



# Evaluación de daño en vigas a través de las emisiones acústicas y la transformada *wavelet*

José Manuel Machorro López Jorge Alberto Hernández Figueroa Francisco Javier Carrión Viramontes Juan Pablo Amézquita Sánchez Martín Valtierra Rodríguez Juan Antonio Quintana Rodríguez Saúl Enrique Crespo Sánchez Luis Álvaro Martínez Trujano Miguel Anaya Díaz Jesús Joaquín Yáñez Borjas Adriana Guadalupe Porres López Germán Michel Guzmán Acevedo Héctor Miguel Gasca Zamora

> Publicación Técnica No. 712 Querétaro, México. 2022

> > ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte en colaboración con el Departamento de Ingeniería Electromecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus San Juan del Río, y el Tecnológico de Monterrey, *School of Engineering and Science*, Campus Querétaro. Por parte del Instituto Mexicano del Transporte participaron: José Manuel Machorro López, Jorge Alberto Hernández Figueroa, Francisco Javier Carrión Viramontes, Juan Antonio Quintana Rodríguez, Luis Álvaro Martínez Trujano, Miguel Anaya Díaz, Adriana Guadalupe Porres López, Germán Michel Guzmán Acevedo y Héctor Miguel Gasca Zamora; por la Universidad Autónoma de Querétaro: Juan Pablo Amézquita Sánchez, Martín Valtierra Rodríguez y Jesús Joaquín Yáñez Borjas; y por el Tecnológico de Monterrey: Saúl Enrique Crespo Sánchez.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna El 01/22 *Detección y evaluación de daño en vigas de concreto mediante el análisis* wavelet *de emisiones acústicas*.

Se reconoce y agradece el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del Proyecto No. 34/2018 del Programa "Investigadoras e Investigadores por México" del CONACYT; así como la colaboración de los investigadores del *Engineering Applications Research Group* (ENAP-RG) de la Universidad Autónoma de Querétaro campus San Juan del Río y del Tecnológico de Monterrey, *School of Engineering and Science*.

# Tabla de contenido

P	agina <sup>°</sup>		
Sinopsis	ix		
Abstract	xi		
Resumen ejecutivoxiii			
Introducción1			
. Metodología para la detección de daño	5		
1.1 Energía <i>wavelet</i>	6		
2. Experimentos de laboratorio	11		
3. Análisis y discusión de resultados	17		
Conclusiones	31		
Bibliografía			

# Índice de figuras

Página

		-			
Figura 0.1	La fuente de EA genera una onda de EA debido a una carga aplicada en el material. Cadena de proceso de EA: sensor, señal de EA y sistema de adquisición [10]	2			
Figura 1.1	Diagrama esquemático de la metodología propuesta	6			
Figura 1.2	Representación de la CWT, mostrando su capacidad para exhibir características de multirresolución de una señal utilizando una <i>wavelet</i> de tamaño variable	7			
Figura 2.1	Diseño geométrico de especímenes concreto simple	11			
Figura 2.2	Arreglo experimental para pruebas de flexión en especímenes con cuatro puntos de apoyo				
Figura 2.3	(a) Máquina servo-hidráulica Instron®, modelo 8801. (b) Carga de compresión registrada durante una prueba	13			
Figura 2.4	(a) Diagrama de ubicación de los sensores de EA. (b) Arreglo experimental antes de una prueba	13			
Figura 2.5	(a) Equipo para pruebas de EA Physical Acoustics <sup>©</sup> mDisp <sup>©</sup> . (b) Equipo para pruebas de VPU Controls <sup>©</sup> E48 <sup>®</sup> . (c) Equipo para pruebas de resistividad M.C.Miller <sup>©</sup> 400A <sup>©</sup>	15			
Figura 3.1	Fotografías de pruebas de laboratorio para algunos especímenes: (a) PVPU. (b) Pruebas de resistividad	18			
Figura 3.2	<i>Mother wavelet</i> tipo gaus6	19			
Figura 3.3	Señal típica de EA analizada	19			
Figura 3.4	Máxima EW para cada <i>hit</i> de EA de la prueba No. 14 y S2 usando diferentes MW	20			

Figura 3.5	Máxima EW para cada <i>hit</i> de EA de la prueba No. 14 y S2 usando la MW tipo gaus6	21
Figura 3.6	Viga de concreto No. 14 fracturada después de la prueba de flexión, mostrando la vista inferior y las caras fracturadas en los extremos (áreas de sección transversal)	21
Figura 3.7	(a) Análisis de rango de escala. (b) Acercamiento alrededor de la región de la manifestación de la fisura principal	23
Figura 3.8	Análisis de rangos de escala considerando sólo los dos rangos más diferentes: 1-50 y 1-180	24
Figura 3.9	Máxima EW para cada <i>hit</i> de EA de la prueba No. 8 y 2 sensores diferentes	25
Figura 3.10	Máxima EW para cada <i>hit</i> de EA de la prueba No. 20 y S2	26
Figura 3.11	Máxima EW para cada <i>hit</i> de EA de la prueba No. 21 y S2	27

# Índice de tablas

#### Página

- Tabla 3.1Detección de la etapa de manifestación de la fisura28principal para los primeros 30 especímenes
- Tabla 3.2Comparación de instantes de tiempo en los que se29identifica daño con la metodología propuesta y<br/>con la técnica de PVPU

# Sinopsis

Las vigas de concreto son elementos utilizados en una gran cantidad de estructuras civiles; desafortunadamente, pueden contener fisuras que evolucionen hasta producir una falla crítica si esos defectos no se detectan a tiempo. Por ello, este trabajo expone un nuevo método para evaluar la condición estructural de vigas de concreto sometidas a flexión. El método propuesto utiliza la transformada *wavelet* continua para analizar las señales de emisiones acústicas provenientes de fisuras o defectos internos en los elementos de concreto sometidos a flexión y, de ahí, se calcula la energía wavelet para determinar la condición estructural (sana o dañada) en cualquier momento. Más aún, de este análisis es posible identificar con mayor precisión la etapa en la que se encuentra la condición estructural, clasificándose como condición sana y aparición de micro-fisuras, manifestación de fisura principal, propagación de fisura principal y ruptura final. Este método se valida experimentalmente en laboratorio y, además, se realizan pruebas de velocidad de pulso ultrasónico en algunos especímenes a fin de confirmar el cambio entre condición sana y dañada. Los resultados son satisfactorios y abren la posibilidad para que este método se utilice para la detección de daño en estructuras reales.

