

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



**UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA**

**ESTUDIO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
DISPOSITIVO ULTRASÓNICO PARA LA MEDIDA DE LA
VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SUPERFICIALES
EN SÓLIDOS**

TESIS DE MASTER

Autor:

Carlos Ortí Inglés

Director/es:

D. Francisco Camarena Femenía

D. Juan Vicente Sánchez Pérez

GANDIA, 2012

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

ESTUDIO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO ULTRASÓNICO PARA LA MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SUPERFICIALES EN SÓLIDOS

Autor: Carlos Ortí Inglés

Director1: Francisco Camarena Femenía

Director2: Juan Vicente Sánchez Pérez

Resumen

En los últimos años se han desarrollado múltiples técnicas para la caracterización ultrasónica de materiales. Mientras que los métodos más comunes usan técnicas de propagación de ondas en el interior del material bajo test, en el presente trabajo se propone un método para estimar las propiedades mecánicas de materiales sólidos mediante la medición de la velocidad de onda superficial Rayleigh u ondas Lamb. Para ello se ha diseñado y construido un prototipo capaz de medir la velocidad de propagación de estas ondas. Se trata de un método de caracterización por contacto directo con el material o tejido, no invasivo y de bajo costo, que además podría tener gran potencial para aplicaciones clínicas o en la industria alimenticia.

Abstract

In recent years many ultrasound techniques on materials characterization have been developed. Common methods use wave propagation techniques inside materials under test, in this document is suggested a method to estimate mechanical properties on solid materials throw measuring sound speed on Rayleigh waves or Lamb Waves. In order to do it, a prototype has been designed able to measure sound speed on this waves. This is a non-invasive and low-cost method for materials characterization by direct contact, furthermore it could have great potential on clinical applications and food processing industry.

Palabras claves: Caracterización, Velocidad de propagación, Prototipo, Ultrasonidos, Propagación superficial.

Autor: Carlos Ortí Inglés, email: caroan@epsg.upv.es

Fecha de entrega: 04/09/2013

Índice de contenidos

Resumen	2
Abstract	2
I. INTRODUCCIÓN	4
II. FUNDAMENTOS FÍSICOS	5
III. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO ULTRASÓNICO PROPUESTO	13
i. Principio general de funcionamiento	13
ii. Diseño del prototipo.....	14
iii. Conclusiones.....	20
IV. PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	21
i. Principio general	21
ii. Instrumentación de análisis	22
iii. Selección de los parámetros de medida	23
iv. Procesado de la señal	24
V. RESULTADOS EXPERIMENTALES	25
i. Caracterización de la propagación de ondas superficiales sobre diferentes materiales	25
ii. Conclusiones	37
iii. Resultados del prototipo propuesto.....	39
iv. Discusión	48
VI. FUTURAS VÍAS PARA EL DESARROLLO DEL DISPOSITIVO	49
VII. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	50
VIII. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	51
IX. ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.
i. Propiedades de la cerámica PIC 255	¡Error! Marcador no definido.
ii. Código empleado para la generación de la señal de excitación.....	¡Error!
iii. Código requerido para el cálculo de la velocidad de propagación.....	¡Error!

Marcador no definido.

Marcador no definido.

I. INTRODUCCIÓN

En la presente tesina se pretende llevar a cabo el estudio y montaje de un dispositivo ultrasónico, que determine las características elásticas de materiales sólidos de forma no destructiva.

El funcionamiento del prototipo propuesto se basa, en la medida de la relación temporal existente entre una excitación mecánica, aplicada sobre una muestra (un desplazamiento o esfuerzo) y la respuesta también mecánica producida por dicha muestra.

El principio general de medida se refleja en la figura 1. Aplicando una tensión eléctrica a un piezoeléctrico actuador, que vibra y ejerce una compresión sobre la muestra. A su vez, la vibración se transmite por el material, siendo la transmisión en la capa superficial la que nos permitirá detectar mediante otros dos piezoeléctricos, los piezoeléctricos sensores, el tiempo empleado por la vibración mecánica para recorrer la superficie del material.

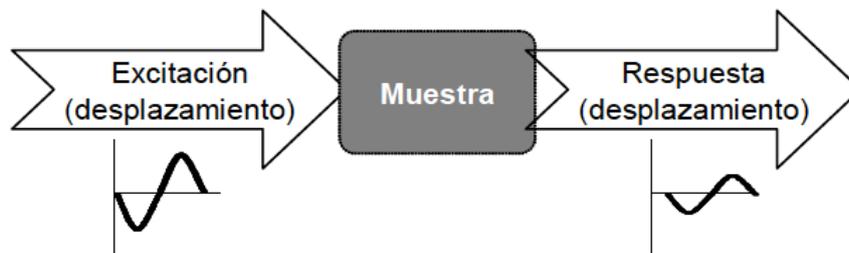


Figura I.1. Concepto general de la tesina

El valor de velocidad se obtendrá, a partir de la distancia recorrida y del tiempo transcurrido entre la salida de la onda desde el emisor y su llegada al receptor. Así, el tiempo empleado para el cálculo de la velocidad, tiempo de vuelo t_v , será definido como tiempo transcurrido desde que el equipo generador envía la señal a través del transductor emisor (actuador) hasta que el transductor receptor (sensor) detecta la llegada de la señal. La Obtención del t_v , se realizará mediante cálculos de similitud y correlación de señales.

II. FUNDAMENTOS FÍSICOS

En principio, los medios donde se pueden propagar ondas mecánicas deberán ser capaces de soportar deformaciones en su interior. Estas pueden ser del tipo de compresión o dilatación en la dirección de propagación y se observan en los tres estados básicos de la materia, es decir, en sólidos, líquidos y gases. Existen, en el caso de los sólidos, otras deformaciones que son del tipo cizalladura y cuyas direcciones de vibración y propagación son perpendiculares. Esto aumenta las diferentes formas en que podemos observar el fenómeno de la propagación de las ondas mecánicas.

Matemáticamente, la elasticidad se establece a través de constantes elásticas para cada materia que permiten la caracterización de fenómenos estáticos que se dan en diversas estructuras. La elasticidad determina cómo un medio permite la propagación de ondas mecánicas en su interior.

Modelo físico de propagación de ondas

Considerando un fluido homogéneo de densidad ρ y módulo de compresibilidad k , a partir de las ecuaciones de conservación del momento y de conservación de la masa, podemos obtener las expresiones que rigen la dinámica de dicho fluido:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla P \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -k \nabla \cdot v \quad (2)$$

Siendo P la magnitud escalar presión acústica y v la magnitud vectorial velocidad. La onda acústica será de naturaleza longitudinal y posee una velocidad de propagación c_p que depende de las propiedades del medio, de manera que:

$$c_p = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad (3)$$

La propagación de ondas elásticas en sólidos, vendrá gobernada por la segunda ley de Newton y la ley de Hooke, en función de las de constantes de Lamé λ , μ , y la densidad ρ de dicho sólido.

Así, la deformación en función del esfuerzo viene dada por la ley de Hooke (Auld, 1973):

$$\tau = c : \varepsilon \quad (4)$$

Donde τ el tensor de tensiones esfuerzo, ε el tensor de deformaciones y c el tensor de coeficientes elásticos. Así mismo, a partir de la definición de velocidad de partícula como

la derivada temporal del desplazamiento, podemos expresar la deformación ε en función de la velocidad v como:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{2} (\nabla v + v \nabla) \quad (5)$$

Sustituyendo en (5) podemos obtener el esfuerzo en función de la velocidad de partícula como:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{c}{2} (\nabla v + v \nabla) \quad (6)$$

Simplificando el modelo para sólidos isotrópicos en base ortogonal, podemos expresar el tensor de constantes elásticas c como:

$$c = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (7)$$

Reescribiendo (7), y a partir de la segunda ley de Newton, podemos expresar las ecuaciones constitutivas de la dinámica de sólidos en forma vectorial como:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = \lambda \bar{\nabla} (\nabla \cdot v) + \mu (\nabla v + v \nabla) \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla \cdot \tau \quad (9)$$

Siendo $\bar{\nabla} v$ la traspuesta de $v \nabla$. Podemos sustituir operador gradiente y la divergencia en el sistema de coordenadas más adecuado a nuestro problema para deducir las expresiones de forma escalar.

Este modelo describe la propagación en un sólido elástico, linear, isotrópico y sin pérdidas. Dicha propagación se caracteriza principalmente por presentar en el interior del sólido un comportamiento ondulatorio caracterizado por dos tipos de ondas.

Las primeras son las ondas longitudinales, las cuales implican la compresión y la rarefacción del medio. Cada partícula del medio por el cual viaja la onda longitudinal, se mueve sobre su posición de equilibrio en la dirección de propagación de la onda. Son denominadas también como ondas P (primarias), por ser las primeras ondas en aparecer en los sismógrafos (estudios de sismografía).

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

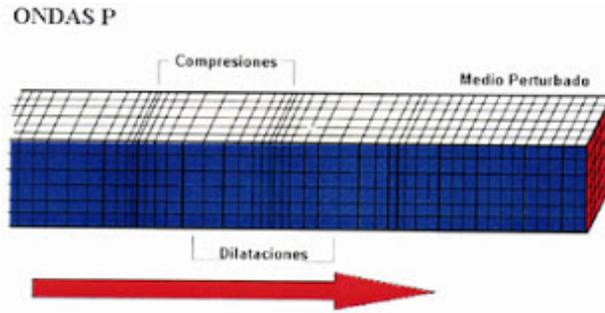


Figura II.1 Representación de la posición de partícula para una onda longitudinal

La velocidad de propagación c_p de esta onda se puede calcular como:

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (10)$$

Las segundas son las ondas transversales, de cizalla o ondas S (secundarias). La propagación de este tipo de ondas implica un movimiento de cizalla o rotación del material. El movimiento de la partícula es perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

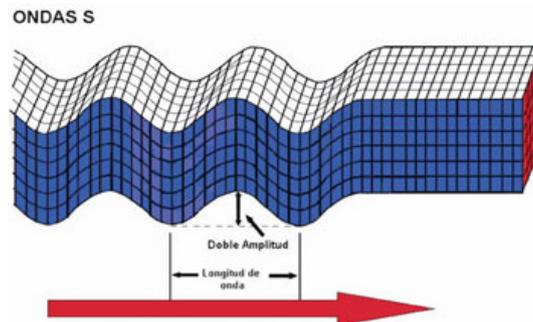


Figura II.2 Representación de la posición de partícula para una onda transversal

Dicha velocidad de propagación c_s en un sólido viene dada como:

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (11)$$

Ambos tipos de ondas pueden propagarse en medios sólidos, mientras que en líquidos y gases solo pueden existir las longitudinales, en dichos medios $\mu = 0$, y por consiguiente $c_s = 0$.

Para que en un medio solo se propaguen ondas longitudinales y transversales, éste deberá ser homogéneo, isotrópico e ilimitado. Si el medio es limitado aparecen también las ondas superficiales, las cuales podemos separar en ondas de Rayleigh y ondas love.

En las primeras, las partículas que son perturbadas por una onda de Rayleigh, vibran con una polarización elíptica en el plano sagital con respecto de la velocidad de propagación, es decir, trazan elipses respecto de su posición de equilibrio.

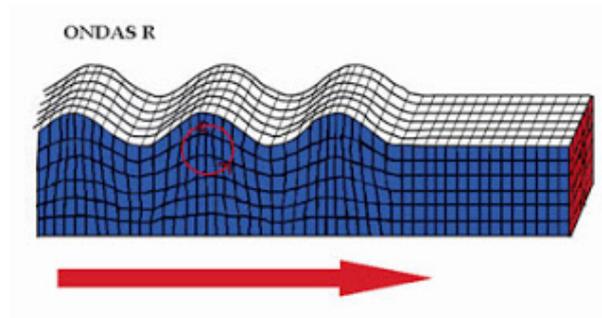


Figura II.3 Representación de la posición de partícula para una onda Rayleigh

Dichas elipses en la superficie, se trazan en el sentido contrario a las agujas del reloj. A una profundidad de entorno a $0,2\lambda$ las partículas vibran en la dirección vertical (velocidad de partícula en el eje x nula, ver Figura II.4, y por debajo, las elipses se trazan en sentido contrario. La amplitud del desplazamiento de las partículas decrece exponencialmente con la profundidad y lo hace más rápidamente a longitudes de onda pequeñas, por ello, la onda queda confinada en la superficie y solo alcanza unas pocas longitudes de onda, figura II.4. Por otro lado, la amplitud decrece con la distancia a la fuente r con un factor de $1/r$ en comparación con el factor de atenuación por divergencia de las ondas longitudinales y transversales que es $1/r^2$. Además, una fuente impulsiva localizada en la superficie tiende a transmitir mucha más energía por medio de ondas de Rayleigh que por medio de otro tipo de ondas (Seth Stein, 2003), por lo que las vibraciones de mayor amplitud detectadas en la superficie suelen ser debidas a ondulaciones tipo Rayleigh (Foti, 2000).

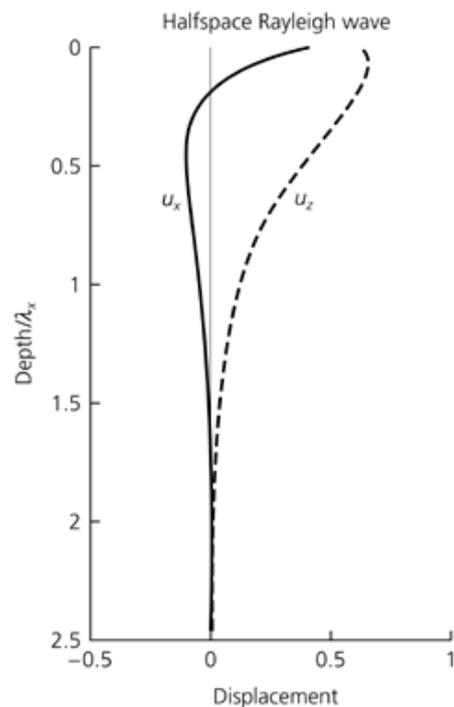


Figura II.4. Amplitud de las componentes del desplazamiento de partícula para una onda Rayleigh en función de la profundidad normalizada a la longitud de onda (Seth Stein, 2003).

La velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh c_R depende de las constantes elásticas, pero también de la geometría de la superficie, por lo que para una superficie plana (Foti, 2000) y asumiendo un módulo de Poisson igual a 0,25:

$$c_R \approx 0,92 \cdot c_S \quad (12)$$

La velocidad de la onda Rayleigh aumenta en función del módulo de Poisson ν del sólido, así podemos tomar como aproximación la expresión propuesta en (Malischewsky, 2005):

$$c_R = c_S(0,874 + 0,196\nu - 0,043\nu^2 - 0,055\nu^3) \quad (13)$$

Si el módulo de Poisson se mantiene en el rango $\nu = [0:0,5]$, la velocidad de la onda de Rayleigh varía aproximadamente entre $c_R \approx [0,85:0,95] c_S$.

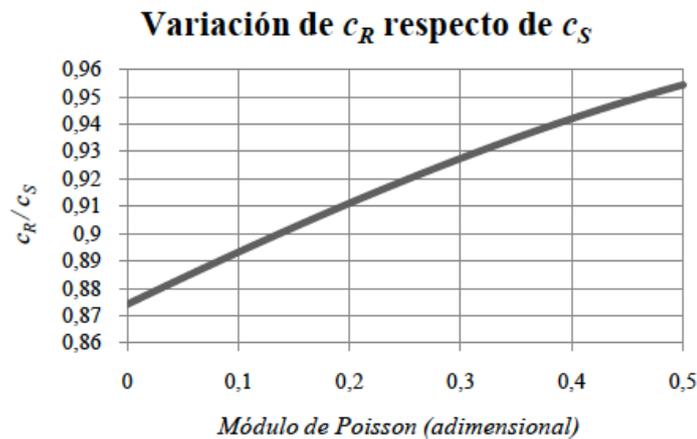


Figura II.5. Variación de la velocidad de propagación de una onda superficial de Rayleigh en función de la velocidad de propagación de una onda transversal y el módulo de Poisson.

Por otro lado, aunque teóricamente en un sub-espacio homogéneo, las ondas Rayleigh no son dispersivas, si existen heterogeneidades cada componente frecuencial viajará entonces a una velocidad concreta (Seth Stein, 2003).

Otro tipo de ondas superficiales son las ondas Love. El movimiento de partícula en estas ondas es transversal y paralelo a la superficie ver figura II.6. A diferencia de ondas de Rayleigh, las ondas love no pueden propagarse en un semiespacio homogéneo, estas pueden propagarse sólo si existe en el material una capa superficial de velocidad de propagación inferior a la de la capa subyacente.

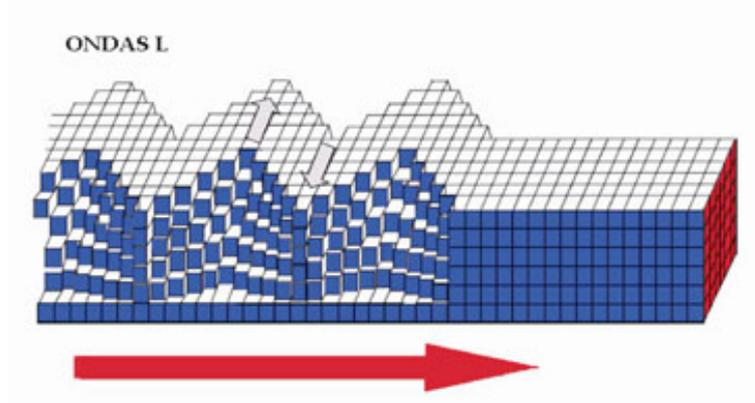


Figura II.6 Representación de la posición de partícula para una onda Love

Las ondas Love son dispersivas, y generalizando, podemos afirmar que la velocidad de propagación de una onda de Love c_L será (Seth Stein, 2003):

$$c_P \gg c_S > c_L > c_R$$

Cuando la propagación se produce sobre placas infinitas, cuyo espesor es del orden de algunas longitudes de onda, y con ambas superficies libres, se generan otro tipo de ondas, conocidas como ondas Lamb. Estas ondas se caracterizan por ser dispersivas y por la existencia de un conjunto discreto de modos de propagación, debido a que las componentes de los vectores de onda normales a la placa, deben satisfacer las condiciones de frontera libre. El movimiento de las partículas está en el plano que contiene la dirección de propagación de la onda y la normal de la placa (la dirección de propagación es perpendicular a la placa).

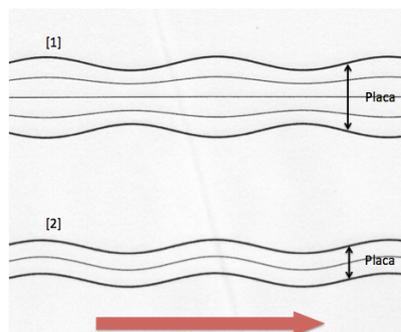


Figura II.7. Propagación de ondas Lamb en placa infinita. [1] modo simétrico; [2] modo asimétrico

Estas ondas, son detectadas por los desplazamientos normales que se originan en las caras de la placa. Por tal motivo, interesan solamente los estados de polarización L (longitudinal) y SV (shear vertical), que son los únicos que originan desplazamientos normales a la superficies de frontera. Los vectores u_L y u_T son los vectores de desplazamiento del medio para las ondas longitudinales y transversales respectivamente. Los vectores k_L y k_T son los respectivos vectores de propagación.

A causa de la conversión de modos en la reflexión, cada uno de estos estados de polarización genera dos con ambas polarizaciones que se reflejan en diferentes direcciones, toda vez que las ondas alcanzan las superficies superior e inferior de la placa.

Una forma eficaz de resolver el problema, es plantearlo en términos de los potenciales escalar φ y vectorial Ψ de desplazamiento, con las condiciones de frontera libre en las superficies de la placa. Esto conduce a dos ecuaciones independientes, para el número de onda k de las ondas Lamb propagándose en la dirección x de la figura II.8, ecuaciones 14 y 15.

$$(k^2 - s^2)^2 \sin qd \cos sd + 4k^2 qs \sin sd \cos qd = 0, \quad (14)$$

$$(k^2 - s^2)^2 \sin sd \cos qd + 4k^2 qs \sin qd \cos sd = 0, \quad (15)$$

donde

$$q^2 = \left(\frac{\omega}{v_t}\right)^2 - k^2, \quad s^2 = \left(\frac{\omega}{v_T}\right)^2$$

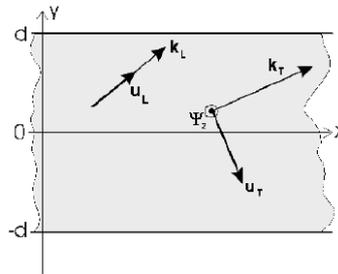


Figura II.8. placa con ondas transversales(polarización SV) y longitudinales (polarización L).

La velocidad de propagación depende de la frecuencia (o longitud de onda), así como de las constantes elásticas y la densidad del material. Este fenómeno es fundamental para el estudio y comprensión del comportamiento de las ondas en placas. Físicamente, el parámetro clave es la relación del espesor de la placa d y longitud de onda λ . Esta relación determina la rigidez efectiva de la placa y por lo tanto la velocidad de la onda. En aplicaciones tecnológicas, se utiliza un parámetro más práctico, fácilmente derivado de este, es decir, el producto del espesor y la frecuencia:

$$fd = \frac{dc}{\lambda}$$

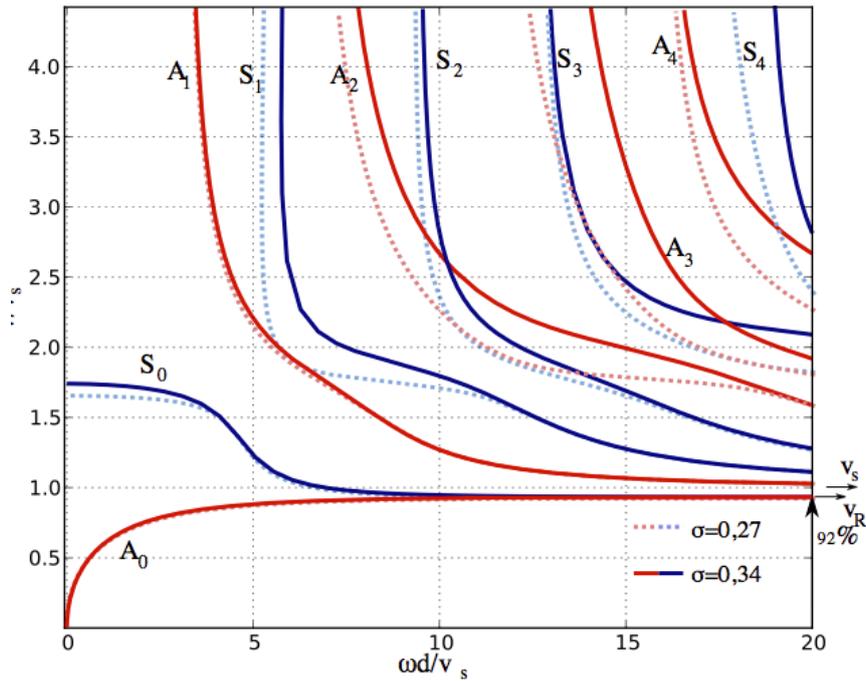


Figura II.9. Curvas de dispersión de ondas de Lamb para diferentes relaciones de Poisson.

En la figura anterior, el eje de las abscisas muestra el producto de la frecuencia angular y el espesor de la placa, normalizado por la velocidad de onda de transversal. En las ordenadas se muestra la velocidad de fase de la onda Lamb normalizada por la velocidad de onda de corte. Para altas frecuencias tienen la velocidad de la onda de Rayleigh, aproximadamente 92% de la velocidad de onda transversal.

Los modos de orden cero simétrico y anti-simétrico merecen una atención especial. Estos modos tienen frecuencias "nacientes" de cero. Por lo tanto ellos son los únicos modos que existen en todo el espectro de frecuencia. En la gama de baja frecuencia (es decir, cuando la longitud de onda es mayor que el espesor de la placa), estos modos son a menudo llamados "modo de extensión" y "modo de flexión", respectivamente. El movimiento de las partículas, es principalmente elíptico en el plano de la placa para el modo extensional simétrico y perpendicular al plano de la placa para el modo anti simétrico de flexión. Estas características cambian a frecuencias más altas.

Estos dos modos son los más importantes debido a que existen en todas las frecuencias y que en la mayoría de las situaciones prácticas, llevan más energía que los modos de orden superior.

III. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO ULTRASÓNICO PROPUESTO

Como ya se ha avanzado en el resumen, el objetivo de la actual tesina consiste en el estudio de la propagación de ondas mecánicas superficiales en sólidos, y el desarrollo de un prototipo capaz de medir la velocidad de propagación de este tipo de ondas.

i. Principio general de funcionamiento

El funcionamiento del dispositivo ultrasónico propuesto en esta tesina se basa en la medida de la relación entre una excitación mecánica (un desplazamiento o un esfuerzo) aplicada a una pequeña muestra del material a caracterizar y la respuesta también mecánica de dicha muestra. El principio general de medida se refleja en la figura III.1.

Aplicando una tensión eléctrica a un piezoelectrico actuador, vibra y hace vibrar a la muestra. A su vez, la vibración de la muestra se transmite a otros dos piezoelectrico, los piezoelectricos sensores, que mide la respuesta del material.

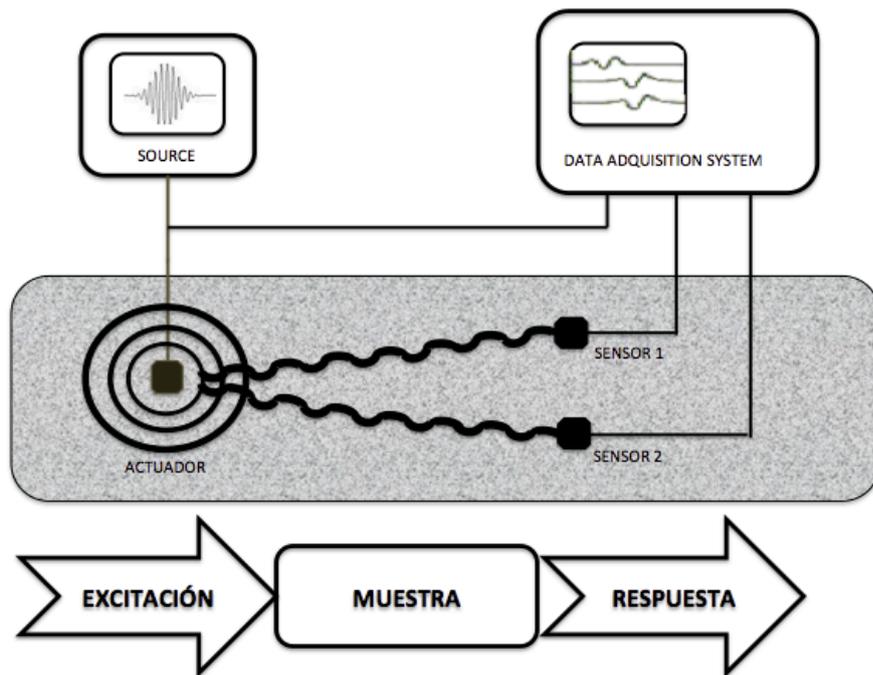


Figura III.1. Principio general de medida

ii. Diseño del prototipo

Para llevar a cabo el proceso de medida descrito en el punto III.i. el prototipo propuesto constará de las siguientes partes:

Actuador

Este elemento es el encargado de excitar la muestra de material a partir de la señal eléctrica proveniente del generador de señales. El actuador elegido es el modelo MA40S4S de PIEZOTITE, que se trata de un emisor ultrasónico basado en una cerámica piezoeléctrica, usado comúnmente para aplicaciones de control remoto, alarmas simples, o automatización de puertas.

Las principales motivaciones en la elección de este transductor han sido el bajo coste del mismo, y la adecuación de la optimización (Tamaño y frecuencia de trabajo) de este modelo a las necesidades del prototipo.

El aspecto del sensor y sus dimensiones son las que se muestran en la figura III.2.a y III.2.b.



