



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

ANGEL ALFONSO MEJIA VALENCIA

RAFAEL BACH VALSOLER

ROBERTO YANDRI MARTINEZ SANCHEZ

**COMPARACIÓN NO DESTRUCTIVA DEL
COMPORTAMIENTO MATERIAL DE DOS BARRAS ADIF
MEDIANTE ENSAYO DE TRANSMISIÓN DIRECTA**

ASIGNATURA: EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA Y CALIDAD EN ESTRUCTURAS

PROF. GUILLERMO RUS CARLBORG, ANTONIO CALLEJAS ZAFRA

UNIVERSIDAD DE GRANADA

MASTER ESTRUCTURAS

GRANADA, ESPAÑA

2026

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la integridad de los materiales sin causar daños ha adquirido una importancia creciente en diversas áreas de la ingeniería, especialmente cuando la seguridad estructural está involucrada. En este contexto, los ensayos no destructivos (END) desempeñan un papel fundamental, ya que permiten analizar el comportamiento interno de los materiales sin comprometer su utilización.

Entre los distintos métodos disponibles, el ensayo ultrasónico destaca por su amplia aplicación, precisión y capacidad para proporcionar información relevante no solo sobre la presencia de defectos, sino también sobre las propiedades del material evaluado.

Este tipo de ensayo se basa en la propagación de ondas mecánicas de alta frecuencia a través de un medio sólido. La onda se propaga a través del material, pudiendo verse afectada por discontinuidades internas o variaciones en sus propiedades. En el método de transmisión directa, utilizado en este trabajo, dos transductores independientes, uno encargado de la emisión y otro de la recepción de la señal, permitiendo medir el tiempo de recorrido de la onda en el interior de la pieza.

A partir de este tiempo y del espesor del material, es posible calcular la velocidad de propagación de la onda ultrasónica. Este parámetro, aunque físico, está directamente relacionado con las características internas del material, como la densidad y las propiedades elásticas.

En general, se espera que materiales homogéneos presenten valores de velocidad más consistentes. Por el contrario, la presencia de defectos internos, como porosidades o fisuras, puede alterar este comportamiento, generando variaciones en los resultados obtenidos.

Por ello, el análisis comparativo de la velocidad ultrasónica entre diferentes muestras se presenta como una estrategia adecuada para evaluar el comportamiento del material de forma indirecta. Este enfoque permite una visión más global del material, más allá de la simple identificación de defectos puntuales.

En el caso de componentes metálicos, especialmente aquellos utilizados en contextos estructurales como el sector ferroviario, los requisitos de calidad y fiabilidad son elevados. Pequeñas fallas pueden comprometer tanto el rendimiento como la seguridad de las estructuras, lo que refuerza la importancia del uso de técnicas de END en procesos de inspección y control.

En este trabajo, el análisis experimental se llevó a cabo mediante un ensayo ultrasónico en configuración de transmisión directa, en el cual se emplean dos transductores independientes: uno encargado de emitir la señal y otro de recibirla tras atravesar el material. Este enfoque permite evaluar la propagación de la onda ultrasónica a través del espesor de la muestra, proporcionando información relevante sobre su comportamiento interno.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Se analizaron dos barras metálicas, denominadas Barra 1 y Barra 2, con características geométricas similares. Ambas están constituidas de acero, y sus dimensiones fueron previamente determinadas, siendo el espesor un parámetro esencial para el cálculo de la velocidad ultrasónica.

Para la realización de los ensayos, se utilizó un equipo portátil de ultrasonido con configuración de transmisión directa, mostrado en la *Figura 01*, empleando dos transductores de contacto, uno como emisor y otro como receptor. Asimismo, se utilizó gel acoplante con el objetivo de mejorar la transmisión de las ondas entre los transductores y la superficie del material.



Figura 01 - Detectores de fallos por ultrasonidos.

2.2 Procedimiento experimental

Inicialmente, las superficies de las barras fueron limpiadas para eliminar impurezas que pudieran interferir en el contacto con el transductor. Posteriormente, se aplicó una capa de gel acoplante en la zona de medición.

Los transductores fueron posicionados de forma alineada, uno en cada cara de la muestra, favoreciendo la propagación de las ondas a lo largo del espesor del material. Con el fin de aumentar la fiabilidad de los resultados, se realizaron mediciones en diferentes puntos equivalentes en cada barra.