#### Abstract

Concrete beams are elements used in a large number of civil structures; unfortunately, they may contain cracks that can evolve to produce a critical failure of structures, if those defects are not detected on time. For this reason, this work proposes a new method to evaluate the structural condition of concrete beams subjected to bending. The proposed method uses the continuous wavelet transform to analyze acoustic emission signals from cracks or internal defects in concrete elements when subject to bending loads and then, the wavelet energy is calculated to determine, at any time, the structural condition (healthy or damaged). Moreover, from this analysis it is possible to identify more precisely the stage of that structural condition, classifying it as healthy condition and presence of micro-cracks, manifestation of principal crack, propagation of principal crack, and final rupture. This method is validated experimentally in laboratory and, complementarily, ultrasonic pulse velocity tests are performed for some specimens to confirm the change between healthy and damaged condition. The results are satisfactory and open up the possibility to use this method for damage detection in real structures.

### **Resumen ejecutivo**

El concreto es el material de construcción más utilizado en la historia de la ingeniería civil. La mayoría de las obras de infraestructura están construidas con concreto; por ejemplo, edificios, presas, puentes, etc.

El concreto tiene buena resistencia a la compresión, pero muy baja resistencia a la tensión. En elementos viga sujetos a flexión, las fisuras se desarrollan durante la aplicación de la carga de trabajo y, dado que el concreto es débil a la tensión, las fisuras se generan en las zonas de tensión. Cuando el esfuerzo en las fibras de tensión extrema supera el módulo de ruptura del concreto, se produce la primera fisura. Sin embargo, el esfuerzo de tensión no es la única causa que provoca fisuras en el concreto; existe una gran cantidad de factores que influyen en la aparición de fisuras, como el cambio de temperatura, la contracción y el esfuerzo cortante. El patrón de las fisuras en un elemento de concreto es muy complejo y difícil de predecir, ya que el concreto no es un material homogéneo y las fisuras tienen diferente orientación, longitud, ancho, algunas de ellas son estacionarias, mientras que otras se propagan. Además, la causa de su aparición es diferente y pueden ser micro-fisuras muy pequeñas o macro-fisuras de gran tamaño.

El monitoreo de daño en elementos de concreto usados en diversas estructuras es una tarea muy exigente y desafiante. Los métodos tradicionales de monitoreo de integridad estructural (ultrasonido, radiografía, etc.) son caros e ineficientes para estructuras de concreto de gran tamaño con accesibilidad limitada o nula.

Por lo tanto, en este trabajo se desarrolló un método eficiente y sencillo para detectar daño (fisuras) en vigas de concreto sometidas a cargas de flexión. Este método utiliza la transformada *wavelet* (TW) para posprocesar las señales de emisiones acústicas (EA) generadas durante la aplicación de la carga de flexión, obteniendo un índice de daño basado en la energía *wavelet* (EW) que produce cada evento o *hit* de EA mientras se aplica la carga en el elemento. Así, de acuerdo con la magnitud y características de la EW para cada *hit* de EA, este método permite la detección y evaluación de daño en vigas de concreto, pudiendo diferenciar las diferentes etapas del estado estructural de dichas vigas: condición sana y aparición de micro-fisuras, manifestación de fisura principal, propagación de fisura principal y ruptura final. Cabe destacar que los resultados experimentales obtenidos en laboratorio son muy promisorios y, por tanto, el método propuesto presenta importantes ventajas para que pueda aplicarse en elementos de estructuras de la vida real, destacando las siguientes: no se requiere filtrar las señales de EA, la carga computacional es baja, los resultados se proporcionan en tiempo real, no es necesario colocar los sensores de EA en la posición exacta del daño, se utiliza sólo un índice de daño para conocer el estado estructural, etc.

### Introducción

Las vigas de concreto son elementos utilizados en la infraestructura civil; a pesar de ser elementos robustos, se ven continuamente afectados por las condiciones ambientales (fenómenos climáticos extremos) y por daños causados por accidentes y condiciones de operación de las estructuras [1]. Por lo tanto, es crucial evaluar el desempeño y condición de estos elementos estructurales para asegurar la integridad de toda la estructura [2,3].

Entre muchas técnicas de ensayos no destructivos (END) disponibles, se destaca la prueba de emisión acústica (EA), ya que esta herramienta no destructiva se puede utilizar para evaluar elementos estructurales sometidos a carga viva sin necesidad de interrumpir la operación [4–7]. En particular, los materiales generan ondas elásticas transitorias debido a la liberación de esfuerzos o energía de una o más fuentes dentro del propio material. Por lo tanto, esta técnica utiliza sensores que actúan como estetoscopios para "escuchar" los eventos que conducen a la falla de un elemento [8,9].

La figura 0.1 ilustra la generación de la onda de EA por una fuente, sometiendo el material a una carga [10]. Las ondas elásticas se propagan en el interior del material y finalmente alcanzan la superficie, produciendo pequeños desplazamientos temporales en la superficie, que son detectados por los sensores.

El método de evaluación no destructivo basado en EA es reconocido por su alta capacidad para monitorear la integridad estructural de los elementos en tiempo real, detectar la aparición de defectos y fallas incipientes, así como para la caracterización de materiales [11,12]. A diferencia de los métodos de ultrasonido y radiografía, el método de EA es pasivo, ya que el elemento de prueba no tiene que ser excitado con ninguna onda, sólo se reciben las ondas de EA cuando el componente estructural se somete a esfuerzo [13,14].



Figura 0.1. La fuente de EA genera una onda de EA debido a una carga aplicada en el material. Cadena de proceso de EA: sensor, señal de EA y sistema de adquisición [10].

A continuación, se mencionan las principales ventajas de esta técnica frente a otras:

(1) La onda de EA se origina en el elemento inspeccionado.

(2) Esta técnica detecta movimientos en tiempo real (procesos dinámicos) y no discontinuidades geométricas sin movimiento, previamente existentes en el material.

(3) Puede detectar daño con discontinuidades desconocidas ubicadas en lugares inaccesibles que otros métodos no logran detectar.

(4) Es una técnica no-direccional en el sentido de que la energía de la fuente de EA se libera en todas las direcciones; es decir, un sensor colocado en cualquier lugar cerca de la fuente puede detectar la EA resultante. Esta capacidad es otra diferencia significativa con respecto a otros métodos basados en END que utilizan un conocimiento a priori de la probable ubicación y orientación de la discontinuidad.

Mientras que, las principales limitaciones de esta técnica están relacionadas con el acceso al elemento estructural y el uso del adecuado acoplante para la fijación de los sensores en el elemento a estudiar.

Asimismo, la técnica de EA incluye tecnología con potencial de uso en una amplia gama de aplicaciones en el campo de los END, entre las que destacan las siguientes: (a) Monitoreo de estructuras civiles, especialmente en elementos fabricados con concreto armado y acero usados en puentes, túneles, edificios, etc. [15–18].

