

Ultrasonic velocity and attenuation in carbon steel specimens

Brenda Buitrago, Ignacio Irausquín y Johnny Mendoza

*Departamento de Tecnología Industrial, Universidad Simón Bolívar, Sede del Litoral.
Caracas 1080, Venezuela. E-mail: bbuitrag@usb.ve, irausqui@usb.ve, jmendoza@usb.ve*

Abstract

Materials testing and inspection by means of the ultrasonic nondestructive method, has become an useful and sensitive tool to determine its acoustic properties. By virtue of this, the purpose of the following study was to measure the longitudinal ultrasonic velocity and to estimate the ultrasonic attenuation for three carbon steel specimens. This ultrasonic characterization was done by means of the pulse-echo technique using transducers with a diameter of 0.375" (9.525 mm) and center frequencies of 1.5, 2.25, 5, 7.5 and 10 MHz, besides glycerin as coupling. Results showed an insignificant change in the frequency spectrum of each specimen and significant changes of its attenuation. Likewise differences in velocity and attenuation were found between the specimens, proportionally to its carbon concentration.

Key words: Ultrasonic velocity, ultrasonic attenuation, carbon steels.

Velocidad y atenuación ultrasónica en muestras de acero al carbono

Resumen

La inspección y evaluación de materiales mediante el método no destructivo ultrasónico se ha convertido en una herramienta muy útil y sensible para determinar las propiedades acústicas de los mismos. En virtud de ello, este estudio ha tenido por objeto la medición de la velocidad ultrasónica longitudinal y la estimación de atenuación ultrasónica para tres muestras de acero al carbono. Esta caracterización ultrasónica se hizo mediante la técnica pulso-eco de contacto directo utilizando transductores de 0,375" (9,525 mm) de diámetro con frecuencias centrales de 1,5; 2,25; 5; 7,5 y 10 MHz, además de glicerina como medio acoplante. Los resultados mostraron una variación insignificante de la velocidad ultrasónica en el espectro de frecuencia de cada muestra y variaciones significativas de su atenuación. Así mismo se encontraron diferencias de velocidad y atenuación entre las muestras, proporcionales a su concentración de carbono.

Palabras clave: Velocidad ultrasónica, atenuación ultrasónica, aceros al carbono.

1. Introducción

La velocidad ultrasónica es una propiedad particular de los materiales que ha sido ampliamente utilizada para su caracterización. Este parámetro se ha empleado para estimar, por ejemplo, el tamaño de grano en acero inoxidable austenítico [1] y el módulo de elasticidad en materiales porosos [2], entre otros. Por otra parte, las ondas ultrasónicas se propagan en un medio homogéneo a una velocidad y atenuación propias para

cada material. Así pues, ambas propiedades (velocidad y atenuación) pueden ser empleadas para identificar la existencia de defectos en el interior de un determinado material. La determinación de estos parámetros, que pueden ser considerados básicos y elementales, debe hacerse con sumo cuidado y en su medición deben ser consideradas numerosas fuentes de error, tan significativas, que algunas veces ocultan las magnitudes de interés, restando validez al método de medición y sus resultados [3].

En medios homogéneos, las técnicas de medición de velocidades de propagación deben cuidar principalmente la precisión que es posible alcanzar como resultado de los errores asociados a la determinación de las distancias de propagación (camino acústico) y el tiempo empleado en recorrer la distancia asociada (tiempo de vuelo). La situación es diferente cuando el medio es no-homogéneo, ya que en este caso se presenta el fenómeno de la dispersión. Es por ello que se debe distinguir entre la velocidad de propagación que el medio presenta para cada frecuencia (velocidad de fase) y la velocidad con que se propaga un grupo de ondas (velocidad de grupo).

P. Palamichamy *et al.* [1994] realizaron mediciones de velocidad ultrasónica empleando ondas longitudinales y transversales en muestras de acero inoxidable austenítico, con el fin de hacer una estimación aproximada del tamaño de grano. Tales mediciones fueron realizadas aplicando el método de pulso-eco de superposición, que se basa en la recolección de señales sucesivas de ecos de reflexión, que son superpuestas en el osciloscopio, ajustando el eje de las abscisas con el portador de frecuencias, cuyo período es el tiempo de vuelo entre las señales de interés. De esta manera, mientras una señal aparece en el primer barrido del osciloscopio, la siguiente aparece en el próximo barrido. Posteriormente se miden con precisión los espesores de las muestras, obteniendo de este modo la correspondiente velocidad ultrasónica a partir de los datos. Además de este procedimiento descrito existen otras técnicas que permiten realizar un estudio de velocidades ultrasónicas longitudinales.

