







Acoustic Parameters in Reference Standards for Calibration of the Industrial Ultrasound Test System

Jorge Wilfredo Vera Alvarado, Dr.¹, Luis Fernando Caballero Garcia, Bach.¹, Martin Taboada Neira, Dr.¹
¹Universidad Nacional de Trujillo, Perú, jvera@unitru.edu.pe, lcaballero@unitru.edu.pe, mtaboada@unitru.edu.pe

Abstract– *The non-destructive method of industrial ultrasound uses reference standards for calibration of the test system, a key factor to characterize a defect dimensionally. In welded steel structures, the AWS D 1.1 code suggests, depending on availability, various types of reference standards for calibration. It is important for the repeatability of the inspection results, regardless of whether one or another reference standard is used, to be certain of the measurement of its acoustic properties. The objective of the research was to obtain the speed and ultrasonic attenuation in the DSC, K1 and K2 type reference standards, with longitudinal and transversal beam, by varying the frequency of the beam. The acoustic parameters in each reference were obtained by the direct contact method, pulse-echo technique, 16 experimental runs were carried out with three repetitions to produce acoustic waves with a straight and transversal beam with refraction angles of 45°, 60° and 70° and frequencies of the 2.25, 5.0, 10.0 and 15 MHz transducer. The results reported that the comparable acoustic parameters differ in each reference standard, the speed of the ultrasonic beam decreased and the attenuation increased, as the frequency of the transducer increased, due to generating greater dispersion of the ultrasonic beam. It was not possible to obtain reliable results with transverse beam for sweep frequencies of 10 and 15 MHz. The type of reference standard and the frequency of the transducer have a significant effect on the measurements of the acoustic parameters.*

Keywords: *Acoustic parameters, reference standards, industrial ultrasound, calibration.*

Parámetros Acústicos en Estándares de Referencia para Calibración del Sistema de Prueba de Ultrasonido Industrial

Jorge Wilfredo Vera Alvarado, Dr.¹, Luis Fernando Caballero Garcia, Bach.¹, Martin Taboada Neira, Dr.¹
¹Universidad Nacional de Trujillo, Perú, jvera@unitru.edu.pe, lcaballero@unitru.edu.pe, mtaboada@unitru.edu.pe

Resumen– El método no destructivo de ultrasonido industrial utiliza estándares de referencia para calibración del sistema de prueba, factor clave para caracterizar dimensionalmente un defecto. En estructuras de acero soldado, el código AWS D 1.1 sugiere en función a la disponibilidad, diversos tipos de estándar de referencia para calibración. Es importante para la repetibilidad de los resultados de la inspección, independiente a que se utilice uno u otro estándar de referencia, tener certeza en la medida de sus propiedades acústicas. El objetivo de la investigación fue obtener la velocidad y atenuación ultrasónica en los estándares de referencia tipo DSC, K1 y K2, con haz longitudinal y trasversal, al variar la frecuencia del haz ultrasónico. Los parámetros acústicos en cada referencia fueron obtenidos por el método de contacto directo, técnica pulso-eco, se realizaron 16 corridas experimentales con tres repeticiones para producir ondas acústicas con haz recto y trasversal con ángulos de refracción de 45°, 60° y 70° y frecuencias del transductor de 2.25, 5.0, 10.0 y 15 MHz. Los resultados reportaron que los parámetros acústicos comparables difieren en cada estándar de referencia, la velocidad del haz ultrasónico, disminuyó y la atenuación aumentó, conforme aumentó la frecuencia del transductor, por generar mayor dispersión del haz ultrasónico. No fue posible obtener resultados confiables con haz trasversal para frecuencias de barrido de 10 y 15 MHz. El tipo de estándar de referencia y la frecuencia del transductor tienen un efecto significativo en las medidas de los parámetros acústicos.

Palabras claves: Parámetros acústicos, estándar de referencia, ultrasonido industrial, calibración.

I. INTRODUCCIÓN

El ensayo no destructivo de ultrasonido para verificar la calidad, requiere un estándar de referencia para la calibración previa a la inspección. Los estándares para calibración son de utilidad para disponer de una línea base de referencia y tener certeza en la dimensión de un defecto, y permite evaluar la señal recibida en la pantalla del equipo de ultrasonido [1]. La calibración consiste en realizar ajustes en el sistema de prueba para obtener medidas precisas y exactas. El estándar de referencia dispone de barrenos de dimensiones conocidas inducido artificialmente para producir una señal al interactuar con el haz ultrasónico emitido por el transductor. La calibración previa a la inspección ayuda al inspector a estimar el tamaño y ubicación del defecto [2], la señal recibida en el patrón de referencia es comparada con la señal recibida en un defecto [3]. En un sistema de prueba por pulso-eco, la intensidad de la señal recibida, es afectada tanto por el tamaño

del barreno, como la distancia del barreno al transductor [4]. La técnica de pulso eco ultrasónico es de amplia utilidad para realizar mediciones precisas de los parámetros acústicos. El barrido se realiza con un transductor piezoeléctrico amortiguado de banda ancha que emite y recopila señales ultrasónicas. El transductor se mantiene en contacto con el objeto de prueba en incidencia normal. El contacto con el objeto de prueba generalmente se refiere a la separación por medio de un tampón líquido o un medio de acoplamiento por inmersión.