(b) Diagnóstico de recipientes sujetos a presión y contenedores de almacenamiento [19–21].

(c) Detección de fallas provocadas por grietas en estructuras aeroespaciales y otras estructuras de materiales compuestos reforzados con fibras o plásticos sometidos a esfuerzos mecánicos [22–25].

(d) Investigación de las propiedades de los materiales, mecanismos de falla y comportamiento frente al daño [26,27].

(e) Control de calidad e inspección de diferentes procesos, tales como soldadura, secado de madera, recubrimientos, etc. [28–30].

(f) Detección y localización de fugas en tiempo real, ya sea en válvulas pequeñas o incluso en el fondo de grandes tanques o en tuberías enterradas [31–34].

Para el caso de estructuras civiles, independientemente de las importantes ventajas del ensayo de EA y del esfuerzo de muchos investigadores por proveer métodos basados en esta técnica para detectar daño en elementos de estructuras completas [15-18,35], aún existe la necesidad de contar con un método confiable y sencillo para este fin; por ejemplo, en trabajos recientes se utiliza un índice histórico para detectar daño en vigas de concreto [15], el cual es complejo, involucra un elevado tiempo de cómputo y, además, no fue posible determinar con claridad las diferentes etapas del daño; por otro lado, en [16,17] se analizan las señales de EA para el seguimiento de procesos prolongados de corrosión en elementos estructurales; sin embargo, el estudio no profundiza en la detección de fisuras que puedan provocar fracturas repentinas; y, por último, en [18,35] se requieren imágenes digitales para realizar una correlación con los resultados de EA y detectar daño en vigas de concreto, aumentando los costos y la complejidad del método debido al uso de un segundo equipo adicional al equipo de EA.

Por lo tanto, el método propuesto en esta publicación supera esas desventajas mencionadas previamente, ya que es simple, utiliza un solo *hardware* (equipo de EA), la carga de cómputo es baja, los resultados se proporcionan en tiempo real y sólo se usa un índice de daño para determinar el estado del elemento inspeccionado de acuerdo a diferentes etapas de su condición estructural con la presencia de fisuras.

Así entonces, en esta investigación se desarrolla un método para determinar el estado estructural de vigas de concreto sometidas a cargas de flexión, donde, en primer lugar, se aplica la *continuous wavelet transform* (CWT) a las señales de EA generadas por diferentes *hits* (eventos) de EA y, posteriormente, se calcula la energía *wavelet* (EW) para el diagnóstico.

El valor de EW para cualquier *hit* permite conocer el estado estructural actual del elemento que se esté evaluando, y además, se puede clasificar de acuerdo a diferentes etapas: condición sana y aparición de microfisuras, manifestación de fisura principal, propagación de fisura principal y ruptura final; lo que representa una importante ventaja al utilizar este método, ya que sólo se requiere un parámetro para conocer el condición estructural precisa del elemento analizado en vez de clasificar su estado solamente como sano o dañado, lo cual es de gran ayuda para tomar decisiones acertadas sobre un estructura completa en función del específico estado estructural actual de uno de sus elementos bajo inspección.

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio son prometedores para aplicar este método en vigas de concreto utilizadas como elementos críticos de la infraestructura de la vida real, ya que presenta importantes ventajas en comparación con otros métodos, tales como: no se requiere un filtro para las señales de EA, baja carga de cómputo, resultados proporcionados en tiempo real, no es necesario colocar los sensores de EA en la posición exacta del daño, sólo se usa un índice de daño para conocer el estado de salud preciso del elemento de acuerdo a diferentes etapas, etc.

### 1. Metodología para la detección de daño

La metodología propuesta para determinar el estado estructural de vigas de concreto sometidas a flexión consiste en (ver figura 1.1):

1. Instrumentar el elemento de concreto con sensores de EA y adquirir los correspondientes *hits* generados en forma de *waveforms* durante una prueba de flexión. El equipo de EA se debe configurar de la manera más conveniente.

2. Realizar un análisis de *mother wavelet* (MW) y rango de escala (RE) para definir ambos parámetros para el elemento específico en estudio. Este análisis se debe realizar obteniendo la máxima EW para todos los *hits* de EA generados durante la prueba inicial usando diferentes MW y RE hasta encontrar la mejor combinación de ambos parámetros que permita distinguir las diferentes etapas del estado estructural del elemento y con un tiempo de cómputo aceptable. Cabe señalar que la máxima EW para cada *hit* de EA debe calcularse considerando la imagen completa de los correspondientes diagramas CWT; es decir, se debe tener en cuenta la duración total de cada *hit* y luego se considera el respectivo valor máximo de EW. La explicación detallada para obtener la máxima EW para cada *hit* de EA se proporciona en la siguiente subsección (1.1) y específicamente se refiere a la aplicación de la ecuación 10.

3. Definir los valores de magnitud de EW y las condiciones para que un *hit* de EA represente cada una de las diferentes etapas del estado estructural del elemento: condición sana y aparición de micro-fisuras, manifestación de fisura principal, propagación de fisura principal y ruptura final. Se debe asegurar la repetibilidad de tendencia de resultados.

4. Una vez conocido el comportamiento del elemento estructural bajo este tipo de prueba y definidas todas las configuraciones, parámetros, valores y etapas; el valor de EW de cualquier *hit* durante la prueba de flexión (o durante la operación real bajo escenarios similares) determinará la condición estructural de dicho elemento.

5. Determinar la etapa exacta de la condición estructural del elemento ensayado de acuerdo a: condición sana y aparición de micro-fisuras, manifestación de fisura principal, propagación de fisura principal y ruptura final.



Figura 1.1. Diagrama esquemático de la metodología propuesta.

#### 1.1 Energía wavelet

Para obtener la EW de cualquier *hit* de EA, en primer lugar, se debe posprocesar la señal de EA correspondiente utilizando la CWT.

Las *wavelets* presentan importantes ventajas para procesar los datos de vibración estructural y realizar análisis para evaluar una estructura, ya que esta herramienta proporciona mayor información que la *fast Fourier transform* (FFT) y la *short time Fourier transform* (STFT) [36]; es decir, esta técnica puede proveer un análisis en tiempo y frecuencia en el mismo diagrama y con buena resolución.

Una *wavelet* es una oscilación en forma de onda con una amplitud que comienza en cero, aumenta y luego disminuye hasta volver a cero; es decir, las *wavelets* son pequeñas ondas (señales) altamente localizadas en el tiempo que descienden rápidamente a cero después de algunas oscilaciones y tienen un valor promedio nulo, como las señales registradas por un monitor cardíaco. En general, las *wavelets* se diseñan intencionalmente para que tengan propiedades específicas que las hagan útiles para el procesamiento de señales. Como herramienta matemática, las *wavelets* se pueden utilizar para extraer información de muchos tipos diferentes de datos [36,37].

