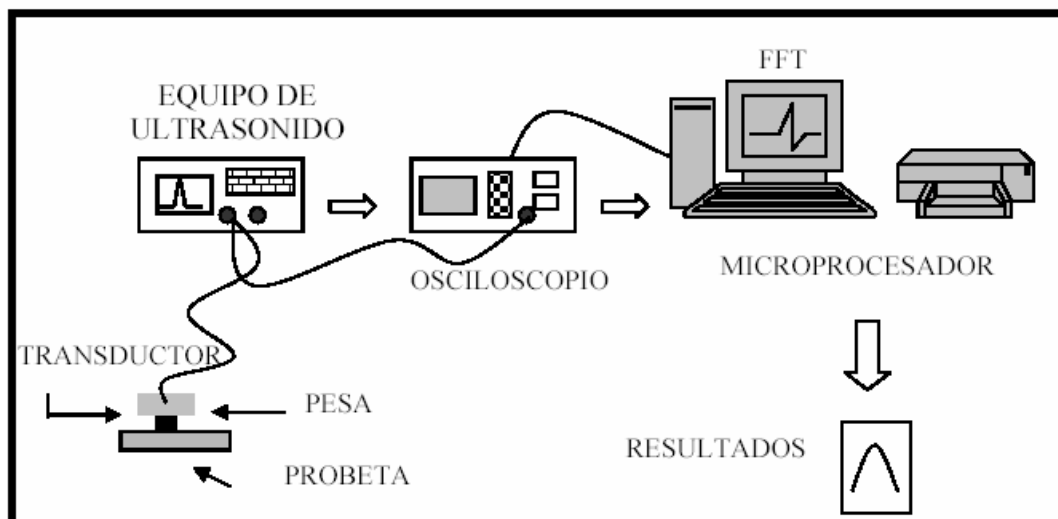
Osciloscopio: equipo auxiliar, instrumento de medición electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo. Se conecta al equipo de ultrasonido para obtener una señal digitalizada de la interacción de la onda con el material de estudio.



Transductores



Osciloscopio



Esquema de conexión de equipos.

Técnicas:

- Pulso-eco: mide tiempo de vuelo e intensidad reflejada
- Transmisión: mide intensidad transmitida

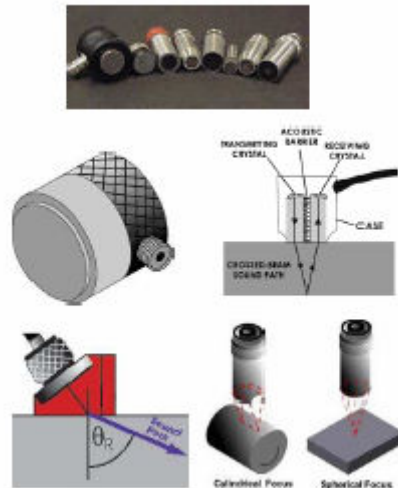
Según las propiedades que queramos estudiar, utilizaremos una técnica u otra.

Técnicas de inspección por ultrasonidos
Elisa Padilla Malo de Molina
END 2010-2011

4.3. Transductores

Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra. Un transductor ultrasónico convierte energía eléctrica en energía mecánica, en forma de sonido y viceversa.

Tipos: de contacto, (dual, angular, transversal); de inmersión, (focalizados).

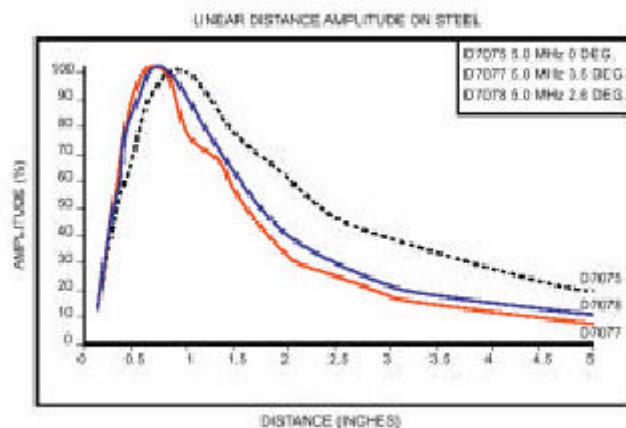


4.3.1. Transductor dual

Utilizan elementos separados como emisores y receptores, montados con cabezas lineales, usualmente en ángulo de corte.

