

# Utilización de las señales Acústicas para la evaluación del módulo de elasticidad

## Using acoustic signals to evaluate the elastic modulus

José Israel Cárdenas Jiménez, Carlos Vargas Hernández  
*Laboratorio de Propiedades Ópticas de Materiales*  
*Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia*  
[jicardenasj@unal.edu.co](mailto:jicardenasj@unal.edu.co)  
[cvargash@unal.edu.co](mailto:cvargash@unal.edu.co)

**Resumen**— Se diseñó e implementó un prototipo para evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales, mediante la técnica de propagación de señales acústicas. Los materiales estudiados fueron vidrio, bronce, aluminio y cobre. El parámetro analizado lo constituye el tiempo de retardo de la señal, cuando está se propaga por la muestra. Este parámetro permite obtener la velocidad de propagación del sonido y el módulo de elasticidad, los cuales están de acuerdo con los resultados reportados en la literatura por otras técnicas; validando de esta manera la técnica de pulsos sónicos.

**Palabras clave**—Pulsos sónicos, Módulo de Young, Velocidad de Onda.

**Abstract**— It was designed and implemented a prototype for evaluation of mechanical properties of materials using the technique of propagating acoustic signals. The materials studied were glass, bronze, aluminum, and copper. The time-delay was the parameter analyzed when signal goes through the sample. This parameter allows obtaining the speed of sound propagation and the modulus of elasticity, which agrees with the results reported in the literature for other techniques, thus validating the technique of sonic pulses.

**Key Word** — Sonic pulses, Young's Module, Wave Velocity.

### I. INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico a través de la historia se ha dado gracias al desarrollo de nuevos materiales y al aprovechamiento de los ya existentes, donde las propiedades físicas, químicas y morfológicas son aplicables según la necesidad requerida.

Entre las propiedades mecánicas que despiertan un gran interés está el Modulo de Elasticidad (E), el cual explica el comportamiento de un material cuando se le aplica un esfuerzo, deformándolo de manera temporal; siempre y cuando la perturbación no supere el límite elástico. El

módulo de elasticidad o módulo de Young, puede ser evaluado empleando técnicas que se clasifican en métodos destructivos (MD) y no destructivos o invasivos (MND). Entre los MD es común encontrar la prueba de la máquina universal, que permite la evaluación de la deformación debida a tensiones aplicadas. Los MND permiten examinar los materiales y sus componentes sin que se vean afectadas sus propiedades, su integridad y su utilidad final; y a su vez permiten detectar, localizar, medir y evaluar defectos estructurales [1]. Los MND se clasifican según el tipo de interacción empleada; entre los cuales se tienen:

**1. Ondas ultrasónicas** las cuales son producidas por la incidencia de la radiación electromagnética sobre la muestra y proveniente de un haz de luz transmitido con una frecuencia definida (laser) [2,3]. Cuando la radiación es absorbida en la interface generan un movimiento relativo entre las moléculas y una disipación de potencia que se manifiesta en la expansión térmica del material respectivo, generando la propagación de la señal.

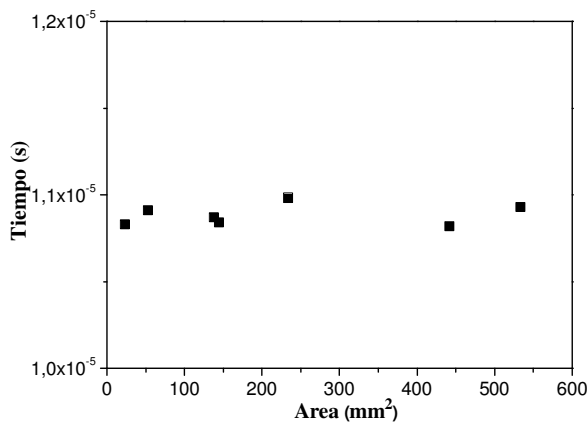
**2. La propagación de ondas ultrasónicas** que son generadas por materiales tipo piezoeléctrico y que se encuentran en contacto con la muestra a estudiar. El rango general de trabajo es para frecuencias mayores a 20kHz, y son señales que se propagan a través del material permitiendo identificar algunas de las propiedades mecánicas y acústicas. Esta técnica es de bajo costo y su desarrollo tecnológico es sencillo, lo cual generó una gran motivación para el desarrollo de este trabajo.