Figura III.2.a. Aspecto del transductor adquirido

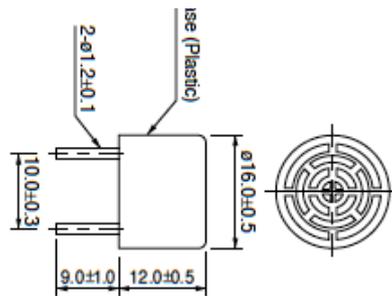


Figura III.2.a. Dimensiones del transductor

En la figuras III.3.a y III.3.b se muestran respectivamente la sensibilidad proporcionada por el fabricante, y la admitancia medida mediante el analizador de impedancias del laboratorio.

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

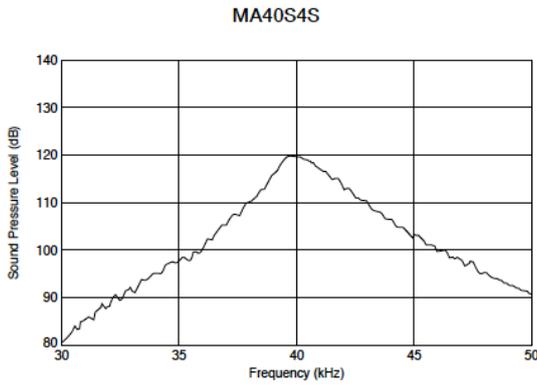


Figura III.3.a. Sensibilidad del transductor MA40S4S

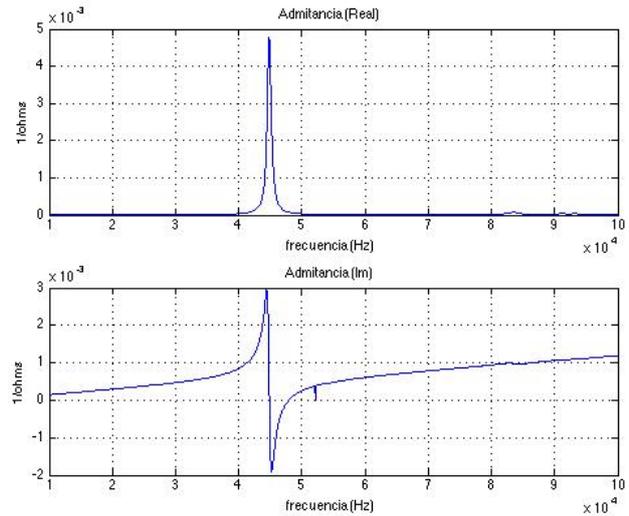


Figura III.3.b. Admitancia del transductor MA40S4S

Modelo	Frecuencia de trabajo	Tensión máxima de entrada
MA40S4S	40 KHz	20 V <i>pico</i>

La elección de este elemento para realizar la función de emisor, viene determinada por la conveniencia del rango frecuencial para el que está diseñado, por sus dimensiones, y también por su reducido coste. A pesar de todo ello, se ha realizado una serie de modificaciones necesarias para conseguir una buena transmisión de la señal. En primer lugar se ha roto la carcasa protectora externa, que impide el contacto directo entre el elemento activo (la cerámica), y el material bajo test. Debido a que el transductor está pensado para emisión en aire, éste incorpora una membrana pegada solidariamente a la cerámica, la cual también ha sido retirada. Por último se ha realizado la soldadura de las pestañas conductoras a un cable debidamente apantallado para reducir en la medida de lo posible las interferencias electromagnéticas entre emisor y receptor. El resultado final es el mostrado en la figura III.4



Figura III.4. Actuador

Sensores

A diferencia que en el caso anterior, para la elección de los sensores se ha realizado el diseño de estos, debido a las limitaciones geométricas determinadas por el sistema de posicionamiento del dispositivo final.

El material elegido para implementar los sensores es el PIC 255. Se trata de un material piezoeléctrico con alta temperatura de Curie y alto factor de acoplamiento. Estos parámetros y el bajo factor de calidad mecánico hacen a este material particularmente adecuado para transductores de ultrasonidos de baja potencia y sistemas de banda ancha en frecuencias no resonantes.

Las características determinadas por el fabricante para este material piezoeléctrico se incluyen en el anexo IV.I.

En figura III.5 se muestra una de las cerámicas usadas y las dimensiones de estas.



Figura III.5 Cerámicas piezoeléctricas usadas en los sensores

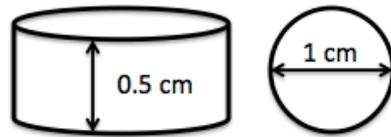


Figura III.6. Dimensiones de las cerámicas

Éstas cerámicas tienen geometría de disco plano para favorecer la vibración en modo espesor. En este tipo de vibración, tanto la diferencia de potencial como la deformación se producen entre las dos caras planas del disco, y la cerámica resuena a una serie de frecuencias, múltiplos impares de la frecuencia fundamental f_0 .

Los sensores requerirán una lámina de protección para evitar que una de las caras de la cerámica esté en contacto directo con el material a analizar, ya que por las rozaduras con éste, podrías producirse daños en el electrodo de la cerámica. Además se deberá realizar una conexión entre conductor y cerámica, para evitar que esta unión perjudique la adaptación entre cerámica y material bajo test, se soldará el conductor con el elemento protector, que deberá ser conductor eléctrico, al menos en su cara interior.

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

El espesor de la lámina es de 0.3 mm y tiene un diámetro de 1.25 cm.



Figura III.7. Lámina de protección

La unión entre cerámica y lámina de protección se realizó mediante un epoxi, compuesto principalmente de plata, que proporciona una unión rígida y con un buen factor de conductividad eléctrica, sobre la que se efectúa la soldadura del conductor. Para llevar a cabo este proceso contamos con la ayuda del departamento de electrónica, debido a la necesidad de la utilización de equipo técnico especializado tal como soldadores especiales u hornos de temperatura controlada.



Figura II.8. Unión entre cerámica y lámina de protección

Para la obtención de la señal registrada por los sensores se realizó la soldadura entre cable conductor y ambas caras de la cerámica, siendo dicha soldadura directamente sobre el electrodo de la cerámica para la parte superior, y sobre el material sobrante de epoxi en la cara inferior.

El resultado final es el que se muestra en la figura III.9

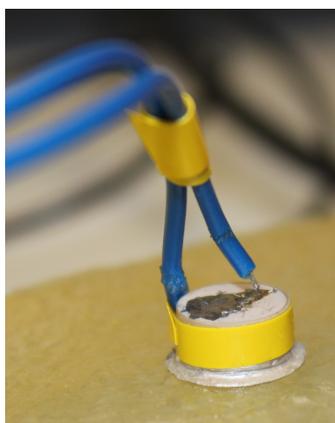


Figura III.9. Sensor

En la figura III.10 se muestra la curva de admitancia de uno de los sensores.

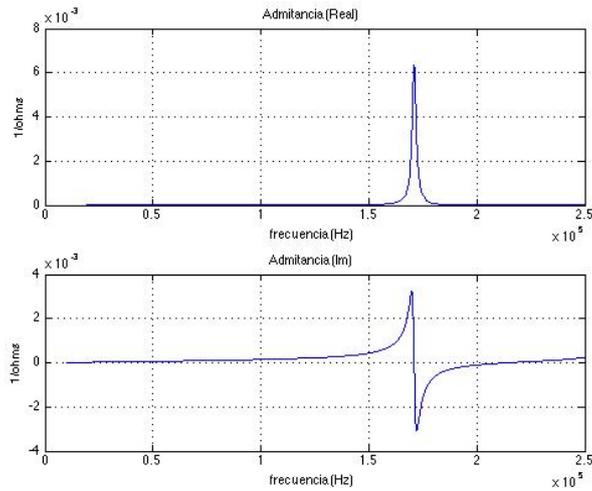


Figura III.10. Admitancia de la cerámica PIC 255

Como se puede apreciar en la curva de admitancia, estos sensores no están optimizados para la frecuencia de trabajo. El hecho de que la frecuencia de resonancia de las cerámicas, dependa de forma inversamente proporcional al espesor de este elemento, juega en nuestra contra, ya que para trabajar a 40 kHz (baja frecuencia), se requiere de una cerámica de exageradas dimensiones en cuanto al espesor, lo cual supondría un elemento piezoeléctrico muy frágil frente a golpes externos, y haría inviable su posterior ubicación en un dispositivo de reducidas dimensiones.

Sistema de posicionamiento adaptable

Estudiando cuidadosamente el diseño de la fijación mecánica del sistema y la adaptación de los elementos activos sobre las superficies de prueba, dispondremos de un sistema de posicionamiento adaptable de los elementos que conformarán el dispositivo, cuyo objetivo será el de asegurar un buen contacto o adaptación entre el actuador y sensores con la muestra de material a caracterizar, aún sobre superficies no planas.



Figura III.11. Sistema de posicionamiento adaptable

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

Se trata del marco de retención del cabezal de una maquinilla de afeitado, que a sido adaptado a las necesidades del presente proyecto.

Este objeto esta compuesto por un elemento central que conecta con tres ranuras circulares, donde irán situados los sensores y el actuador, las cuales incorporan un sistema de rotación y un sistema de presión vertical.



Figura III.12. Método de posicionamiento del marco de retención

El resultado de la colocación de los sensores y actuador en cada una de las ranuras circulares en el sistema de posicionamiento adaptable es el mostrando en la figura III.13.

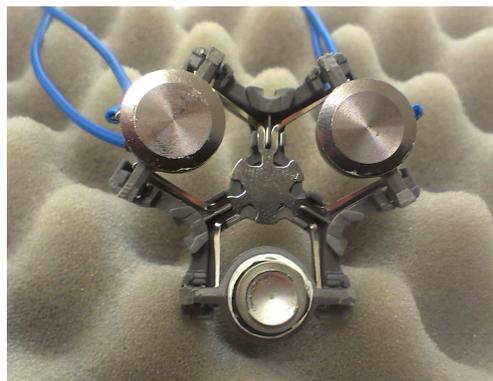


Figura III.13. Sistema compuesto por actuador, sensores y sistema de posicionamiento adaptable

La distancia entre los tres elementos adheridos al sistema de posicionamiento es de $2.44 \pm 0.01 \text{ cm}$ entre centros.

Carcasa

La pieza encargada de compactar los elementos nombrados asta el momento, será el cuerpo de la maquinilla de afeitado HP-1606 de Philips mostrada en la figura III.14.



Figura III.14. Maquinilla de afeitado Philips HP-1606

Para adecuarlo a las necesidades del dispositivo deseado, se ha retirado toda la parte electrónica interna y de cabezales de afeitado, empleando únicamente la carcasa de plástico de la afeitadora.

El conjunto de sistema de posicionamiento, actuador y sensores visto en el punto anterior, se sitúa en la parte superior del cuerpo, donde antes estaban los cabezales de afeitado, aprovechando el interior del cuerpo para realizar la sujeción de todos los elementos y del cableado necesario. El resultado final se muestra en la figura III.14.



Figura III.14. Prototipo de medidor de velocidad superficial

iii. Conclusiones

El medidor Piezoeléctrico de velocidad superficial propuesto en el presente trabajo consta de tres piezoeléctricos, un actuador de baja potencia y otros dos actuadores, fijados por un sistema de sujeción adaptable a diferentes superficies, y un cuerpo que hace compacto el conjunto. La originalidad de esta propuesta de sensor Piezoeléctrico, frente a las restantes encontradas en la literatura, radica en que a priori no requiere de ninguna medida previa de espesor de la muestra o del conocimiento del estado de esta. También con la compactación de los tres piezoeléctricos en un cuerpo fijo se pretende reducir el tamaño del instrumento de medida en su conjunto.

Esta configuración seleccionada con dos piezoeléctricos sensores, permitirá una estimación de la validez de cada una de las medidas, y la estimación de la homogeneidad de la muestra en cuestión para al menos las dos trayectorias de la onda superficial hacia los sensores.

La señal eléctrica medida en el dispositivo proporcionará información sobre el comportamiento elástico de la muestra.

IV. PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Parte de la presente tesina constará de la determinación de la velocidad de propagación, para definir dicha propagación superficial sobre cada uno de los materiales caracterizados. Además este estudio supondrá el punto de partida para la validación de las medidas realizadas posteriormente con el prototipo final.

i. Principio general

Como se ha anticipado, para validar las medidas realizadas posteriormente con el dispositivo final, será necesario conocer la propagación producida por nuestro actuador sobre diferentes materiales. Para realizar dicha tarea, se ha realizado un análisis temporal de las señales recibidas a diferentes distancias entre emisor y receptor, sobre diversos materiales (Metacrilatos, metales, maderas, phantoms, etc.), para caracterizar así la velocidad de propagación de la onda en dichas muestras. La configuración de los elementos empleados queda reflejada en la figura IV.1.

