

END clásica

Evaluación no destructiva y Calidad de Estructuras

Guillermo Rus

Universidad de Granada

2023



ugr

Universidad
de Granada

LABORATORIO
EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA



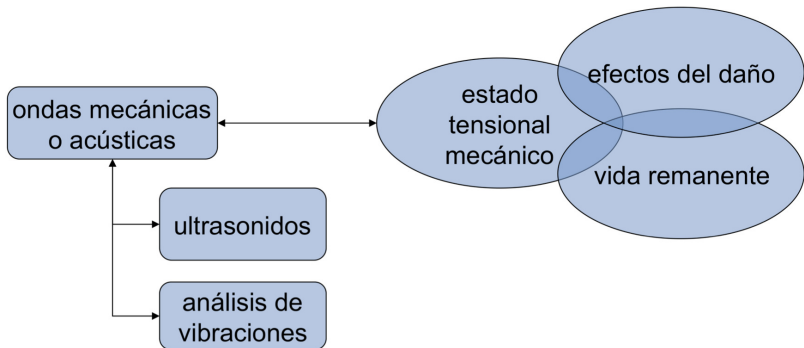
Índice

- 1 Introducción
 - Ultrasonidos como paradigma de END
 - Introducción
- 2 Elasticidad
 - Variables y ecuaciones básicas
 - Ecuación de ondas
 - Ondas
- 3 Transductores
- 4 Técnicas
 - Configuración
 - Usos

Ultrasonidos como paradigma de END

- Es la más desarrollada
- Se utiliza a muchas escalas
- Utiliza la teoría de ondas más completa

Ultrasonidos como paradigma de END



Introducción

Ventajas:

- Sensible a discontinuidades superficiales y subsuperficiales
- Mayor capacidad de penetración
- Sólo se necesita acceso por un lado en pulso-eco
- Alta precisión para determinar posición y tamaño de reflectores
- Preparación de la muestra mínima
- Resultados instantáneos
- Posibilidad de imagen detallada con c-scan
- Otros usos: espesor, propiedades mecánicas.

Inconvenientes:

- Necesita una superficie accesible
- Requiere más entrenamiento que otras técnicas
- Normalmente requiere acoplante
- Dificultades con materiales ásperos, irregulares o pequeños
- Alta atenuación en materiales granulares
- Posible falso negativo en defectos planos perpendiculares a las ondas
- Requiere calibración

Introducción

Historia:

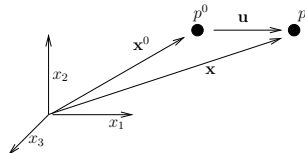
- Antes de la IIGM: sónar
- Sokolov 1929-1935: ultrasonidos para detectar metales
- Japón 1950: ultrasonidos médicos para detectar piedras y tumores
- EEUU: ecografía, ecodoppler
- 1970: damage tolerant, fail safe
- 1980: QNDE

Variables: desplazamiento

Un cuerpo se desplaza cuando las posiciones de sus puntos cambian.

Posición inicial p^0 $\mathbf{x}^0 = \sum_i x_i^0 \mathbf{e}^i$

Posición final p $\mathbf{x} = \sum_i x_i \mathbf{e}^i$



x_i^0 Variables lagrangianas

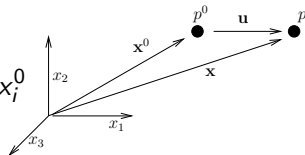
x_i Variables eulerianas

\mathbf{e}^i Vectores unitarios.