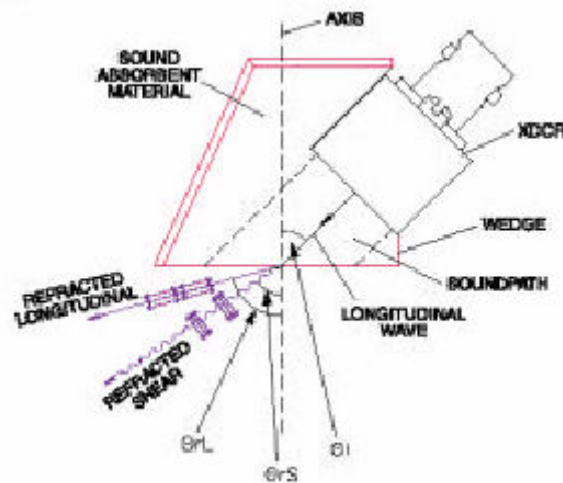
Esta configuración mejora la resolución cerca de la superficie eliminando los problemas de recuperación del golpe sonoro principal. Adicionalmente, el diseño de emisores cruzados, provee de un pseudo-foco que hace a los elementos duales más sensibles a los ecos de reflectantes irregulares como la corrosión o superficies rugosas.

Una consecuencia del diseño de elementos duales, es una curva de amplitud-distancia nítidamente definida. En general, con un decremento en el ángulo de los transductores o con el incremento del tamaño de los mismos, se obtiene un cambio en la distancia pseudo-focal y un incremento en el rango de uso, como se muestra en la figura



4.3.2. Transductor angular

Los transductores de emisión angular usan el principio de refracción para producir una onda transversal o longitudinal refractada en el material a prueba.



El ángulo de incidencia necesario para producir la refracción deseada (p.e. una onda a 45° en acero) se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\sin(\theta_i)/c_i = \sin(\theta_{rl})/c_{rl} = \sin(\theta_{rs})/c_{rs}$$

θ_i : ángulo de incidencia de la cuña

θ_{rl} : ángulo de la onda longitudinal refractada

θ_{rs} : ángulo de la onda transversal refractada

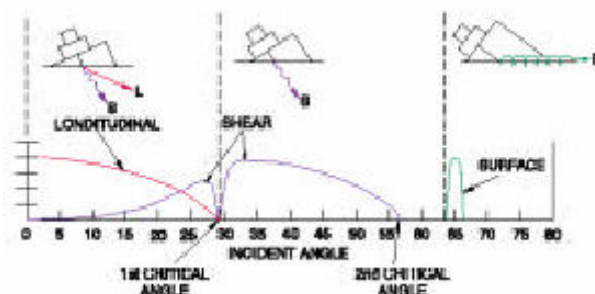
c_i : velocidad del sonido en el material incidente

c_{rl} : velocidad del sonido en el material (ondas longitudinales)

c_{rs} : velocidad del sonido en el material (ondas transversales)

Debido a los efectos de la dispersión de la emisión, esta ecuación no se cumple en bajas frecuencias y con elementos de pequeño tamaño.

La siguiente figura muestra la relación entre el ángulo de incidencia y las amplitudes relativas de la onda refractada longitudinal, transversal y de superficie que pueden ser producidas por una cuña de plástico en el acero.



Las emisiones de estos transductores son usualmente usadas para localizar grietas con una orientación no paralela a la superficie del material a prueba.

4.3.3. Transductor transversal

Los transductores de Onda Transversal de Incidencia Normal incorporan un cristal de ondas transversales en contacto con el forro del propio transductor.

En lugar de usar los principios de la refracción, como con los transductores de emisión angular, para producir las ondas transversales en un material, es el cristal mismo el que produce dichas ondas.

