



FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY



Laboratorio de Materiales
y Metrología Industrial

Ingeniería Industrial

2021

Trabajo Práctico END - Ultrasonido

Objetivos:

- Detección de defectos internos en componentes de equipos industriales
- Control de calidad (presencia de macroestructura)
- Medición de desgaste en recipientes (medición de espesores)
- Determinación de la velocidad del sonido en diferentes materiales

Fundamentos:

- El campo de energía mecánica, en forma de ondas acústicas no audibles, interacciona con el material (medio elástico).
- Los materiales presentan gran poder de absorción, por lo que no son sensibles a la propagación ultrasónica.
- Las leyes de la física que gobiernan el fenómeno de propagación de este tipo de energía, se estudia en la teoría de ondas elásticas de la mecánica
- La interacción de las ondas ultrasónicas con el material, genera perturbaciones que se presentan como diferentes tipos de señales en la pantalla de TRC del equipo de ultrasonido.

Velocidad de propagación del ultrasonido C

Velocidades características, densidades e impedancias acústicas

Material	C_L m/s	C_T m/s	C_s m/s	δ kgf/dm ³	$Z_L = \delta \cdot C_L$ 10 ⁶ kgf/m ² ·s
Acero al C.	5900	3230	2790	7,70	45
Acero Inox.	5660 a 7390	2990 a 3120	—	7,85	43 a 59
Fundición	3500 a 5600	2200 a 3200	—	6,9 a 7,2	25 a 42
Cobre	4700	2260	1930	8,90	42
Bronce	3530	2230	1950	8,86	37
Latón	4370	2100	—	8,10	33
Aluminio	6300	3130	2900	2,70	17
Cinc	4170	2410	—	7,10	30
Niquel	5630	2960	2460	8,80	50
Plexiglas	2730	1430	—	1,18	3,2

Ecuación fundamental:

$$C = f * \lambda \text{ (m/s)}$$

C : Velocidad de propagación del sonido. Coeficiente de proporcionalidad entre la frecuencia y la longitud de onda

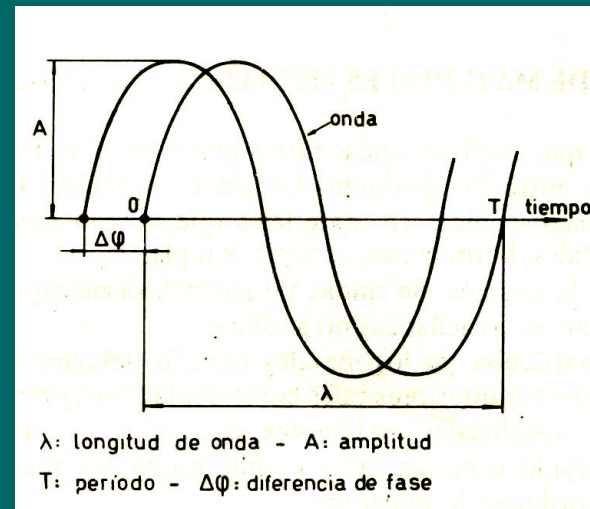
$$\lambda = C / f$$

f : Frecuencia (oscilaciones por segundo)

Se mide en Hertz: $1\text{Hz} = 1/\text{s}$ (Una oscilación por segundo)

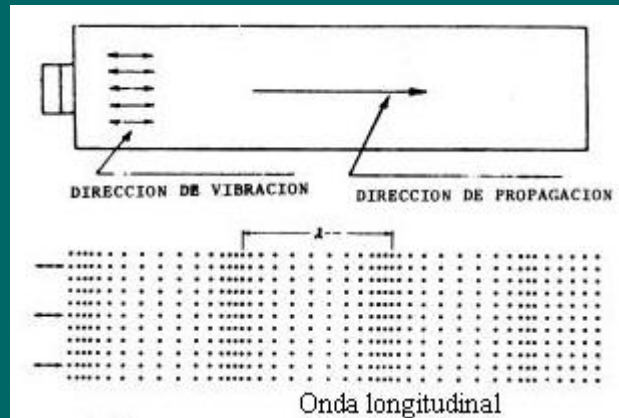
λ : La longitud de onda (m)

Distancia entre dos planos en que las partículas se encuentran en el mismo estado de oscilación en el sentido de la propagación