Variables: desplazamiento

Desplazamiento \mathbf{u} : vector que une el punto original p^0 con el desplazado p

$$\mathbf{u} = \sum_i x_i \mathbf{e}^i - \sum_i x_i^0 \mathbf{e}^i \Rightarrow u_i = x_i - x_i^0$$

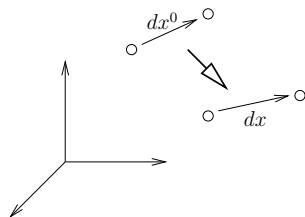


Movimiento: la posición de un punto x_i es una función que depende de la localización (x_1^0, x_2^0, x_3^0) del punto en un instante original y el tiempo t :

$$x_i = x_i(x_1^0, x_2^0, x_3^0, t)$$

Variables: deformación

Un cuerpo está deformado cuando las posiciones relativas entre sus puntos ha cambiado. Para estudiarlo recurrimos al concepto de *distancia* o *longitud* entre dos puntos cercanos. La distancia entre ambos puntos en los estados inicial dL_0 y deformado dL se pueden expresar



$$\begin{cases} dL_0^2 = \sum_i dx_i^0 dx_i^0 \\ dL^2 = \sum_m dx_m dx_m = \sum_{ijm} \frac{\partial x_m}{\partial x_i^0} \frac{\partial x_m}{\partial x_j^0} dx_i^0 dx_j^0 \end{cases}$$

donde se ha desarrollado el segundo término considerando que $dx_m = \sum_i \frac{\partial x_m}{\partial x_i^0} dx_i^0$.

Ecuación de compatibilidad

El cambio de longitud entre los dos estados es

$$dL^2 - dL_0^2 = \sum_{ij} \underbrace{\left[\sum_m \frac{\partial x_m}{\partial x_i^0} \frac{\partial x_m}{\partial x_j^0} - \delta_{ij} \right]}_{2E_{ij}} dx_i^0 dx_j^0$$

E_{ij} : tensor de deformación de Lagrange.

Hipótesis de *pequeños desplazamientos*: $u_i \ll x_i \Rightarrow x_i \simeq x_i^0$,

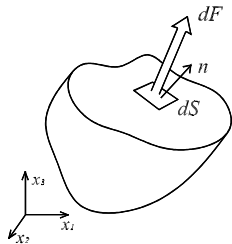
$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left[\sum_m \frac{\partial x_m}{\partial x_i^0} \frac{\partial x_m}{\partial x_j^0} - \delta_{ij} \right] \quad u_i \ll x_i \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})$$

$$u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

Variables: tensión

Para conocer las tensiones en un punto interior dado, cortamos por un plano definido por una dirección perpendicular $\mathbf{n} = n_i$ y que contiene a dicho punto. La resultante que compensa la parte eliminada es $\frac{dF_i}{dS}$ y t_i se denomina tracción.

$$\frac{dF_i}{dS} = t_i$$



El Principio de tensión de Cauchy establece que en el límite cuando $dS \rightarrow 0$ existe una fuerza resultante definida por unidad de área en dicho punto que únicamente depende del punto y de la orientación.

Variables: tensión

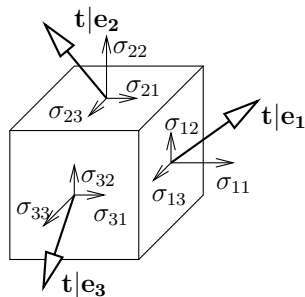
Estado tensional en un punto:
tensiones necesarias para conocer
la tracción en cualquier dirección \mathbf{n} .

$$\sigma_{ij} = t_j | \mathbf{e}_i$$

siendo σ_{ij} la tensión
en la dirección i y normal al plano j .
A partir de σ_{ij} , se puede conocer
la tracción según un plano cualquiera,
no canónico definido por su normal \mathbf{n} :

$$t_i = \sum_j \sigma_{ij} n_j = \sigma_{ij} n_j$$

Nótese que, por equilibrio de momentos alrededor de un eje
canónico $k \neq i, j$, se demuestra la simetría $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$.