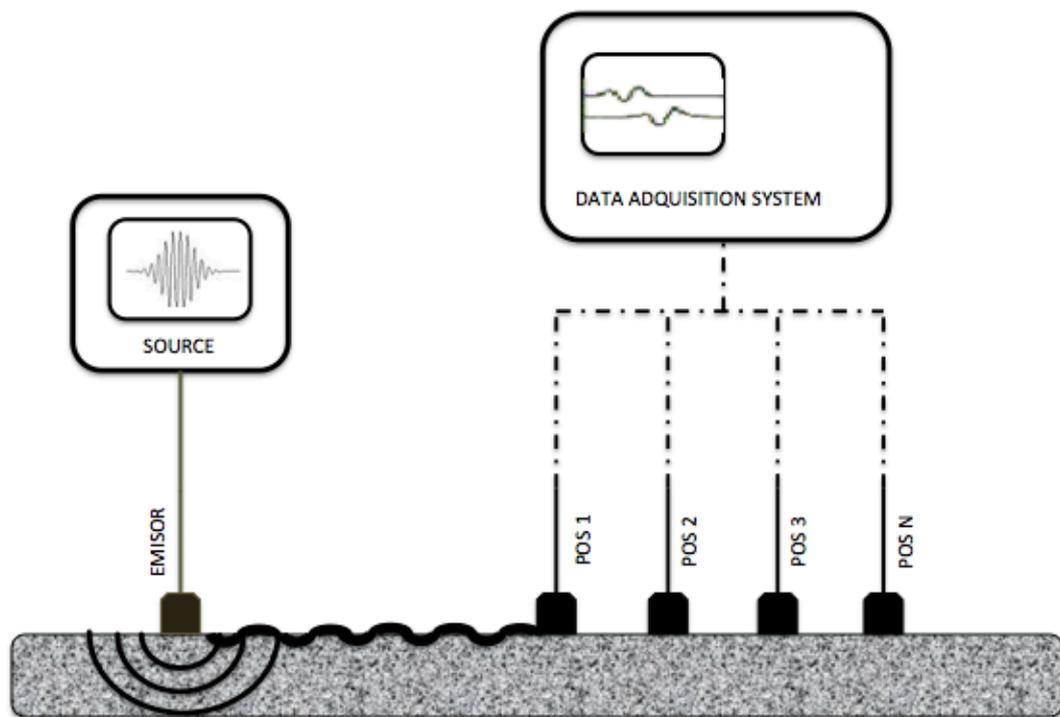


Figura IV.1 Montaje experimental para la caracterización de la velocidad de propagación superficial.

ii. Instrumentación de análisis

A continuación se enumera la instrumentación empleada tanto para la generación, amplificación y adquisición de las señales que intervienen en el proceso de medida.

Generador de señal

La generación de las señales ha sido mediante el generador de forma de onda arbitraria de National Instruments PXI/PCI – 5412. Las características mas relevantes se muestran a continuación:

- 1 canal de salida
- impedancia de salida 50Ω
- Resolución 14 bits
- Tipo de forma de onda arbitraria
- Tensión máxima de salida $12 V_{RMS}$
- Velocidad de muestreo 100 MS/s
- Rango frecuencial 0 Hz - 20MHz
- Memoria interna 256 MB
- Potencia nominal 22 W

La interfaz de programa para el desarrollo de aplicación ha sido mediante un programa elaborado en el software Labview y suministrado por el técnico del laboratorio.

Sistema de amplificación

Debido al insuficiente nivel de señal entregada por la tarjeta generadora, se requiere de amplificación. Con el fin de conseguir unos valores de entrega al emisor de entorno 20 V de pico se ha empleado el amplificador modelo 1040 de la marca comercial Electronics Innovation ,



Figura IV.2 Amplificador 1040 Electronics Innovation

cuyas características mas destacadas se presentan en la tabla siguiente:

Clase	Rango de frecuencias	Ganancia	Impedancia de entrada	Impedancia de salida	V máx. de entrada
AB	10-50000kHz	55 dB	50Ω	50Ω	1 Vp

Sistema de adquisición de señales

Partiendo de la premisa de usar el mismo equipo de medida para la caracterización de materiales, que posteriormente en el prototipo de medidor de velocidad superficial, El sistema de adquisición de datos empleado a sido el osciloscopio Tektronix TDS2024B

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

debido a que se trata del único sistema disponible en el laboratorio de física aplicada que es capaz de adquirir 3 señales distintas simultáneamente.



Figura IV.3 Sistema de adquisición empleado

Las características más destacables de este equipo son las siguientes:

- 4 canales de entrada
- impedancia de entrada $1\text{ M}\Omega$
- Máxima tensión de entrada 300 V_{RMS}
- Puerto USB Flash para almacenamiento de archivos
- Velocidad de muestreo 2.0 GS/s
- Ancho de banda 200 MHz
- Longitud de registro de 2500 puntos por canal

iii. Selección de los parámetros de medida

Señal de emisión

Para la caracterización de las ondas superficiales en sólidos se ha empleado una señal de burst de 5 ciclos con forma de onda sinusoidal de frecuencia 40 KHz modulada por una gaussiana. La representación de la señal empleada se muestra en la figura IV.4.

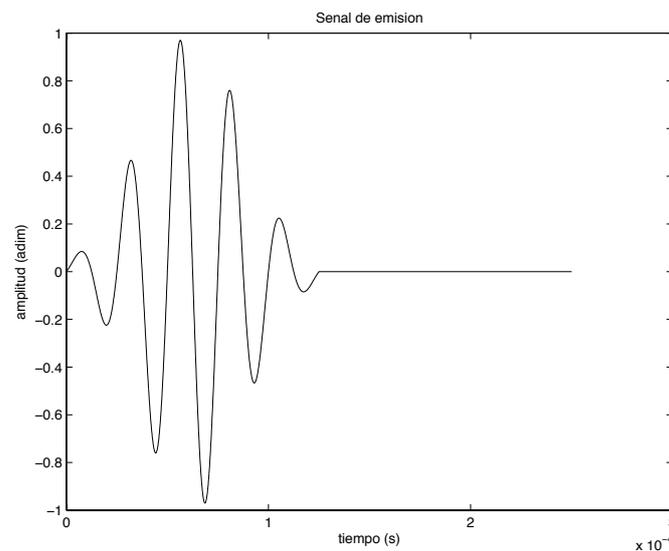


Figura IV.4 Señal de emisión

Esta configuración de forma de onda a sido elegida por las ventajas que presenta frente al mismo burst sin la modulación gaussiana, ya que mediante esta última se obtuvieron

medidas de la onda superficial distorsionadas por el efecto de tiempo de reacción de los transductores, ya que estos no podían recrear el brusco salto de la señal.

Con la modulación de la señal gaussiana sobre el burst se pretende conseguir una mayor adecuación del tiempo de reacción de los transductores, siendo la señal lo mas corta posible en tiempo, para obtener una excitación sobre la muestra que permita distinguir posibles rebotes de la señal sobre los contornos de la muestra. Para la elección del numero de ciclos de la señal burst, se ha realizado el ajuste de modo que las señales registradas presentaran una mayor coherencia.

El código de generación de la señal se presenta en el anexo IX.2.

Parámetros de generación de la señal de la figura IV.4.

- Tiempo de señal $250\mu s$ Frecuencia de muestreo 10 MHz
- Numero de ciclos 5 Frecuencia de trabajo 40 KHz
- Gaussiana $\rightarrow \mu = 0 ; \sigma = 250$

La tensión entregada por el amplificador será de $40 V_{pp}$. Actuando con el máximo valor posible, determinado por la máxima tensión de entrada admitida por el actuador.

Material de acoplamiento

Será necesaria la aplicación de un medio de acople que permita la transmisión de los ultrasonidos hasta la muestra, eliminando el aire entre el transductor y la muestra, y evitando así la reflexión de la señal en la superficie del actuador debida a la gran diferencia entre impedancias acústicas, cerámica-aire. En nuestro caso se ha utilizado vaselina pura para realizar dicha adaptación.

iv. Procesado de la señal

Una vez obtenidas las señales capturadas mediante el sistema de adquisición, ha sido necesaria la elaboración de un programa, realizado mediante el software MatLab para la detección del tiempo de vuelo de la señal.

El método en el que se basa dicho proceso es la correlación cruzada, entre la forma de onda emitida y la recibida para diferentes posiciones de sensor. Ha sido necesaria también la aplicación de varios filtrados y escalados para eliminar la componente continua y otros efectos indeseados presentes en la recepción y captura de las señales . El código empleado se adjunta en el anexo IV.III.

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

i. Caracterización de la propagación de ondas superficiales sobre diferentes materiales

Mediante el principio general definido en el apartado IV.i, se procederá a la medida de la propagación de ondas superficiales sobre diferentes materiales. El método de obtención de la velocidad de propagación para cada una de las muestras caracterizadas se resolverá con el ajuste lineal del tiempo de vuelo capturado, para distintas distancias de medida entre actuador y sensor.

Metacrilato

El primer material caracterizado será una muestra de metacrilato (PMMA) con forma cuadrada de 15 cm de lado y 3 cm de grosor. Este elemento se muestra en la figura V.1.



Figura V.1. Material de medida, PMMA

El PMMA es un termoplástico fundido polímero acrílico hecho a partir de monómeros de metacrilato de metilo, cuyas características elásticas mas relevantes son las mostradas en la siguiente tabla (D. R. Christman, 1972):

Módulo de Poisson ν [adim]	0.327
Módulo de Young	$6.08 \times 10^9 Pa$
Densidad	$1180 Kg/m^3$
Velocidad prop. longitudinal	$2751 m/s$
Velocidad prop. transversal	$1397 m/s$

Por lo tanto y según datos de la figura II.5, la velocidad superficial aproximada esperada será de **1271 m/s**

En la figura V.2, se muestran las señales obtenidas en este material en función del tiempo de captura. En ella se aprecia una evolución posicional del pulso positivo, que indica el crecimiento del retardo temporal en la recepción de la señal.

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

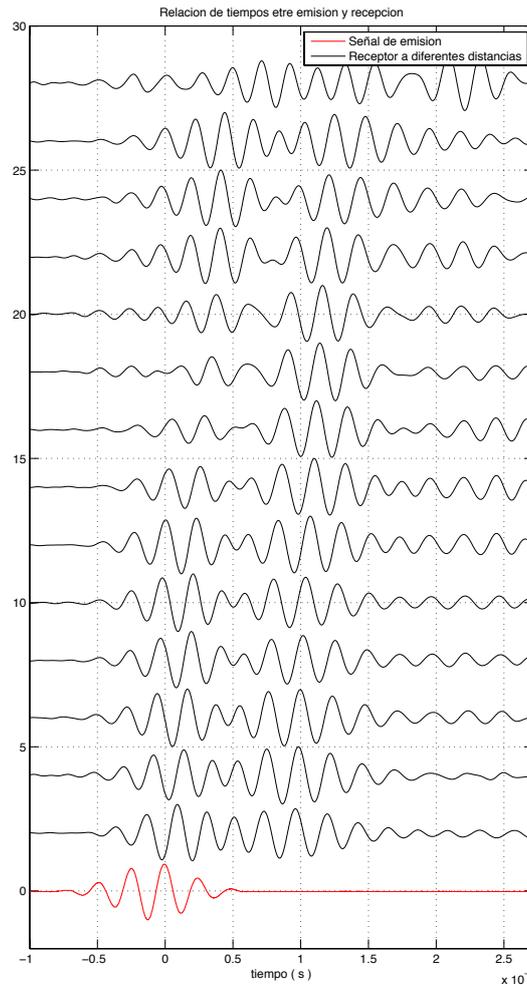


Figura V.2. Relación temporal entre señales recibidas en metacrilato

NOTA: La atenuación no está considerada ya que la amplitud está normalizada para cada una de las medidas.

A partir de los datos de distancia entre actuador y sensor, y de los retardos temporales observados en la figura anterior, se procede al cálculo de la velocidad de propagación superficial correspondiente a la muestra de PMMA analizada.

Dicha velocidad ha sido calculada mediante el ajuste lineal del tiempo de vuelo frente a la distancia entre emisor y receptor. En la siguiente tabla se muestra las distancias consideradas para esta muestra y los tiempos obtenidos para dichas distancias.

Distancia (mm)	13	18	22	28	32	35	39	43	46	49	52	58	70
Tiempo (s) $\cdot 10^{-6}$	9.3	13.7	17.5	21.2	24.5	26.3	29.5	35.9	39.3	41.7	42.3	44.7	---

Tabla V.1) Tiempo de vuelo de propagación respecto a la distancia emisor-receptor.

* " --- " indica resultado no válido debido a la deformación de la onda durante la propagación

En la figura V.3, se muestra el ajuste lineal realizado con los datos experimentales de la tabla V.1.

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

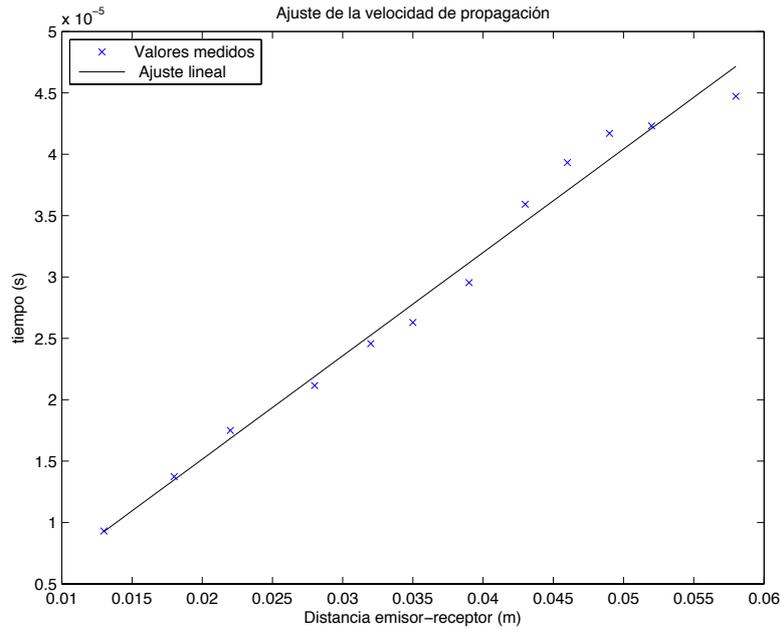


Figura V.3. Representación de los puntos de medida junto con el ajuste lineal de la velocidad de propagación en la muestra de PMMA

El resultado obtenido por el ajuste lineal es el siguiente:

Velocidad m/s	R^2	Termino constante (s)
1187	0.984	$- 1.68 \times 10^{-6}$

El error obtenido para la pendiente de recta de regresión corresponde al 3.9 % lo que conlleva una incertidumbre de $\pm 46 \text{ m/s}$

Vidrio

La muestra de vidrio bajo test tiene una forma rectangular de 18 x 19 cm de lado y 1.2 cm de grosor. Dicha muestra se presenta en la figura V.4.