Para la realización de este trabajo se seleccionaron tres muestras de acero al carbono con el objeto de caracterizar el comportamiento de la velocidad longitudinal de señales ultrasónicas. Dichas muestras fueron caracterizadas mediante el ensayo no destructivo ultrasónico, empleando la técnica de pulso-eco por contacto directo y utilizando transductores marca Krautkramer de banda ancha de 0,375 pulgadas (9,525 mm) de diámetro y con frecuencia central en el intervalo de 1,5 a 10 MHz. Se consideraron como variables acústicas relevantes, la velocidad de propagación de la onda ultrasónica longitudinal y la atenuación de estas señales, cuando ocurre su interacción con el material. Los cálculos correspondientes a estas varia-

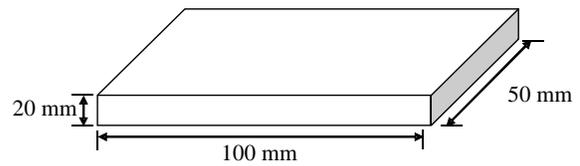


Figura 1. Dimensiones de las probetas.

bles acústicas fueron desarrollados utilizando como base el método de Sachse y Pao [4].

2. Parte Experimental

2.1. Preparación de las muestras

Las muestras fueron obtenidas de barras de acero con sección rectangular de tres tipos diferentes de acero al carbono con tratamiento térmico de recocido. Cada una de las muestras fue cortada y mecanizada de acuerdo a las dimensiones mostradas en la Figura 1.

El acabado superficial en las tres muestras fue el mismo, obteniéndose un valor promedio de rugosidad de $1,1 \mu\text{m}$ para cada una de las mismas. Dicho valor fue obtenido de medidas efectuadas con un rugosímetro de contacto marca Mitutoyo, modelo SJ-301. Debido a la similitud en la rugosidad de las probetas, no se consideró su influencia sobre los resultados.

Puesto que las muestras fueron fabricadas de tres tipos de acero al carbono (con diferentes composiciones químicas), se procedió a identificarlas como se indica a continuación:

- Muestra A: Probeta de acero AISI 1020
- Muestra B: Probeta de acero AISI 1030
- Muestra C: Probeta de acero AISI 1040

Composición química de las muestras:

La composición química de cada una de las muestras puede ser apreciada en las Tablas 1, 2 y 3, respectivamente. Estos datos fueron suministrados por el proveedor del material.

En la Tabla 1, se puede apreciar la composición química de la muestra A. Este material es generalmente empleado en componentes en donde la dureza no representa un factor crítico; tal es el caso de láminas de sección transversal.

La Tabla 2 presenta la distribución de los componentes químicos que constituyen la muestra B, en donde se puede apreciar un contenido de carbono de aproximadamente 0,33%. Las aplicaciones más comunes de este material incluyen: niveladores, pernos, espárragos, y piezas obtenidas por extrusión.

La Tabla 3 indica la composición química de la muestra C. Las principales aplicaciones que tiene este material están orientadas a componentes que requieren alta resistencia; generalmente piezas obtenidas mediante el proceso de forja.

2.2. Medición de velocidad ultrasónica longitudinal y atenuación

La velocidad ultrasónica viene dada por la siguiente expresión:

$$v = \frac{2d}{t} \quad (1)$$

donde d es el espesor de la muestra y t es el tiempo de propagación de la onda ultrasónica longitudinal al atravesar dicho espesor. Un pulso de la onda ultrasónica se propaga en el acero a diferentes frecuencias. El espectro de fase $\varphi(\omega)$ y la amplitud del espectro $A(\omega)$ fueron obtenidos mediante una transformada FFT, la cual fue realizada a través del programa computacional *Matlab*