Ecuación de equilibrio

La segunda ley de Newton establece el equilibrio dinámico, $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, y se puede escribir para cada cubo infinitesimal de dimensiones $dx_1 \times dx_2 \times dx_3$. El equilibrio según la dirección x_1 queda,

$$\underbrace{\left[\sigma_{11} + \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} \right] dx_2 dx_3 - \sigma_{11} dx_2 dx_3 + \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_2} dx_1 dx_3 + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_3} dx_1 dx_2 +}_{\text{tensión en caras perpendiculares a eje 1}} + \underbrace{dx_1 dx_2 dx_3 b_1}_{\text{fuerza volúmica}} = \underbrace{dx_1 dx_2 dx_3 \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}}_{\text{inercia}}$$

que se simplifica para una dirección i cualquiera como $(\ddot{u}_i = \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2})$,

$$\sigma_{ij,j} + b_i = \rho \ddot{u}_i$$

Ecuación constitutiva

Para la propagación de la mayoría de ondas se puede asumir la Ley de Hooke, que relaciona tensiones con deformaciones. Si para 1D,

$$\sigma = E\varepsilon$$

en el caso general 3D resulta,

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\varepsilon_{kl}$$

Si el material es isótropo, las 81 constantes elásticas c_{ijkl} sólo dependen de 2 coeficientes de Lamé, μ y λ ,

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk}$$

relacionadas con el módulo de Young E y coeficiente de Poisson ν ,

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

Resumen de ecuaciones

Compatibilidad:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})$$

Constitutiva:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk}$$

Equilibrio:

$$\sigma_{ij,j} + b_i = \rho\ddot{u}_i$$

Ecuación del movimiento:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu)u_{j,jj} + \mu u_{i,jj} + \rho b_i &= \rho\ddot{u}_i \\ (\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u} + \mu\nabla^2 \mathbf{u} + \rho\mathbf{b} &= \rho\ddot{\mathbf{u}} \quad \nabla f = f_{,i} \end{aligned}$$

Ecuación de ondas

Ecuación del movimiento libre ($b_i = 0$):

$$(\lambda + \mu)u_{j,ji} + \mu u_{i,jj} - \rho \ddot{u}_i = 0$$

Si descomponemos el movimiento \mathbf{u} en suma de dos potenciales (descomposición de Helmholtz) escalar φ y vectorial ψ_k ,

$$u_i = \varphi_{,i} + \psi_{k,l} \epsilon_{ikl} \quad \psi_{k,k} = 0, \quad \epsilon_{ikl} = \epsilon_{kli} = -\epsilon_{kil}$$

tensor de permutación

$$\mathbf{u} = \nabla \varphi + \nabla \times \boldsymbol{\psi} \quad \nabla \cdot \boldsymbol{\psi} = 0$$

$$(\lambda + \mu) [\varphi_{,jji} + \psi_{k,lji} \epsilon_{jkl}]^1 + \mu [\varphi_{,ijj} + \psi_{k,ljj} \epsilon_{ikl}] - \rho [\ddot{\varphi}_{,i} - \ddot{\psi}_{k,l} \epsilon_{ikl}] = 0$$

$$[(\lambda + 2\mu)\varphi_{,jj} - \rho \ddot{\varphi}]_{,i} + [\mu \psi_{k,jj} - \rho \ddot{\psi}_k]_{,l} \epsilon_{ikl} = 0$$

¹ $\psi_{k,lj} \epsilon_{jkl} = \psi_{1,23} - \psi_{1,32} + \psi_{2,31} - \psi_{2,13} + \psi_{3,12} - \psi_{3,21} = 0$

Ecuación de ondas

Soluciones:

$$[(\lambda + 2\mu)\varphi_{,jj} - \rho\ddot{\varphi}]_{,i} + [\mu\psi_{k,jj} - \rho\ddot{\psi}_k]_{,l} \epsilon_{ikl} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} (\lambda + 2\mu)\varphi_{,jj} - \rho\ddot{\varphi} = 0 & \Leftrightarrow & c_p^2 \varphi_{,jj} - \ddot{\varphi} = 0, & c_p = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \\ \mu\psi_{k,jj} - \rho\ddot{\psi}_k = 0 & \Leftrightarrow & c_s^2 \psi_{k,jj} - \ddot{\psi}_k = 0, & c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{cases}$$

