

# MEDICIONES ULTRASÓNICAS PARA CUANTIFICAR ESPESOR DE CAPA ENDURECIDA EN ACEROS TEMPLADOS POR INDUCCIÓN

Alfredo A. Elías<sup>1</sup>, Ana L. López<sup>1</sup>, Gilberto Loera<sup>1</sup>, Antonio Salas<sup>1</sup>, José L. Cabrera<sup>1</sup>, Raúl Cárdenas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional de Metrología (CENAM), El Marqués, Querétaro, C.P. 76246  
+52 (442) 211 05 00 al 04, correo-e: [ultrasonido@cenam.mx](mailto:ultrasonido@cenam.mx)

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Celaya (ITC), Celaya, Guanajuato, C.P. 38010

**Resumen:** La técnica de medición es no-destructiva y utiliza ultrasonido de alta frecuencia en incidencia angular en un medio acuoso. Las señales ultrasónicas se procesan digitalmente para determinar el tiempo de vuelo entre indicaciones provenientes de la interface agua-acero y la zona de transición del acero templado. En experimentos con barras cilíndricas templadas por inducción, la profundidad de capa endurecida obtenida por metalografía, micro-dureza y ultrasonido muestran que la técnica ultrasónica es capaz de medir profundidad de temple, en el intervalo de 4 mm a 6 mm, con un error de medición cercano a 0.1 mm.

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo aborda la medición no-destructiva de la profundidad de temple en aceros endurecidos por inducción utilizando ultrasonido. Las mediciones se realizaron en un tanque de inmersión, empleando un transductor ultrasónico de 20 MHz con una orientación fija para controlar la propagación angular de las ondas ultrasónicas dentro del acero endurecido bajo estudio. La interacción del ultrasonido en la zona de transición (material endurecido - material suave) genera indicaciones ultrasónicas que permiten medir la profundidad de capa endurecida, [1]. La profundidad de temple, aquí definida como la suma del espesor de la capa endurecida y el espesor de la zona de transición, se obtuvo utilizando un procesamiento digital similar al descrito en [1-2] aunque incorporando funciones wavelet en el filtrado y diferentes criterios de cruce por ceros en la medición del tiempo de vuelo.

## 2. METODOLOGÍA

La distancia,  $h$ , que recorre una onda ultrasónica en incidencia normal, al propagarse en un material con velocidad conocida,  $c$ , puede obtenerse a partir del siguiente modelo de medición,

$$c = \frac{h}{t/2} \quad (1)$$

En donde  $t/2$  es el tiempo que le toma a la señal ultrasónica recorrer la distancia  $h$ . Empleando ultrasonido con incidencia angular (i.e., con ondas ultrasónicas propagándose dentro del material a un ángulo  $\theta$ ) la profundidad de temple  $h_m$  se mide con

$$h_m = h \cos \theta = c \frac{t_m}{2} \cos \theta \quad (2)$$

Y por tanto, un patrón de referencia fabricado con el mismo material se asume que cumple la relación,

$$h_p = c \frac{t_p}{2} \cos \theta \quad (3)$$

Dicha profundidad de temple  $h_p$ , comúnmente se determina con un método metalográfico destructivo, que consiste en la preparación laboriosa de una probeta extraída al azar de una zona pequeña de la pieza, la cual posteriormente es analizada, ya sea por microscopía o dureza por microindentación. Las ecuaciones 2 y 3 permiten entonces relacionar: a) la medición de profundidad de temple obtenida por un método destructivo y por un método no-destructivo usando ultrasonido; así como, b) los tiempos de vuelo,  $t_p$  y  $t_m$ , cuantificados a partir de mediciones ultrasónicas asociadas con la profundidad de temple de un material (patrón) de referencia y una pieza desconocida, respectivamente. Con base en el error de medición,  $e$ , definido como la diferencia en profundidad de temple entre una pieza desconocida y el material de referencia, se llega a la relación

$$e = h_m - h_p = \frac{c}{2} (t_m - t_p) \cos \theta \quad (4)$$

Con lo cual, la profundidad de temple,  $h_m$ , puede determinarse mediante

$$h_m = h_p + \frac{c}{2} (t_m - t_p) \cos \theta \quad (5)$$

Esto es, empleando i) la profundidad de temple del material de referencia  $h_p$ ; previamente obtenida a partir de una metalografía o un perfil de micro-dureza, y ii) los tiempos de vuelo  $t_p$  y  $t_m$ , del material de referencia y de la pieza sujeta a medición, respectivamente; es preciso medir ambos tiempos de vuelo experimentalmente empleando las indicaciones ultrasónicas asociadas con el punto de