5.5. La obtención del espectro de fase y la amplitud del espectro, son valores necesarios para calcular la velocidad de fase y la atenuación, los cuales fueron calculados a través de la siguiente relación [4]:

$$v(\omega) = \frac{2\omega d}{\varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega)} \quad (2)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\ln A_1(\omega) - \ln A_2(\omega)}{2d} \quad (3)$$

donde ω , es la frecuencia angular. Así $v(\omega)$ y $\alpha(\omega)$ son la velocidad de fase y atenuación de onda respectivamente, $A_i(\omega)$ y $\varphi_i(\omega)$ ($i = 1, 2$) son las amplitudes y espectro de fase cuyos subíndices 1 y 2 representan directamente el eco de reflexión que llega a la muestra.

El esquema representativo para este estudio se muestra en la Figura 2.

El desarrollo experimental consistió en colocar el transductor ultrasónico sobre cada una de las muestras de estudio. Para mantener constante la presión acústica en todas las adquisiciones de las señales, se colocó una pesa de 150 g sobre el transductor. Este componente se conectó al equipo de ultrasonido USN 52 L de Krautkramer, el cual se encontraba en paralelo con un osciloscopio digital modelo TDS 210 de Tektro-

Tabla 1
Componentes de la Muestra A

Elemento	Carbono (C)	Hierro (Fe)	Manganeso (Mn)	Fósforo (P)	Azufre (S)
% en Peso	0,21	99,12	0,50	0,03	0,05

Tabla 2
Componentes de la Muestra B

Elemento	Carbono (C)	Hierro (Fe)	Manganeso (Mn)	Fósforo (P)	Azufre (S)
% en Peso	0,33	99,71	0,80	0,03	0,05

Tabla 3
Componentes de la Muestra C

Elemento	Carbono (C)	Hierro (Fe)	Manganeso (Mn)	Fósforo (P)	Azufre (S)
% en Peso	0,42	98,60	0,80	0,02	0,03

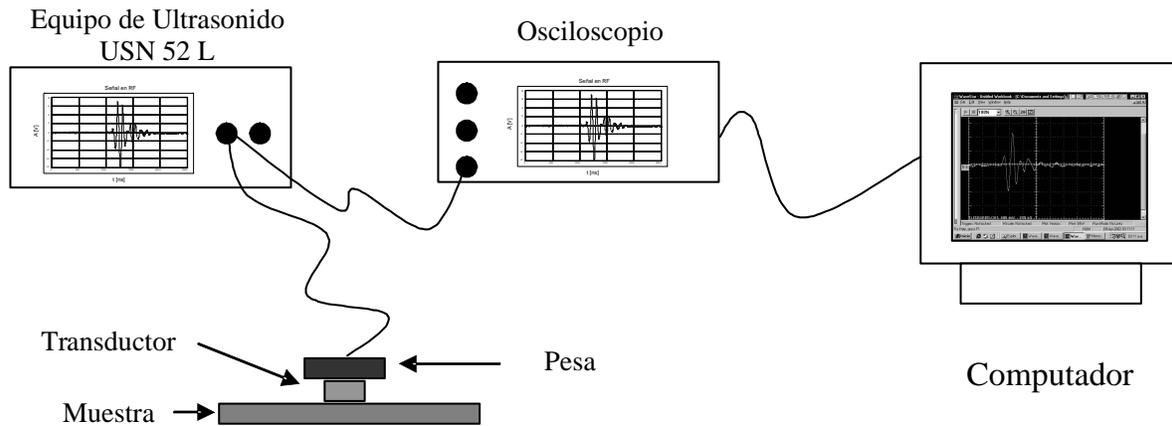


Figura 2. Arreglo experimental.

nix, a fin de obtener los datos digitales respectivos de cada señal, mediante el uso de un software de aplicaciones, distribuido por la empresa Tektronix. Este proceso se llevó a cabo usando un computador personal. Con el objeto de disminuir el margen de error experimental, se realizaron diez (10) mediciones para cada frecuencia empleada en cada probeta, obteniéndose un total de cincuenta (50) datos por cada una de ellas.

3. Resultados

En base al arreglo experimental de la Figura 2, la velocidad de fase y la atenuación fueron obtenidas utilizando las ecuaciones 2 y 3. Dichos resultados se muestran en la Figura 3.