Diversos estudios han sido realizados para verificar la linealidad del sistema de instrumentos utilizados en la inspección ultrasónica. Se han utilizado bloques de acero de referencia (amplitud de área y amplitud de distancia) para medir el efecto de las variaciones microestructurales por tratamiento térmico en las propiedades mecánicas, ultrasónicas y elásticas del material [5]. La velocidad del haz ultrasónico en un elemento de prueba está vinculada a sus propiedades elásticas [6], y su valor es afectado por el tamaño de grano, precipitados y fases características [7]. La onda acústica sufre pérdida de energía conforme se transmite dentro del elemento de prueba, por mecanismos de difracción, absorción y dispersión [8,9]. En materiales policristalinos, prevalece el mecanismo de atenuación por dispersión en bordes de grano [9-11].

En aceros al carbono de características microestructurales diferentes, la velocidad y atenuación ultrasónica presentan cambios notorios que responden a las propiedades elásticas típicas de cada fase, la velocidad del sonido en la martensita es inferior a la de la perlita, y ésta es inferior a la velocidad del sonido en la ferrita [12]; al incrementar el tamaño de grano, disminuye la ratio de propagación del haz, y aumenta la dispersión ultrasónica generando mayor atenuación de la energía [13-15].

Para la inspección por ultrasonido en estructuras soldadas de acero de bajo carbono de acuerdo al código aplicable AWS D1.1 [16], se sugieren diversos estándares de referencia para la calibración, actividad previa a la inspección, en general su elección está en función a la norma de fabricación del elemento de prueba, en este punto depende de la disponibilidad y facilidad operativa en campo. Independiente se elija uno u otro estándar de referencia, se asume que disponen la misma capacidad para ubicar dimensionalmente un defecto, sin embargo, es probable que, durante la fabricación, se induzca características metalúrgicas que presenten ligeras variaciones entre un estándar y otro por diferir en su configuración

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

geométrica, y afecten las propiedades acústicas, de hecho, la atenuación de la onda ultrasónica y la velocidad del haz ultrasónico dependen de las propiedades metalúrgicas del acero [17-21]. Es importante para la efectividad del ensayo de ultrasonido en la detección de defectos y repetibilidad de los resultados, independiente a que se utilice uno u otro estándar de referencia para calibración, tener certeza en la medida de las propiedades acústicas en cada referencia, con lo cual, el objetivo de la investigación fue medir, tanto la velocidad como la atenuación ultrasónica con haz recto y trasversal, variando la frecuencia del transductor con un equipo convencional de ultrasonido, en los estándares de referencia tipo DSC, K1 y K2 recomendados por AWS para la calibración del sistema de prueba.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

A. Material Objeto de Estudio

En la investigación se utilizaron tres estándares de referencia de acero 1018, preparadas con paño y alcohol para eliminar resquicios superficiales que puedan afectar las mediciones ultrasónicas. Estas fueron (1) Bloque de prueba distancia – sensibilidad- calibración DSC, (2) Bloque de calibración K1 acorde con DIN EN 12223 [22] y (3) Bloque de calibración K2 acorde con DIN EN 27963 [23]. Cada estándar difiere en su configuración geométrica como se aprecia en la Fig. 1.

B. Métodos y Técnicas

Para determinar los parámetros acústicos, las mediciones fueron realizadas por el método de contacto directo y la técnica pulso-eco, acorde las normas ASTM E 494 [6] y ASTM E 664 [24]. Se utilizó un equipo convencional marca Krautkramer y modelo USM 36, conectado a un palpador piezoeléctrico de haz recto de General Electric, su función como emisor – receptor de los impulsos de sonido, 16 corridas experimentales fueron realizadas con tres repeticiones, al variar la frecuencia del transductor en un intervalo de 2.25, 5.0, 10.0 y 15.0 MHz, con haz recto y trasversal, el ángulo de refracción en acero para producir ondas transversales fue con acople del transductor de haz recto a zapatas de plexiglás 45°, 60° y 70°, para el acople se utilizó acoplante marca Sonatec. La secuencia para el procedimiento experimental se aprecia en la Fig. 2.

La velocidad del haz ultrasónico (V) se calculó en el equipo, por la medida del tiempo de vuelo TOF (t) generado por dos ecos consecutivos desde la pared posterior de longitud en cada referencia (X), y de acuerdo a la Ecuación (1):

$$V = 2X/t \quad (1)$$

El coeficiente de atenuación (α) fue calculado a partir de la relación de la amplitud del primer eco en pantalla (A_0) y segundo eco en pantalla (A) consecutivos de la pared posterior de un elemento de prueba de longitud (X) [25], como se detalla en Ecuación (2):

$$\alpha = \frac{20 \log(A_0/A)}{2X} \quad (2)$$

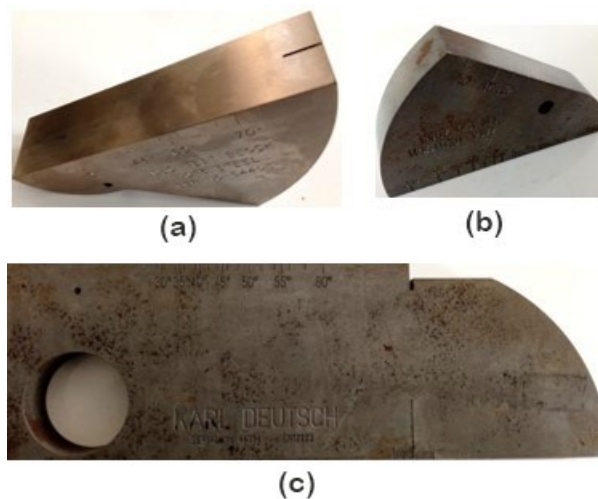


Fig. 1 Estándar de referencia tipo (a) DSC, (b) K2 y (c) K1.