Ecuación de ondas

Probamos la solución onda plana:

$$u_i = A_i f(x_k \nu_k - ct)$$

(loading...)

x_k, t Posición y tiempo

ν_k Vector unitario de dirección de propagación

c Velocidad de propagación

A_i Dirección del movimiento de partículas en x_k

Ecuación de ondas

$$u_i(x_k, t) = A_i f(x_k \nu_k - c t)$$

$$u_i = \varphi_{,i} + \psi_{k,l} \epsilon_{ikl} \begin{cases} \varphi(x_k, t) &= \varphi^0 g(x_k \nu_k - c_p t) \\ \psi_k(x_k, t) &= \psi_k^0 h(x_k \nu_k - c_s t) \end{cases}$$

$$(\lambda + 2\mu)\varphi_{,jj} - \rho\ddot{\varphi} = 0$$

$$(\lambda + 2\mu)\varphi^0 \nu_j^2 g''(\dots) - \rho\varphi^0 c_p^2 g''(\dots) = 0 \quad \forall g \Leftrightarrow c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

$$\mu\psi_{k,jj} - \rho\ddot{\psi}_k = 0$$

$$\mu\psi_k^0 \nu_j^2 h''(\dots) - \rho\psi_k^0 c_s^2 h''(\dots) = 0 \quad \forall h \Leftrightarrow c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

$$u_i = \varphi^0 \nu_i g'(x_k \nu_k - c_p t) + \psi_k^0 \nu_l \epsilon_{ikl} h'(x_k \nu_k - c_s t)$$

Ecuación de ondas

$$u_i = \underbrace{\varphi^0 \nu_i g'(x_k \nu_k - c_p t)}_{\text{movimiento alineado con } \nu_k} + \underbrace{\psi_k^0 \nu_l \epsilon_{ikl} h'(x_k \nu_k - c_s t)}_{\text{movimiento perpendicular a } \nu_k}$$

(loading...)

(loading...)

El producto vectorial $\boldsymbol{\psi}^0 \times \boldsymbol{\nu} = \psi_k^0 \nu_l \epsilon_{ikl}$ es perpendicular a ν_l .

Ondas

Conclusiones sobre elasticidad:

- Movimiento propagación - oscilación
- Variables:
 - Desplazamiento u_i
 - Tensiones $t_i = \sigma_{ij}n_j$
- Relaciones:
 - Equilibrio dinámico (inercia): $\sigma_{ij,j} + b_i = \rho \ddot{u}_i$
 - Comportamiento elástico $\sigma_{ij} = c_{ijkl}\varepsilon_{kl}$
 - Compatibilidad: $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})$

Ondas

Tipos de ondas	Movimiento de las partículas
Longitudinal (P)	Paralelo a la dirección de la onda
Transversal (S)	Perpendicular a la dirección de onda
Rayleigh (guiada superficie)	Órbita elíptica - modo simétrico
Lamb (guiada placa)	Perpendicular a la onda (extensional)
Love (guiada placa)	Paralelo a placa, perpendicular a onda
Stoneley (leaky Rayleigh)	Onda guiada por la interfase
Sezawa	Modo antimétrico

Ondas

Velocidad de onda longitudinal

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (1)$$

Velocidad de onda transversal

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

c_p, c_s Velocidad de onda longitudinal y transversal

E, G, K Módulo de Young, Cizalla, compresibilidad

ν Coeficiente de Poisson

ρ Densidad

Ondas

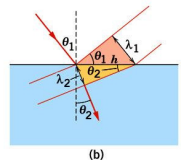
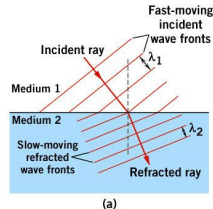
Longitud de onda

