

## MÁSTER EN ESTRUCTURAS

Evaluación No Destructiva:

# **Evaluación de la sensibilidad ultrasónica en sistemas de Entramado Liger: Detección de interfaces.**

Presentado por:

**María Abril Negri**

**Fabiana Alexandra Noriega Carrión**

**Diego Andrés Bernal Sanchez**

Presentado a:

**Prof. Guillermo Rus Carlborg**

**ESCUELA INTERNACIONAL DE POSGRADO**

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**

**06 DE MAYO DE 2026**

## Introducción

En la actualidad, se ha desarrollado una amplia variedad de sistemas constructivos que integran diversos tipos de materiales, cada uno con propiedades físicas y mecánicas específicas. Ante este escenario, y gracias al avance de las nuevas tecnologías, los métodos de evaluación no destructiva (END) se han implementado como una herramienta indispensable. Estos permiten garantizar la integridad estructural y el cumplimiento normativo sin alterar la funcionalidad ni la estética del elemento analizado.

Estos métodos cumplen una función crucial, especialmente en sistemas multicapa, donde la naturaleza heterogénea de sus componentes, como la combinación de madera, tableros y aislantes plantea desafíos significativos para el control de calidad, tanto en la fase de ejecución de obra como en las tareas de mantenimiento posterior.

El presente estudio se centra en el análisis de la Velocidad de Pulso Ultrasónico mediante el método de transmisión directa utilizando equipos de baja frecuencia (100 kHz). El objetivo es evaluar la viabilidad de este método para caracterizar paneles compuestos, analizando cómo factores críticos como la ortotropía de la madera (orientación de las fibras), la dispersión acústica en tableros de virutas (OSB) y la impedancia acústica de los núcleos aislantes (EPS) afectan la precisión de las lecturas y la interpretación de los resultados técnicos.

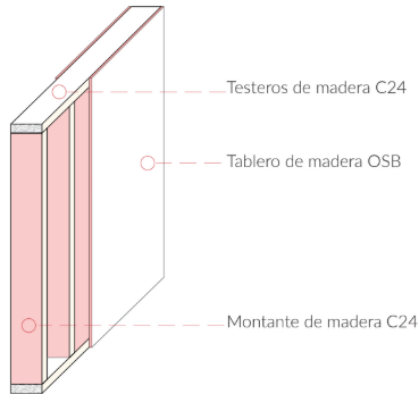
## Marco teórico

### Entramado ligero:

El entramado ligero de madera es un sistema constructivo industrializado, seco, modular y optimizado, que utiliza elementos estructurales ligeros repetitivos, diseñados para facilitar tanto el montaje en obra como el control en cada fase del proceso. Su proceso de armado está constituido por diferentes componentes:

- Montantes piezas de madera colocadas en posición vertical, que forman la estructura portante principal de los muros. Distribuidos a intervalos regulares (normalmente cada 40 o 60 cm).
- Viguetas En forjados y cubiertas, las viguetas reciben las cargas verticales y transmiten las cargas de suelos y techos hacia los muros.
- Tableros estructurales: Se fijan sobre el bastidor (OSB, contrachapado o paneles de fibras) y aportan rigidez al conjunto, actuando como diafragmas que estabilizan la estructura frente a cargas horizontales.

- Núcleo aislante: Así mismo entre estas placas se incorpora un núcleo de poliestireno expandido entre los tableros estructurales (u otro tipo de aislante). Este componente actúa como el principal aislante térmico y acústico del sistema.

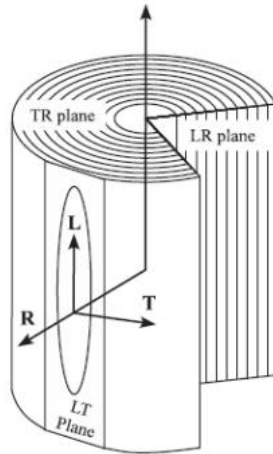


*Ilustración 1. Representación de entramado ligero.*

Este tipo de sistema constructivo ha experimentado un crecimiento exponencial en España durante la última década, pasando de ser un sistema marginal para convertirse en la solución para la vivienda unifamiliar industrializada y la rehabilitación ligera. El uso de este sistema podría rondar entre 5-8% de la obra nueva. Su consolidación se fundamenta en Exigencia Normativa y Térmica, es decir, con la implementación de las sucesivas actualizaciones del Código Técnico de la Edificación (CTE), los estándares de eficiencia energética se han vuelto extremadamente estrictos. El entramado ligero surge como la solución más eficiente para alcanzar niveles de Edificio de Consumo Casi Nulo (ECCN), Así mismo, tiene un fuerte impacto en la reducción de Riesgos y Plazos en un mercado financiero volátil; la rapidez de los sistemas ligeros permite reducir los plazos de entrega hasta en un 60% en comparación con el hormigón armado.