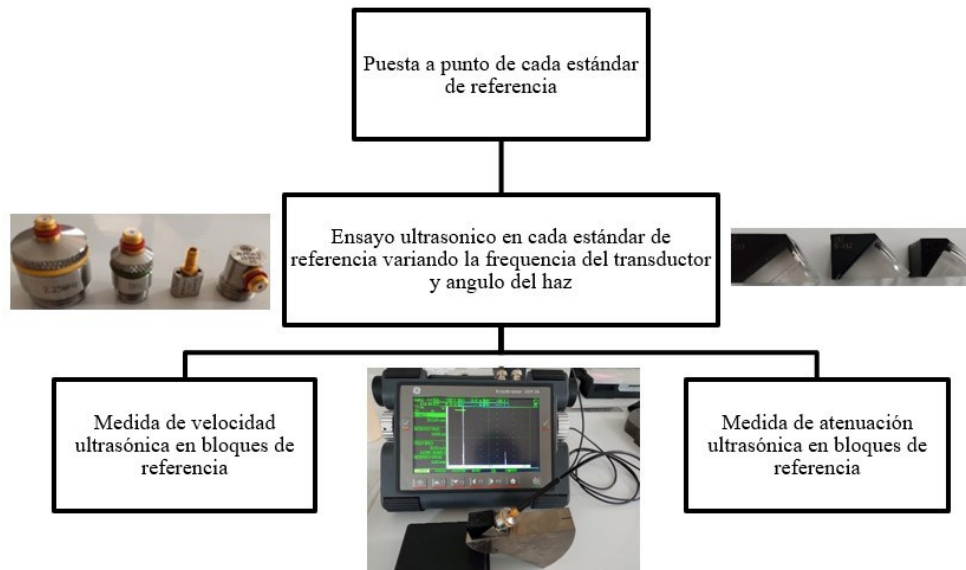


Fig. 2 Procedimiento experimental.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos ejecutados estuvieron orientados a obtener el tiempo de vuelo (para cálculo de velocidad) y altura en pantalla (para cálculo de atenuación) de los ecos consecutivos producidos desde la pared posterior en cada estándar de referencia, tanto con haz recto, como transversal, tal como se aprecia en la Fig. 3.

Los resultados fueron ordenados, de tal forma que relacionan los parámetros acústicos obtenidos con haz

longitudinal y trasversal con ángulos de refracción de 70° , 60° y 45° , por referencia cruzada en función al tipo de estándar de referencia y frecuencia del palpador. En la tabla I se detallan las velocidades acústicas promedio con (1) haz longitudinal VL, (2) haz transversal y ángulo de refracción de 70° VT70, (3) haz transversal y ángulo de refracción 60° VT60, (4) haz transversal y ángulo de refracción 45° VT45. Es importante destacar la imposibilidad de medir la velocidad con haz transversal en cada estándar de referencia, para frecuencias de barrido de 10 y 15 MHz.