Antes de las mediciones, el equipo fue calibrado considerando la velocidad aproximada del sonido en el acero. Durante los ensayos, se registró el tiempo de propagación de la onda ultrasónica desde el transductor emisor hasta el receptor, atravesando el espesor del material.

2.3 Determinación de la velocidad ultrasónica

La velocidad de propagación de la onda se determinó a partir de la relación entre el espesor del material y el tiempo de tránsito medido experimentalmente, considerando la propagación directa de la onda entre el emisor y el receptor, utilizando la siguiente relación (1):

$$v = \frac{e}{t} \quad (1)$$

Donde v representa la velocidad de la onda en el material, e corresponde al espesor de la barra y t al tiempo de tránsito de la onda a través del material, desde el transductor emisor hasta el receptor.

Para cada barra, se calculó la velocidad media a partir de las mediciones realizadas, con el objetivo de reducir posibles variaciones puntuales y mejorar la representatividad de los resultados.

2.4 Análisis de los datos

Los valores de velocidad obtenidos fueron organizados y comparados entre sí. La interpretación de los resultados consideró que la velocidad ultrasónica está directamente relacionada con las propiedades internas del material.

De este modo, se adoptaron los siguientes criterios:

- Valores similares indican comportamiento homogéneo y ausencia de alteraciones relevantes.
- Diferencias significativas pueden estar asociadas a defectos internos, procesos de degradación o variaciones en el proceso de fabricación.

Además, se consideraron posibles fuentes de error experimental, como acoplamiento inadecuado, rugosidad superficial e imprecisiones en la medición del espesor.

2.5 Limitaciones del método

Aunque el ensayo ultrasónico por transmisión directa es ampliamente utilizado y presenta buenos niveles de fiabilidad, existen algunas limitaciones que deben ser consideradas. Entre ellas, destacan la dependencia de una adecuada calibración del equipo, la influencia de las condiciones de acoplamiento y la sensibilidad a irregularidades en la superficie.

Otro aspecto importante es que la interpretación de las señales requiere experiencia, ya que la presencia de ruido o reflexiones múltiples puede dificultar la interpretación de la señal recibida.

3. RESULTADOS

3.1 Equipo y configuración empleada

Parámetro	Valor
Equipo	Olympus EPOCH 650
Tipo de ensayo	Transmisión directa
Número de transductores	Dos transductores enfrentados: emisor y receptor
Frecuencia de transductores	5 MHz
Material ensayado	Acero
Densidad de referencia usada para estimaciones	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
Retardo instrumental anotado	$t_0 = 0,68 \text{ }\mu\text{s}$

3.2 Datos experimentales corregidos

La sección medida fue de 26,00 mm para la Barra 1 y de 26,22 mm para la Barra 2. Se registraron mediciones tanto en zona plana como en zona curva. La medición antes tratada como “Barra 3” queda corregida como “Barra 1 – zona curva”.

Elemento	Zona medida	Espesor L (mm)	Tiempo P (μs)	Tiempo S leído (μs)
Barra 1	Zona plana	26,00	5,42	14,04
Barra 2	Zona plana	26,22	5,40	14,29
Barra 1	Zona curva	26,00	4,34	11,00
Barra 2	Zona curva	26,22	4,24	10,82

3.3 Criterio de cálculo

Al tratarse de transmisión directa, el recorrido considerado es únicamente de ida entre el transductor emisor y el receptor. Por tanto, la velocidad se calcula como:

$$v = L / t$$

Donde L es el espesor atravesado y t es el tiempo de tránsito. Como 1 mm/ μs equivale a 1 km/s, los resultados se presentan directamente en km/s. Además, se calcula una velocidad corregida usando el retardo instrumental:

$$t \text{ corregido} = t \text{ medido} - t_0$$

3.4 Resultados de velocidades

Elemento	Zona	L (mm)	tP (μs)	tS (μs)	tP corr. (μs)	tS corr. (μs)	Vp bruta (km/s)	Vp corr. (km/s)	Vs aparente bruta (km/s)	Vs aparente corr. (km/s)	tS/tP	tS corr./tP corr.
Barra 1	Zona plana	26,00	5,42	14,04	4,74	13,36	4,797	5,485	1,852	1,946	2,59	2,82
Barra 2	Zona plana	26,22	5,40	14,29	4,72	13,61	4,856	5,555	1,835	1,927	2,65	2,88
Barra 1	Zona curva	26,00	4,34	11,00	3,66	10,32	5,991	7,104	2,364	2,519	2,53	2,82
Barra 2	Zona curva	26,22	4,24	10,82	3,56	10,14	6,184	7,365	2,423	2,586	2,55	2,85