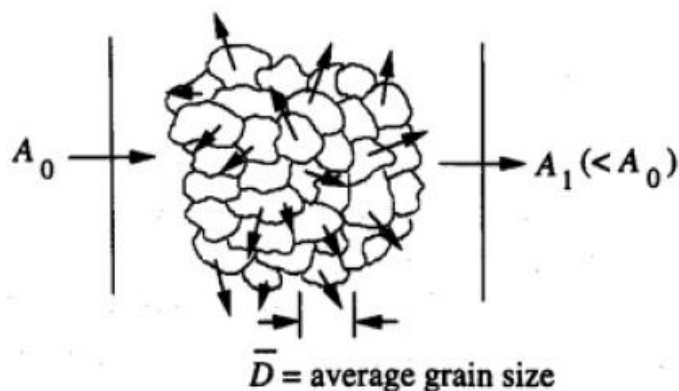
La complejidad estructural de este sistema, caracterizada por la superposición de materiales con propiedades físicas diferentes, determina su comportamiento ante los ensayos de caracterización:

La madera es un material compuesto natural, viscoelástico, que suele considerarse como un medio ortotrópico a escala milimétrica. Presenta direcciones principales, también llamadas ejes de simetría natural que, en teoría, son paralelas a las direcciones anatómicas visibles del árbol: longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T), correspondientes a las coordenadas cilíndricas en el caso de nuestro ensayo se analizara:



*Ilustración 2. Representación de la dirección de las fibras en madera de pino.*

- La madera de Pino como estructura principal (montantes) como se mencionó anteriormente, de acuerdo con la orientación de análisis, el material se comportará de forma diferente. En el sentido Longitudinal (paralelo a la fibra) un valor típico varía entre 3500 - 5000 m/s, que en este sentido son más rápida porque las fibras actúan como "autopistas" para el sonido mientras que en sentido Transversal (perpendicular a la fibra) varía entre 1000 - 1500 m/s. Es más lenta porque la onda debe saltar de fibra en fibra.
- Tableros OSB: Su estructura de virutas orientadas y prensadas con resinas actúa como un medio dispersor. Cada interfaz interna entre virutas provoca reflexiones secundarias que disipan la energía de la onda. La velocidad típica de este tipo de material varía entre 1000-1400 m/s.

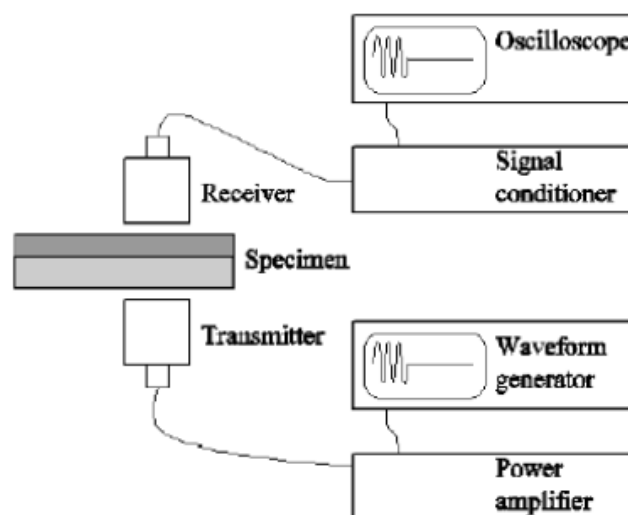


*Ilustración 3. Representación de la absorción de energía en materiales fibrosos.*

Poliestireno Expandido (EPS): Debido a su bajísima impedancia acústica y su naturaleza celular compuesta mayoritariamente por aire, el EPS funciona como una barrera para las ondas de 100 kHz. Donde la señal captada probablemente no atraviesa el núcleo, sino que se difracta por los elementos sólidos adyacentes. Mientras que su velocidad teórica va entre los 500-700 m/s (pero es casi imposible de medir con precisión en espesores delgados).

#### Ensayo de Ultrasonido por transmisión

Dentro del campo de la Evaluación No Destructiva existen diversas técnicas para la inspección de materiales y la detección de defectos, una de las más utilizadas es el ensayo de ultrasonido por transmisión. Esta técnica consiste en la emisión de ondas mecánicas de alta frecuencia a través de materiales, las cuales son captadas por sensores receptores. El principio de esta práctica consiste en medir la cantidad de energía sónica que logra atravesar el material.



*Ilustración 4. Representación de ensayo de Ultrasonido de Transmisión.*

El transductor emisor genera una onda ultrasónica que atraviesa el material; la interacción de la onda cambia en el medio donde la onda se propaga. Es por esta razón que la propagación de la onda depende de las propiedades físicas del material, tales como la densidad, el módulo elástico, el coeficiente de Poisson, entre otros. También existen diferentes tipos de ondas ultrasónicas; entre las más usadas:

- Ondas longitudinales (L): Son ondas que hacen oscilar las partículas de un medio en la misma dirección de propagación.
- Ondas transversales (S): Son ondas que se propagan en dirección perpendicular; también se les conoce como ondas de corte.
- Ondas superficiales (Rayleigh): Consiste en la propagación de ondas en la superficie del material.