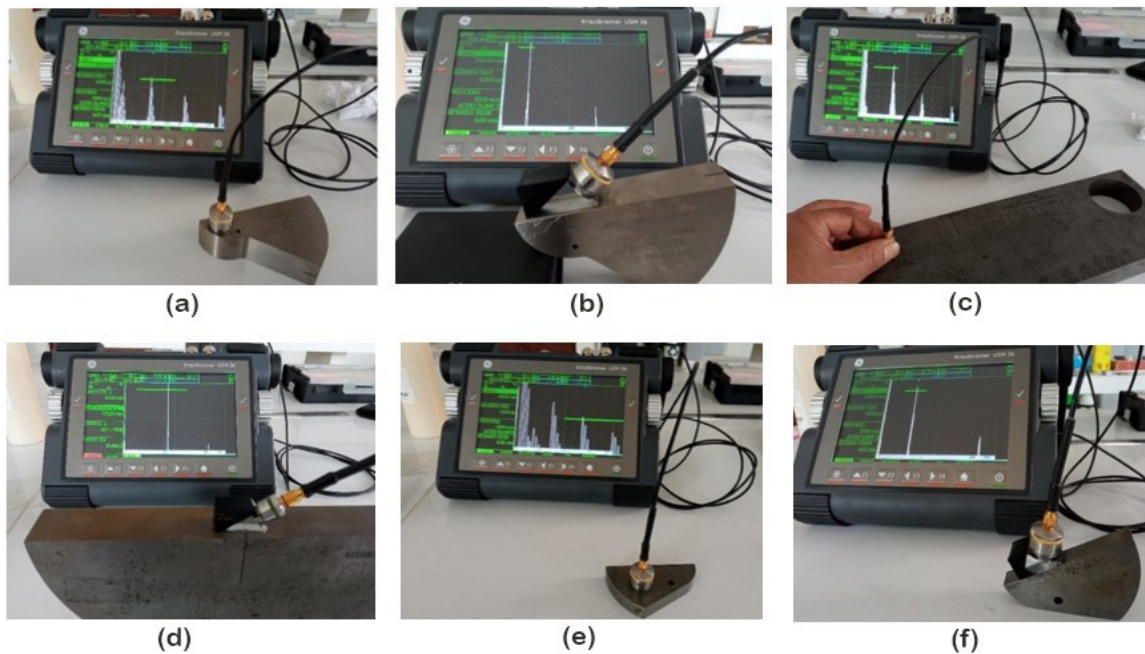


Fig. 3 Medida del tiempo de vuelo y atenuación ultrasónica con haz longitudinal y transversal en los estándares de referencia tipo (a, b) DSC, (c, d) Tipo K1 y (e, f) Tipo K2.

TABLA I
VELOCIDADES ACÚSTICAS PROMEDIO POR ESTÁNDAR DE REFERENCIA – FRECUENCIA DEL PALPADOR

ESTÁNDAR DE REFERENCIA	FRECUENCIA DEL PALPADOR (MHz)	V_L (m/s)	V_{T70} (m/s)	V_{T60} (m/s)	V_{T45} (m/s)
ESTÁNDAR DE REFERENCIA K1	2.25	5939.42	3234.08	3232.81	3224.42
	5.00	5929.09	3230.39	3226.15	3229.47
	10.00	5925.81			
	15.00	5924.64			
ESTÁNDAR DE REFERENCIA K2	2.25	5938.44	3233.46	3236.97	3216.64
	5.00	5937.03	3232.25	3218.10	3216.40
	10.00	5930.01			
	15.00	5926.28			
ESTÁNDAR DE REFERENCIA DSC	2.25	5932.84	3245.25	3240.27	3247.27
	5.00	5916.74	3241.26	3233.85	3227.40
	10.00	5909.86			
	15.00	5911.24			

En la tabla II se detalla el coeficiente de atenuación acústico promedio con: (1) haz longitudinal α_L , (2) haz transversal y ángulo de refracción 70° α_{T70} , (3) haz transversal y ángulo de refracción 60° α_{T60} , (4) haz transversal y ángulo de refracción 45° α_{T45} . Se aprecia la limitación del método para

producir resultados con haz transversal y frecuencias de barrido de 10 y 15 MHz; debido a que no se aprecia en pantalla, la segunda indicación de la pared posterior en cada estándar de referencia.

TABLA II
COEFICIENTE DE ATENUACIÓN ACÚSTICAS PROMEDIO POR ESTÁNDAR DE REFERENCIA – FRECUENCIA DEL PALPADOR

ESTÁNDAR DE REFERENCIA	FRECUENCIA DEL PALPADOR (MHz)	α_L (dB/mm)	α_{T70} (dB/mm)	α_{T60} (dB/mm)	α_{T45} (dB/mm)
ESTÁNDAR DE REFERENCIA K1	2.25	0.090			0.075
	5.00	0.113			0.058
	10.00	0.127			
	15.00	0.157			
ESTÁNDAR DE REFERENCIA K2	2.25	0.110	0.090	0.107	0.077
	5.00	0.203	0.100	0.120	0.120
	10.00	0.277			
	15.00	0.363			
ESTÁNDAR DE REFERENCIA DSC	2.25	0.057	0.070	0.070	0.060
	5.00	0.147	0.083	0.083	0.073
	10.00	0.210			
	15.00	0.210			

La velocidad de propagación ultrasónica con haz longitudinal medida en cada estándar de referencia difiere entre sí, comportamiento similar se produce cuando el haz es transversal, tal como se aprecia en la Fig. 4, es probable que las características metalúrgicas impuestas en la fabricación difieran y expliquen este hecho. En general la velocidad disminuye en su valor conforme incrementó la frecuencia del transductor, se

comprende que, la longitud de onda del haz disminuye y se produce mayor interacción con el borde de grano que actúan como dispersores del haz ultrasónico, provocando mayor resistencia a la propagación del ultrasonido, comportamiento similar se encuentran en los trabajos reportados por [13, 17, 18, 25].