Figura V.4. Material de medida, vidrio

El vidrio es un material inorgánico duro, frágil, transparente y amorfo que se puede encontrar en la naturaleza. Para este material, partiendo que desconocemos el tipo de

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

vidrio que intentamos caracterizar, nos valdremos, en principio de las características de dos tipos distintos de vidrio, vidrio sílex (1) y vidrio copa (2), para determinar así a cual de ambos se asemeja más la medida realizada. Las características elásticas más relevantes de ambos tipos de vidrio son las mostradas en la siguiente tabla (Propagación de U.S.):

Módulo de Poisson ν [adim]	0.22 - 0.23
Módulo de Young	$70 \times 10^9 Pa$
Densidad 1	$3880 Kg/m^3$
Densidad 2	$2250 Kg/m^3$
Velocidad prop. Longitudinal 1	$3980 m/s$
Velocidad prop. Transversal 1	$2380 m/s$
Velocidad prop. Longitudinal 2	$5100 m/s$
Velocidad prop. Transversal 2	$2840 m/s$

Por lo tanto y según los datos de la figura II.5, la velocidad superficial aproximada esperada será de **2165 m/s** para el caso del vidrio tipo sílex, y **2585 m/s** para el caso del vidrio tipo copa.

En la figura V.5, se muestran las señales obtenidas en este material en función del tiempo de captura. En ella se aprecia una evolución posicional positiva del pulso, que indica el crecimiento del retardo temporal en la recepción de la señal.

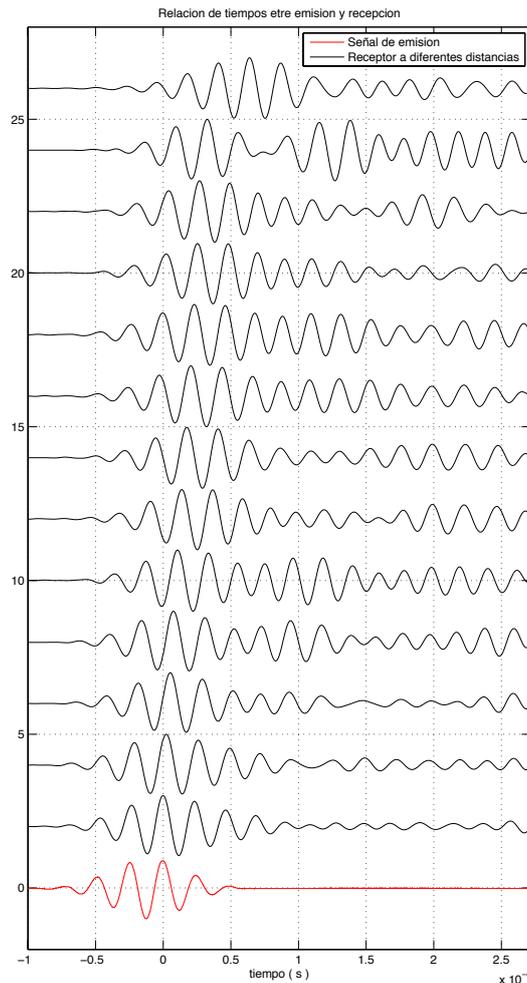


Figura V.5. Relación temporal entre señales recibidas en vidrio

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

Como en el caso anterior, a partir de los datos de distancia entre actuador y sensor y de los retardos temporales observados en la figura anterior, se procede al cálculo de la velocidad de propagación superficial correspondiente a la muestra de vidrio.

En la siguiente tabla se muestra las distancias consideradas para esta muestra y los tiempos obtenidos para dichas distancias.

Distancia (mm)	13	17	21	25	30	35	40	45	50	55	60	70
Tiempo (s) · 10 ⁻⁶	5.1	7.3	9.5	11.5	13.1	15.1	18.1	21	22.9	25.5	27.1	33.1

Tabla V.2) Tiempo de vuelo de propagación respecto a la distancia emisor-receptor.

En la figura V.6, se muestra el ajuste lineal realizado con los datos experimentales de la tabla V2.

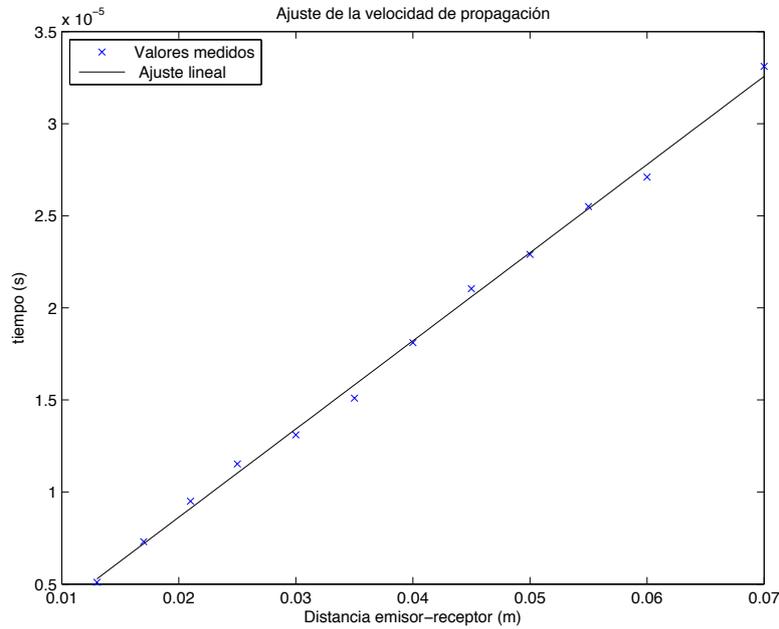


Figura V.6. Representación de los puntos de medida junto con el ajuste lineal de la velocidad de propagación en la muestra de vidrio

El resultado obtenido tras el ajuste lineal es el siguiente:

Velocidad m/s	R^2	Termino constante (s)
2089	0.997	$- 9.42 \times 10^{-7}$

El error obtenido para la pendiente de recta de regresión corresponde al 1.5 % lo que conlleva una incertidumbre de $\pm 31 \text{ m/s}$

Acero inoxidable

La muestra de acero bajo test tiene forma cuadrada de 42 cm de lado y 0.16 cm de grosor. Dicha muestra se presenta en la figura V.7.



Figura V.7. Material de medida, acero inoxidable

El acero inoxidable es un acero de elevada resistencia a la corrosión, debido al cromo, u otros metales aleantes que contiene. Una de sus características mas destacables es el alto nivel de conductividad eléctrica. Sus propiedades elásticas mas destacables se muestran en la tabla siguiente.

Módulo de Poisson ν [adim]	0.30 – 0.31
Módulo de Young	$210 \times 10^9 Pa$
Densidad	$7900 Kg/m^3$
Velocidad prop. longitudinal	$5790 m/s$
Velocidad prop. transversal	$3100 m/s$

Por lo tanto, la velocidad superficial aproximada esperada será de **2865 m/s**.

Una vez mas en la figura V.8, se muestran las señales obtenidas en este material en función del tiempo de captura.

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

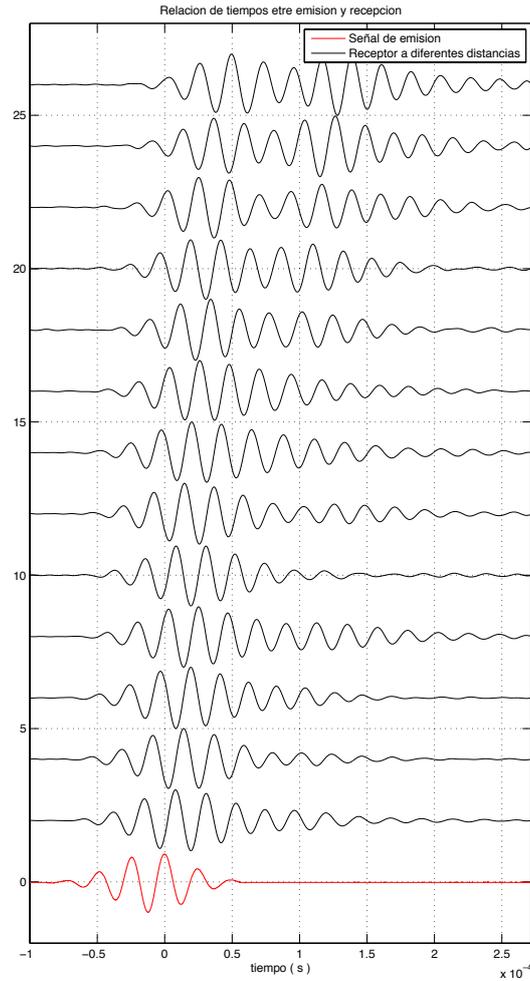


Figura V.8. Relación temporal entre señales recibidas en acero inoxidable

En la siguiente tabla se muestra las distancias consideradas para esta muestra y los tiempos de vuelo de propagación de las ondas obtenidos para dichas distancias.

Distancia (mm)	13	17	21	25	30	35	40	45	50	55	60	70
Tiempo (s) · 10 ⁻⁶	9.9	13.5	19.5	24.7	29.9	34.9	39.9	44.5	37.9	41.9	48.5	59.3

Tabla V.3) Tiempo de vuelo de propagación respecto a la distancia emisor-receptor.

En la figura V.9, se muestra el ajuste lineal realizado con los datos experimentales de la tabla V.3

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

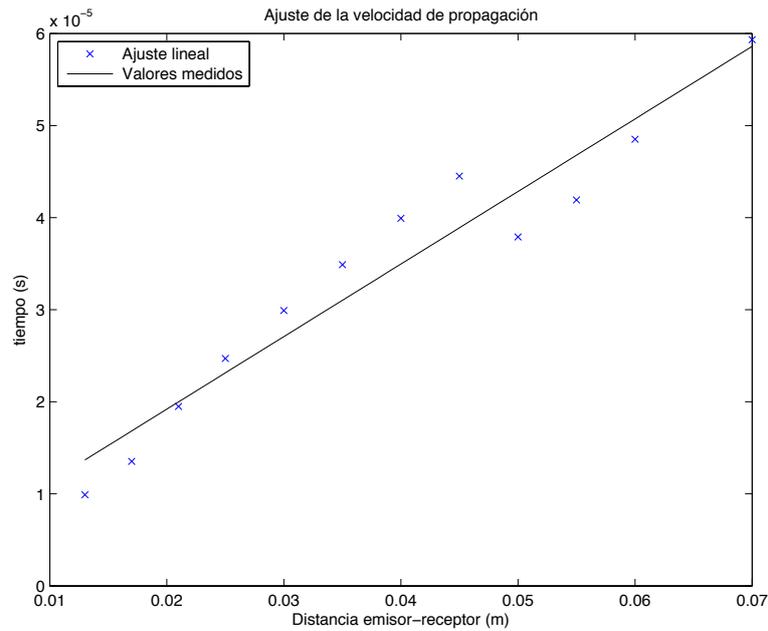


Figura V.9. Representación de los puntos de medida junto con el ajuste lineal de la velocidad de propagación en la muestra de acero inoxidable

El resultado obtenido tras el ajuste lineal es el siguiente:

Velocidad m/s	R^2	Termino constante (s)
1269	0.933	$- 3.44 \times 10^{-6}$

El error obtenido para la pendiente de recta de regresión corresponde al 8.5 % lo que conlleva una incertidumbre de $\pm 108 \text{ m/s}$

Madera

La muestra de madera tiene una forma cuadrada de 50 cm de lado y 1.25 cm de grosor. Dicha muestra es presenta en la figura V.10.



Figura V.10. Material de medida, madera

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

La madera es un material de origen orgánico. Es uno de los materiales más versátiles utilizado en diversas aplicaciones. Debido a la incertidumbre del tipo de madera del que se trata, para este material no definiremos los parámetros elásticos.

En la figura V.11, se muestran las señales obtenidas en la placa de madera en función del tiempo de captura.

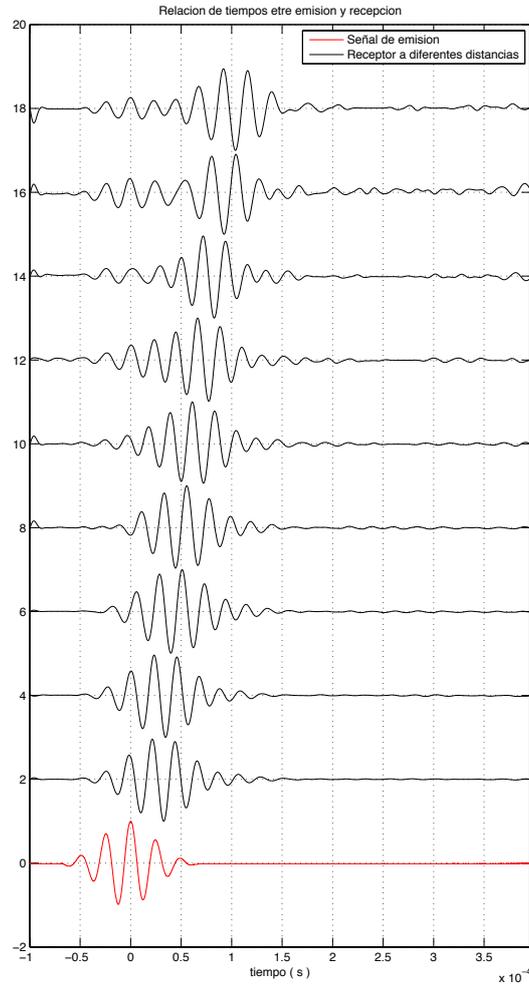


Figura V.11. Relación temporal entre señales recibidas en madera

En la siguiente tabla se muestra las distancias consideradas para esta muestra y los tiempos de vuelo obtenidos para dichas distancias.

Distancia (mm)	13	17	21	25	30	35	40	45
Tiempo (s) · 10 ⁻⁵	2.05	2.29	2.79	3.25	3.83	4.45	5.12	---

Tabla V.4) Tiempo de vuelo de propagación respecto a la distancia emisor-receptor.