La expresión matemática detrás de la física de ondas y la interacción con los materiales se define en los siguientes términos:

Velocidad de la onda ultrasónica  $C_p$ :

$$C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1)$$

Donde  $\mu$  y  $\lambda$  son propiedades que dependen del módulo de elasticidad:

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

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3)$$

De la ecuación (2) y (3) se pueden incorporar en la ecuación (1) y se obtiene:

$$C_p^2 = \frac{1}{\rho} \left( \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} + 2 \left( \frac{E}{2(1+\nu)} \right) \right) \quad (4)$$

$$C_p^2 = \frac{E}{\rho(1+\nu)} \left( \frac{\nu}{1-2\nu} + 1 \right) \quad (5)$$

$$C_p^2 = \frac{E}{\rho(1+\nu)} \left( \frac{\nu+1-2\nu}{1-2\nu} \right) = \frac{E}{\rho(1+\nu)} \left( \frac{1-\nu}{1-2\nu} \right) \quad (6)$$

Finalmente, para calcular el módulo de elasticidad en función de la velocidad de onda, la densidad y el coeficiente de Poisson, se obtiene la siguiente expresión:

$$E = C_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (7)$$

### Impedancia acústica

Durante la propagación, la onda ultrasónica puede experimentar fenómenos como reflexión, refracción, dispersión y atenuación; esto sucede cuando la onda cruza diferentes interfaces con diferentes impedancias acústicas. La impedancia acústica ( $Z$ ) se define como la facilidad que tiene la onda de viajar en el medio y depende de la velocidad de onda y la densidad:

$$Z = c \cdot \rho \quad (8)$$

Con la impedancia acústica podemos calcular el coeficiente de transmisión entre medios, lo cual indica cuánta señal puede ser transmitida por el material:

$$D = \frac{4Z_1Z_2}{[Z_1+Z_2]^2} \quad (9)$$

Por otro lado, el coeficiente de reflexión indica la cantidad de señal que es reflejada por los materiales; en otras palabras, la señal que se pierde entre medios.

$$R = \left[ \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right]^2 \quad (10)$$

## **OBJETIVOS**

Caracterizar el comportamiento dinámico y la eficiencia de la propagación de ondas elásticas longitudinales (Ondas P) en un panel compuesto heterogéneo (madera de pino, poliestireno y OSB), mediante el uso de técnicas de Ensayos No Destructivos (END) por ultrasonido.

### Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, se proponen las siguientes metas técnicas:

- Evaluar la influencia de la anisotropía: Determinar cómo la orientación de la fibra en la madera de pino afecta la velocidad de transmisión, comparando las velocidades longitudinales teóricas (3,800 - 5,500m/s) frente a las transversales medidas ( $\approx 1,100$  m/s).
- Analizar el contraste de impedancia acústica: Cuantificar el retraso en el tiempo de vuelo provocado por materiales de baja densidad como el poliestireno (Tergopol), el cual incrementa significativamente el tiempo de tránsito hasta los 68.00  $\mu$ s.

- Validar la continuidad estructural de las interfaces: Comparar la eficiencia en la transmisión de energía entre zonas con y sin adhesivo estructural para determinar la calidad de la unión entre las distintas fases del material compuesto.
- Correlacionar datos experimentales y teóricos: Contrastar los valores obtenidos mediante el equipo Olympus Epoch 650 con los rangos bibliográficos estándar para validar la precisión del modelo experimental y la metodología empleada.

## DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 1. Descripción del Modelo Experimental

El modelo consiste en un panel compuesto multicapa diseñada para el estudio de la propagación de ondas de compresión (Ondas P) en medios con heterogeneidad controlada. La estructura se organiza mediante una configuración de núcleo y revestimiento que permite evaluar:

- Trayectorias Críticas: El modelo permite diferenciar el comportamiento de la onda al atravesar elementos sólidos continuos frente a secciones interrumpidas por materiales aislantes.
- Influencia de la Interfaz: El diseño facilita el análisis del efecto de las uniones mecánicas y adhesivas en la continuidad del frente de onda.
- Geometría de Control: Se emplea una cuadrícula de referencia sobre la superficie del panel para asegurar la repetibilidad de la posición de los transductores en cada ensayo.

### 2. Materiales Empleados

Según la instrumentación y los datos técnicos registrados en el protocolo de ensayo:

#### 2.1. Componentes

- Madera de Pino (Montantes): Utilizada en espesores variables (3 cm y 3.5 cm) para el estudio de la velocidad de propagación en función de la densidad y la dirección de la fibra.
- Poliestireno: Empleado como fase de baja velocidad y alta atenuación para simular rellenos estructurales livianos.
- Tableros de OSB: Capas exteriores que actúan como plano de apoyo para la instrumentación.





*Ilustración 5. Representación de materiales del modelo.*

## 2.2. *Equipamiento e Insumos*

- Detector Ultrasónico: Sistema Olympus Epoch 650.
- Transductores: Sensores de tipo Longitudinal operando a una frecuencia de 100 KHz, configuración óptima para materiales de alta porosidad.
- Gel Acoplante: Gel ultrasónico para eliminar la impedancia del aire en el contacto sensor-material.
- Parámetros de Entrada: Voltaje de pulso de 100 V y un tiempo de corrección inicial ( $T_0$ ) de 2.745  $\mu$ s.

# EQUIPOS



## 1. ODS (TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO)



**Función:** Convierte las señales eléctricas en ondas ultrasónicas y viceversa. Envía las ondas al material y recibe los ecos reflejados para su análisis.