La transformada *wavelet* (TW) es una de las técnicas más utilizadas en el análisis de tiempo-frecuencia, la cual tiene la ventaja de tratar con señales no estacionarias, transitorias y no lineales.

La CWT es una de las formas más usadas de la TW, la cual proporciona una representación de tiempo-frecuencia de una señal mediante el uso simultáneo de una técnica de ventanas de tamaño variable (ver figura 1.2). La CWT descompone la señal en una serie de pequeñas ondas (*wavelets*); esas wavelets pueden ser funciones reales o complejas, y existe una familia de *wavelets* disponible. Para cada aplicación, una *wavelet* en particular puede ser más apropiada que otras, pero, en general, para encontrarla, se requiere un proceso de prueba y error. La *wavelet* seleccionada se llama MW y puede ser una función del espacio o del tiempo. Por lo tanto, la CWT se genera eligiendo una simple MW y luego formando una familia continua de wavelets, trasladando y dilatando la MW; esto se utiliza para evaluar secuencialmente la similitud entre la MW y una parte de la señal que se analizará en todo el tiempo [36,37]. Las wavelets con escalas más finas son un indicador de información de alta frecuencia de la señal, mientras que las wavelets con escalas más gruesas son apropiadas para capturar componentes de baja frecuencia.



Figura 1.2. Representación de la CWT, mostrando su capacidad para exhibir características de multirresolución de una señal utilizando una *wavelet* de tamaño variable.

De esta manera, mientras que la FFT descompone una señal en senos y cosenos de longitud infinita, perdiendo toda la información de localización en el tiempo, la CWT se utiliza para construir una representación en tiempo-frecuencia de una señal que ofrece muy buena localización en tiempo y frecuencia.

Así entonces, una función MW se define como [29]:

$$\psi(t) \in L^2(\mathbb{R}),$$

(1)

la cual está limitada en el dominio del tiempo. Es decir,  $\psi(t)$  tiene valores en un cierto rango y ceros en otros lugares. Otra propiedad de una MW es el promedio cero; la otra propiedad es que la MW está normalizada. Matemáticamente, esas dos últimas propiedades se representan como:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \, dt = 0 \tag{2}$$

$$\|\psi(t)\|^{2} = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)\psi^{*}(t)dt = 1.$$
(3)

Como indican las propiedades de traslación y dilatación, la MW puede formar un conjunto base denotado por:

$$\left\{\psi_{s,u}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-u}{s}\right)\right\}\Big|_{u\in\mathbb{R},s\in\mathbb{R}^+},\tag{4}$$

donde u es el parámetro de traslación, que indica la región que concierne. Mientras que s es el parámetro de escala mayor que cero porque la escala negativa es indefinida. La propiedad de multirresolución garantiza que el conjunto obtenido { $\psi_{s,u}(t)$ } sea ortonormal. Así, la CWT es el coeficiente de la base  $\psi_{s,u}(t)$ , es decir,

$$Wf(s,u) = \langle f(t), \psi_{s,u} \rangle \tag{5}$$

$$Wf(s,u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{s,u}^{*}(t) dt$$
(6)

$$Wf(s,u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) dt.$$
(7)

A través de esta transformada, es posible mapear una señal unidimensional f(t) a coeficientes bidimensionales Wf(s, u). Ambas variables permiten realizar el análisis de tiempo-frecuencia. Posteriormente, se puede indicar la ubicación de una frecuencia particular (parámetro s) en un determinado instante de tiempo (parámetro u).

Si f(t) es una función  $L^2(\mathbb{R})$ . El inverso de CWT es:

$$f(t) = \frac{1}{c_{\psi}} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty W f(s, u) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) du \frac{ds}{s^2},$$
(8)

donde  $C_{\psi}$  se define como:

$$C_{\psi} = \int_{0}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^{2}}{\omega} d\omega < \infty , \qquad (9)$$

donde  $\Psi(\omega)$  es la transformada de Fourier de la MW  $\psi(t)$ . Esta ecuación también se llama "condición de admisibilidad".

Finalmente, para estimar la EW, que es el parámetro que indica la condición estructural del elemento utilizando la metodología propuesta (tal como se describió anteriormente al inicio de la sección 1), el área bajo la curva generada por los coeficientes *wavelets* a lo largo del RE seleccionado se debe calcular para cada instante de tiempo de la duración de cada *hit* de EA, como se representa en la siguiente ecuación sólo para un instante de tiempo de una señal de EA:

$$EW = \int_{s_{min}}^{s_{max}} f(Wf) ds , \qquad (10)$$

donde *s<sub>min</sub>* y *s<sub>max</sub>* son los valores mínimo y máximo de escala, del RE seleccionado, respectivamente; mientras que *f*(*Wf*) representa la función de la curva de los coeficientes a lo largo del RE seleccionado sólo para un instante de tiempo de la duración total de un *hit* de EA. De esta forma, después de obtener el valor máximo de EW para todas las señales completas de EA generadas durante una prueba de flexión con una viga de concreto, el *hit* con el valor más alto de máxima EW indicará el *hit* crítico correspondiente a la manifestación de la fisura principal, la cual provocará la ruptura final. Por otra parte, según sus valores de máxima EW, los demás *hits* indicarán la condición sana y aparición de micro-fisuras, propagación de fisura principal y ruptura final. Es importante recalcar que se deben seleccionar la MW y RE más convenientes.

La gran ventaja de aplicar la CWT para las señales de EA es que el hit correspondiente a la manifestación de la fisura principal tiene un amplio contenido de frecuencias de EA que se pueden capturar usando la MW y RE convenientes para los diagramas CWT; así entonces, la EW correspondiente exhibirá un valor alto debido a la acumulación de esa energía a lo largo del RE seleccionado, por lo que el hit más crítico se puede identificar rápidamente. Por otro lado, los otros hits tendrán valores de EW menores debido a coeficientes de más baja amplitud en los diagramas CWT y contenidos de frecuencias de EA más limitados, lo que resultará en una exhibición más pobre de acumulación de EW. Por tanto, los hits correspondientes a los estados de "propagación de fisura principal" y "ruptura final", aparecerán después del hit de "manifestación de fisura principal" y serán los segundos en magnitud de EW. En cambio, los hits relacionados con "aparición de micro-fisuras" y "condición sana" serán el tercero y cuarto en magnitud de EW, respectivamente, y aparecerán antes del hit correspondiente al estado de "manifestación de fisura principal". El hit de la ruptura final no es indispensable para analizarse, ya que es obvio que será el último, y el elemento fracturado será visualmente evidente; además, la EW de ese hit puede verse influenciada por otros ruidos durante la ruptura/caída del elemento.