Típicamente estos transductores son usados para hacer medidas de la velocidad transversal de los materiales. Esta medida, junto con la de la velocidad longitudinal, puede ser usada para calcular el ratio de Poisson, el módulo de Young y el módulo transversal, como se hace en las siguientes ecuaciones:

$$\nu = \frac{1 - 2(V_T / V_L)^2}{2 - 2(V_T / V_L)^2} \quad E = \frac{V_L^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad G = V_T^2 \rho \nu$$

ν : coeficiente de Poisson
 V_L : velocidad longitudinal
 V_T : velocidad transversal
 ρ : densidad del material
 E : Módulo de Young
 G : Módulo transversal

Debido a que las ondas transversales no se propagan en líquidos, es necesario usar una unión muy viscosa para hacer medidas con ellos. Cuando se usa este tipo de transductores en aplicaciones de tipo transmisión, es importante que la dirección de la polaridad de estos transductores esté alineada una con otra. Si las polaridades forman un ángulo mayor de 90°, el receptor no recibirá la señal del transmisor.

4.3.4. Transductor de inmersión

Los transductores de inmersión ofrecen principalmente tres ventajas sobre los transductores de contacto:

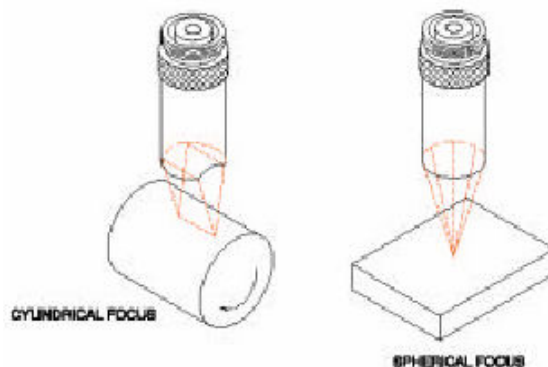
- El acoplamiento uniforme reduce las variaciones de sensibilidad.
- La reducción del tiempo de escaneo.
- El enfoque de los transductores de inmersión incrementa la sensibilidad de los pequeños reflectantes.

Hay tres configuraciones diferentes para transductores de inmersión: sin enfoque ("planos"), de enfoque esférico ("punto") y de enfoque cilíndrico ("línea").

El enfoque se realiza mediante lentes o curvando el propio elemento. La adición de lentes es la manera más común de realizar el enfoque de un transductor.

Un transductor no enfocado se puede usar en aplicaciones generales o para penetrar en materiales delgados, los transductores de enfoque esférico se usan generalmente para mejorar la sensibilidad de pequeñas grietas y los de enfoque cilíndrico se usan típicamente para la inspección de tuberías.

En la siguiente figura se muestran ejemplos de enfoques esférico y cilíndrico.



Técnicas de inspección por ultrasonidos
 Elisa Padilla Malo de Molina
 END 2010-2011

5. Medidas

5.1. Velocidad ultrasónica en los materiales.

Para poder determinar las constantes elásticas es necesario medir la velocidad de propagación de las ondas.

La velocidad puede ser medida determinando el tiempo de vuelo de la onda a través del espesor de la muestra. La velocidad es la distancia recorrida por la onda (que se corresponde al espesor) dividido por el tiempo que tarda la onda en recorrer esa distancia.

En este caso, se utiliza la técnica de pulso-eco (mide tiempo de vuelo), y un mismo transductor envía la onda y la recibe. La onda ultrasónica recorre una distancia igual a dos veces el espesor de la muestra. Por tanto, la velocidad es igual a dos veces el espesor dividido por el tiempo:

$$C_L = \frac{2 \times d}{t}$$

C_L : velocidad de la onda ultrasónica longitudinal

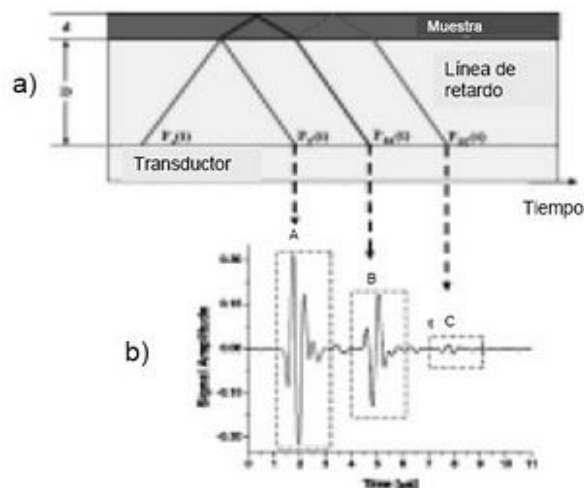
d : espesor del material

t : tiempo que tarda en recorrer la onda el espesor d

Es un gráfico en el que en el eje de abscisas se encuentra la distancia recorrida por la onda y en el eje de ordenadas corresponde a la amplitud. En ella se deben ver siempre al menos dos reflexiones características. Una inicial debida a la superficie sobre la que se apoya el transductor y otra debida a la reflexión de la onda en la superficie posterior.

Los resultados tipo que se obtienen, se muestra en el siguiente gráfico, donde la parte a) representa un esquema del trayecto del pulso a través del transductor, la línea de retardo y la muestra y b) la amplitud de la señal obtenida en el tiempo.

El máximo A, no contiene información de la muestra, ya que es la reflexión ocasionada por la interface entre la línea de retardo y la muestra. El máximo B contiene la información de interés, al analizar esta señal es posible medir la velocidad de sonido en la muestra, la atenuación de la onda y mediante una transformada de Fourier es posible obtener el espectro de frecuencias de la onda transmitida a través de la pieza de estudio.



Para la medida de la velocidad de propagación se utiliza el desfase temporal existente entre la onda incidente y la onda que atraviesa la muestra de prueba. Este desfase es producido por el retardo que sufría la onda al atravesar el material, de forma que conocido su espesor (d) es inmediato obtener el valor de la velocidad.

5.2. Medición de la atenuación ultrasónica

Para medir la atenuación de la señal ultrasónica, se comprueba la pérdida de energía de la onda ultrasónica, es decir, observando la disminución de la amplitud de la onda a medida que aumenta la distancia recorrida por ella.

5.3. Cálculo de las longitudes de onda características

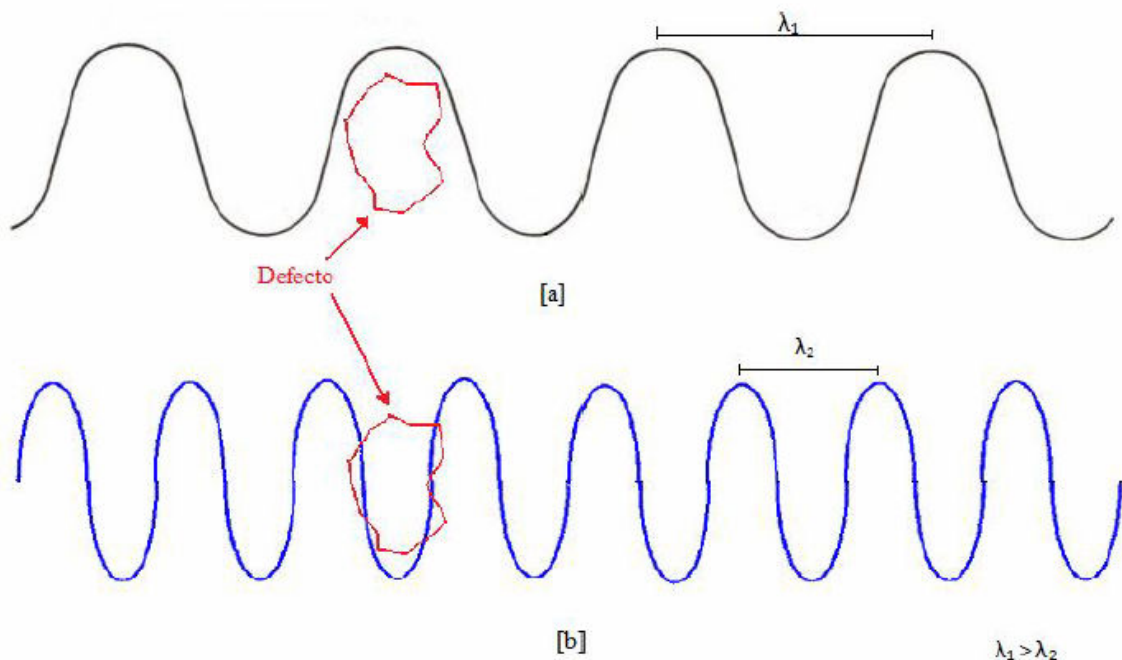
Obtenida la velocidad, continuación se indica como se calculan las longitudes de onda características para cada frecuencia y se estudia su relación con la atenuación que sufre la onda.