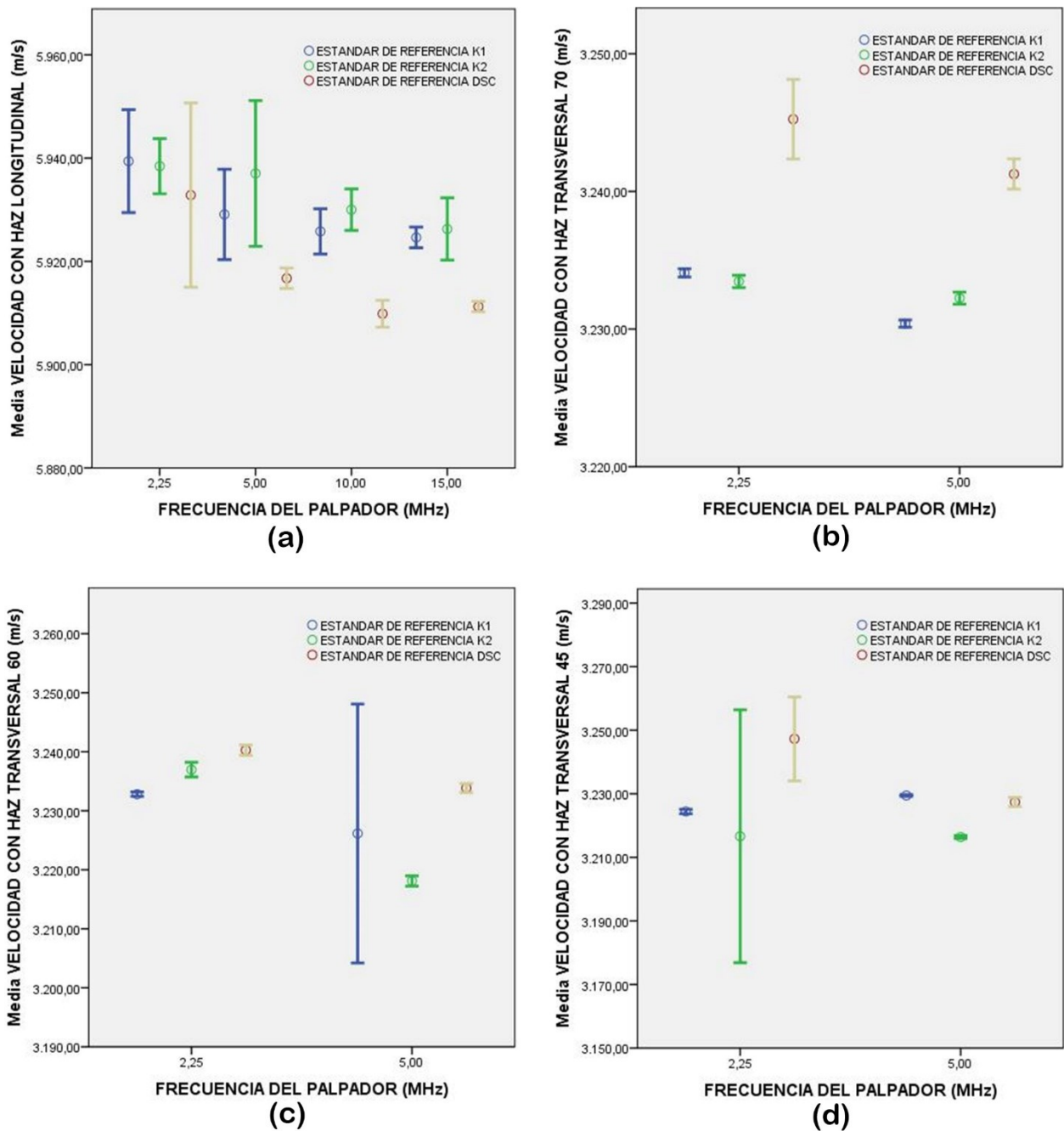


Fig. 4 Influencia de la frecuencia del palpador en la media de velocidad de propagación ultrasónica en los estándares de referencia K1, K2 y DSC, con (a) haz recto, (b) haz transversal 70°, (c) haz transversal 60° y (d) haz transversal 45°

Las medidas de atenuación ultrasónica producida por pérdida de energía, fue caracterizada con medidas del coeficiente de atenuación, fue posible obtener indicaciones confiables con haz transversal con frecuencias de barrido de 2, 25 y 5, 0 MHz, la utilidad del estándar tipo K1 para producir indicaciones de la pared posterior está limitada para un ángulo de refracción de 45°. En la Fig. 5 se aprecia que, la atenuación medida y comparable en cada estándar, difieren, y en general

aumenta con la frecuencia del transductor, al disminuir la longitud de onda se experimenta un aumento de pérdida de energía por dispersión por mayor interacción con los bordes de grano. Se ha dicho que, en los materiales policristalinos, la atenuación ultrasónica se produce principalmente por la dispersión de los granos en comparación con mecanismos de difracción y absorción [9, 10].