* " --- " indica resultado no valido debido a la deformación de la onda durante la propagación

En la figura V.12, se muestra el ajuste lineal realizado con los datos experimentales de la tabla V.4

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

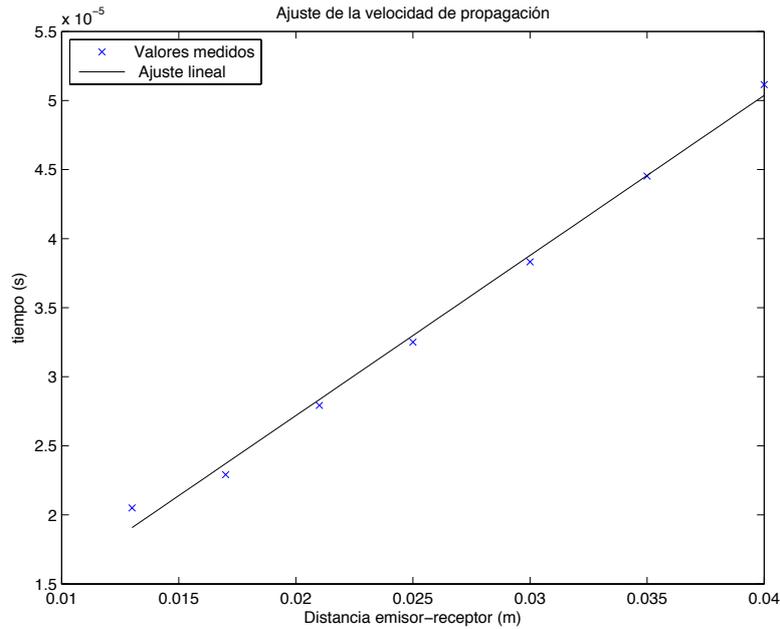


Figura V.12. Representación de los puntos de medida junto con el ajuste lineal de la velocidad de propagación en la muestra de madera

El resultado obtenido por el ajuste lineal es el siguiente:

Velocidad m/s	R^2	Término constante (s)
863	0.995	$- 4.01 \times 10^{-6}$

El error obtenido para la pendiente de recta de regresión corresponde al 3.2 % lo que conlleva una incertidumbre de $\pm 27 \text{ m/s}$

Gelatina

Esta última muestra, se trata de una gelatina elaborada por Rocio Peña en la realización de su tesina. Dicha gelatina se emplea a modo de Phantom para simular las propiedades físicas de la piel humana. Para conseguir dicho propósito se compuso de agua, gelatina neutra y agar. La muestra analizada se presenta en la figura V.13.



Figura V.13. Material de medida, Phantom

En la figura V.14, se muestran las señales obtenidas en este material en función del tiempo de captura.

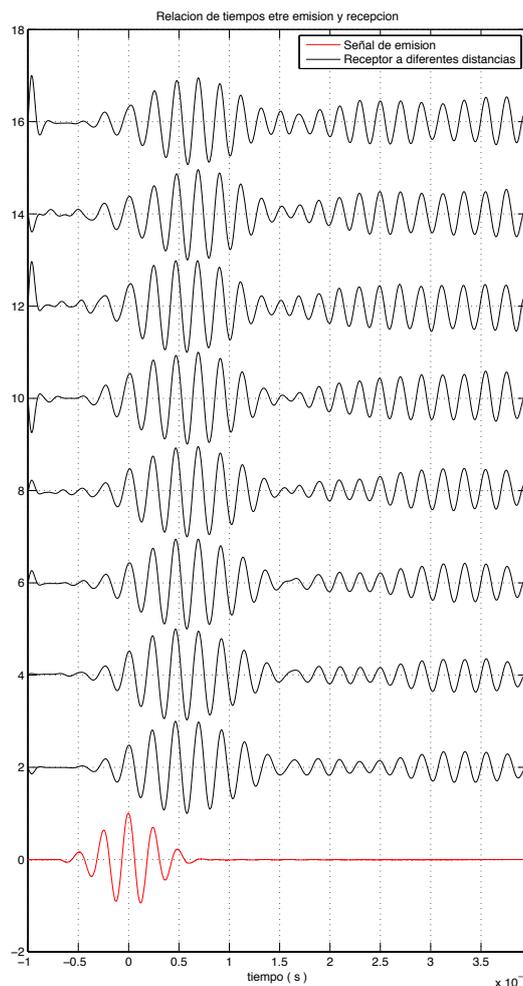


Figura V.14. Relación temporal entre señales recibidas en phantom

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

En la siguiente tabla se muestra las distancias consideradas para esta muestra y los tiempos de vuelo obtenidos para dichas distancias.

Distancia (mm)	13	16	19	22	25	31	34
Tiempo (s) · 10 ⁻⁵	2.55	2.69	4.33	4.65	4.65	6.92	6.94

Tabla V.5) Tiempo de vuelo de propagación respecto a la distancia emisor-receptor.

En la figura V.15 se muestra el ajuste lineal realizado con los datos experimentales de la tabla V.5

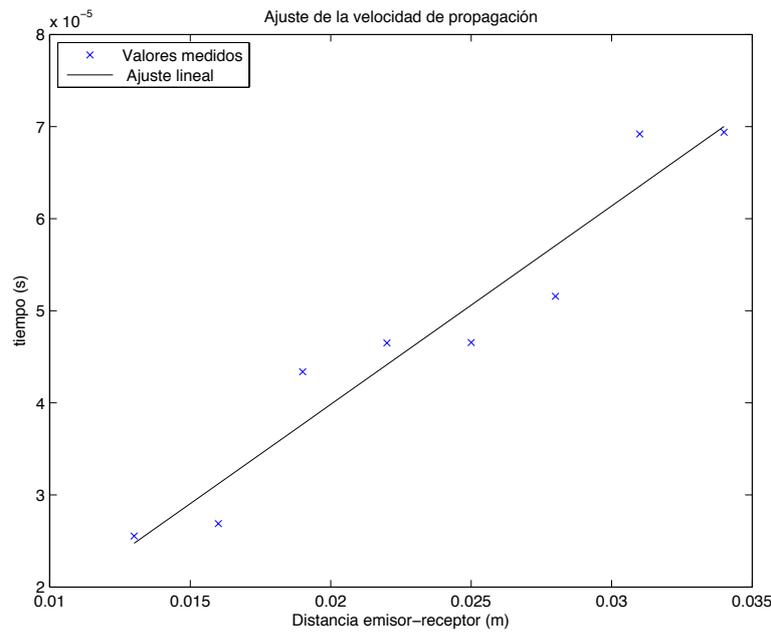


Figura V.15. Representación de los puntos de medida junto con el ajuste lineal de la velocidad de propagación en la muestra de phantom

El resultado obtenido por el ajuste lineal es el siguiente:

Velocidad m/s	R^2	Termino constante (s)
464	0.927	$- 3.26 \times 10^{-6}$

El error obtenido para la pendiente de recta de regresión corresponde al 11.4 % lo que conlleva una incertidumbre de $\pm 53 \text{ m/s}$

ii. Conclusiones

En la tabla V.6, se comparan los valores de velocidad de propagación obtenidas a partir de diferentes bibliografías y las resultantes del método propuesto en este capítulo.

Material	Metacrilato	Vidrio	Acero inox.	Madera	Gelatina
Vel. esperada	1271	2165	2865	---	---
Vel. medida	1187±46	2089±31	1269±108	863±27	464±53

Tabla V.6. Comparación entre velocidad de propagación teórica y medida

* " --- " indica valor no determinado.

De la tabla anterior concluimos que los resultados obtenidos en la medida de la velocidad de las ondas superficiales se corresponden con bastante fidelidad a los esperados, en los materiales de los que disponíamos de sus propiedades elásticas, a excepción de la placa de acero inoxidable, cuyo caso será tratado a continuación. Los desajustes entre estos pueden ser debidos a que los datos obtenidos de bibliografía, no sean exactamente los correspondientes a las muestras analizadas, pero aún así sirven como buena referencia para validar los resultados obtenidos.

Se puede apreciar también en las figuras que representan los puntos de medida frente a los ajustes lineales (figuras V3, V6, V9, V12 y V15), que cuanto menor absorción se espera del material a caracterizar, mejor se adecuan los valores medidos con el ajuste obtenido. Esta circunstancia era previsible, debido a que la absorción y no homogeneidad de las muestras producen deformaciones en la señal, que dificultan enormemente la determinación con exactitud de la velocidad de propagación sobre las muestras. Este hecho se hace claramente visible en la inspección de las señales recibidas por el sensor, sobre la muestra más desfavorable, figura V14 (gelatina). La no exactitud de las medidas en dichas muestras puede ser debido, al efecto causado por esta circunstancia sobre el proceso de correlación cruzada empleado en el procesamiento de las señales.

Así los resultados más ajustados a la recta de regresión lineal, son los producidos por la muestra de vidrio con coeficiente de determinación lineal $R^2 = 0.997$ y un error del 1.5 %, siendo material de presumiblemente menor absorción, frente a los obtenidos en el caso de la gelatina, con $R^2 = 0.927$ y un error del 11.4%, siendo el de mayor grado de absorción y no homogeneidad. Todo ello sin tener en cuenta el caso especial de la placa de acero inoxidable.

Las deformaciones de la señal anteriormente nombradas puede ser debida a diferentes causas, entre ellas, efectos inerciales en las cerámicas piezoeléctricas, así como reflexiones en los bordes del medio material utilizado para las medidas, estas últimas evidentes para el caso del metacrilato, figura V.2.

Los resultados obtenidos para el caso de la placa de acero inoxidable pueden parecer alarmantes debido a que, los valores obtenidos no se asemejan a los valores esperados.

En el resto de materiales caracterizados, la relación entre longitud de onda y grosor de la muestra, son lo suficientemente elevados como para considerar que la onda se propaga de forma mayoritaria por la superficie del material, sin embargo en la placa metálica no podemos realizar dicha afirmación.

Para este caso calculamos la relación entre el producto de la frecuencia angular y el espesor de la placa, normalizada por la velocidad de onda de corte, con el que nos situaremos sobre el eje de las abscisas de la figura II.9.

$$\frac{\omega d}{V_s} = 0.13$$

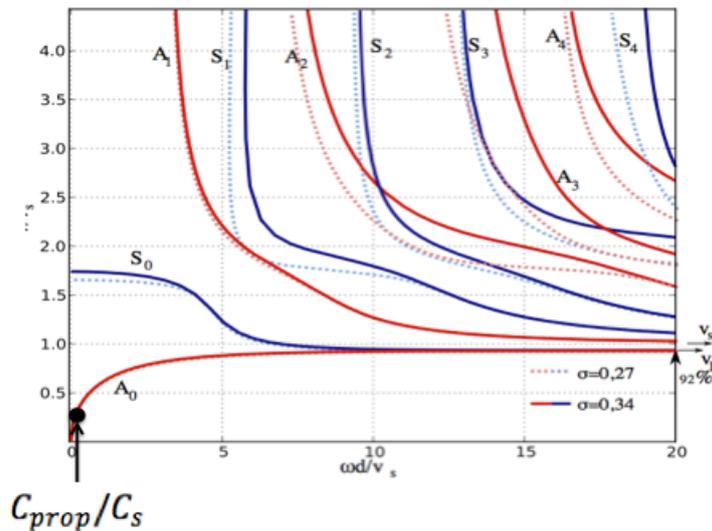


Figura II.9. Curvas de dispersión de ondas de Lamb para diferentes relaciones de Poisson.

Con la relación obtenida para el modo asimétrico A_0 , que suponemos predominante y según la figura II.9, obtenemos una relación entre la velocidad de propagación de la onda y la velocidad transversal, de aproximadamente 0.3, tal y como se indica en la figura presentada a continuación.

Mediante esta relación, podemos ahora determinar de forma teórica la velocidad de propagación de ondas esperada sobre la placa de acero inoxidable.

$$c_{prop} = 0.3 * c_s = 930 \text{ m/s}$$

Dada la mayor similitud existente entre este valor y los resultados obtenidos en las medidas, podemos confirmar que la propagación predominante en la placa metálica es debida a ondas Lamb, aunque aún así, la diferencia de valores es significativa, véase que existe un error del 8.5 % en el cálculo de la pendiente de la recta. El ajuste lineal realizado para las medidas en este material, parece mostrar dos tendencias de crecimiento distintas.

Los resultados obtenidos para la muestra de gelatina, son lo suficientemente dispersos como para no dar por válidas las medidas en este material.

iii. Resultados del prototipo propuesto

En este punto se evaluarán los resultados obtenidos mediante el prototipo de medidor de velocidad superficial presentado en el punto III del presente documento.

Las condiciones de medida, son las mismas que en el apartado anterior, realizando las pruebas con la misma señal de excitación y sobre las mismas muestras ya caracterizadas, con la misma instrumentación de medida y también con el mismo gel adaptador de impedancias. Un único cambio se ha realizado para la obtención de las velocidades de propagación con el prototipo con respecto al método de las distancias, y a sido el ajuste del código MatLab empleado para la obtención del tiempo de vuelo de la onda, ya que en este caso disponemos de dos sensores, lo cual conlleva la recepción de 3 señales. El código empleado se adjunta en el anexo IX.3.

Del mismo modo que en el punto de caracterización de la propagación de las ondas superficiales (punto V.i.), en este apartado se evaluarán uno a uno los diferentes materiales testeados, y para cada uno de ellos se evaluarán los resultados a partir de 3 figuras. En primer lugar las 3 señales capturadas por el sistema de adquisición de datos, cada una por separado, esto nos permitirá percibir el retardo temporal existente entre la señal de emisión y ambas señales de recepción. En segundo lugar, las dos señales de recepción conjuntamente. Esta figura facilitará el estudio de la similitud entre las señales recibidas. Por último y también para cada uno de los materiales, la tercera figura mostrará el ajuste entre señales en el punto exacto de correlación entre emisión y recepción, con el que se ha tomado el cálculo del tiempo de vuelo de la onda, y con ello el cálculo de la velocidad de propagación de esta. Esta representación nos permitirá comprobar la distorsión sufrida por la onda durante la propagación por el material y verificar efectos perjudiciales para el cálculo de la velocidad de propagación.

NOTA: Para todas las figuras representadas en este apartado, la forma de onda pintada en color rojo, hace referencia a señal de excitación.

Metacrilato

A continuación y como se mencionaba en el punto anterior, en las figuras V.16.a y V.16.b se muestran las señales registradas por el sistema de adquisición de datos para la muestra de PMMA.