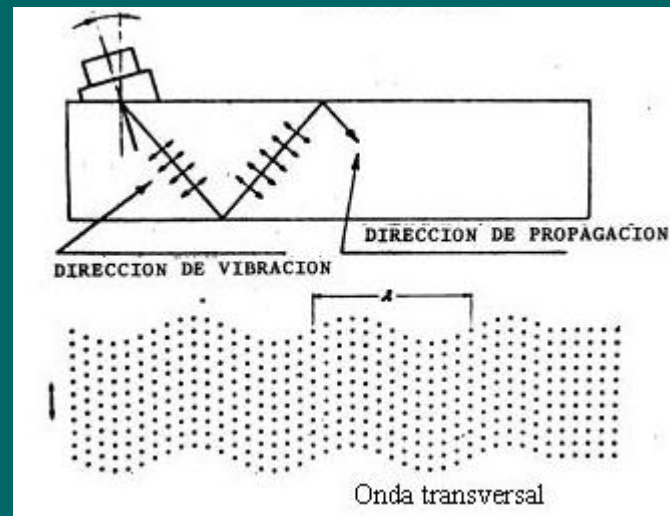


Tipos de ondas acústicas

- Longitudinales



- Transversales



Espectro acústico

- Infrasónica: No audible. Frecuencias menores de 16 Hz
- Sónica: 16 Hz a 20 KHz
- Ultrasónica: Mayor de 20 KHz (1000 MHz)
Equipo de 1 a 4 MHz

Tipos de ondas acústicas

- Longitudinales
- Transversales
- De superficie
- De Lamb

Impedancia acústica (Z)

Resistencia a la vibración de las partículas

$$Z = \delta \cdot C \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad \delta: \text{Densidad}$$

$$Z = P/V$$

P: Presión acústica V: velocidad de vibración de la partícula

Energía e Intensidad acústica

En un medio elástico, la excitación que genera ondas no produce transporte de partículas.

Energía acústica

Se produce desplazamiento de energía con la velocidad acústica del medio, de acuerdo a lo siguiente

$$E = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot V = \frac{1}{2} \cdot P^2 \cdot Z^{-1} \cdot C^{-1} \quad (\text{w} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3})$$

Intensidad acústica

Intensidad acústica es la cantidad de energía que pasa por unidad de área en la unidad de tiempo

$$I = E \cdot C = \frac{1}{2} \cdot P^2 \cdot Z^{-1} \quad (\text{w}/\text{m}^2)$$

Haz Ultrasonico

Incidencia normal

Incidencia oblicua (Ley de Snell)

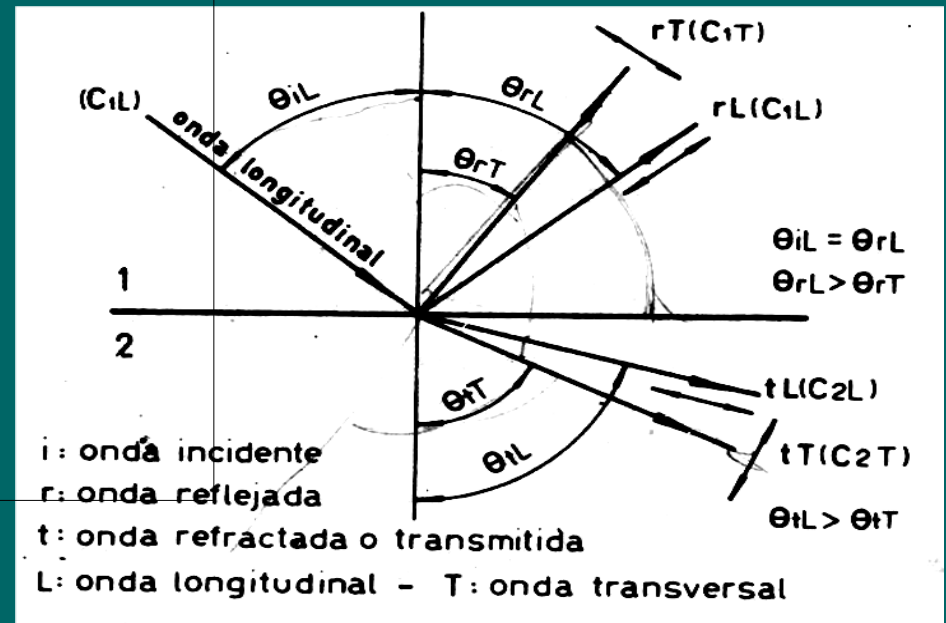
$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Intensidad acústica