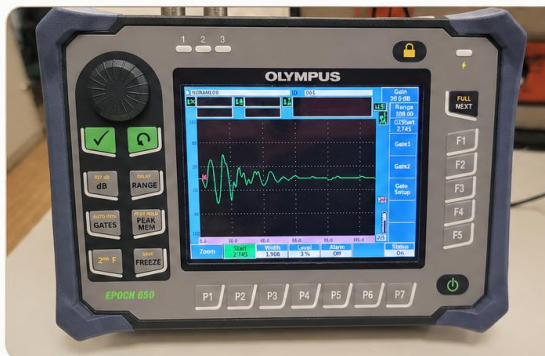


**Uso:** Inspección ultrasónica no destructiva para detectar fallas internas, medir espesores y caracterizar materiales.



**Características:**

- Frecuencia: 0.1 MHz (100 kHz)
- Modelo: V1548
- Fabricante: Panametrics – VIDEOSCAN
- Conector: LEMO



## 2. EQUIPO DE ULTRASONIDO OLYMPUS EPOCH 650



**Función:** Genera y controla los pulsos ultrasónicos, amplifica las señales recibidas y muestra el patrón A-Scan para análisis e interpretación.



**Uso:** Ensayos no destructivos por ultrasonido (UT) para detección y evaluación de discontinuidades en materiales.



**Características:**

- Modelo: EPOCH 650 (Olympus)
- Pantalla: A-Scan (representación de ecos)
- Modos: Pulso-eco
- Funciones: Ganancia, rango, puertas (gates), medición de distancia, alarmas, congelar señal, guardar datos.

Ilustración 6. Representación de equipos usados.

### 3. Metodología

El ensayo se rige por el método de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) bajo una configuración de transmisión directa:

- Calibración del Sistema: Ajuste de la referencia temporal ( $T_0$ ) para descontar el retardo intrínseco de los cables y el equipo.
- Muestreo Sistemático: Se realizan mediciones en cada punto de la malla previamente trazada. Se registran un mínimo de tres lecturas por punto para obtener una Media representativa del tiempo de tránsito ( $T_p$ ).
- Adquisición de Tiempos: El tiempo de tránsito se mide en microsegundos ( $\mu s$ ), identificando el arribo del primer frente de onda en el receptor.
- Diferenciación de Condiciones: Se analizan comparativamente los puntos con y sin presencia de adhesivo estructural para evaluar la calidad de la unión.

#### 4. Valores Típicos:

Tabla 1. Valores típicos de los materiales en estudio.

| Material                     | Velocidad de Referencia (m/s) | Velocidad Aparente Medida (m/s) | Observación Técnica (Análisis END)  |
|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---|
| Pino (Dirección Transversal) | 1000 - 1500                   | ≈1100                           | Consistente con la anisotropía de la madera; reducción por orientación diagonal y capas de OSB.                   |
| Tableros OSB / Aglomerado    | 1000 - 1400                   | ---                             | Elevada atenuación por dispersión ( <i>scattering</i> ) en la matriz de partículas y resinas.                     |
| Poliestireno (Tergopol)      | < 700                         | ≈ 548                           | Valor en el límite inferior; la señal puede verse afectada por el acoplamiento en los bordes y presencia de aire. |

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los ensayos se capturaron los tiempos de vuelo de las ondas longitudinales en los materiales por separado, en la tabla 2 se observan los resultados obtenidos:

Tabla 2. Tiempo de vuelo de cada material.

| Material          | Tiempo Tp (μS) | Media | DESV. ST |
|-------------------|----------------|-------|----------|
| Tableros          | 15.42          | 15.32 | 0.09     |
|                   | 15.32          |       |          |
|                   | 15.21          |       |          |
| Montantes (3cm)   | 25.56          | 25.44 | 0.12     |
|                   | 25,72          |       |          |
|                   | 25.32          |       |          |
| Montantes (3.5cm) | 22.45          | 22.55 | 0.10     |
|                   | 22.69          |       |          |
|                   | 22.51          |       |          |
| Poliestireno      | 67.61          | 68.00 | 4.77     |
|                   | 67.62          |       |          |
|                   | 67.63          |       |          |
|                   | 65.91          |       |          |
|                   | 66.02          |       |          |
|                   | 66.84          |       |          |
|                   | 60.45          |       |          |
|                   | 70.46          |       |          |
|                   | 79.47          |       |          |

Las propiedades físicas de cada material se muestran en la siguiente tabla 3, en la gráfica se muestra la representación de los tiempos de vuelo para cada material:

Tabla 3. Propiedades físicas de cada material en estudio.

| Material           | Tiempo Tp ( $\mu$ S) | Espesor e [mm] | Volumen [mm <sup>3</sup> ] | Peso [g] | Densidad [kg/m <sup>3</sup> ] |
|--------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------|-------------------------------|
| Tablones           | 15.32                | 10             | 181500                     | 106.56   | 587.11                        |
| Montantes (3 cm)   | 25.44                | 30             | 330750                     | 150.97   | 456.45                        |
| Montantes (3.5 cm) | 22.55                | 35             | 330750                     | 150.97   | 456.45                        |
| Poliestireno       | 68.00                | 30             | 331500                     | 7.6      | 22.93                         |