Las longitudes de onda se calculan mediante la siguiente fórmula:

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

Como se deduce de la fórmula, para frecuencias grandes, la longitud de onda es muy pequeña. Por tanto la onda se atenúa más porque intercepta más obstáculos que con una longitud de onda mayor. Y al contrario, para una frecuencia pequeña, la longitud de onda es grande y se atenúa menos.

Como se puede observar en la figura, con una longitud de onda relativamente grande, se pueden pasar por alto defectos u obstáculos. Sin embargo, con una longitud de onda menor, un defecto del mismo tamaño es interceptado por la onda.



6. Medida y caracterización de las propiedades mecánicas titulares

Una de las aplicaciones de los estudios con ultrasonidos es en el campo de la medicina.

Un gran número de patologías se asocian al cambio de rigidez de los tejidos, de ahí la importancia de la aplicación de ultrasonidos.

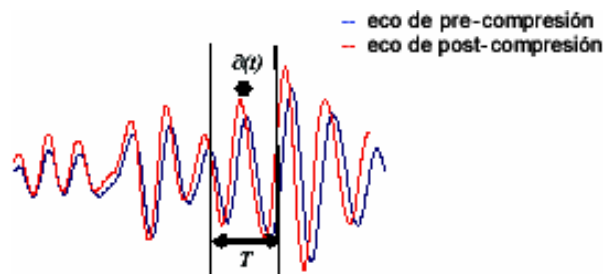
La técnica de medición de las características elásticas de los tejidos por ultrasonidos, se denomina “elastografía por ultrasonidos”, y a la imagen de elasticidades obtenidas se le llama “elastograma”.

Esta técnica está basada en la estimación de los desplazamientos de los tejidos, sometidos a una compresión mecánica externa. Los elastogramas proporcionan información de las características elásticas como las deformaciones unitarias axiales, el módulo de Young o las relaciones de Poisson.

Los tejidos corporales son sustancias por lo general anisotrópicas. La respuesta de éstos frente a una deformación aplicada es, también en general, viscoelástica. Sin embargo, para pequeñas deformaciones (de hasta el 10%), los geles y los tejidos exhiben una relación lineal entre tensión y deformación. Por lo tanto, para pequeñas deformaciones de hasta el 10% y con las hipótesis de isotropía, homogeneidad y elasticidad lineal, la respuesta de los tejidos a los estímulos externos puede modelarse por dos constantes: el módulo de Young E , y la relación de Poisson con las ecuaciones

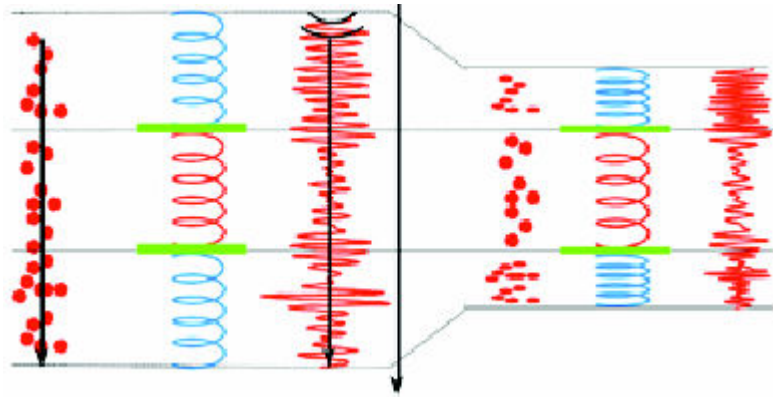
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}}$$

Cuando las estructuras del órgano o tejido se deforman, los puntos que lo forman se acercan a la superficie del transductor de ultrasonidos debido a la compresión. De esta forma, las ondas de ultrasonido que se reciben lo hacen llegando un poco antes, y los ecos quedan aparentemente ‘comprimidos’.