I_i : Intensidad incidente;

I_r : Intensidad reflejada;

I_t : Intensidad transmitida



Reflexión y Transmisión

Coefficiente de reflexión: R

Coefficiente de transmisión: T

$$R + T = 1$$

$$R = \frac{I_r}{I_i}$$

$$T = \frac{I_t}{I_i}$$

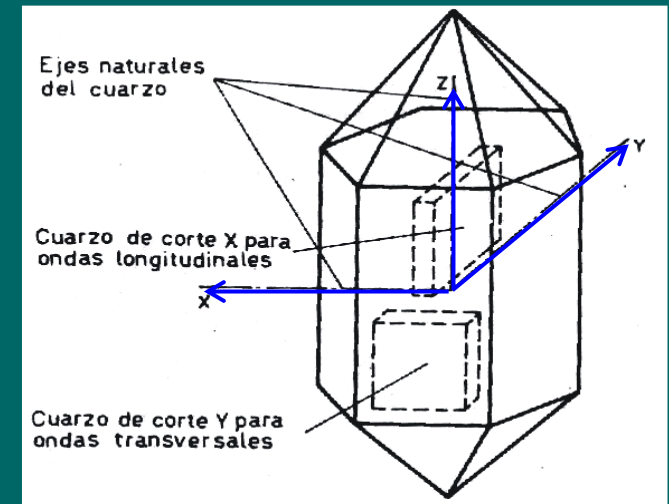
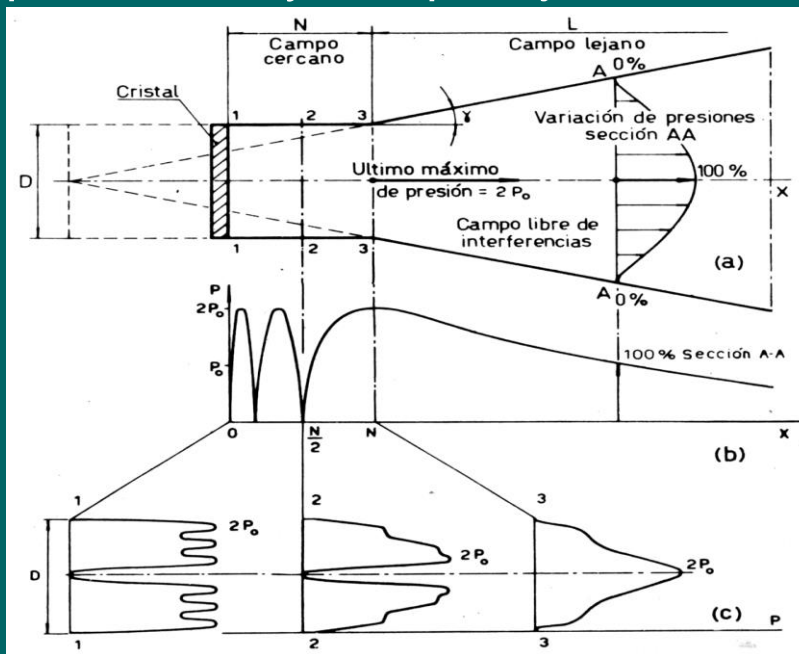
Transductor piezoeléctrico

Cristal piezoeléctrico: Cuarzo

Transforma energía eléctrica en mecánica
y energía mecánica en eléctrica

- El pulso eléctrico que recibe el cristal, lo deforma.
- Cuando se aplica presión al cristal, emite pulsos eléctricos

Campo cercano y campo lejano



Sistema de coordenadas de un cristal de cuarzo.
Posiciones cortes X e Y

- Campo cercano y campo lejano del haz ultrasónico
- y c) Distribución longitudinal y transversal de de la presión acústica

Atenuación

- En el haz ultrasónico
 - En el campo cercano la presión acústica es constante.
 - En el campo lejano, diverge (decrece con el cuadrado de la distancia)

- En materiales sólidos

La atenuación del haz ultrasónico se produce por efectos de amortiguación debido a:

- Dispersión: Heterogeneidades (inclusiones no-metálicas, óxidos, porosidades, etc.), constitución cristalográfica, superficies límites, tamaño de grano si es mayor que la longitud de onda
- Absorción: Debido a la deformación de la red cristalina, se produce conversión de la energía ultrasónica en calor.