La transmisión de la onda en régimen de ultrasonido depende de la compresión y extensión de los enlaces químicos presentes que forman la estructura cristalográfica del material, siendo ampliamente utilizada en la caracterización de alimentos, concentración de soluciones, identificación de propiedades mecánicas en diferentes tipos de materiales metálicos y no metálicos entre otros [4-5]. La esencia del método estudiado reside en la relación existente entre las propiedades elastomecánicas del material [6] y el módulo de elasticidad que se encuentra relacionado con la constante dinámica o primer coeficiente de la matriz de rigidez definida como  $C_{22}$  en la dirección radial. En primera aproximación se puede obtener la

velocidad de propagación  $v_m$  de la señal a través del material, mediante:

$$C_{22} = \rho v_m^2 \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad volumétrica del material. Para el estudio es necesario colocar el material analizado en contacto íntimo entre los dos sensores tipo piezoeléctrico, los cuales envían un pulso a una frecuencia comprendida entre 20 a 200 KHz. A estas frecuencias; los pulsos acústicos no se ven afectados por la no-homogeneidad del material en cuanto a la distribución del haz, y presentan un frente de onda esférico cuyo centro se sitúa en el sensor emisor [7]. Al colocar los sensores (emisor y receptor) de manera enfrentada y en contacto directo con la muestra, la propagación de la onda ultrasónica recorrerá el material por el camino más corto y su velocidad dependerá esencialmente de las características mecánicas del material, esto fue corroborado al analizar la figura 1; que fue obtenida al graficar el tiempo de retardo de la señal al atravesar un grupo de muestras de sección transversal constante y área variable. En esta configuración se dispuso de muestras (secciones rectangulares variables de Silicio de alta pureza), de diferente área y a las cuales se les hizo incidir un pulso sónico perpendicular al área analizada. En el rango de estudio de tamaño y área de la muestra, se puede garantizar que con las especificaciones empleadas la propagación de la onda es perpendicular a la muestra y en dirección a los detectores evitando pérdidas por propagación lateral.

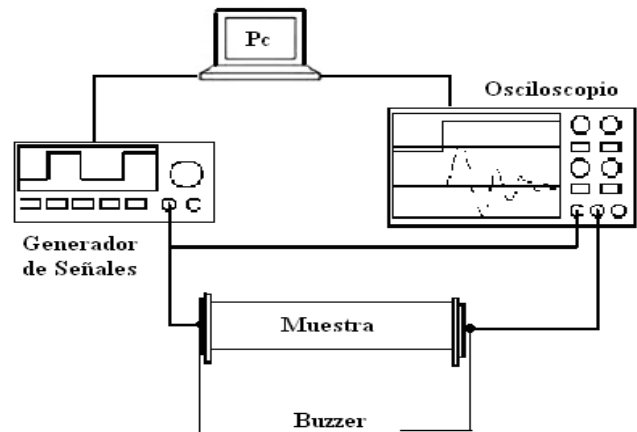


**Figura 1.** Tiempo de retardo de la señal que atraviesa la muestra de silicio en función del área de la sección plana. Muestra empleada para optimizar el área de contacto entre Emisor-Muestra-Receptor

La investigación se centra en la implementación y puesta a punto de un sistema de medición del módulo de Young de materiales en principio homogéneos (vidrio, bronce, aluminio y cobre), mediante la propagación de ondas sónicas.