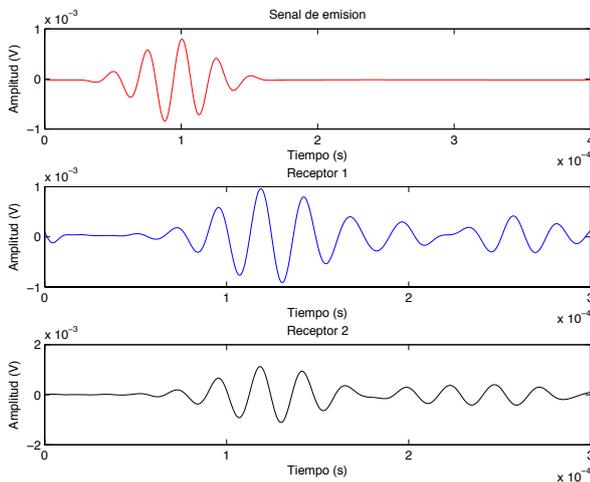


Figura V.16.a. Señales de emisión y recepción del prototipo, para la muestra de metacrilato

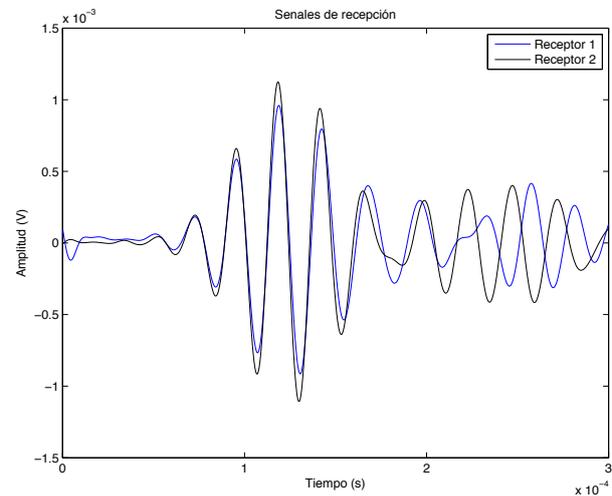


Figura V.16.b. Señales de recepción del prototipo, para la muestra de metacrilato

De la figura V.16.b advertimos que el resultado obtenido para la velocidad de propagación será muy semejante para ambos sensores, debido a la similitud y situación temporal de ambas formas de onda. Además se observa que incluso la amplitud de la señal es muy pareja, por lo que se puede llegar a la conclusión de que la muestra presenta homogeneidad, al menos para las dos trayectorias de la onda registradas. A partir de la diferencia entre las colas de las señales, se observa también que en uno de los sensores aparece una interferencia, seguramente provocada por el rebote de la propagación en los contornos de la muestra.

La figura V.17, muestra el punto exacto del ajuste entre las señales obtenidas, para el que se ha tomado el cálculo del tiempo de vuelo de la onda.

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

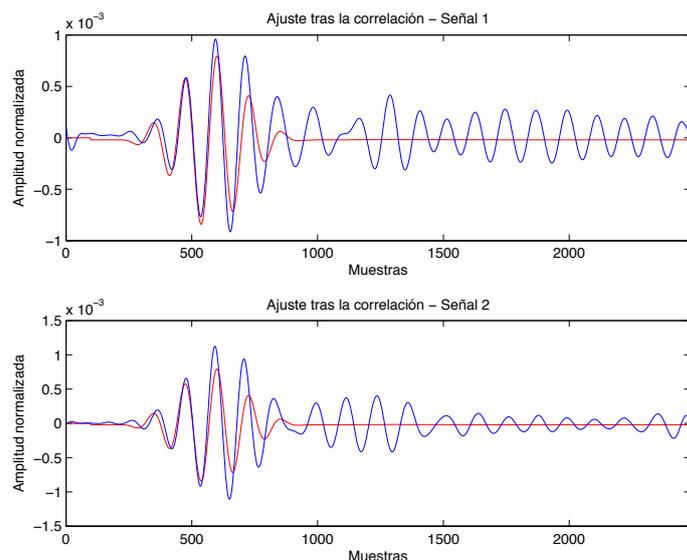


Figura V.17. Señal de recepción ajustada para máxima correlación con la señal emitida por la muestra de metacrilato

Se puede apreciar que el ajuste es muy bueno, y que la señal recibida por los sensores no ha sufrido apenas deformación durante la propagación por la muestra, lo que conllevará a un cálculo del tiempo de vuelo de la onda bastante exacto.

La velocidad obtenida de las señales mostradas en las figuras V.16.a y V.16.b son las siguientes,

Velocidad de propagación sensor 1
1264.2 m/s

Velocidad de propagación sensor 2
1264.0 m/s

Se ha realizado el proceso mostrado 3 veces, por lo que obtenemos 6 medidas de la velocidad de propagación. Todos los resultados y el análisis de la dispersión para la muestra de metacrilato son los mostrados en la tabla V.7.

	Medida Vel.1 (m/s)	Medida Vel.2 (m/s)	Medida Vel.3 (m/s)	Global (m/s)
Sensor 1	1264.2	1264.2	1264.7	---
Sensor 2	1264.0	1251.3	1257.0	---
Media	1264.1	1257.8	1260.8	1260.9
Desviación típica	---	---	---	3.18

Tabla V.7. Resultados dispositivo para muestra de metacrilato

La desviación típica obtenida para las medidas de la tabla V.7 se corresponde con el 0.3% del valor medio.

El valor medio resultante de las tres medidas realizadas para la muestra de PMMA es de **1261 (m/s)**, frente a los 1187 ± 46 (m/s) obtenidos en la caracterización la propia muestra, siendo mas cercano al valor teórico obtenido de bibliografía 1271 (m/s).

Vidrio

Al igual que para el caso anterior, se muestran primero las señales obtenidas tras la propagación superficial para la muestra de vidrio.

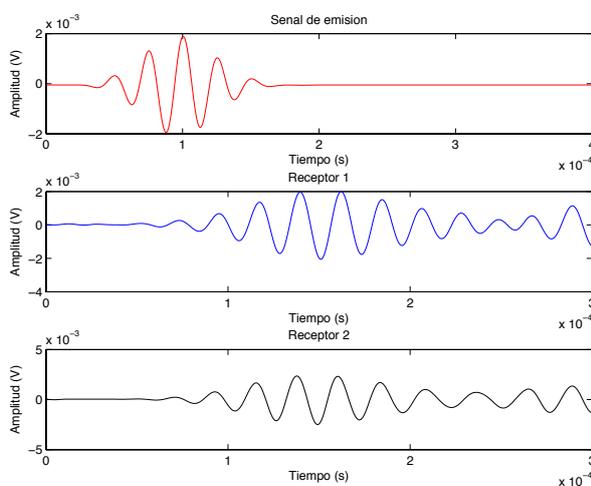


Figura V.18.a. Señales de emisión y recepción del prototipo, para la muestra de vidrio

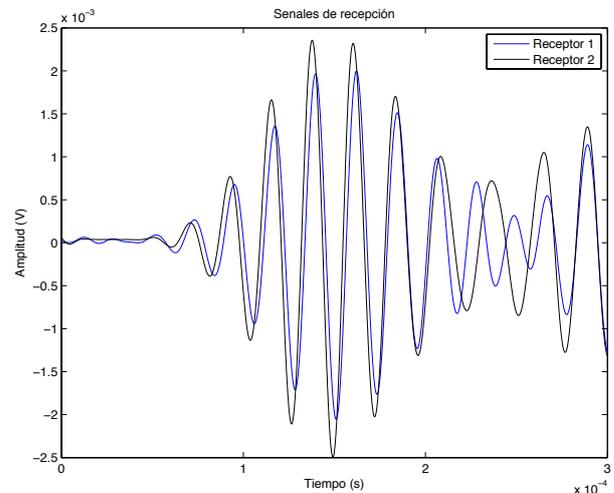


Figura V.18.b. Señales de recepción del prototipo, para la muestra de vidrio

Como se observa en la figura V.18.a, en este caso los pulsos recibidos por los sensores están distorsionados por el paso sobre la muestra, siendo estos mas longevos en tiempo. Este factor indica que existe un retardo entre el momento que el actuador excita la muestra y el momento en que se produce la máxima perturbación sobre el material, lo cual complica la búsqueda del punto exacto para el correcto ajuste de la correlación entre señales, como se vera en la figura V.19.

En cuanto a la figura V.18.b, se percibe claramente la similitud entre las formas de onda de las señales propagadas. Ello implica un vez mas que la medida del tiempo de vuelo es precisa, y debería suponer también valores resultantes de la velocidad de propagación muy próximos.

En la figura V.19, se muestra la representación del ajuste de la correlación para la muestra de vidrio.

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

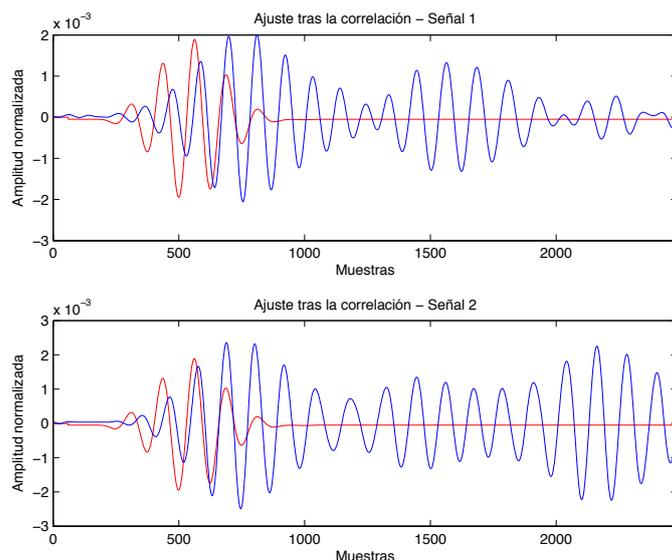


Figura V.19. Ajuste de la señal propagada con la señal emitida según correlación, para el cálculo de t_p , par la muestra de vidrio

En la figura anterior se hacen evidentes los problemas anteriormente mencionados para el ajuste de la señal de emisión y los pulsos recibidos. Estos últimos, han sufrido también un cambio frecuencial, haciendo que no sea posible el completo ajuste de la correlación entre señales. Por ese motivo, para casos de ajuste de correlación con esta problemática se requiere del ajuste visual, introduciendo parámetros limitantes sobre el código de cálculo de la correlación.

Los resultados conseguidos en las 3 medidas realizadas se muestran en la tabla V.8.

	Medida Vel.1 (m/s)	Medida Vel.2 (m/s)	Medida Vel.3 (m/s)	Global (m/s)
Sensor 1	2050.4	1987.3	2076.2	---
Sensor 2	2085.5	2050.4	2073.6	---
Media	2067.9	2018.9	2074.9	2053.9
Desviación típica	---	---	---	30.6

Tabla V.8. Resultados del dispositivo para la muestra de vidrio

La desviación típica obtenida para las medidas de la tabla V.8 se corresponde con el 1.48% del valor medio.

El valor medio resultante de las tres medidas realizadas para la muestra de vidrio es de **2054 (m/s)**, frente a los 2089 ± 31 (m/s) obtenidos en la caracterización la propia muestra.

Acero inoxidable

Una vez mas, en primer lugar se muestran las figuras V.20.a y V.20.b correspondientes a la señal de excitación y a los pulsos recibidos por los sensores tras la propagación de la muestra, en este caso la placa de acero inoxidable.

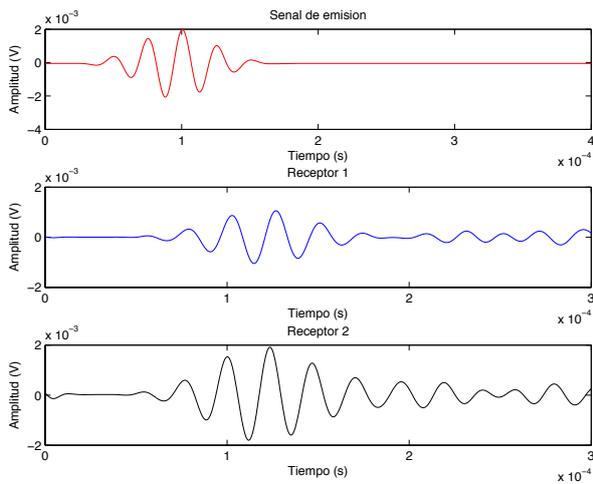


Figura V.20.a. Señales de emisión y recepción del prototipo, para la muestra de acero inoxidable

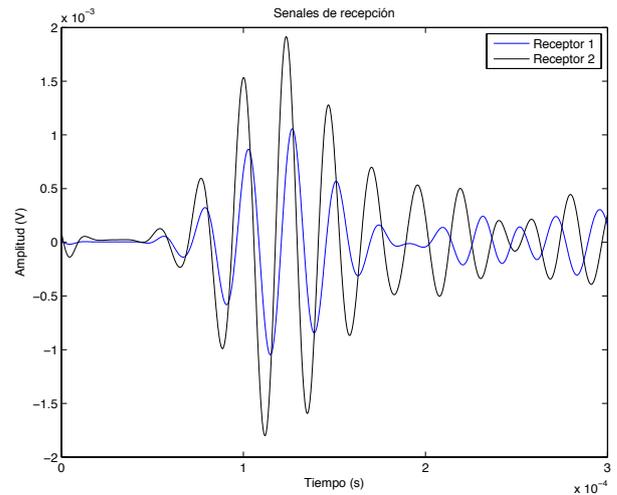


Figura V.20.b. Señales de recepción del prototipo, para la muestra de acero inoxidable

En la primera de las figuras anteriores, observamos el buen estado de los pulsos recibidos, lo que facilitará el proceso de correlación en el cálculo de la velocidad de propagación. En la figura V.20.b se distingue un pequeño retardo temporal de la señal recibida por el sensor 1 frente a la del sensor 2, además la amplitud de esta es casi el doble que la del primer receptor. Este último efecto puede ser producido por el mal acoplamiento entre el sensor y la muestra.