Ley de Atenuación

La pérdida de energía o disminución de la intensidad y presión acústica de una onda plana debido a dispersión y absorción, sigue una ley exponencial: $I_x = I_0 \cdot e^{-a \cdot x}$

I_x : Intensidad a la distancia x

I_0 : Intensidad en el origen

a : Coeficiente de atenuación referido a la intensidad

Dado que la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión acústica, se tiene: $P_x = P_0 \cdot e^{-a_1 \cdot x}$ con $a_1 = a/2$

Esta ecuación permite medir la atenuación en el campo cercano y lejano a una distancia x del emisor.

En el campo cercano se tiene: $\ln P_x = \ln P_0 + (-a_1 \cdot x)$; $a_1 \cdot x = \ln \frac{P_0}{P_x}$ (dB)

dB : decibel. Expresión logarítmica de la relación entre dos amplitudes o dos intensidades

Acoplando el oscilador sobre la superficie del material, cuando se emite el sonido por impulsos, en la pantalla del equipo se obtienen ecos múltiples de amplitudes decrecientes, cuyas alturas resultan proporcionales a las presiones acústicas. En consecuencia la atenuación a una distancia x es:

$$a_1 \left(\frac{\text{dB}}{\text{mm}} \right) \cdot x (\text{mm}) = 20 \cdot \log \frac{H_1}{H_2} (\text{dB})$$

El decibel mide 20 veces el logaritmo base 10 de la relación de amplitudes de la presión acústica

$$P_2 = P_1/2; \quad 20 \log(P_2/P_1) = 6 \text{ dB}$$

Cual es el valor de la relación de amplitudes para una caída de -14 dB?

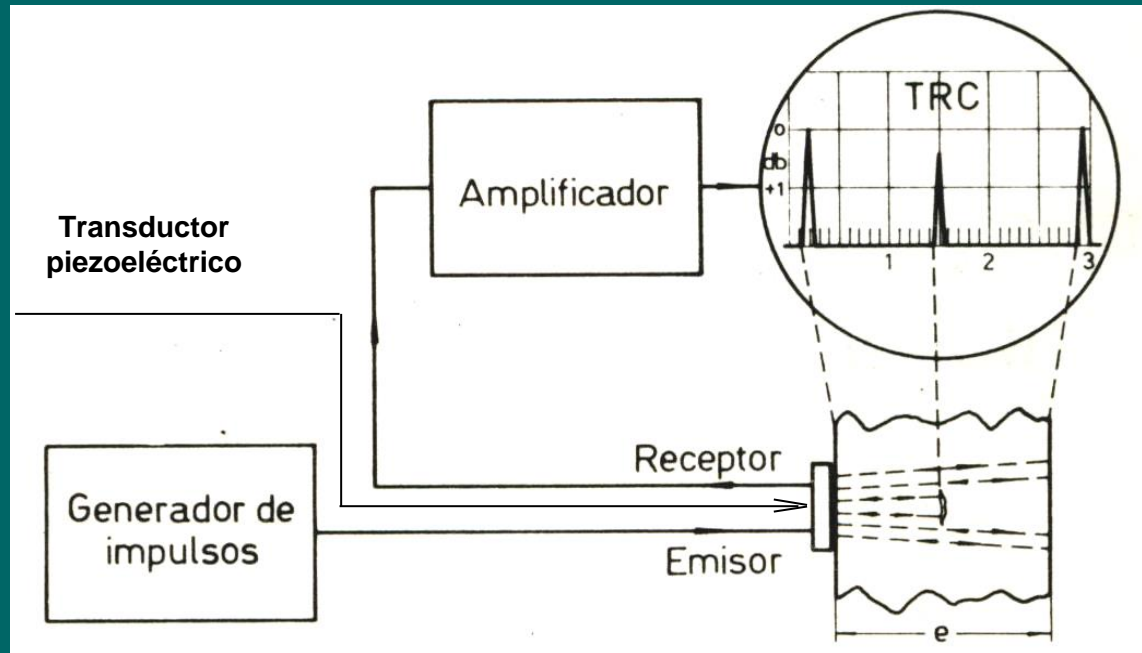
$$20 \lg(H_2/H_1) = -14 \text{ dB} = -20 \text{ dB} + 6 \text{ dB}$$