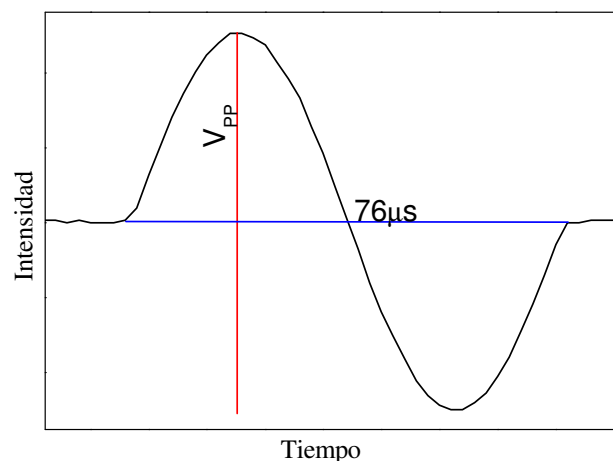
## II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la figura 2 se muestra el diagrama de bloques del montaje experimental donde la excitación proviene de un generador de señales AGILENT 33220A y es transmitida a la muestra mediante el sensor emisor o buzzer (piezoeléctricos), la señal viaja a través de la muestra, y en su camino experimental, atenuación y retardo, y posteriormente la excitación es enviada al segundo canal del osciloscopio es captada por el sensor receptor y registrada en un osciloscopio y constituye la señal de referencia; con una tasa de muestreo máxima de 1GS/s.



**Figura 2.** Esquema del equipo utilizado para las mediciones del retardo de la señal acústica.

El generador de señales envía al buzzer emisor un pulso de onda senoidal cada  $20\mu\text{s}$  (ver figura 3) con una amplitud de  $8 V_{pp}$  (voltios pico a pico) y un tiempo de excitación de  $76\mu\text{s}$ . Se utilizó una frecuencia de 14KHz debido al alto rendimiento de operación del transductor.



**Figura 3.** Pulso de Onda utilizado como señal de excitación

Para el control y monitoreo de estos instrumentos, fue desarrollado un programa en *LabView 8.0* de la *National*

*Instruments (NI)*; en la figura 4 se presenta la pantalla de usuario para el procesamiento de la información asociado al proceso, y que permite grabar las señales adquiridas; la configuración de los parámetros de adquisición de la señal (Base de Tiempo, Voltaje / división y el número de señales promediadas), y la

representación gráfica en el dominio de tiempo y dominio de frecuencias.

Las señal de excitación y de salida a través a través del emisor y receptor, y capturadas por el osciloscopio son enviadas al PC mediante una tarjeta GPIB. La recolección de datos presenta una resolución del orden de 2µs.