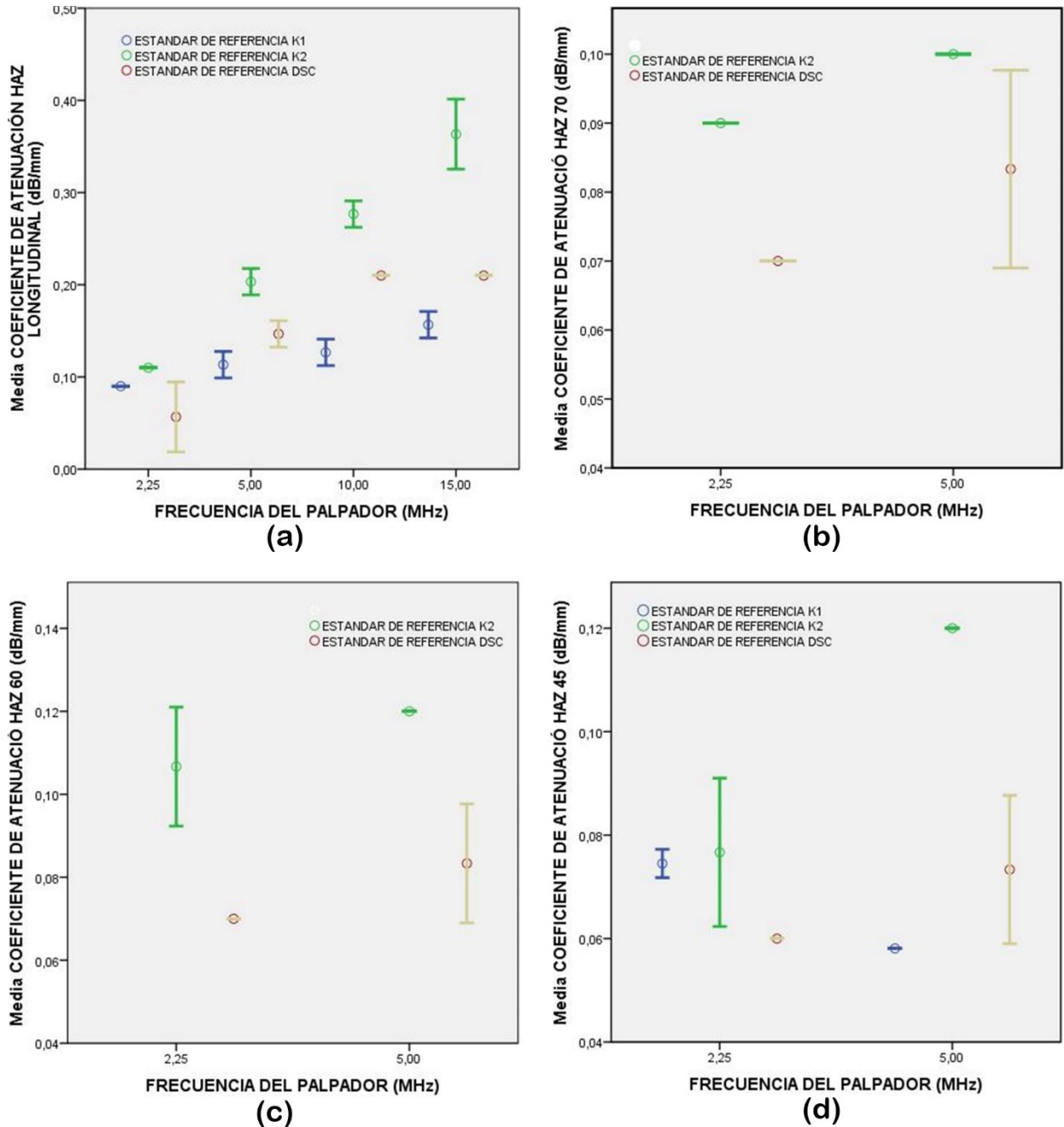


Fig. 5 Influencia de la frecuencia del palpador en la media de atenuación a propagación ultrasónica en los estándares de referencia K1, K2 y DSC, con (a) haz recto, (b) haz transversal 70°, (c) haz transversal 60° y (d) haz transversal 45°

La prueba estadística de regresión múltiple, fue realizada para determinar la relación lineal entre las variables dependiente, velocidad y atenuación ultrasónica con haz recto y las variables dependientes, frecuencia del transductor y tipo de estándar de referencia. Los resultados que se detallan en las tablas III y IV, muestran que la frecuencia del transductor y tipo

de estándar de referencia tienen un efecto significativo en la velocidad y atenuación ultrasónica ($p < 0,05$).

TABLA III
PRUEBA DE REGRESIÓN MÚLTIPLE VELOCIDAD CON HAZ RECTO

ANÁLISIS DE VARIANZA ^a						
Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
1	Regresión	1207.24	1	1207.24	17.71	0.000 ^b
	Residual	2317.86	34	68.17		
	Total	3525.10	35			
2	Regresión	2080.87	2	1040.43	23.77	0.000 ^c
	Residual	1444.23	33	43.77		
	Total	3525.10	35			

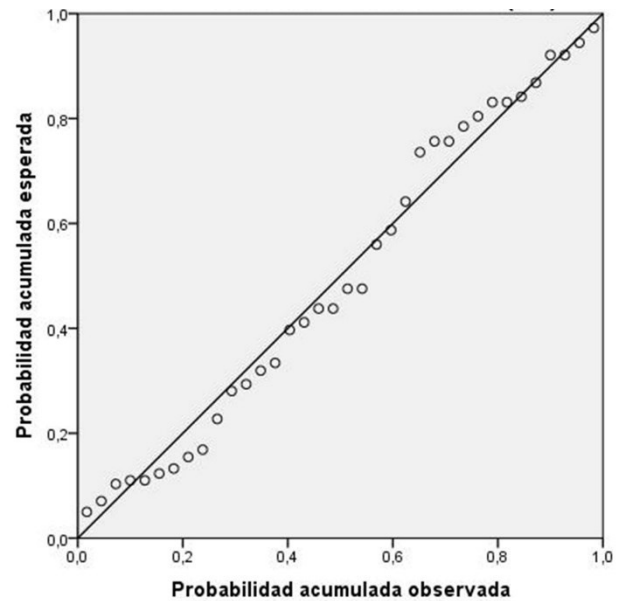
a. Variable dependiente: velocidad con haz longitudinal (m/s)
 b. Variables predictoras: (Constante), frecuencia del palpador (MHz)
 c. Variables predictoras: (Constante), frecuencia del palpador (MHz), estándar de referencia