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

Ley de Snell

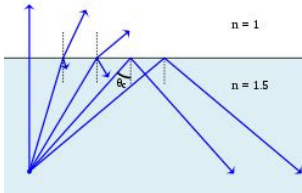
$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2} \quad (4)$$

- λ Longitud de onda
- c Velocidad de onda
- f Frecuencia
- θ Ángulo de incidencia



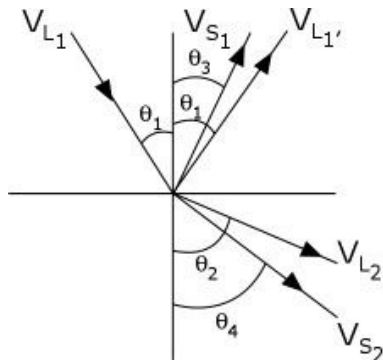
Ondas

Ángulo crítico: cuando desaparece la onda refractada.



Ondas

Conversión de modos.



Ondas

Impedancia acústica

$$Z = c\rho \quad (5)$$

Transmisión y reflexión^a

^aEn caso de incidencia en ángulo, se reemplazan por las ecuaciones de Zoeppritz

$$R = \left[\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right]^2 \quad D = \frac{4Z_1 Z_2}{[Z_1 + Z_2]^2} \quad (6)$$

Z Impedancia acústica

R Coeficiente de reflexión (loading...)

D Coeficiente de transmisión

Ondas

Presión acústica

$$p = \rho c \omega \xi = z \omega \xi \quad (7)$$

Intensidad acústica

$$\beta_2 - \beta_1 = 10 \log \left(\frac{p_2^2}{p_1^2} \right) = 20 \log \left(\frac{p_2}{p_1} \right), \quad J = \frac{p^2}{2z} = \frac{z \omega^2 \xi^2}{2} \quad (8)$$

p Presión acústica

ξ Desplazamiento de partículas

β Intensidad acústica

J Nivel acústico

Ondas

Atenuación

$$\frac{p}{p_0} = e^{-\alpha x}, \quad \alpha = \frac{0.1151 U}{v} \quad (9)$$

α Coeficiente de atenuación

x Distancia

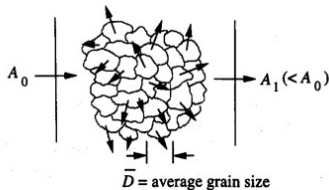
U Atenuación en db/m

v Velocidad

Ondas

Atenuación

- = absorción + dispersión
- α proporcional a f o f^2
- depende de parámetros termofísicos

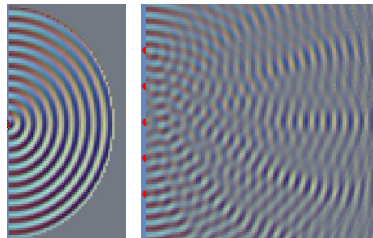
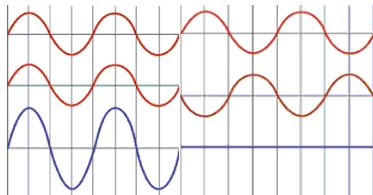


(loading...)

Ondas

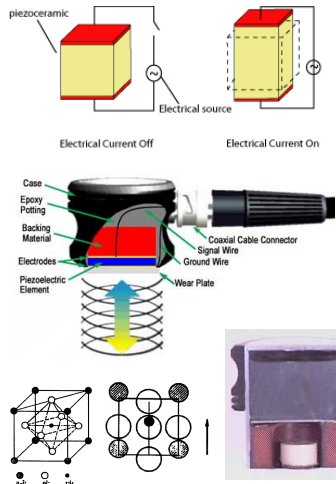
- Interferencia
- Difracción
- Refracción
- Combinaciones

(loading...)