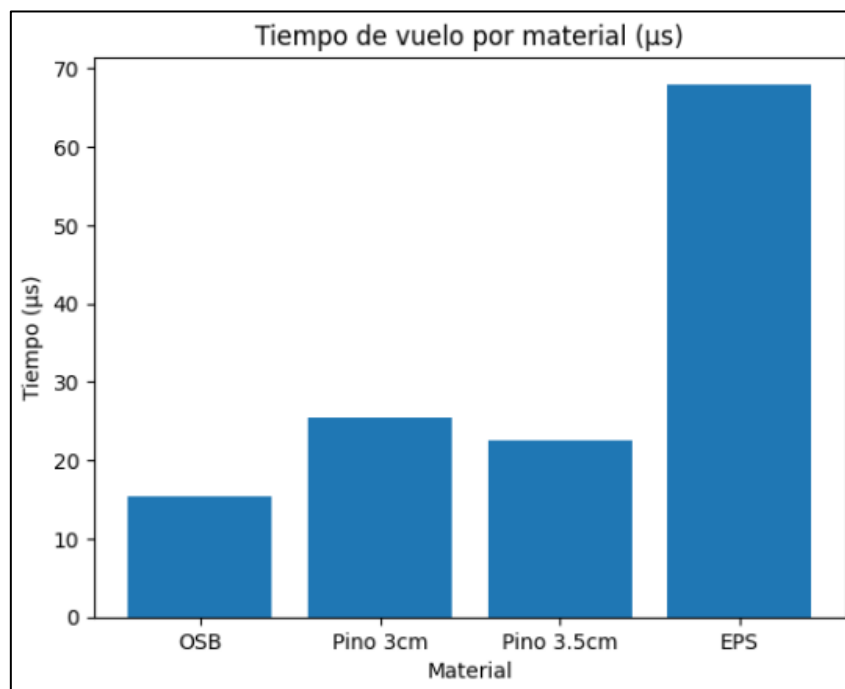


Ilustración 7. Representación gráfica del Tiempo de Vuelo por material (US)

Con las propiedades físicas de los materiales se obtiene la velocidad de onda longitudinal y el módulo de Young. Los resultados se muestran en la tabla 4 y gráficamente en la ilustración 8:

Tabla 4. Velocidad de onda y Modulo de Young de cada material en estudio.

| Material     | Velocidad Cp [m/s] | Coef. Poisson $\nu$ | E [Pa]        | Módulo de Young E |
|--------------|--------------------|---------------------|---------------|-------------------|
| Tablones     | 795.44             | 0.35                | 231458713.22  | 0.23 GPa          |
| Montantes    | 1321.88            | 0.30                | 592486202.37  | 0.59 GPa          |
| Montantes    | 1767.23            | 0.30                | 1058967181.39 | 1.06 GPa          |
| Poliestireno | 459.73             | 0.03                | 4836414.73    | 4.84 MPa          |

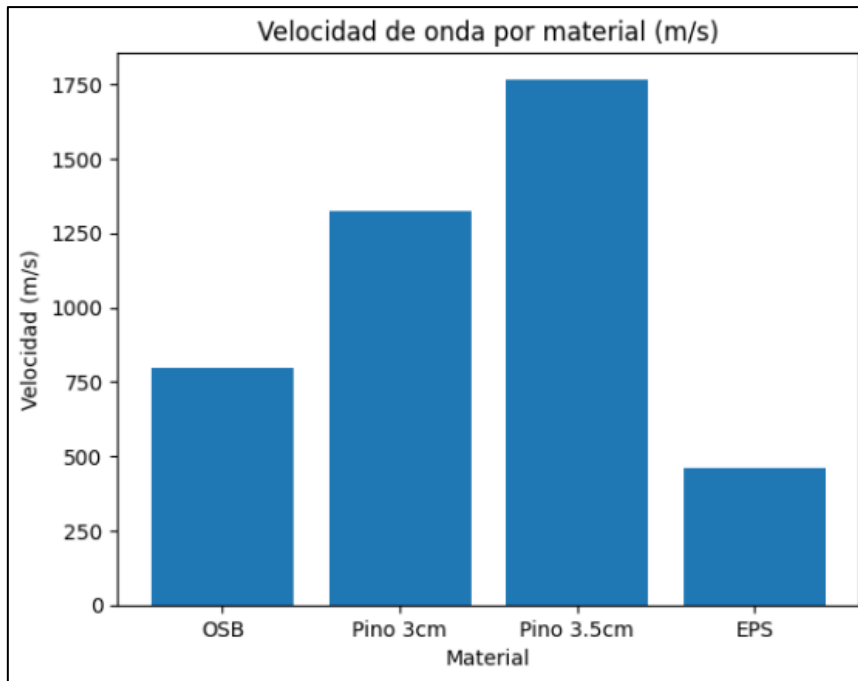


Ilustración 8. Representación gráfica de la Velocidad de onda por material (m/s).