TABLA IV
PRUEBA DE REGRESIÓN MÚLTIPLE ATENUACIÓN CON HAZ LONGITUDINAL

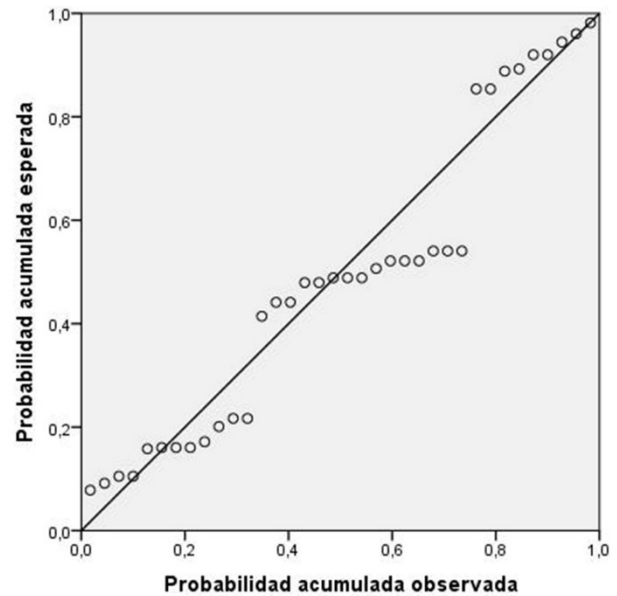
ANÁLISIS DE VARIANZA ^a						
Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
1	Regresión	0.118	1	0.118	31.002	0.000 ^b
	Residual	0.129	34	0.004		
	Total	0.246	35			
2	Regresión	0.125	2	0.062	16.858	0.000 ^c
	Residual	0.122	33	0.004		
	Total	0.246	35			

a. Variable dependiente: coeficiente de atenuación haz longitudinal (dB/mm)
 b. Variables predictoras: (Constante), frecuencia del palpador (MHz)
 c. Variables predictoras: (Constante), frecuencia del palpador (MHz), estándar de referencia

Los cambios en la velocidad y la atenuación del haz ultrasónico, por pérdida de energía, al variar la frecuencia del haz y tipo de estándar de referencia se producen por las interacciones con las características microestructurales del material, producto de su historia termomecánica y son factores clave a tener cuenta para la inspección de componentes estructurales para detectar y dimensionar defectos, resulta de suma importancia realizar la inspección con la misma frecuencia de calibración, en cuanto al estándar de referencia, en la práctica es imposible disponer de un material idéntico metalúrgicamente al elemento de prueba, por lo cual es muy probable, que los resultados de las inspecciones presenten desviaciones respecto a la ubicación y tamaño real del defecto en el elemento de prueba. La gráfica de probabilidad normal para residuos (residuos contra los valores esperados), para las variables velocidad y atenuación ultrasónica con haz recto, se aprecia en la Fig. 6, se verifica que los residuos siguen aproximadamente una línea recta con lo cual la distribución es normal.



(a)



(b)

Fig. 6 Probabilidad normal para (a) velocidad y (b) atenuación, con haz recto

IV. CONCLUSIONES

Los estándares de referencia tipo DSC, K1 y K2 recomendados para la calibración previa a la inspección, de aceros estructurales soldados por el código AWS D 1.1 por ultrasonido por la técnica pulso eco, disponen de parámetros ultrasónicos que difieren de un estándar a otro, con lo cual la ubicación dimensional en el espacio, de un defecto detectado dependerá del tipo de estándar de referencia utilizado para la calibración, este hecho afecta la efectividad del método para ubicar con certeza un defecto. En cada estándar de referencia la

velocidad del haz ultrasónico disminuye y la atenuación aumenta, conforme aumenta la frecuencia del transductor, los bordes de grano en la estructura actúan como dispersores del haz ultrasónico, siendo más sensibles conforme disminuye la longitud de onda ultrasónica, por tanto, resulta de suma importancia realizar la inspección para ubicar defectos con la misma frecuencia de calibración. Para el sistema de prueba los parámetros acústicos obtenidos con haz trasversal, está limitada a frecuencias de barrido de 2,25 y 5,0 MHz, frecuencias mayores no generan la señal del segundo eco de la pared posterior, requisito para medir el tiempo de vuelo y atenuación. En la práctica es imposible disponer de un estándar de referencia idéntico metalúrgicamente al elemento de prueba, se sugiere que futuras investigaciones, se orienten a determinar la desviación y el error estadístico por calibración respecto a la ubicación y tamaño real de un defecto introducido artificialmente en el elemento de prueba.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Universidad Nacional De Trujillo por brindar las instalaciones del Laboratorio de Ensayos No destructivos y Soldadura.