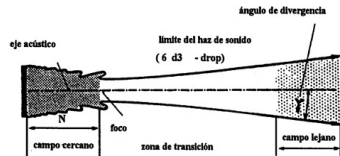
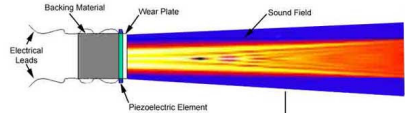
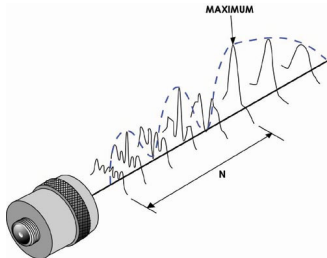
Transductores

- Transductor:
 - convierte señal eléctrica en física
- Piezoeléctrico:
 - electricidad - desplazamiento
 - Por alineamiento de moléculas polarizadas (SiO_2 , BaTiO_3)
- Resonancia:
 - lámina de espesor = $l/2$



Transductores

- Campo irradiado
- Focalización
- Divergencia (zona Fraunhofer)



Transductores

	Titanato de circonato de plomo (PZT)	Titanato de bario	Metaniobato de plomo	Sulfato de litio	Cuarzo	Niobato de litio
Velocidad del sonido (m/s)	4000	5100	3300	5460	5740	7320
Impedancia acústica Z	30	27	20,5	11,2	15,2	34
Factor k de acoplamiento electromecánico	0,6 – 0,7	0,45	0,4	0,38	0,1	0,2
Módulo piezoeléctrico d	150 – 593	125 - 190	85	15	2,3	6
Constante H de deformación piezoeléctrica	1,8 – 4,6	1,1 – 1,6	1,9	8,2	4,9	6,7
Factor de acoplamiento para oscilación radial k_p	0,5 – 0,6	0,3	0,07	0	0,1	-

Transductores

Campo cercano

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4c} \quad (10)$$

Ángulo de propagación

$$\sin\theta = 1.2 \frac{\lambda}{D} = 1.2 \frac{c}{Df} \quad (11)$$

N Campo cercano

θ Semiángulo de propagación

c Velocidad

D Diámetro del transductor

f Frecuencia

λ Longitud de onda

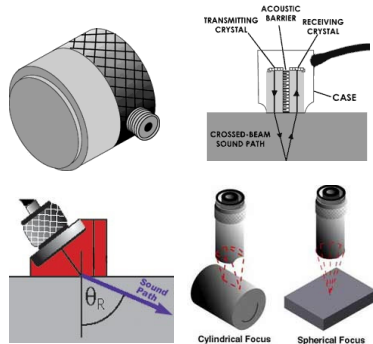
Tipos

Contacto: capa protectora

- Dual
- Angular
- Transversal

Inmersión:

- Focalizados



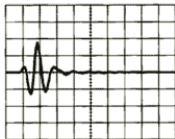
Tipos

Caracterización:

- Respuesta en frecuencia
- Impedancia eléctrica
- Perfil del campo irradiado

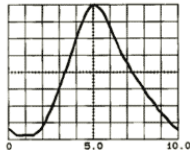
WAVEFORM

VERTICAL SENSITIVITY: 200 mv/div
HORIZONTAL RESOLUTION: .20 μ s/div



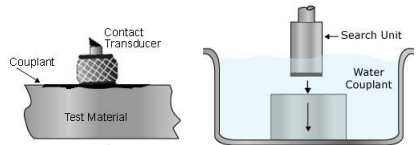
SPECTRUM

SCALE FORMAT: LINEAR (MHZ)



Acoplante

- Motivo: diferencia en impedancia acústica del aire
- Gel, glicerina, aceite, miel
- Inmersión



Electrónica

Pulsador:

- Baja impedancia
- Corta duración (o alta atenuación)
- Energía (V)