# 2. Experimentos de laboratorio

A fin de validar la metodología para detectar fisuras en vigas de concreto sin acero de refuerzo, se diseñaron y realizaron diversas pruebas de laboratorio. Para este propósito, se diseñaron y fabricaron bloques simples de concreto con cemento Portland ordinario con una resistencia a la compresión de 330 kg/cm<sup>2</sup> y un revenimiento de la mezcla de 10 cm. Para obtener las propiedades físicas deseadas, los especímenes se sometieron a un tiempo de curado de 120 días, y el diseño de la mezcla consideró un tamaño máximo de agregado calizo de 20 mm. Se fabricaron 37 especímenes con una geometría como se indica en la figura 2.1.



Figura 2.1. Diseño geométrico de especímenes concreto simple.

Las características de los especímenes se seleccionaron junto con las características de la carga de compresión aplicada para asegurar la ruptura final en menos de 10 minutos, evitando pruebas innecesariamente largas. Inicialmente, se probó un grupo de 30 especímenes aplicando la metodología de detección de daño y, posteriormente, se seleccionaron 3 de los 7 especímenes restantes para validar el método adquiriendo al mismo tiempo datos de EA y velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

El proceso experimental se diseñó para efectuar pruebas de flexión con un dispositivo de cuatro puntos de apoyo (figura 2.2) a fin de asegurar un momento de flexión constante en la zona donde se espera que ocurra el agrietamiento de las muestras. Para todos los ensayos realizados, la longitud entre apoyos inferiores se estableció de 45 cm, mientras que el incremento de carga fue constante con una tasa de crecimiento de 8,172 N/min hasta la ruptura. En promedio, la carga máxima aplicada fue de 28.83 kN (2.94 tons), lo que resultó en un módulo de ruptura promedio de 3.84 MPa y un momento máximo promedio de 6,631 kN-m.



Figura 2.2. Arreglo experimental para pruebas de flexión en especímenes con cuatro puntos de apoyo.

Para realizar las pruebas experimentales se utilizó una máquina servohidráulica de la marca Instron<sup>©</sup>, modelo 8801, con capacidad máxima de 100 kN (figura 2.3a), con la cual se aplicaba la carga de compresión con incremento lineal (figura 2.3b).



Figura 2.3. (a) Máquina servo-hidráulica Instron<sup>®</sup>, modelo 8801. (b) Carga de compresión registrada durante una prueba.

Para medir las señales de EA durante las pruebas se utilizaron tres sensores piezoeléctricos de amplio espectro fabricados por Physical Acoustics<sup>®</sup>, modelo WS $\alpha^{\text{®}}$ , con un rango de frecuencia de 100 a 1,000 kHz. Los sensores se colocaron en la parte inferior, cerca de ambos bordes de los especímenes. El sensor 1 (S1) y el sensor 3 (S3) se colocaron a ambos lados de la zona de agrietamiento, cerca de la cara frontal del espécimen bajo estudio, como se muestra en la figura 2.4; mientras que el sensor 2 (S2) se colocó cerca de la cara opuesta (cara posterior) y alrededor de la zona de agrietamiento (a la mitad del claro).



(a) (b) Figura 2.4. (a) Diagrama de ubicación de los sensores de EA. (b) Arreglo experimental antes de una prueba.

Para registrar y almacenar las señales de EA se utilizó un equipo de Physical Acoustics<sup>®</sup> modelo mDisp<sup>®</sup> de tres canales (ver figura 2.5a), el cual opera con una frecuencia de muestreo de 1 MHz por canal y se configuró para medir datos con base en un criterio de disparadores por *hits* o eventos. Los tres sensores se configuraron con un umbral de disparo (*trigger threshold*, TT) de 20 dB, una pre-amplificación (*pre-amplification*, PA) de 40 dB, un tiempo de definición de pico (*peak definition time*, PDT) de 50 ms, un tiempo de definición de *hit* (*hit definition time*, HDT) de 200 ms y un tiempo de bloqueo de *hit* (*hit lockout time*, HLT) de 300 ms.

De acuerdo con el proceso experimental descrito anteriormente, todos los *hits* exhibidos en cada prueba se registraron como *waveforms* típicos (tiempo-amplitud), para ser posprocesados con la TW y determinar la condición estructural de cada espécimen durante las pruebas mediante el cálculo de la EW de cada *hit*. De esta forma, con sólo conocer la EW de cada *hit*, se puede saber si corresponden con una condición sana y aparición de micro-fisuras, manifestación de fisura principal, propagación de fisura principal o ruptura final.

Adicionalmente, para validar el tiempo correspondiente al cambio entre condición sana y dañada (momento en el que ocurre el hit con máxima EW), se realizaron pruebas de velocidad de pulso ultrasónico (PVPU) junto con la adquisición de EA para tres especímenes, asegurando así la repetibilidad de resultados. La PVPU es un ensayo no destructivo in-situ para comprobar la resistencia y la calidad del concreto. Esta prueba se lleva a cabo haciendo pasar un pulso ultrasónico a través del elemento de concreto que se va a probar y midiendo el tiempo que tarda el pulso en atravesar dicho elemento. Las velocidades más altas indican buena calidad y continuidad del material, mientras que las velocidades más bajas pueden indicar la presencia de muchas grietas o vacíos en el concreto [38]. De esta forma, el instante de tiempo relacionado con el hit de EA de máxima EW debe tener buena correspondencia con el respectivo instante de tiempo donde el valor proporcionado por el equipo de VPU (tiempo de propagación de la onda) cambia drásticamente. Así, para las PVPU se utilizó un medidor VPU Controls<sup>®</sup>, modelo E48<sup>®</sup>, ver figura 2.5b.

Por último, cabe señalar que también se realizaron pruebas de resistividad para evaluar la calidad del concreto y seleccionar tres probetas con valores de resistividad similar para realizar las últimas pruebas de flexión adquiriendo señales de EA así como valores VPU. El equipo utilizado para esas pruebas de resistividad fue un medidor de resistencia Miller 400A<sup>®</sup> fabricado por M.C.Miller<sup>®</sup> [39], ver figura 2.5c.



Figura 2.5. (a) Equipo para pruebas de EA Physical Acoustics® mDisp®. (b) Equipo para pruebas de VPU Controls® E48®. (c) Equipo para pruebas de resistividad M.C.Miller® 400A®.