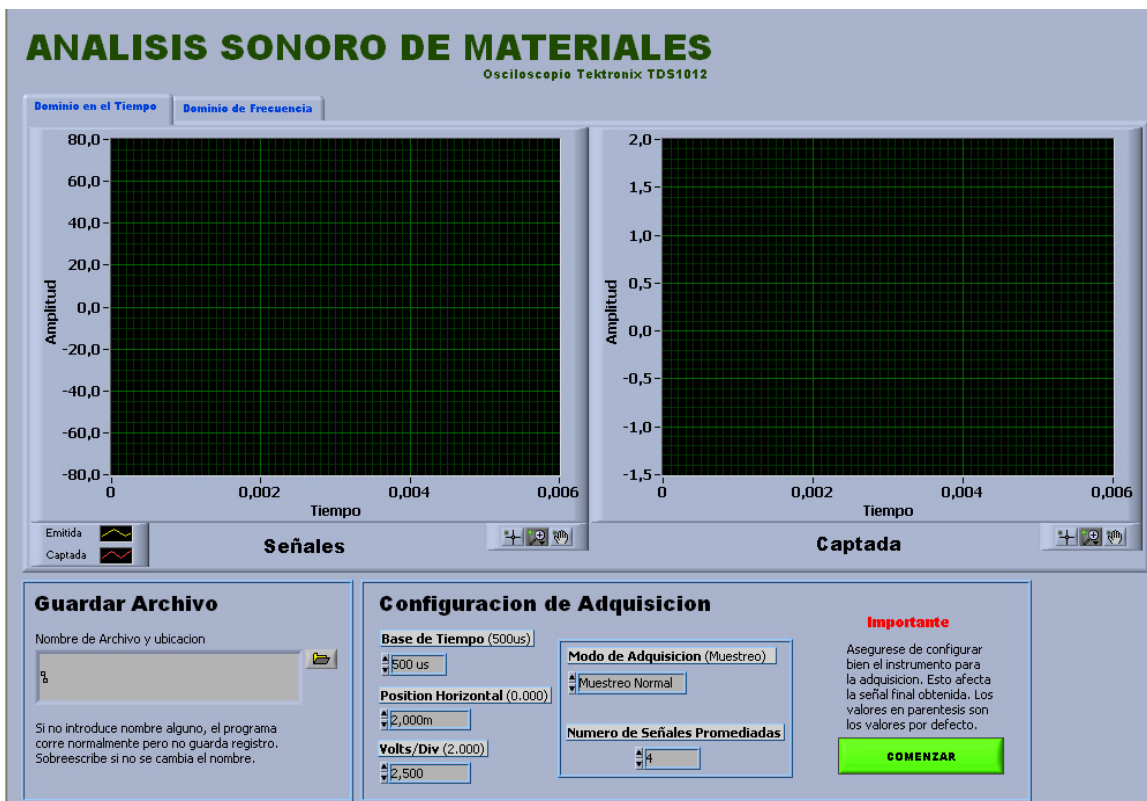


Figura 4. Pantalla de control del procesamiento de la información

La velocidad del sonido es calculada a partir del retardo de la señal de salida tal como se observa en la figura 5. La señales; tanto de referencia como la obtenida al atravesar la muestra, son enviadas al canal 1 (Ch1) y canal 2 (Ch2) del osciloscopio, respectivamente. Con el desplazamiento relativo de las señales en el eje del tiempo, se determina el retardo. Con este dato y mediante la ecuación (2) se evalúa la velocidad de propagación de la onda ( $v_m$ ).

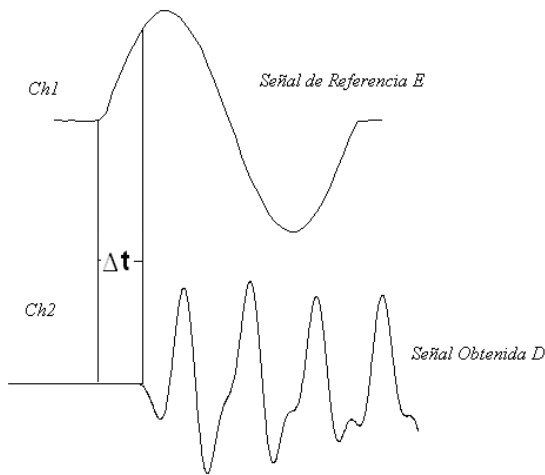
$$v_m = \frac{L_m}{t_R} \quad (2)$$

En donde  $L_m$  es la longitud de la muestra y  $t_R$  es el tiempo absoluto de retraso. El valor de la velocidad permite estimar en primera aproximación el módulo de elasticidad de la muestra, de acuerdo con la ecuación (3).

$$v_m = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

Donde E representa el módulo de elasticidad y  $\rho$  es la densidad de la muestra, que se puede determinar por métodos volumétricos [8]. Dicha aproximación es válida si consideramos la muestra como un medio homogéneo.

Con el fin de validar la técnica implementada en este trabajo, se emplearon muestras de Aluminio, Cobre, Bronce y Vidrio con diferentes longitudes (variando desde 13mm hasta 200mm), con área de sección transversal constante de 2mm de forma circular.