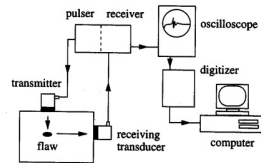
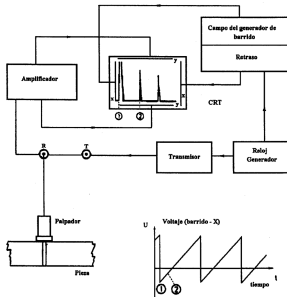
Receptor:

- Preamplificación o ganancia
- Rectificación
- Filtrado

Cableado:

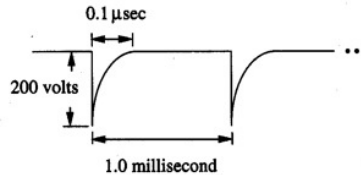
- Impedancia
- atenuación
- blindaje
- capacitancia

Configuración básica

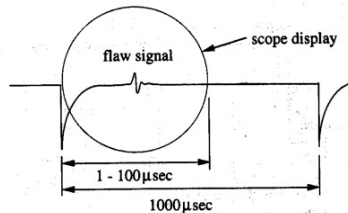


Funcionamiento

Emisión



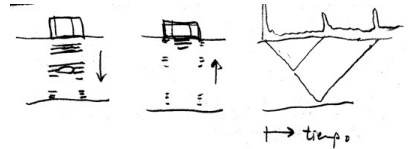
Recepción



Configuración

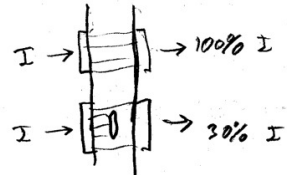
Pulso-eco:

- mide tiempo de vuelo
- e intensidad reflejada



Transmisión:

- mide intensidad transmitida



Pulso-eco: presentación de información

A-scan:

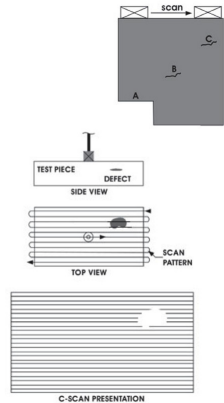
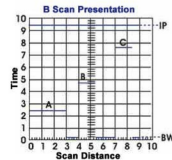
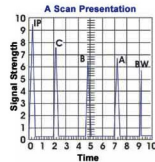
- $V(t)$
- Rectificación

B-scan:

- Tiempo de vuelo (x)
- Umbral

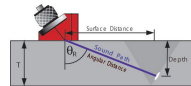
C-scan:

- Movimiento computerizado
- Ventana de tiempo



Pulso-eco

- Incidencia normal
- Incidencia con ángulo
- Incidencia con ángulo y reflexiones
- Difracción en punta de grieta



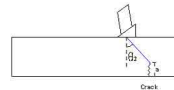
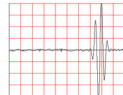
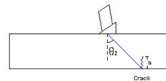
θ_R = Angle of Refraction
 T = Material Thickness
 Surface Distance = $\sin \theta_R \times \text{Sound Path}$



θ_R = Refracted Angle
 T = Material Thickness
 Skip Distance = $2T \times \tan \theta_R$

$$\text{Leg} = \frac{T}{\cos \theta_R}$$

$$\text{V-Path} = \frac{2T}{\cos \theta_R}$$



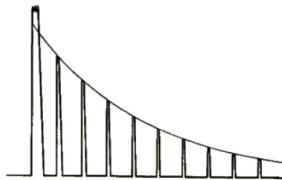
Funcionamiento

Velocidad:

- Medido por tiempo de vuelo
- Fase (pitch-catch)

Atenuación:

- Medida por sucesivo decremento logarítmico



Elección de onda

Tamaño reflector $> \frac{1}{2}$ longitud de onda

Sensibilidad: tamaño del reflector detectable.

Resolución: distancia entre reflectores separables.

Penetración: distancia a la que se distingue señal reflejada por reflector del ruido.