# 3. Análisis y discusión de resultados

Antes de efectuar las pruebas de flexión y aplicar la metodología de detección de daño, se realizaron PVPU para todas las probetas, obteniendo un valor mínimo de 126.0 µs y un valor máximo de 131.2 µs, lo que da como resultado una velocidad de 3,968.25 m/s y 3,810.97 m/s, respectivamente; así entonces, de acuerdo con [40], la calidad del concreto para todos los especímenes fue "alta".

En la figura 3.1a se muestra una fotografía de una PVPU. Adicionalmente, dichos ensayos sirvieron para conocer los valores de VPU de las tres vigas de concreto seleccionadas en estado sano antes de realizar las pruebas de flexión adquiriendo datos tanto con el equipo de EA como con el de VPU.

Asimismo, para seleccionar esas tres vigas de concreto para la adquisición de EA y VPU al mismo tiempo durante los ensayos de flexión, se realizaron pruebas de resistividad en las últimas siete probetas sanas marcadas como UPT-1 a UPT-7 respectivamente, y se encontró que las vigas UPT-2, UPT-4 y UPT-7 arrojaron los valores más similares: 103.50 k $\Omega$  cm, 90.00 k $\Omega$  cm y 94.50 k $\Omega$  cm, respectivamente, y esos especímenes se seleccionaron para las pruebas finales. Además, según [40], esos valores de resistividad corresponden con un riesgo moderado de generarse corrosión en los elementos; así, el principal daño podría enfocarse en fisuras. En la figura 3.1b se observa una fotografía de una prueba de resistividad.

Por otra parte, los valores promedio considerando tres mediciones diferentes de VPU para las muestras seleccionadas fueron 128.63  $\mu$ s, 131.07  $\mu$ s y 127.33  $\mu$ s en tiempo y 3,887.12 m/s, 3,814.76 m/s y 3,926.80 m/s en velocidad, respectivamente para las vigas UPT-2, UPT-4 y UPT-7; los cuales se establecen como los valores de referencia de condición sana antes de las pruebas de flexión.



(a)



(b)

Figura 3.1. Fotografías de pruebas de laboratorio para algunos especímenes: (a) PVPU. (b) Pruebas de resistividad.

Siguiendo la metodología propuesta para la determinación del estado estructural de las vigas de concreto sometidas a pruebas de flexión, como se explicó en las dos secciones anteriores; en primer lugar, se seleccionó aleatoriamente una probeta del grupo original de 30, y se obtuvo la EW para cada *hit* de EA generado durante la prueba, pero cambiando la MW y el RE. Este proceso inicial permitió establecer una prueba base y realizar un análisis de MW y RE para iniciar la caracterización del comportamiento de este tipo de elementos bajo cargas de flexión y determinar la MW y el RE más convenientes para diferenciar entre las diversas etapas del estado estructural (condición sana y aparición de micro-fisuras, manifestación de fisura principal, propagación de fisura principal y ruptura final). Además, las 29 pruebas restantes podrían compararse con esta prueba base utilizando los mismos parámetros de posprocesamiento establecidos y ver la repetibilidad de los resultados para garantizar la eficiencia del método.

Así, la probeta seleccionada fue la número 14. La EW se calculó para los 208 *hits* de EA generados en esta prueba utilizando diferentes MW, el RE inicial se propuso de 1 a 100 de acuerdo con un tiempo de cómputo aceptable para obtener resultados en un tiempo congruente. Se aplicaron 90 MW diferentes utilizando un código desarrollado en MATLAB<sup>®</sup> para esta metodología y, a pesar de que todas las MW permitieron la detección de daño, se encontró que la MW Gaussiana denominada "gaus6" (ver figura 3.2) fue la más útil para detectar daño y diferenciar claramente entre las diferentes etapas de la condición estructural, debido a sus propiedades/resultados satisfactorios.

Por otro lado, como referencia del tipo de señales analizadas, en la figura 3.3 se muestra una de las señales típicas de EA obtenidas durante una prueba.



Figura 3.2. Mother wavelet tipo gaus6.



Figura 3.3. Señal típica de EA analizada.

En la figura 3.4, se muestra la EW para 7 de las MW más satisfactorias, mientras que en la figura 3.5, la EW se presenta sólo para la MW seleccionada como la más conveniente (gaus6) para determinar la condición estructural del elemento. Esos resultados corresponden con el sensor 2, ya que la posición de ese sensor era la más cercana a la zona de inicio de la fisura principal, y por tanto los resultados son más contundentes; sin embargo, los otros dos sensores exhibieron la misma tendencia.



Figura 3.4. Máxima EW para cada *hit* de EA de la prueba No. 14 y S2 usando diferentes MW.

Analizando la figura 3.5, se puede observar que desde el *hit* 1 hasta el *hit* 20, la viga de concreto puede considerarse sana debido a los valores de EW en niveles muy bajos; en este rango de *hits* aparecen algunas micro-fisuras; posteriormente, el *hit* 21 corresponde claramente con la manifestación de la fisura principal; consecutivamente, del *hit* 22 al 207 se propaga la fisura principal hasta la ruptura en el *hit* final 208. Es importante señalar que una vez manifestada la fisura principal, la EW no será igual ni inferior al valor máximo de EW de la etapa sana; por consiguiente, tanto las condiciones sanas como las dañadas se pueden distinguir fácilmente con este método, y se pueden definir las etapas específicas de la condición estructural.



Figura 3.5. Máxima EW para cada *hit* de EA de la prueba No. 14 y S2 usando la MW tipo gaus6.

En la figura 3.6 se muestran fotografías de la viga fracturada después de que finalizó la prueba de flexión. Por el tipo de material, la fractura es frágil, por lo que la manifestación de la fisura principal es súbita, y el valor de EW de cualquier otro *hit* de EA posterior a la manifestación de la fisura principal advertirá que el elemento puede fallar en cualquier momento durante la etapa de propagación de fisuras debido a que los valores de EW son más altos que los valores de EW en condición sana.



Figura 3.6. Viga de concreto No. 14 fracturada después de la prueba de flexión, mostrando la vista inferior y las caras fracturadas en los extremos (áreas de sección transversal).

Asimismo, el análisis de RE consistió en variar el valor máximo de dicho parámetro por encima y por debajo del valor considerado para los resultados mostrados en la figura 3.5, pero siempre utilizando la MW ya seleccionada (gaus6).

Así entonces, se probaron 12 RE diferentes (incluido el RE original propuesto de 1 a 100), siendo el valor mínimo igual a 1 para todos ellos y el máximo de 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150 y 180.