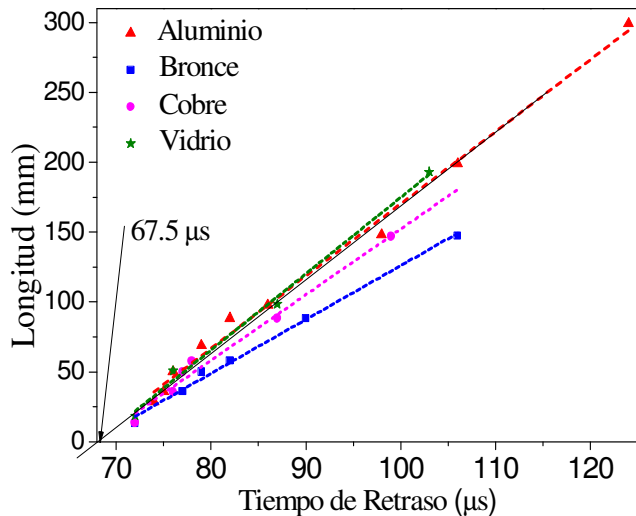


**Figura 5.** Señal de referencia y señal obtenida al atravesar la muestra.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 6, se muestran los resultados de la validación propuesta al graficar la longitud de la muestra (para los diferentes materiales) en función del tiempo de retardo entre la señal emitida y la señal recibida.

Las gráficas muestran un comportamiento aproximadamente lineal, coherente para ondas que se propagan en un medio homogéneo, mientras que la pendiente representa la velocidad de propagación de la onda en el material y a partir de estos valores y del intercepto es posible obtener el tiempo de retardo de la señal instrumental (buzzers en contacto sin muestra), el cual fue aproximadamente de  $67,5\mu\text{s}$ .



**Figura 6.** Longitud del material en función del tiempo de retardo de la señal.

La velocidad de propagación de las ondas para cada material y la determinación del módulo de elasticidad ( $E$ ) son mostradas en la tabla 2 y están de acuerdo con resultados previos reportados en la literatura. La cuantificación de los errores instrumentales (dado por la sensibilidad de los equipos) es del orden del 1%, lo cual confirma una contribución muy baja del error instrumental en la medida de la velocidad. Los errores totales cometidos en las medidas de la velocidad del sonido (error relativo) son inferiores al 8%, el cual está dentro de los límites permitidos y verifica la viabilidad de la técnica.

**Tabla 2.** Velocidad del sonido y módulo de elasticidad para diferentes materiales

Material	V, obtenida	E [GPa]	V [m/s]	E [GPa]
	[m/s]	Obtenida	Reportado	Reportada
Cobre	$4705 \pm 306$	$201 \pm 26$	4711[9]- 3692[12]	117-120 [10] [11]
Vidrio	$5469 \pm 283$	$47 \pm 50$	5950[13] - 3760[15]	68 [14]
Aluminio	$5174 \pm 165$	$73 \pm 50$	5134 [16]- 6401[9]	75 a 82 [17]
Bronce	$3861 \pm 137$	$128 \pm 90$	-	128 [18]

Es importante anotar, que la velocidad de propagación de las ondas mecánicas a través de los materiales depende del grado de pureza de la muestra que se analiza y su calidad cristalina, y por tal motivo se presentan diferencias entre los valores obtenidos por diferentes autores.

Comercialmente, existen muchos tipos de materiales para los cuales la densidad puede ser significativamente variable, lo cual justifica las discrepancias mostradas en la tabla 2.

### IV. CONCLUSIONES

A partir de la evaluación de la velocidad de propagación del sonido y del módulo de elasticidad para cobre, vidrio, aluminio y bronce, fue posible corroborar y validar la técnica implementada. El error instrumental (del orden 1%) y el error del método propuesto (inferior al 8%) fueron cuantificados. El diseño implementado es supremamente ventajoso respecto a otras técnicas convencionales (no destructiva, de fácil montaje, no requiere instrumentación ni programación sofisticada) para la medida del módulo de elasticidad haciéndolo potencialmente útil para su uso a nivel industrial.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan sus agradecimientos a los ingenieros M. A. Rengifo Morocho, C. L. Londoño Calderón por sus aportes al éxito de esta investigación.