Parámetro	Significado	Fórmula
L (mm)	Longitud recorrida por la onda ultrasónica entre emisor y receptor	—
tP (μs)	Tiempo de llegada de la onda longitudinal (onda P)	—
tS (μs)	Tiempo de llegada de la onda transversal (onda S)	—
tP corr (μs)	Tiempo corregido de la onda P (elimina retardos instrumentales)	$tP_corr = tP - t_0$
tS corr (μs)	Tiempo corregido de la onda S	$tS_corr = tS - t_0$
Vp bruta (km/s)	Velocidad de la onda P sin corrección	$Vp = L / tP$
Vp corr (km/s)	Velocidad de la onda P con tiempo corregido	$Vp = L / tP_corr$
Vs aparente bruta (km/s)	Velocidad de la onda S sin corrección	$Vs = L / tS$
Vs aparente corr (km/s)	Velocidad de la onda S corregida	$Vs = L / tS_corr$
tS/tP	Relación entre tiempos de onda S y P	tS / tP
tS corr / tP corr	Relación corregida entre tiempos	tS_corr / tP_corr

4. ANÁLISIS

4.1 Interpretación de la onda P

Las velocidades corregidas de la onda P obtenidas en las zonas planas son de aproximadamente 5,49 km/s para la Barra 1 y 5,56 km/s para la Barra 2. Estos valores son razonables para acero, aunque ligeramente inferiores al rango teórico habitual de 5,8 a 6,0 km/s. La diferencia puede estar asociada al acoplamiento, al retardo instrumental, a la precisión en la lectura del primer eco y a la geometría real de contacto entre los transductores.

En las zonas curvas, las velocidades P corregidas aumentan hasta aproximadamente 7,10 km/s y 7,37 km/s, valores superiores al rango esperado para acero. Esto indica que la lectura en zona curva es más sensible a errores de contacto, geometría, acoplamiento y selección del primer arribo. Por tanto, para caracterización del material se consideran más representativos los resultados de la zona plana.

4.2 Análisis específico de la onda S

Los tiempos identificados como onda S son mayores que los tiempos de onda P, lo cual es coherente cualitativamente, ya que una onda transversal viaja más lento que una onda longitudinal. Sin embargo, las velocidades S aparentes calculadas se encuentran aproximadamente entre 1,83 y 2,59 km/s, valores bajos respecto a los típicos del acero, que suelen estar cerca de 3,1 a 3,3 km/s.

Por esta razón, la señal marcada como S no debe utilizarse como una onda transversal pura para calcular propiedades elásticas definitivas. En esta configuración de transmisión directa, sin cuña angular ni transductor específico de onda cortante, la señal puede corresponder a ruido, modos convertidos, reflexiones internas, dispersión en la barra o pérdida de energía por contacto. La onda S se reporta como “aparente” y no como medición fiable de velocidad transversal.

4.3 Propiedades aparentes estimadas a partir de P y S

De forma orientativa, se estimaron el coeficiente de Poisson, el módulo de corte y el módulo de Young usando las velocidades corregidas. Estos resultados se consideran aparentes porque dependen de una señal S que no se ha identificado de forma plenamente fiable.

Elemento	Zona	v aparente	G aparente (GPa)	E aparente (GPa)
Barra 1	Zona plana	0,428	29,73	84,91
Barra 2	Zona plana	0,432	29,14	83,42
Barra 1	Zona curva	0,428	49,83	142,31
Barra 2	Zona curva	0,430	52,49	150,08

Los módulos de Young aparentes obtenidos quedan muy por debajo del valor típico del acero estructural, aproximadamente 200–210 GPa. Esto confirma que la señal S no debe emplearse para caracterización elástica definitiva en este ensayo.

4.4 Valores de referencia del acero

Propiedad	Valor típico
Velocidad onda P	5,8 – 6,0 km/s
Velocidad onda S	3,1 – 3,3 km/s
Módulo de Young	200 – 210 GPa
Coeficiente de Poisson	0,27 – 0,30
Densidad	≈ 7850 kg/m ³

ENSAYO ULTRASÓNICO POR PULSO-ECO

4.5. Descripción del ensayo

El ensayo se realizó mediante técnica de pulso-eco utilizando transductores de 5 MHz sobre barras de acero. En este método, el mismo transductor emite y recibe la señal, por lo que el tiempo medido corresponde al recorrido de ida y vuelta de la onda.