En esta figura se puede apreciar el espectro de velocidad correspondiente a los diferentes

transductores utilizados para la medición sobre cada una de las muestras. De acuerdo a la gráfica mostrada de velocidad ultrasónica longitudinal; para una muestra de acero al carbono AISI 1020 (Muestra A) el valor promedio de velocidad corresponde a $5892,2 \pm 1,9$ m/s; en el caso del acero AISI 1030 (Muestra B) el valor de velocidad ultrasónica es aproximadamente $5933,6 \pm 4,2$ m/s y para la muestra de acero AISI 1040 (Muestra C) la velocidad longitudinal ultrasónica alcanzó un valor aproximado de $5975,8 \pm 4,4$ m/s.

La Figura 4 muestra los valores de atenuación obtenidos para las diferentes muestras empleando las ecuaciones (2) y (3). En esta gráfica se puede apreciar que la muestra C correspondiente al acero AISI 1040 es la que sufre la mayor atenuación de la señal. En los tres casos (Muestras A, B y C) se observa un incremento del

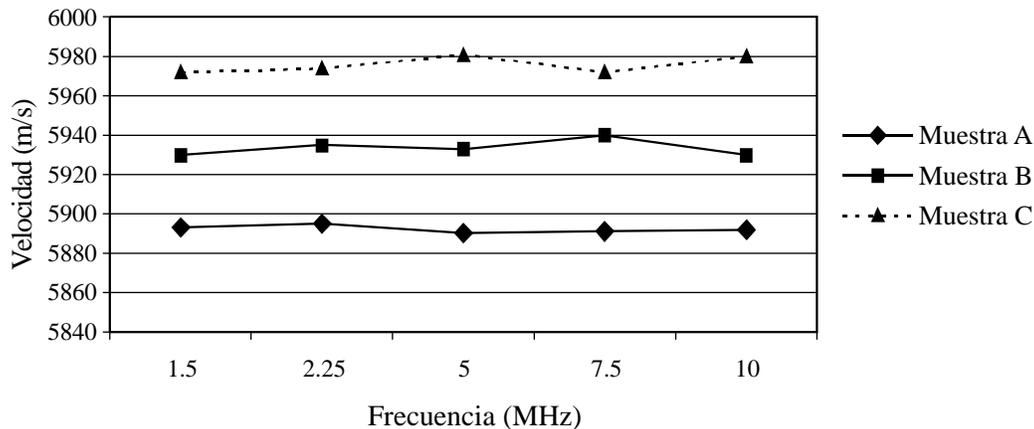


Figura 3. Velocidad ultrasónica longitudinal de las muestras.

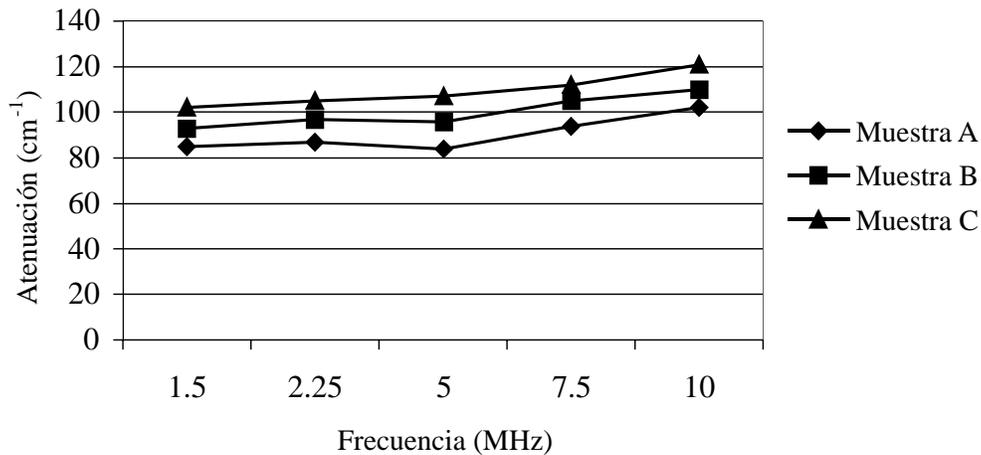


Figura 4. Atenuación de las señales ultrasónicas en las diferentes muestras.

coeficiente de atenuación a medida que se incrementa la frecuencia.