REFERENCIAS

- [1] American Society for Testing and Materials, *ASTM E1158: Standard Guide for Material Selection and Fabrication of Reference Blocks for the Pulsed Longitudinal Wave Ultrasonic Examination of Metal and Metal Alloy Production Material*, 2014. <https://doi.org/10.1520/E1158-04>
- [2] American Society for Testing and Materials, *ASTM E127: Standard Practice for Fabrication and Control of Flat Bottomed Hole Ultrasonic Standard Reference Blocks*, 2020. <https://doi.org/10.1520/E0127-20>
- [3] National Institute for Standardization. *Annual brochure of the National Institute for Standardization*, 2006.
- [4] S. Dixon, S. Burrows, B. Dutton, and Y. Fan, "Detection of cracks in metal sheets using pulsed laser generated ultrasound and EMAT detection", *Ultrasonics*, vol. 51, no. 1, pp. 7-16, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.05.002>
- [5] M. Ali, N. Elsayed, and A. Eid, "Ultrasonic Attenuation and Velocity in Steel Standard Reference Blocks", *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, vol. 10, no. 1, pp. 33-38, 2013.
- [6] American Society for Testing and Materials, *ASTM E494: Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials by Comparative Pulse-Echo Method*, 2020. <https://doi.org/10.1520/E0494-15>
- [7] S. Hirsekorn, "The scattering of ultrasonic waves by polycrystals", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 72, pp. 1021-1031, 1982. <https://doi.org/10.1121/1.388233>
- [8] M. Toozandehjani, K. Matori, F. Ostovan, F. Mustapha, N. Zahari, and A. Oskoueian, "On the correlation between microstructural evolution and ultrasonic properties: a review", *Journal of Materials Science*, vol. 50, pp. 2643-2665, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-8855-x>
- [9] T. Wan, T. Naoe, T. Wakui, M. Futakawa, H. Obayashi, and T. Sasa, "Effects of Grain Size on Ultrasonic Attenuation in Type 316L Stainless Steel", *Materials*, vol. 10, no. 7, pp. 753, 2017. <https://doi.org/10.3390/ma10070753>
- [10] L. Botvina, L. Fradkin, and B. Bridge, "A new method for assessing the mean grain size of polycrystalline materials using ultrasonic NDE", *Journal of Materials Science*, vol. 35, pp. 4673-4683, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1004890604013>
- [11] A. Moghanizadeh, and A. Farzi, "Effect of heat treatment on an AISI 304 austenitic stainless steel evaluated by the ultrasonic attenuation coefficient", *Materials Testing*, vol. 58, no. 5, pp. 448-452, 2016. <https://doi.org/10.3139/120.110878>
- [12] V. Freitas, A. Almeida, E. Silva, V. Albuquerque, and J. Tavares, "Microstructural characterization of carbon steels using ultrasonic velocity measurements", [20th International Congress of Mechanical Engineering, Brasil, 2009].
- [13] P. Palanichamy, A. Joseph, T. Jayakumar, and B. Raj, "Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel", *NDT & E International*, vol. 28, no. 3, pp. 179-185, 1995. [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(95\)00011-L](https://doi.org/10.1016/0963-8695(95)00011-L)
- [14] A. Bouda, S. Lebailli, and A. Benchaala, "Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation", *NDT & E International*, vol. 36, no. 1, pp. 1-5, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00043-9)
- [15] P. Behjati, H. Vahid, R. Mahdavi, and D. Rasouli, "Effect of microstructure on attenuation mechanism of ultrasonic waves in carbon steels", *Materials Science and Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 482-486, 2010. <https://doi.org/10.1179/026708309X12495548508509>
- [16] American Welding Society, *AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel*, 2020.
- [17] C. Hakan, and B. Orkun, "Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement", *Materials Characterization*, vol. 55, no. 2, pp. 160-166, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.05.002>
- [18] E. Papadakis, "Ultrasonic attenuation and velocity in AISI/SAE 52100 steel quenched from various temperatures", *Metallurgical Transactions*, vol. 1, pp. 1053-1057, 1970. <https://doi.org/10.1063/1.1702596>
- [19] N. Tehrani, Z. Abbasi, D. Ozevin, and J. Indacochea, "Metallurgical Characterization of a Low Carbon Steel Microstructure Using Linear and Nonlinear Ultrasonics", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 28, pp. 7206-7212, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04434-z>
- [20] J. Kennedy, J. Wiskel, D. Ivey, and H. Henein, "L80 pipe steel microstructure assessment using ultrasonic testing", *Materials Science and Technology*, vol. 35, no. 16, pp. 1942-1949, 2019. <https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1656370>
- [21] M. Rojas, and A. Martínez, "Análisis microestructural y ultrasónico de un acero AISI/SAE 1020, tratado térmicamente por medio de un temple a 800°C, 900°C y 1000°C", [6th Pan American Conference for NDT, Colombia, 2015].
- [22] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 12223:2000: Non-destructive testing - Ultrasonic examination - Specification for calibration block No. 1*, 2000.
- [23] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 27963:1992, Welds In Steel; Calibration Block No. 2 For Ultrasonic Examination Of Welds*, 1992.
- [24] American Society for Testing and Materials, *ASTM E 664: Standard Practice for the Measurement of the Apparent Attenuation of Longitudinal Ultrasonic Waves by Immersion Method*, 2020. https://doi.org/10.1520/E0664_E0664M-15R20E01
- [25] C. Hakan, and I. Cam, "Comparison of magnetic Barkhausen noise and ultrasonic velocity measurements for microstructure evaluation of SAE 1040 and SAE 4140 steels", *Materials Characterization*, vol. 58, no. 5, pp. 447-454, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.06.008>