$$\lg(H_2/H_1) = -1 \text{ dB} + 0.3 \text{ dB}$$

$$H_2/H_1 = 10^{-1} * 10^{0.3}$$

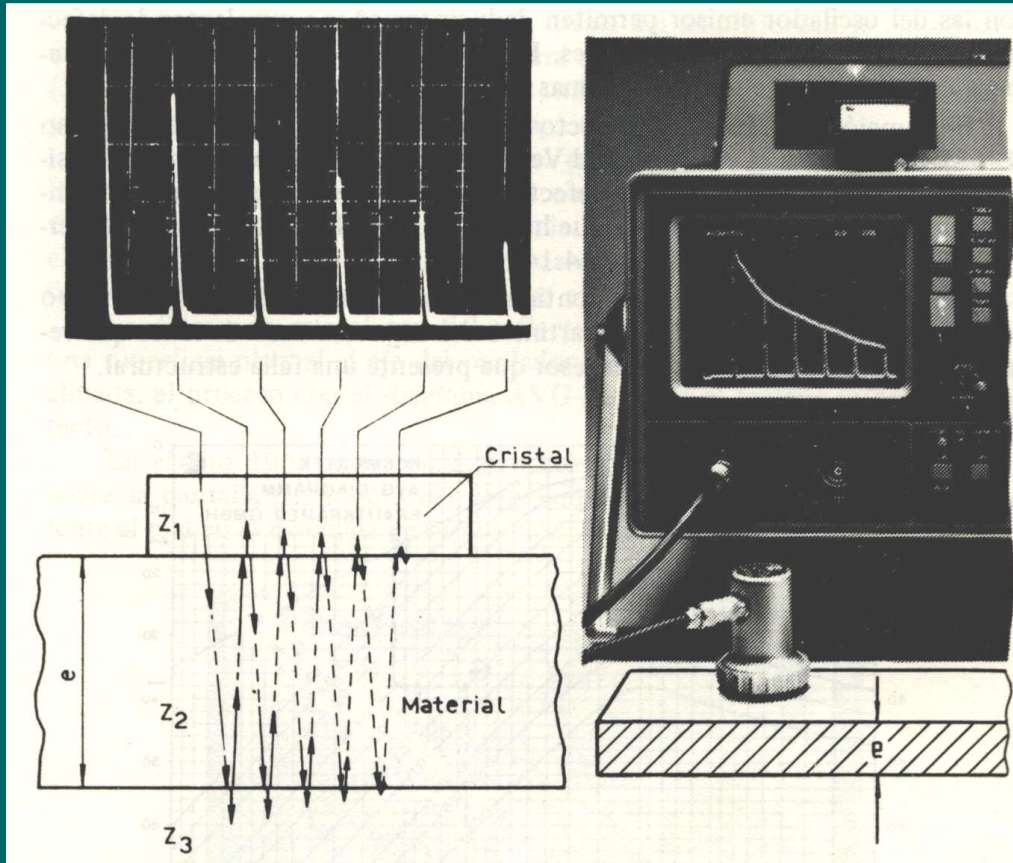
$$H_2/H_1 = 0.1 * 2 = 0.2$$

Equipo de ultrasonido



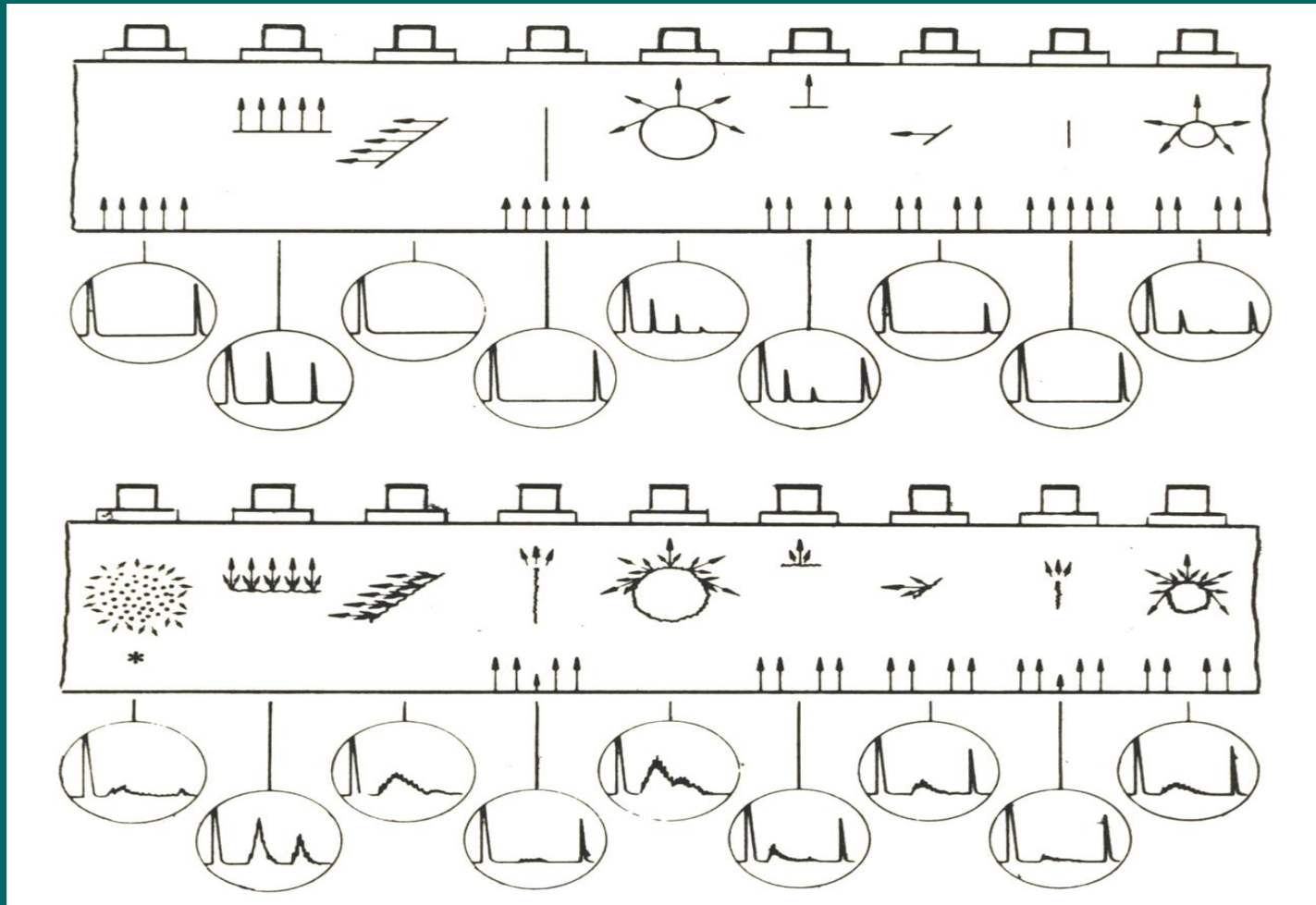
Esquema de funcionamiento del equipo pulso-eco
Detección de fallas y medición de espesores

Ecos del haz ultrasónico



Ecos de fondo del ensayo de ultrasonido

Oscilograma de distintos reflectores



Oscilogramas de distintos tipos de reflectores

Cálculo de la velocidad del sonido en aceros a partir de las constantes elásticas

Ref.: Ecuación diferencial de movimiento ondulatorio

E: Modulo de elasticidad 205000000 Pa (205000000000 N/m²)

1 N = 1 kg*m/s²

E = 205000000000

ρ = 7850 kg/m³

ν = 0.29 (adimensional)

CL = 5849.9 m/s

D:\MATLAB6p1\work\vel.m 26 de septiembre de 2004

%Calculo de la velocidad del sonido en aceros

%E=205000000000 Pa

E=2.05e+11

%E modulo de elasticidad el acero en N/m² = (kg*m/s²/m²)

ro=7.85*1000

ro=7.85e+3

%ro densidad acero en kg/m³

nu=0.29644

%nu: modulo de Poisson

%En tracción uniaxial, la deformación transversal

% es proporcional a la deformación longitudinal

vel=((E*(1-nu))/(ro*(1+nu)*(1-2*nu)))^0.5

%vel: m/s

%E = 2.0500e+011

%ro = 7850

%ro = 7850

%nu = 0.2964

%vel = 5.9000e+003

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