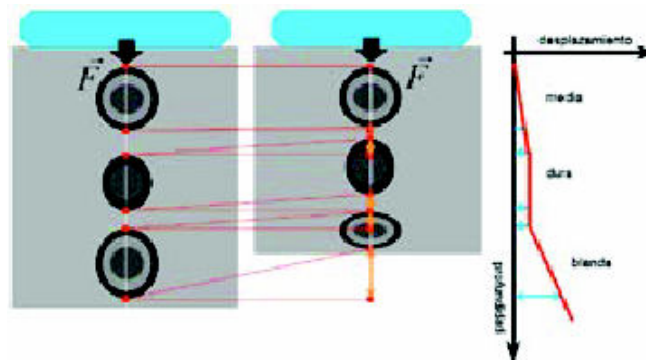


La deformación unitaria se calcula en cada punto de la imagen midiendo el desplazamiento δ entre puntos semejantes de las líneas de ultrasonido y dividiéndolo por unidad de longitud T . Lo que es lo mismo, calculando el gradiente axial de los desplazamientos.

A continuación se aporta una ilustración de cómo se ven modificadas las señales de ultrasonido cuando se realiza una compresión en un tejido con diferentes regiones de distinta elasticidad. En el gráfico, de izquierda a derecha, antes y después de realizar la compresión. El resorte rojo simboliza una dureza inmersa en una región más elástica (azul).



Existe una relación entre los desplazamientos de las distintas regiones de la muestra y su elasticidad. Las regiones que experimentan menos desplazamiento son las más duras, mientras que las zonas más blandas son las que más se deforman y sufren mayor desplazamiento de acercamiento entre sí.



las regiones blandas experimentan una elevada pendiente en sus desplazamientos, (deformación unitaria), mientras que en las duras es constante.

En resumen, se estima la imagen de deformaciones unitarias axiales calculando el gradiente de los desplazamientos que los elementos de cada tejido experimentan bajo compresión. Estas estimaciones de los desplazamientos se evalúan a partir de los retrasos en el tiempo de las señales ecográficas de antes y después de la compresión mecánica aplicada y se obtienen, (generalmente, mediante la técnica de procesamiento de señal conocida como correlación cruzada), a partir de las señales de ultrasonido de antes y después de la compresión.

Se pueden emplear otros estimadores para el cálculo de dichos retrasos temporales, tales como el desplazamiento en frecuencia del espectro cruzado o el punto de fase cero de la función de correlación cruzada.

También se pueden utilizar métodos espectrales de potencia, donde el cálculo de la correlación cruzada en el dominio del tiempo se sustituye por el de los cálculos de potencia en el dominio de la frecuencia.

7. Algunas aplicaciones de medición con ultrasonidos.

Las técnicas de ultrasonido, tienen aplicación en muchos y variados campos, a continuación se cita algunos de ellos.

Medicina.

- Diagnóstico de patologías.
- Detección y caracterización de tumores de próstata y mama.
- Detección de arterias dañadas.
- Medición ultrasónica del hueso en mujeres sanas y factores relacionados con la masa ósea.
- Cribado de osteoporosis en atención primaria, ultrasonidos. Grupo Osteoporosis semFYC y SCMFIC.

Estudios forestales.

- Velocidad de propagación del sonido en algunas especies creciendo en Chile y su relación con propiedades físicas.
- Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas.

Ingeniería Civil.

- Optimización del control de la resistencia del hormigón en obra.
- Control de calidad de los materiales estructurales (END).
- Detección de heterogeneidades.
- Determinación de propiedades (caracterización).
- Medida de espesores (metología).

Aplicaciones en microbiología y bioquímica.

- Caracterización de procesos microbiológicos y bioquímicos por ultrasonidos

8. Fuentes documentales.

La mayor parte de la información se ha obtenido de diversas revistas, artículos, estudios y ensayos realizados en diferentes universidades.

www.wikipedia.es

Universidades: Granada, León, Carlos III, Cataluña.

Universidad Austral de Chile, Facultad de Cs. Forestales,

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Consejo estatal de ciencia y tecnología

Paul. E. Mix. Introduction to Nondestructive Testing.

Revista. Medicina clínica.