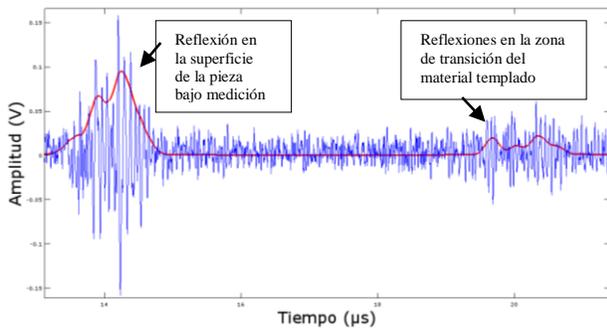
incidencia del haz ultrasónico en el material templado y la zona de transición al material base.

**2.1. Equipo de medición**

La instrumentación utilizada en la técnica de medición con ultrasonido incluye principalmente, i) pulsador-receptor, ii) transductores ultrasónicos de inmersión de 20 MHz, iii) osciloscopio digital, iv) tanque de inmersión, y v) sistema de montaje para el transductor y los especímenes de prueba.

**2.2. Procesamiento de datos**

La señal ultrasónica capturada en el osciloscopio se procesa digitalmente, empleando secuencialmente operaciones de transformación wavelet, transformación Hilbert, de filtrado Savy-Golevsky y filtrado de promedios móviles, para obtener una señal envolvente que simplifique la medición del tiempo de vuelo entre las indicaciones de interés; básicamente entre la superficie de entrada del haz ultrasónico y el inicio de la zona de transición, ver figura 1.



**Fig. 1.** Señal ultrasónica obtenida en la medición de profundidad de temple en aceros (en azul) y su correspondiente señal procesada (en rojo).

**3. RESULTADOS**

Se realizaron tanto mediciones no-destructivas por ultrasonido como mediciones destructivas en especímenes cilíndricos del mismo tipo de acero, aunque con diferente profundidad de temple. Las mediciones ultrasónicas se hicieron, a su vez, en tres secciones transversales de cada uno de los especímenes. El promedio de los valores obtenidos usando la ecuación 5, proporcionó la profundidad de capa endurecida de la pieza sujeta a medición.

Uno de los especímenes cilíndricos se caracterizó con mayor detalle y se definió como material de referencia. Se determinó que la velocidad de propagación del patrón era de 3 190 m/s, y dado que los especímenes de prueba fueron del mismo material se observó que, para efectos prácticos, fue válido suponer la misma velocidad de propagación. El sistema de posicionamiento se ajustó para que

las ondas ultrasónicas se refracten en acero con un ángulo  $\Theta=39^\circ$ ; lo cual se mantuvo constante en todas las mediciones de profundidad de temple.

**Tabla 1.** Profundidad de temple en material de referencia ( $MR_{patrón}$ ) y especímenes de prueba.

Método utilizado		Profundidad de temple (mm)		
		$MR_{patrón}$	B7A	B7B
1	Metalografía	6.03	4.30	4.55
2	Micro-dureza	5.98	4.48	4.43
3	Ultrasonido	6.04	4.42	4.45
Error de medición: ultrasonido-microdureza		0.06	-0.06	0.02

La tabla 1 compara los resultados obtenidos para el material  $MR_{patrón}$  y dos especímenes de prueba. En cada caso, la profundidad de temple se midió tanto por métodos destructivos como por ultrasonido en inmersión; el error de medición resultó  $< 0.1$  mm, con una incertidumbre expandida ( $k=2$ )  $< 0.3$  mm.

**4. DISCUSIÓN**

Aun cuando el procesamiento digital de la señal permite suavizar los cambios bruscos de las indicaciones de alta frecuencia, es necesario extremar cuidados en el arreglo experimental para obtener una medición robusta de la profundidad de temple. El tiempo de vuelo, medido entre el valor máximo de la reflexión ultrasónica en la interface agua-acero y el cruce por cero de la indicación ultrasónica que genera la zona de transición del acero templado fue un mejor criterio para determinar la profundidad de temple.

**5. CONCLUSIONES**

El error de medición y la incertidumbre de medida obtenida muestran que la profundidad de temple puede medirse con alta confiabilidad en un área más grande de la pieza y sin tener que destruir los especímenes de prueba; lo que implica una importante reducción de pruebas destructivas.

**REFERENCIAS**

[1] M. S. Good, Joseph L. Rose, Measurement of thin case depth in hardened steel by ultrasonic pulse-echo angulation techniques, in Nondestructive Methods for Material Property Determination, Springer, p. 189-203, 1984.  
 [2] R. Baqeri, et al; "Case Depth Profile Measurement of Hardened Components Using Ultrasonic Backscattering Method", 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 2012.