4. Discusión de Resultados

El comportamiento de la velocidad ultrasónica longitudinal, en la Figura 3, muestra que los materiales empleados para este estudio son homogéneos, debido a que no existen variaciones notables de la velocidad en cada muestra de acero con respecto a las diferentes frecuencias del transductor empleado en su medición; es decir, la velocidad de fase es prácticamente la misma en el espectro de frecuencia. El hecho de que no se presenten variaciones de velocidad en una misma muestra, con respecto a las diferentes frecuencias empleadas para su medición, es un indicativo de que el material es un medio no dispersivo para el ultrasonido, lo que implica que un pulso ultrasónico puede viajar dentro de estos aceros sin sufrir deformación, debido a diferencias en las velocidades de propagación de sus componentes. Esta propiedad es importante en la inspección de materiales, ya que las pruebas ultrasónicas requieren de pulsos bien definidos que permitan medir distancias y atenuación con precisión. Las diferencias de velocidad mostradas entre las muestras, se deben a la variación en la concentración de carbono. En la medida en que la proporción de carbono aumenta en la aleación, así mismo aumenta la velocidad ultrasónica longitudinal. Si se tiene en cuenta que la variación de la velocidad ultrasó-

nica para las tres muestras estudiadas es relativamente pequeña, es posible atribuir el referido comportamiento (de la velocidad) a las también pequeñas variaciones en la densidad, que en este caso son inversamente proporcionales al porcentaje de carbono en la aleación y que, de forma general, influyen en la propagación de la onda.

En el caso de la atenuación (Figura 4) se observan variaciones considerables de este parámetro en función de las diferentes frecuencias de estudio y de las diferentes muestras de material. La mayor atenuación se aprecia en el acero AISI 1040. Esto se debe a las variaciones que existen en el tamaño de grano presente en las muestras. Si el tamaño de grano permaneciera constante, es decir, si no existiera diferencias del tamaño del mismo entre los tres materiales, la variación del coeficiente de atenuación sería un efecto relacionado a los procesos de absorción y dislocación, producto de la concentración directa del carbono, tal como lo señala Smith [5] en sus investigaciones. También se observa que en la medida que aumenta la frecuencia del transductor utilizado ocurre un incremento en el coeficiente de atenuación.

5. Conclusiones

Al estudiar la velocidad y atenuación ultrasónica en tres muestras correspondiente a distintos tipos de aceros al carbono es posible indicar que:

- Las muestras de acero AISI 1020, AISI 1030 y AISI 1040, presentaron valores promedios de velocidad de $5892,2 \pm 1,9$ m/s, $5933,6 \pm 4,2$ m/s y $5975,8 \pm 4,4$ m/s, respectivamente.
- El valor de la velocidad es proporcional al porcentaje de carbono en la aleación. Se espera desarrollar un estudio semejante en el que las muestras sean sometidas a tratamientos térmicos que modifiquen las constantes elásticas del material, a fin de observar las variaciones en la propagación del pulso ultrasónico.
- El coeficiente de atenuación aumenta en la medida en que se incrementa el porcentaje de carbono en la aleación.
- En todos los casos el coeficiente de atenuación se incrementó de manera proporcional a la frecuencia central del transductor.

Referencias Bibliográficas

1. Petculescu P.: "Investigation of the austenitic structures by ultrasonic spectral analysis". NDT.net, Vol. 3, No.11 (1998).
2. Palanichamy P., Joseph A., Jayakumar T. and Baldex R.: "Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel". NDT & E internacional, Vol. 25, No 2 (1995) 179-185.
3. Gaete L., Vargas Y., Pettorino A.: "Medida de los parámetros acústicos en sólidos". II Jornadas Iberoamericanas en Ultrasonido e Imagen Ultrasónica, España (2001).
4. Sachse W. and Pao Y.: "On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids". Journal Appl. Physics, Vol. 49, No. 8 (1978).
5. Smith R.: "Ultrasonic materials characterization". NDTInternational, Vol. 20, No. 1 (1987).

Recibido el 23 de Julio de 2003

En forma revisada el 07 de Marzo de 2004