En la figura 3.7a se muestran los resultados correspondientes y, como se puede observar, el cambio de RE no afecta significativamente los valores de EW de la etapa de condición sana ni de la etapa de propagación de la fisura principal. Sin embargo, el valor de EW correspondiente a la manifestación de la fisura principal puede alterarse significativamente (ver la figura 3.7b donde se realizó un acercamiento alrededor de la zona de la manifestación de la fisura principal), lo cual es muy importante. Si el valor máximo del RE se establece demasiado bajo, por ejemplo, en 50, los valores de EW para la manifestación de la fisura principal y la propagación de la fisura principal podrían tender a ser similares, y la diferenciación de ambas etapas podría ser poco evidente (ver figura 3.8). Por otro lado, si el valor máximo del RE se establece demasiado alto, por ejemplo, en 180 (ver figura 3.8), la EW para el hit de EA de la manifestación de la fisura principal aumentará exponencialmente y las etapas correspondientes a la condición sana (con aparición de micro-fisuras) y a la propagación de la fisura principal cada vez pueden ser más similares a simple vista y se podrían confundir entre sí, complicando la determinación del estado estructural del elemento (sano o dañado) con los hits generados en estas dos etapas.

Además, el tiempo de cómputo incrementará significativamente a medida que aumente el RE, lo cual no es conveniente para la adquisición/monitoreo continuo de datos en línea en estructuras de la vida real. Por lo tanto, el RE original utilizado de la 100 resultó ser un rango excelente para distinguir claramente las diferentes etapas del estado estructural de los elementos con un tiempo de cómputo congruente. Para diferenciar fácil y rápidamente la gran cantidad de curvas presentadas en ambos diagramas de la figura 3.7, la curva de mayor amplitud para cualquier *hit* corresponde con el primer RE mencionado en la leyenda del diagrama, es decir, el RE más amplio (1-180); y así, secuencialmente, se debe seguir el orden de los RE de la leyenda hasta la curva de menor amplitud correspondiente al RE más estrecho (1-50). De esta forma, se evita incluir diversas marcas en las curvas para una mejor visualización.



EW para prueba No. 14 usando diferentes rangos de escala

Figura 3.7. (a) Análisis de rango de escala. (b) Acercamiento alrededor de la región de la manifestación de la fisura principal.



Figura 3.8. Análisis de rangos de escala considerando sólo los dos rangos más diferentes: 1-50 y 1-180.

Así, una vez estudiado el comportamiento de EA/EW de las vigas de concreto mediante análisis de MW y RE y definidos estos dos últimos parámetros, el método propuesto de detección y evaluación de daño puede aplicarse sistemáticamente a todos los elementos que trabajen en condiciones similares.

Como se mencionó anteriormente, originalmente se realizaron 30 pruebas de flexión y, para todas ellas, se obtuvo la misma tendencia de resultados para evaluar el estado estructural de las vigas utilizando los parámetros de MW y RE establecidos (gaus6 y 1-100, respectivamente), como en la prueba 14 (figura 3.5). Para efectos de brevedad, no es posible mostrar todos los resultados de las pruebas; sin embargo, las pruebas No. 8, 20 y 21 (figuras 3.9, 3.10 y 3.11, respectivamente) fueron seleccionadas para demostrar la repetibilidad de tendencia de resultados, así como para analizar otros aspectos interesantes.

En cuanto a la prueba No. 8 (figura 3.9), se adquirieron 123 *hits* de EA y con la aplicación del método se obtuvo la misma tendencia de resultados que en la prueba No. 14 (figura 3.5), permitiendo la detección de daño y distinguiendo las etapas de condición estructural mencionadas. En este caso, el sensor 3 (S3) fue el sensor más cercano a la zona de inicio/propagación de la fisura principal, por lo que los valores de EW son evidentemente mayores para esta posición del sensor durante la etapa de propagación. Sin embargo, los resultados con el sensor opuesto (S1), el más lejano, también permitieron determinar la condición estructural de la probeta para cada *hit* de EA, lo cual es fundamental, ya que los sensores pueden instalarse en posiciones que no coincidan con la ubicación del daño. Finalmente, cabe señalar que, en comparación con la prueba No. 14, la manifestación de la fisura principal requirió más *hits* de EA, pero dicha manifestación se generó con una mayor EW. Por el contrario, se observaron menos *hits* durante la etapa de propagación de la fisura principal hasta la ruptura del elemento, lo cual es congruente; además, fue evidente una baja actividad de micro-fisuras. A pesar de que este tipo de material es complejo en el sentido de que no es uniforme y es imposible que las distintas etapas aparezcan siempre al mismo tiempo y con las mismas características y energía (EW), la tendencia de resultados es la misma a fin de conocer el estado estructural con cada *hit*, lo cual es muy valioso.



Figura 3.9. Máxima EW para cada *hit* de EA de la prueba No. 8 y 2 sensores diferentes.

Por otra parte, al analizar la prueba No. 20 para S2 (figura 3.10), al igual que ocurrió con el ensayo No. 14, nuevamente se pueden distinguir todas las etapas de la condición estructural. Para la prueba No. 20 se generaron 170 *hits*, y la fisura principal se manifestó en el *hit* número 143 con una EW de 2.07, la cual es significativamente superior a la correspondiente de la

prueba No. 14 (0.24) en el *hit* número 21. El gran número de *hits* antes de la manifestación de la fisura principal y la baja cantidad de micro-fisuras y la baja magnitud de la EW de ellas durante la etapa sana pudo haber contribuido para una liberación tardía y enorme de energía acumulada correspondiente a la manifestación de la fisura principal para la prueba No 20.



Figura 3.10. Máxima EW para cada *hit* de EA de la prueba No. 20 y S2.

Por último, la prueba No. 21 para S2 (figura 3.11) presenta una reducción de la EW en la manifestación de la fisura principal con respecto a la prueba anterior analizada (prueba No. 20), lo que puede deberse a que antes de este punto ocurrieron menos *hits* y a la aparición de varias micro-fisuras (algunas de ellas con una importante magnitud de EW) que ayudaron a liberar energía, evitando que se acumulara y se liberara casi toda ella en la manifestación de la fisura principal. Sin embargo, si se compara con la prueba No. 14, la EW máxima es aún más prominente para la prueba No. 21 debido a que la manifestación de la fisura principal para la prueba No. 14 ocurrió muy temprano en el golpe 21, evitando que se libere demasiada energía en ese evento. Al igual que sucedió con las pruebas No. 14, 8 y 20, también para la prueba No. 21 se identificaron claramente todas las etapas, incluyendo la aparición de importantes micro-fisuras en esta última prueba. A manera de resumen, en la tabla 3.1 se muestran los instantes de tiempo en que se logra detectar, con este método, la etapa de la condición estructural más importante para las 30 vigas probadas inicialmente, la cual corresponde con la manifestación de la fisura principal, y que es la que marca el cambio de condición sana a condición de daño. Como se esperaba, debido a que el material de dichas vigas no es homogéneo, existe una variación importante en el tiempo en que se manifiesta la fisura principal, la cual fluctúa entre el segundo 153.60 y el segundo 307.10 después de iniciadas las pruebas, siendo el promedio 252.04 s. El hecho de poder detectar esta etapa en todas vigas y poder acotar el rango de tiempo en que ocurre, representa una gran ventaja en la aplicación de este método.