## REFERENCIAS

- [1] F. Cau, A. Fanni, A. Montisci, P. Testoni, and M. Usai, A signal-processing tool for non-destructive testing of inaccessible pipes, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19, 753–760, 2006.
- [2] J. Wang, Z. Shen, B. Xu, X. Ni, J. Guan, and J. Lu, Numerical simulation of laser-generated ultrasound in non-metallic material by the finite element method, *Optics & Laser Technology*, 39: 806–813, 2007.
- [3] H. Suzuki, T. Kinjo, N. Saito, M. Takemoto, and K. Ono, Integrity evaluation of glass-fiber composites with varied fiber/ matrix interfacial strength using acoustic emission. *NDT&E International*, 33: 173–180, 2000.
- [4] R. Saggin, J. N. Coupland, Non-Contact Ultrasonic Measurements of Food Materials, *Food Research International*, 34: 865–870, 2001.
- [5] S. S. Chauhan, J.C.F. Walker. Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine. *Forest Ecology and Management*, 229: 388–394, 2006.
- [6] B. Rajeshwar, D. A. Bender, D. E. Bray, K. A. McDonald. An ultrasonic technique for predicting tensile strength of southgth pine lumber, *American Society of agricultural engineers*. 40:1153-1159, 1997.
- [7] L. Acuña, M. R. Díaz, M. Casado. Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. *Boletín del CIDEU*, 2: 7–26, 2006.
- [8] M. Grabianowski, B. Manley, and J. Walker, Acoustic measure-ments on standing trees, logs and green lumber, *Wood Sci. and Techn*, 40: 205-216, 2006
- [9] T. Kambara., Sound wave generated by swift heavy ions, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 245 108–113,2006.
- [10] S. C. Bellemare, M. Dao, S. Suresh, Effects of mechanical properties and surface friction on elastoplastic sliding contact, *Mechanics of Materials* 40, 206–219, 2008.
- [11] T. M. Ahmed, D. Tromans, Fatigue threshold behavior of a-phase copper alloys in desiccated air: modulus effects, *Int. J. Fatigue* 26, 641–649, 2004.
- [12] G. Krauss, J. Kubler, E. Trentini, Preparation and properties of pressureless infiltrated SiC and AlN particulate reinforced metal ceramic composites based on bronze and iron alloys J, *Materials Science and Engineering A* 337 315–322, 2002.
- [13] H. Suzuki, T. Kinjo, N. Saito, M Takemoto, K .Ono, Integrity evaluation of glass–fiber. with varied fibermatrix interfacial strength using acoustic emission, *NDT&E Int* 33 173–180, 2000.
- [14] A. Yeganeh-Haeri, C. THo, R. Weber, J. Diefenbacher, P. F McMillan, Elastic properties of aluminate glasses via Brillouin, Spectroscopy; *Journal of Non-Crystalline Solids* 241, 200-203, 1998.
- [15] M. Bau Baucchio, *ASM Engineered Materials Reference Book, Second Edition*, Ed. ASM. International Materials Park, OH, 1994.
- [16] A. Yeganeh-Haeri, C. T. Ho, R Weber, J. Diefenbacher, P.F McMillan., *Journal of Non-Crystalline Solids*, 241,200–203, 1998.
- [17] R. Tavangar, L. Weber, A. Mortensen, Damage evolution in Saffil alumina short-fibre reinforced aluminium during tensile testing, *Materials Science And Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure And Processing*, 395, 27-34,2005.
- [18] G Krauss., J Kubler., E Trentini., Preparation and properties of pressureless infiltrated SiC and AlN particulate reinforced metal ceramic composites based on bronze and iron alloys J, *Materials Science and Engineering A* 337, 315–322, 2002.