Elección de onda

Señal / ruido:

- Mínimo de 3/1

Depende de:

- Tamaño y focal del palpador.
- Frecuencia, ancho de banda y eficiencia del palpador.
- Distancia de inspección.
- Rugosidad y curvatura de la superficie.
- Posición del reflector respecto al rayo.
- Ruido de grano del medio.
- Reflectividad del defecto según impedancia, tamaño, forma, orientación, etc.

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{16}{\rho v_{\text{metal}} w_s w_y \Delta t}} \frac{A_{\text{flaw}}(f_0)}{FOM(f_0)}$$

Diagram illustrating the Signal-to-Noise Ratio (S/N) formula for flaw detection. The formula is:

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{16}{\rho v_{\text{metal}} w_s w_y \Delta t}} \frac{A_{\text{flaw}}(f_0)}{FOM(f_0)}$$

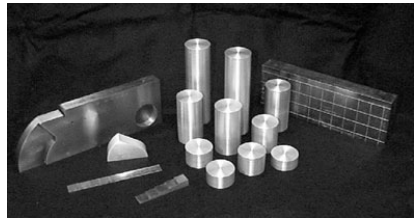
Labels for the variables in the formula:

- ρ : sound speed in metal
- v_{metal} : lateral beam width at flaw depth
- w_s : pulse duration
- w_y : pulse duration
- Δt : pulse duration
- $A_{\text{flaw}}(f_0)$: Flaw scat. ampl. at center frequency
- $FOM(f_0)$: Noise FOM at center frequency

Calibración

Calibración:

- Ángulo
- Resolución
- Distancia
- Área
- Amplitud-Distancia-curvatura



Limitaciones

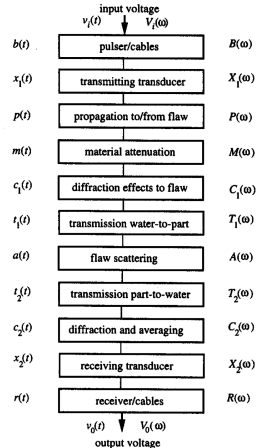


Modelo

Complicado

Ventaja: todo casi lineal

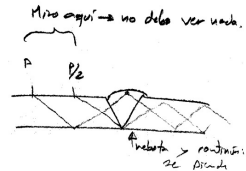
Se suelen usar transformaciones
de Fourier y Hilbert



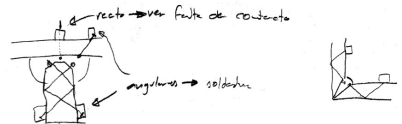
Usos

Soldaduras

- A tope
- En ángulo

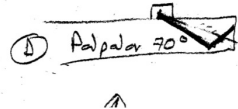
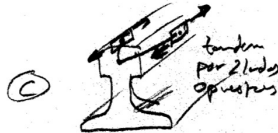
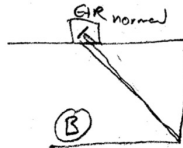
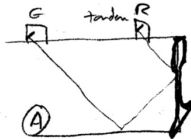


Penetración, fusión, fisura, etc...



Usos

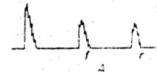
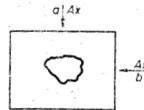
Railes



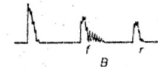
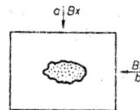
Usos

Defectos en acero fundido

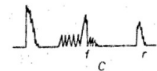
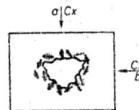
Inclusiones gaseosas



Inclusiones no metálicas



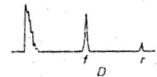
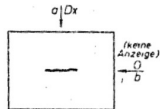
Cavidades de contracción,
rachupes con estructura
dendrítica



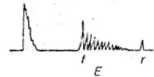
Usos

Defectos en acero fundido

Gristas



Gristas de contracción
con estructura dendrítica



Estructura esponjosa