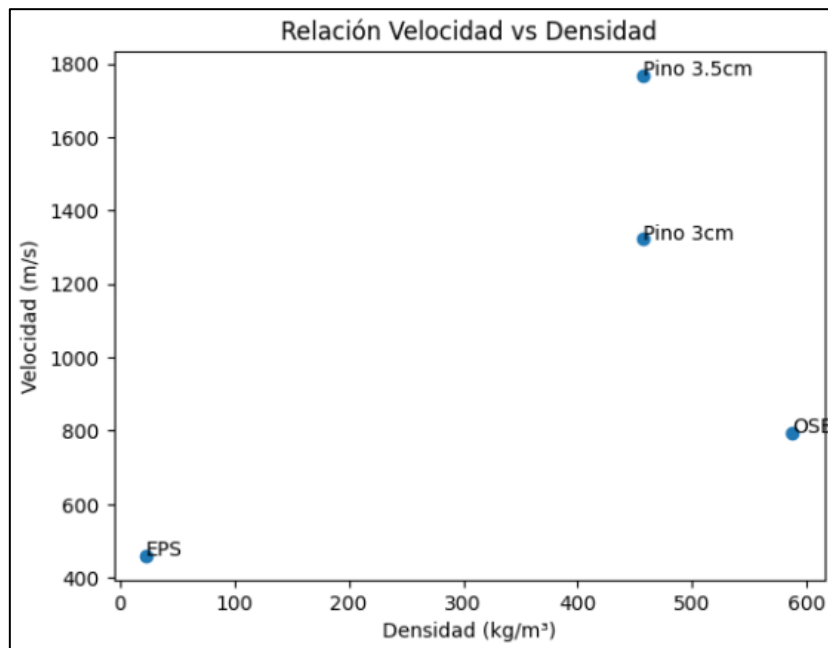


Ilustración 9. Relación entre velocidad de onda y densidad del material.

En base a las ilustraciones 7, 8 y 9, se puede observar como la velocidad de onda es más alta en la madera de pino. También es importante resaltar el comportamiento del poliestireno, ya que muestra un tiempo de vuelo más corto, una velocidad relativamente baja con respecto a su densidad; este fenómeno se puede deber a la interacción de la onda con el material.

Con la velocidad de onda también se calcula la impedancia acústica con la ecuación 8, los resultados se observan en la tabla 5:

Tabla 5. Impedancia acústica de cada material en estudio.

| Material     | Impedancia Acústica |           |
|--------------|---------------------|-----------|
|              | Z (Rayl)            | Z (MRayl) |
| Tablones     | 106560000           | 106.56    |
| Montantes    | 150970000           | 150.97    |
| Montantes    | 150970000           | 150.97    |
| Poliestireno | 7600000             | 76.0      |

Dado los resultados de la impedancia acústica, se puede calcular tanto el coeficiente de transmisión D y el coeficiente de reflexión R entre diferentes medios.

Tabla 6. Coeficiente de Transmisión D y Coeficiente de Reflexión R.

|              | Coeficiente de Transmisión D | Coeficiente de Reflexión R |
|--------------|------------------------------|----------------------------|
| Tablones     | 0.97                         | 0.03                       |
| Montantes    |                              |                            |
|              |                              |                            |
| Tablones     | 0.25                         | 0.75                       |
| Poliestireno |                              |                            |

En una primera observación nos damos cuenta de que la señal entre los tablones de OSB y los montantes de pino transmiten la señal alrededor de un 95%, mientras que la señal transmitida entre los tablones de OSB y el poliestireno es de tanto solo el 25%. Esto demuestra que la señal se pierde en materiales como el poliestireno. Esto se aprecia de mejor forma en la siguiente imagen:



Ilustración 10. Representación de la señal captada entre el poliestireno.



Por otro lado, se realizaron los ensayos de transmisión en el modelo del entramado en diferentes puntos (ilustración 11), como se describió previamente. Los resultados del tiempo de vuelo en las diferentes áreas del entramado se encuentran en las siguientes tablas 7, 8 y 9:

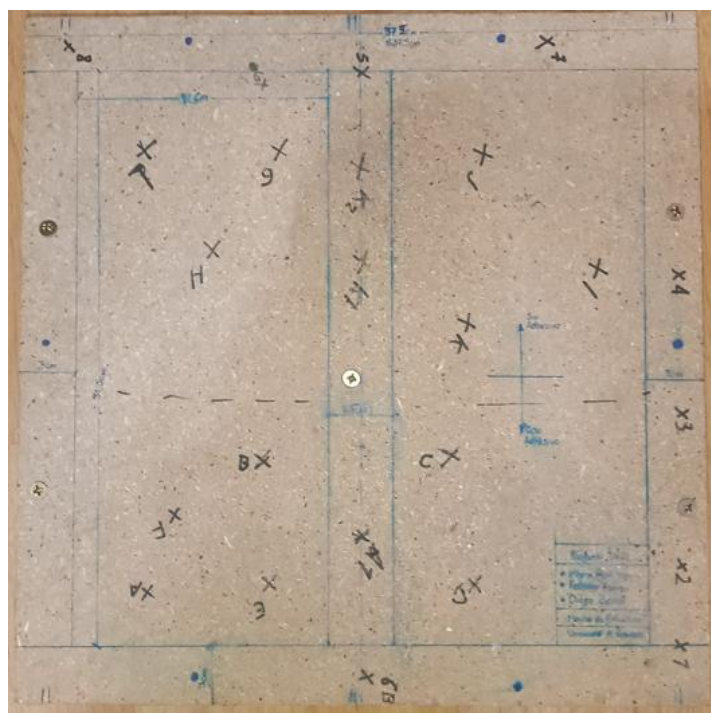


Ilustración 11. Representación de los puntos de muestreo.