4.6. Datos experimentales

Elemento	Diámetro (mm)	Tiempo P (μs)
Barra 1	26.0	9.62
Barra 2	26.22	9.81

4.7. Cálculo de velocidad (pulso-eco)

En pulso-eco la velocidad se calcula como:

$$V = 2L / t$$

Donde L es el espesor y t el tiempo medido.

Elemento	Velocidad P (km/s)	Velocidad P (m/s)	Módulo Young (GPa)
Barra 1	5.41	5405	229.36
Barra 2	5.35	5346	224.31

5. Análisis de resultados

Las velocidades obtenidas se encuentran entre 5,40 y 5,35 km/s, valores ligeramente inferiores a los típicos del acero (5,8 – 6,0 km/s). Esta diferencia puede deberse a errores de medición del tiempo, acoplamiento del transductor o calibración del equipo.

El módulo de Young calculado presenta valores próximos al rango típico del acero estructural (200–210 GPa), aunque ligeramente superiores. Esta diferencia puede asociarse a incertidumbres en la medición del tiempo de tránsito, calibración del equipo o variaciones locales en el material.

6. CONCLUSIÓN

Los ensayos ultrasónicos realizados mediante las técnicas de transmisión directa y pulso-eco permitieron evaluar de manera no destructiva el comportamiento de dos barras de acero utilizadas en aplicaciones estructurales ferroviarias. A partir de los resultados obtenidos, se observó que ambas barras presentan un comportamiento ultrasónico similar, evidenciado por la proximidad de las velocidades de propagación registradas en cada caso.

En el ensayo de transmisión directa, las velocidades longitudinales corregidas obtenidas en las zonas planas se encontraron en un rango aproximado de 5,49 a 5,56 km/s, valores coherentes con los reportados para aceros estructurales. Esto sugiere que ambas barras poseen una adecuada homogeneidad interna y que no se identifican discontinuidades relevantes dentro de la sensibilidad del método empleado.

Por otro lado, las mediciones realizadas en zonas curvas presentaron velocidades superiores al rango típico esperado para el acero, alcanzando valores entre 7,10 y 7,37 km/s. Estos resultados indican que la geometría curva influye significativamente en el acoplamiento y en la interpretación de la señal ultrasónica, generando errores asociados a reflexiones, selección incorrecta del primer arribo o variaciones en el trayecto efectivo de la onda. Por esta razón, dichas mediciones no se consideran representativas para la caracterización real del material.

Respecto a la identificación de ondas transversales (ondas S), los resultados obtenidos mostraron velocidades considerablemente inferiores a las esperadas para acero. Esto sugiere que las señales registradas corresponden probablemente a modos convertidos, ruido o reflexiones internas y no a ondas cortantes puras. En consecuencia, las propiedades elásticas calculadas a partir de estas señales deben considerarse únicamente como estimaciones aparentes y no como valores definitivos del material.

En contraste, el ensayo por pulso-eco proporcionó resultados más consistentes para la caracterización del acero. Las velocidades obtenidas, cercanas a 5,35–5,41 km/s, permitieron estimar módulos de Young del orden de 224 a 229 GPa, valores próximos al rango típico de los aceros estructurales. Esto demuestra que la técnica de pulso-eco presentó una mayor estabilidad y confiabilidad para la evaluación de las propiedades elásticas en las condiciones del presente ensayo.

Finalmente, el trabajo confirma la utilidad de los ensayos ultrasónicos como herramientas eficaces para la evaluación no destructiva de materiales metálicos, permitiendo analizar indirectamente su comportamiento interno sin comprometer la integridad de las piezas. No obstante, los resultados también evidencian la importancia de controlar adecuadamente factores como la geometría de la muestra, el acoplamiento de los transductores y la correcta identificación de las señales ultrasónicas para garantizar interpretaciones confiables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KRAUTKRÄMER, Josef; KRAUTKRÄMER, Herbert.

Ultrasonic testing of materials. 5. ed. Berlin: Springer, 1990.

HELLIER, Charles.

Handbook of nondestructive evaluation. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

RAJ, Baldev; JAYAKUMAR, T.; THAVASIMUTHU, M.

Practical non-destructive testing. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.

ASTM INTERNATIONAL.

ASTM E114-15: *Standard practice for ultrasonic pulse-echo straight-beam contact testing*. West Conshohocken, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.

ISO 16810:2012. *Non-destructive testing — Ultrasonic testing — General principles*. Geneva, 2012.