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

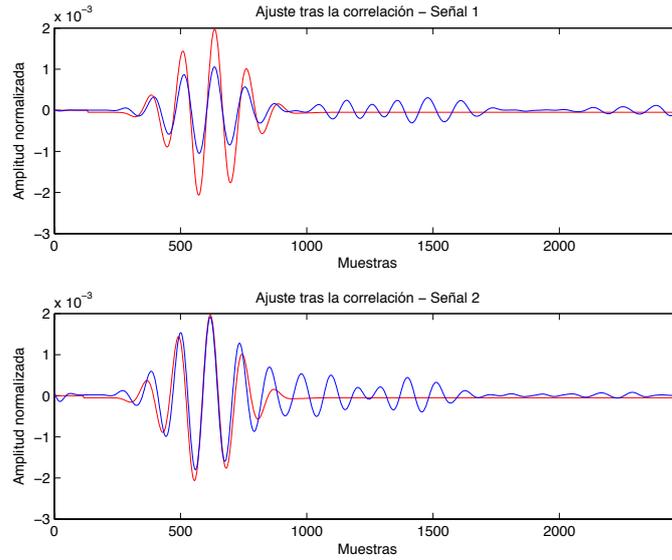


Figura V.21. Señal de recepción ajustada para máxima correlación con la señal emitida por la muestra de acero inoxidable

Del ajuste entre las señales de la figura V.21, confirmamos la similitud entre los pulsos emitido y recibidos, que facilita el dicho ajuste y valida las medidas. Los valores obtenidos para la presente muestra se presentan en la tabla V.9, sabiendo por lo estudiado en el punto V.i, que la propagación sufrida por las ondas para la placa metálica, es de tipo Lamb, y no de Rayleigh, como en los otros materiales.

Los resultados logrados en las 3 medidas realizadas se muestran en la tabla V.9.

	Medida Vel.1 (m/s)	Medida Vel.2 (m/s)	Medida Vel.3 (m/s)	Global (m/s)
Sensor 1	972.1	1226.1	965.6	---
Sensor 2	1167.5	956.8	1221.0	---
Media	1069.8	1091.4	1093.3	1084.4
Desviación típica	---	---	---	13.1

Tabla V.9. Resultados dispositivo para muestra de acero inoxidable

La desviación típica obtenida para las medidas de la tabla V.9 se corresponde con el 1.2% del valor medio.

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

El valor medio resultante de las tres medidas realizadas para la muestra de acero inoxidable es de **1084 (m/s)**, frente a los 1269 ± 108 (m/s) obtenidos en la caracterización la propia muestra.

Madera

Por último analizaremos los resultados obtenidos para la muestra de madera. En las figuras V.22.a y V.22.b se muestran las señales de excitación y recepción producidas por el prototipo presentado.

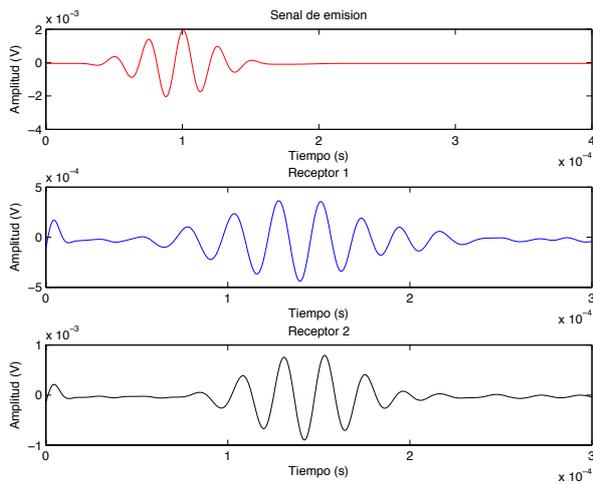


Figura V.22.b. Señales de emisión y recepción del prototipo, para la muestra de madera

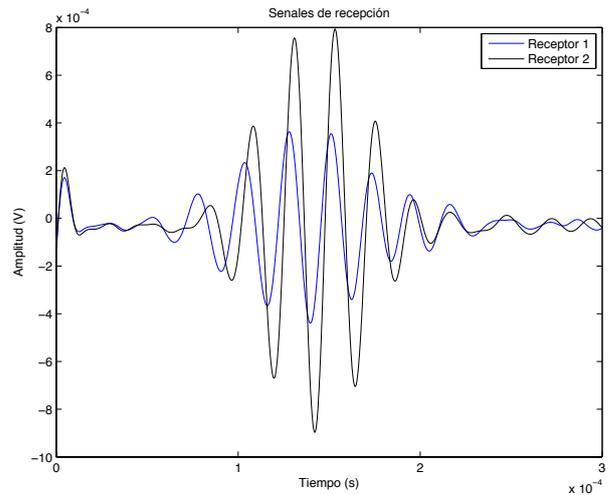


Figura V.22.b. Señales de recepción del prototipo, para la muestra de madera

De las señales anteriores se deduce que el comportamiento de las propagaciones es similar para ambos casos, ya que presentan un forma de onda parecida, sin embargo, la amplitud de dichas señales varia entre ambos sensores. Debido a la estructura del material, este efecto puede ser producido por la no homogeneidad de la muestra para las trayectorias de la onda recorridas, o bien estar propiciado como en el caso anterior, por un mal acoplamiento entre material y sensor.

Estudio, desarrollo e implementación de un dispositivo ultrasónico para la medida de la velocidad de propagación de ondas superficiales en sólidos

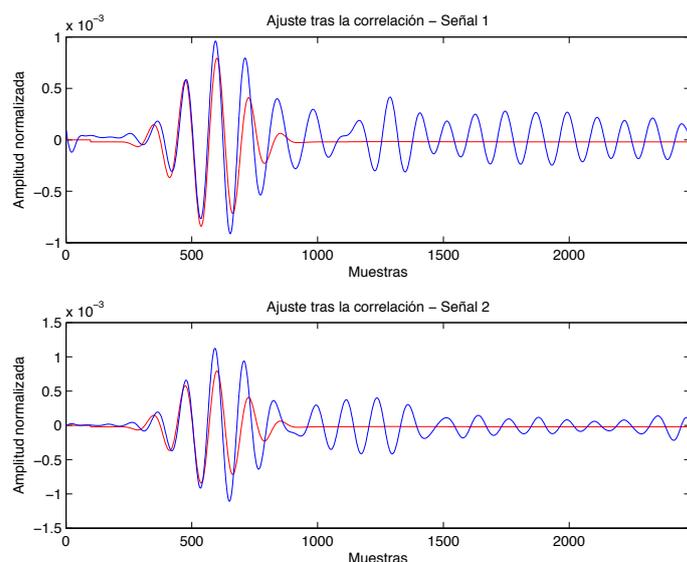


Figura V.23. Señal de recepción ajustada para máxima correlación con la señal emitida por la muestra de madera

Las señales se ajustan claramente tras la correlación, por lo que una vez mas se obtienen unos valores precisos de velocidad de propagación.

Los alcanzados en las 3 medidas realizadas se muestran en la tabla V.8.

	Medida Vel.1 (m/s)	Medida Vel.2 (m/s)	Medida Vel.3 (m/s)	Global (m/s)
Sensor 1	868.3	863.3	874.5	---
Sensor 2	844.3	848.7	844.3	---
Media	856.3	856.0	859.4	857.2
Desviación típica	---	---	---	1.9

Tabla V.10. Resultados dispositivo para muestra de acero madera

La desviación típica obtenida para las medidas de la tabla V.10 se corresponde con el 0.2% del valor medio.

El valor medio resultante de las tres medidas realizadas para la muestra de madera es de **857 (m/s)**, frente a los 863 ± 27 (m/s) obtenidos en la caracterización la propia muestra.

iv. Discusión

En el análisis de las medidas tomadas con el prototipo, se incluyen los resultados obtenidos en los mismos materiales que se han caracterizado previamente, a excepción de los resultados de la phantom de gelatina, debido a la gran absorción de la onda en dicha muestra. En el resto de materiales se ha llegado a unos resultados perfectamente comparables con los datos obtenidos en la caracterización, cuyas diferencias entre ambos son del 6 %, 1.7 % y 0.7 % para metacrilato, vidrio y madera respectivamente. El caso del acero inoxidable a de ser tratado excepcionalmente ya que como se había comentado, no se debe comparar el valor de velocidad de propagación obtenido con el de las ondas Rayleigh sino con el de la velocidad de propagación de las ondas Lamb, como se ha demostrado en la caracterización de esta muestra.

Analizando mas detenidamente los resultados obtenidos para cada una de las muestras observamos que para los casos de metacrilato, acero inoxidable y madera, se obtiene un buen ajuste entre las señales de excitación y recepción, sin embargo, en la muestra de vidrio, la deformación sufrida por el pulso burst durante la propagación hace más complicado este ajuste, y por lo tanto, la determinación de la velocidad de la propagación. La deformación del pulso detectado puede ser debida a diferentes causas, entre ellas, efectos inerciales en las cerámicas piezoeléctricas, así como reflexiones en los bordes del medio material utilizado para las medidas.

El parecido entre las formas de onda de cada medida observada en la mayoría de los resultados, indica la similitud de las características entre ambos sensores, lo cual aprueba el diseño y el trabajo de construcción de estos. Sin embargo nos percatamos de que en los resultados obtenidos en las muestras de acero inoxidable y madera, existe una diferencia considerable entre las amplitudes registradas por ambos sensores. Como ya se ha dicho, este efecto puede ser causado por el mal contacto entre muestra y sensor, por la falta de material acoplante o por una mala conexión electrónica del dispositivo, ya que en todas ellas el sensor que proporciona una menor amplitud es el mismo.

Para la muestra de acero inoxidable parecen existir dos tipos diferentes de propagación, una cuya velocidad es mas cercana al valor resultante de la caracterización 1269 m/s y otra de velocidad inferior de entorno a los 960 m/s , como se predecía mediante el cálculo teórico 930 m/s . Este efecto era distinguible ya en los resultados de la caracterización, donde en el ajuste de los puntos de medida de la figura V.9 se puede apreciar dos tendencias de crecimiento del tiempo de vuelo frente a la distancia entre transductores.

VI. FUTURAS VÍAS PARA EL DESARROLLO DEL DISPOSITIVO

A partir de las de los resultados y conclusiones asimiladas en la presente tesina, en este punto se detallan una serie de mejoras implementables sobre el prototipo concebido.

- **Reducción del tamaño del medidor piezoeléctrico de velocidades de propagación superficial.**

La reducción del tamaño del dispositivo pasa por la posibilidad de incorporar la electrónica de generación y almacenamiento de la señal en el propio prototipo. Esta opción conllevaría el estudio de tarjetas generadoras de forma de onda de tamaño reducido, un sistema de almacenamiento también portable y una fuente de alimentación a modo de batería recargable, capaz de suministrar la potencia eléctrica necesaria.

- **Mejora de los transductores**

La limitación del transductor emisor respecto a la tensión máxima admitida, supone la acotación de los materiales sobre los que poder realizar el estudio de las características elásticas. Por ello la mejora en este campo supondría expandir el rango de materiales sobre los que actuar.

En cuanto a los sensores, conseguir unas cerámicas con las resonancias mas cerca de la frecuencia de trabajo, supondría una mayor sensibilidad sobre la excitación producida por el actuador. Esta mejora requiere el estudio de otros modos de vibración de las cerámicas, y ayudaría a mejorar el problema respecto a la limitación del actuador.

- **Mejora del diseño mecánico del medidor piezoeléctrico de velocidades de propagación superficial**

El sistema de sujeción de los transductores empleado para la construcción del prototipo, es ideal para el ajuste de estos sobre las diferentes superficies, pero limita por completo las dimensiones máximas de las cerámicas, haciendo inviable la utilización de piezoeléctricos de frecuencias de resonancia del orden considerado para el presente estudio. Por ello se propone el estudio de un nuevo sistema de sujeción y adaptación de los transductores que componen el medidor piezoeléctrico de velocidad de propagación superficial.

- **Mejora del procesado para el cálculo de tiempo de vuelo de la señal**

Se propone la implementación de un código capaz de adaptarse a distorsiones de la señal, sufridas y superadas en puntos anteriores por inspección visual y ajuste manual de las condiciones de cálculo. Para ello sería necesario el desarrollo de técnicas adaptativas de procesado de señales.

VII. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo de tesina se ha diseñado y construido un prototipo de medidor piezoeléctrico de velocidad superficial para la caracterización de sólidos.

Para ello se ha definido previamente, un principio de funcionamiento y un diseño del prototipo sugerido, que ha su vez a requerido del estudio del funcionamiento de materiales piezoeléctricos para diseñar y construir los sensores necesarios para la detección de las ondas propagadas por el material.

Para determinar el tipo de propagación existente en las diferentes muestras analizadas, se ha descrito y llevado a cabo un procedimiento de caracterización de la velocidad de propagación superficial, con el que se han obtenido y demostrado varios métodos de propagación superficial con el que las ondas recorren los distintos materiales.

Una vez definidas las posibles propagaciones en las diversas muestras, se ha construido el dispositivo medidor de velocidades de propagación superficial. Con este se han realizando diversas medidas en los materiales previamente caracterizados. De este modo se ha llegado a la conclusión también, de que existen materiales para los que no ha sido posible realizar la caracterización de la velocidad de propagación por la gran absorción que presentan al paso de la onda.

Para el resto de muestras, el prototipo ha sido validado experimentalmente por comparación con los resultados obtenidos de la medida de la velocidad de propagación superficial mediante el ajuste lineal obtenido de la colocación de varios puntos de medida sobre diversas muestras. Así, se ha observado una buena correspondencia entre los resultados obtenidos por ambos métodos, de los que algunos están verificados mediante datos teóricos o de bibliografía diversa.

Por todo lo mencionado en este apartado y con las expectativas de mejora propuestas en el punto VI. podemos afirmar que se ha comprobado la viabilidad de un medidor piezoeléctrico de velocidad superficial para la caracterización de materiales.

VIII. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Auld B.A. Acoustic Fields and Elastic Waves in Solids. New York. Wiley, 1973. Vol. vols. I and II.

De Lawrence E. Kinsler; Austin R. Frey; Alan B. Coppens; James V. Sanders. Fundamentals of acoustics, 1991.

D.R. Christman. Dynamic properties of poly (methylmethacrylate) PMMA, 1972.

Foti Sebastiano. Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves PhD Degree in Geotechnical Engineering, 2000.

Heinrich kuttruff. Ultrasonics fundamentals and applications, 1991.

Josef Krautkrämer; Herbert Krautkrämer. Ultrasonic testing of materials, 1969

Seth Stein Michael W. An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure. Malden, USA : Blackwell Publishing, 2003.