Tabla 7. Medición en Muro Multicapa (Frame).

| Medición en Muro Multicapa  |                      |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                             | Montantes+2 Tablones |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Punto                       | 1                    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 6B     | AI     | KII    |
| Tiempo ( $\mu$ S)           | 66.21                | 50.28  | 54.07  | 50.73  | 52.93  | 55.03  | 55.97  | 59.84  | 118.01 |
|                             | 66.40                | 50.69  | 53.81  | 50.49  | 53.31  | 55.62  | 55.62  | 59.87  | 117.26 |
|                             | 65.94                | 51.21  | 52.66  | 50.61  | 51.84  | 54.09  | 54.09  | 59.89  | 116.73 |
| Media del Tiempo ( $\mu$ S) | 66.18                | 50.73  | 53.51  | 50.61  | 52.69  | 54.91  | 55.23  | 59.87  | 117.33 |
| Desv. ST. Tiempo ( $\mu$ S) | 0.19                 | 0.38   | 0.61   | 0.10   | 0.62   | 0.63   | 0.82   | 0.02   | 0.53   |
| Velocidad (m/s)             | 758.27               | 976.37 | 949.49 | 987.95 | 964.51 | 924.39 | 924.39 | 834.86 | 428.34 |

Tabla 8. Medición en Muro Multicapa (área sin adhesivo).

| Medición en Muro Multicapa  |                                       |        |        |        |        |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                             | 2Tablones+Poliestireno (Con Adhesivo) |        |        |        |        |
| Punto                       | A                                     | B      | C      | D      | E      |
| Tiempo ( $\mu$ S)           | 79.09                                 | 96.96  | 101.08 | 118.14 | 74.41  |
|                             | 78.98                                 | 97.01  | 101.12 | 118.21 | 74.35  |
|                             | 78.90                                 | 98.02  | 101.1  | 118.19 | 74.3   |
| Media del Tiempo ( $\mu$ S) | 78.99                                 | 97.33  | 101.10 | 118.18 | 74.35  |
| Desv. ST. Tiempo ( $\mu$ S) | 0.08                                  | 0.49   | 0.02   | 0.03   | 0.04   |
| Velocidad (m/s)             | 633.71                                | 510.10 | 494.56 | 423.05 | 672.95 |

Tabla 9. Medición en Muro Multicapa (área con adhesivo).

| Medición en Muro Multicapa |                                       |        |        |        |        |
|----------------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                            | 2Tablones+Poliestireno (Sin Adhesivo) |        |        |        |        |
| Punto                      | F                                     | G      | H      | I      | L      |
| Tiempo (μS)                | 115.81                                | 101.68 | 106.03 | 109.39 | 100.35 |
|                            | 114.27                                | 101.71 | 106.02 | 109.44 | 99.68  |
|                            | 113.77                                | 101.73 | 106    | 109.47 | 98.35  |
| Media del Tiempo (μS)      | 114.62                                | 101.71 | 106.02 | 109.43 | 99.46  |
| Desv. ST. Tiempo (μS)      | 0.87                                  | 0.02   | 0.01   | 0.03   | 0.83   |
| Velocidad (m/s)            | 439.48                                | 491.50 | 471.70 | 456.75 | 508.39 |

Al comparar los tiempos de vuelo entre los materiales por separado con los resultados en el entramado obtenemos los siguientes resultados:

Tiempo de Vuelo Tablones + Montantes:

$$T_{v,total} = 15.32\mu s + 25.44\mu s + 15.32\mu s = 56.08\mu s$$

$$T_{v,muro} = [50.61\mu s - 66.18\mu s]$$

Tiempo de Vuelo Tablones + Poliestireno:

$$T_{v,total} = 15.32\mu s + 68.00\mu s + 15.32\mu s = 98.64\mu s$$

$$T_{v,muro} = [78.99\mu s - 114.62\mu s]$$

## Análisis de viabilidad técnica, logística y económica del escalado del método

### Escenario de aplicación:

El estudio demuestra que el método de ultrasonido por transmisión directa presenta un alto valor de aplicación en el ámbito de la inspección de sistemas constructivos de entramados ligeros. La empleabilidad de esta metodología es especialmente relevante en procesos de control de calidad, tanto en entornos de fabricación industrializada como en obra.

A pesar de las limitaciones de los ensayos, el método podría aplicarse para verificar la correcta adherencia entre capas y detectar posibles discontinuidades internas antes del ensamblaje final. En obra, su aplicación permitiría evaluar el estado de paneles ya instalados, particularmente en zonas críticas donde se sospeche la presencia de defectos en las interfaces o pérdida de continuidad estructural.

No obstante, la implementación de esta metodología en campo depende de condiciones como el acceso a ambas caras del elemento, las propiedades geométricas del elemento y la preparación superficial, lo cual puede limitar su uso en el campo.



### Requerimientos logísticos:

La implementación del método requiere una infraestructura relativamente sencilla, lo que facilita su adopción en entornos reales.

En términos de recursos humanos, se requiere al menos dos técnicos capacitados en END, con conocimiento en interpretación de señales ultrasónicas y comportamiento de materiales heterogéneos. También es necesario incluir un equipo de ultrasonido portátil con transductores de baja frecuencia (menores a 100kHz) adecuados para materiales porosos, y un medio acoplante (gel) para garantizar la correcta transmisión de la señal entre el sensor y la superficie del material.

Desde el punto de vista operativo, el tiempo estimado de medición oscila entre los 5 a 10 minutos por punto, dependiendo de las condiciones de acceso y la calidad del acoplamiento. Para un panel típico, el tiempo total de inspección puede variar entre 30 a 60 minutos.

No obstante, el éxito de la inspección depende de las condiciones de accesibilidad al elemento, la limpieza de la superficie y la estabilidad del contacto entre los transductores y el material.

### Análisis económico y de escalabilidad

Desde el punto de vista económico, el método requiere de una inversión inicial que incluye el costo del equipo ultrasónico portátil (típicamente en rangos de 5,000 a 15,000 euros). A esto se suman los costos de los transductores y accesorios.

Adicionalmente, los costos operativos, dominados principalmente por la mano de obra, se estima entre 20 a 40 euros por hora por personal técnico especializado. Se incluye también los consumibles, como el gel acoplante.

Considerando estos factores, el costo estimado por inspección de un panel podría situarse entre los 20 a 50 euros, en función del número de puntos a evaluar y el tiempo requerido. Este costo resulta competitivo en comparación con técnicas más avanzadas (como los rayos X o las termografías), especialmente cuando se requiere de una evaluación rápida y no invasiva.

Por otro lado, la metodología presenta un grado de escalabilidad, particularmente en entornos de producción industrializada. En fábricas de paneles prefabricados, donde las condiciones de acceso, control geométrico y repetibilidad son óptimas, el ultrasonido puede integrarse como una herramienta de control de calidad sistemática. En este contexto, la metodología se podría automatizar mediante sistemas de posicionamiento o escaneo, reduciendo tiempos y aumentando la confiabilidad de la toma de datos.

En contraste, su aplicación en obra presenta mayores desafíos debido a la variabilidad de condiciones, accesibilidad limitada y presencia de acabados superficiales. Estas limitaciones pueden afectar tanto la calidad de la medición como la eficiencia del proceso.

### Viabilidad

A partir del análisis realizado, se concluye que el método de ultrasonido por transmisión directa es técnicamente viable para la evaluación de sistemas multicapa tipo entramado ligero, especialmente como herramienta de diagnóstico cualitativo.

Su bajo costo, facilidad de implementación y carácter no invasivo lo convierten en una opción atractiva para el control de calidad en entornos industrializados. Sin embargo, su aplicación en campo presenta limitaciones asociadas a la heterogeneidad del medio, la accesibilidad y la sensibilidad a las condiciones de acoplamiento.

Asimismo, los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la interpretación de las mediciones requiere un conocimiento profundo del comportamiento físico de la onda en medios compuestos, ya que las trayectorias reales de propagación pueden diferir significativamente de los modelos teóricos simplificados.

En consecuencia, se recomienda el uso del método como complemento a otras técnicas de evaluación no destructiva, especialmente en casos donde se requiera una caracterización más precisa o cuantitativa del estado interno del sistema.

## **CONCLUSIONES**

El presente estudio permitió evaluar la propagación de ondas ultrasónicas en un sistema multicapa tipo *entramado ligero*, evidenciando la fuerte influencia de las interfaces materiales en la transmisión de energía.

En primer lugar, se comprobó que la propagación de ondas longitudinales está altamente condicionada por el contraste de impedancias acústicas entre materiales. En particular, la interfaz entre madera y poliestireno expandido (EPS) genera una reducción significativa en la energía transmitida, lo cual se refleja en coeficientes de transmisión bajos (~25%) y un aumento considerable en los tiempos de vuelo.

Asimismo, los resultados experimentales evidencian la naturaleza anisotrópica de la madera, mostrando variaciones en la velocidad de propagación asociadas a la orientación de las fibras. Sin embargo, las velocidades obtenidas resultaron inferiores a los valores teóricos reportados

en la literatura, lo que demuestra la influencia de trayectorias no directas, la dispersión en interfaces y las limitaciones en el acoplamiento experimental.

Por otro lado, se observó que la presencia de adhesivo estructural mejora la continuidad del medio, favoreciendo la transmisión de la onda en comparación con zonas sin adhesivo, donde la presencia de aire genera una alta reflexión y pérdida de señal.

Adicionalmente, el poliestireno se comporta como un material altamente atenuante, no solo por su baja impedancia acústica, sino también por su estructura celular, que induce dispersión y posibles fenómenos de difracción, dificultando la detección directa de la onda transmitida.

Finalmente, se concluye que el ensayo ultrasónico por transmisión directa presenta limitaciones importantes en sistemas altamente heterogéneos, como el entramado ligero, especialmente en presencia de materiales aislantes. No obstante, el método resulta útil para la detección cualitativa de interfaces y discontinuidades, siempre que se interpreten los resultados considerando la complejidad del medio y las posibles trayectorias alternativas de propagación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Mario Requena, D. J. (2025). *Ultrasonidos como técnica de evaluación no destructiva en hormigón y madera: un estudio comparativo*. Granada.: Universidad de Granada.
- [2] G, L. S. (2023). *Aplicación de la medición de la velocidad de ultrasonidos (Sylvatest 4.0) a la caracterización de madera estructural de pino silvestre*. UVaDOC: Universidad de Valladolid.
- [3] Garcia Pinzon, J. y. (2019). *Análisis del concreto con poliestireno expandido (icopor) como agregado en mezclas para elementos no estructurales [Trabajo de grado de pregrado]*. Bogota D.C.: Repositorio Institucional Universidad Libre.
- [4] Iberolam Timber & Technology. (s.f.). *Manual de diseño constructivo mediante sistema de entramado ligero*. Universidad de Granada: Iberolam.