Figura 3.11. Máxima EW para cada *hit* de EA de la prueba No. 21 y S2.

Tabla 3.1. Detección de la etapa de manifestación de la fisura principal para los
primeros 30 especímenes.

Instantes de tiempo en que se logra detectar la manifestación de la fisura principal para las 30 vigas probadas inicialmente					
Espécimen	Tiempo (s)	Espécimen	Tiempo (s)	Espécimen	Tiempo (s)
1	242.70	11	261.90	21	254.90
2	277.80	12	274.90	22	287.60
3	153.60	13	254.50	23	251.60
4	187.70	14	263.10	24	288.00
5	220.30	15	263.40	25	277.90
6	307.10	16	242.80	26	289.70
7	226.20	17	275.20	27	171.90
8	216.00	18	248.10	28	307.10
9	209.90	19	280.40	29	303.00
10	192.80	20	255.40	30	275.80

Por otro lado, en cuanto a las pruebas de flexión adquiriendo simultáneamente datos de EA y VPU, dichos experimentos sirvieron para validar la ventaja de la metodología propuesta para detectar la etapa más importante del estado estructural, la cual es la de la manifestación de fisura principal y que marca la diferencia evidente entre la condición sana y dañada.

Para los tres especímenes ensayados, las diferencias de tiempo entre la etapa de la manifestación de la fisura principal detectada usando la metodología propuesta y la primera etapa de daño detectada al observar un cambio drástico del valor de VPU fueron: 26.20 s, 8.81 s y 7.96 s para los especímenes UPT-2, UPT-4 y UPT-7, respectivamente (ver tabla 3.2), siendo siempre mayores los tiempos de la técnica basada en VPU.

De esta forma, la metodología propuesta fue capaz de detectar, una vez más, todas las etapas de condición estructural (incluyendo la manifestación de fisura principal); mientras que la técnica que utiliza VPU no fue capaz de detectar la aparición de micro-fisuras ni la manifestación de la fisura principal; la primera etapa de daño detectada para la probeta UPT-2 fue la propagación de fisura principal, y para las probetas UPT-4 y UPT-7 la ruptura final; por lo tanto, la técnica de VPU no es confiable para el propósito de esta investigación.

La incapacidad de la técnica de VPU para detectar la manifestación de la fisura principal, como se comprobó por las significativas diferencias de tiempo al compararla con la metodología propuesta, se debe principalmente a dos factores: (1) la identificación de la fisura mediante VPU depende de colocar ambos transductores alineados con la dirección de la aparición de la fisura (técnica direccional), esa dirección se puede predecir en algunas pruebas controladas pero no se puede asegurar con certeza, mientras que el método propuesto (no direccional) utiliza datos de sensores que se pueden colocar aleatoriamente, ya que las fuentes de EA se liberan en todas las direcciones; y (2) la baja frecuencia de muestreo del equipo de VPU (10 Hz) en comparación con la del equipo de EA (1 MHz).

	Método propuesto basado en EA-TW		Método convencional basado en PVPU		
Método/ Espécimen	Capaz de detectar la manifestación de la fisura principal	Instante de tiempo de la manifestación de la fisura principal	Capaz de detectar la manifestación de la fisura principal	Instante de tiempo de un cambio significativo del valor de la PVPU	Etapa de daño detectada
UPT-2	Sí	218.80 s	No	245.00 s	Propagación de fisura principal
UPT-4	Sí	211.19 s	No	220.00 s	Ruptura final
UPT-7	Sí	187.04 s	No	195.00 s	Ruptura final

Tabla 3.2. Comparación de instantes de tiempo en los que se identifica daño con la metodología propuesta y con la técnica de PVPU.

Por lo tanto, el método no direccional propuesto supera las limitaciones de la técnica de PVPU y técnicas similares, ya que utiliza un equipo de EA de alta frecuencia de muestreo con sensores que se pueden colocar aleatoriamente para adquirir señales que posteriormente se procesan con la TW para identificar con alta precisión todas las etapas de la condición estructural de vigas de concreto sometidas a flexión, lo que representa ventajas significativas frente a otros métodos como el método de VPU probado en este estudio.

### Conclusiones

En esta publicación se desarrolló una metodología para detectar daño en vigas de concreto bajo cargas de flexión, la cual se basa en posprocesar las señales registradas de EA mediante la CWT. La magnitud y características de la EW obtenida para cada *hit* de EA generado durante la operación del elemento permiten identificar las diferentes etapas de su estado estructural: condición sana y aparición de micro-fisuras, manifestación de fisura principal, propagación de fisura principal y ruptura final.

La selección adecuada de la MW y RE es fundamental para distinguir claramente las diferentes etapas de la condición estructural. Este método presenta importantes ventajas para ser aplicado en elementos de estructuras de la vida real, entre las cuales destacan las siguientes: no se requiere aplicar un filtro para las señales de EA, baja carga computacional, los resultados se proporcionan en tiempo real, los sensores de EA no necesitan colocarse en la posición exacta del daño, se utiliza sólo un índice de daño para conocer el estado estructural, etc. Como parte de la continuación de esta investigación, en futuros trabajos se evaluará esta metodología considerando otro tipo de elementos, condiciones de operación y tipos de daño; para que se pueda proporcionar un esquema completo de monitoreo de integridad estructural.

#### Bibliografía

- Buckley, T., Pakrashi, V. & Ghosh, B. (2021). A dynamic harmonic regression approach for bridge structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 20(6), 3150-3181.
- [2] Omar, T. & Nehdi, M. (2018). Condition assessment of reinforced concrete bridges: current practice and research challenges. *Infrastructures*, *3*(3), 1-23.
- [3] Chen, H. (2018). *Structural health monitoring of large civil engineering structures*. Estados Unidos de América: Wiley.
- [4] Desa, M., Ibrahim, M., Shahidan, S., Ghadzali, N. & Misri, Z. (2018). Fundamental and assessment of concrete structure monitoring by using acoustic emission technique testing: A review. *Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 140(1), 1-8.
- [5] Kot, P., Muradov, M., Gkantou, M., Kamaris, G., Hashim, K. & Yeboah, D. (2021). Recent advancements in non-destructive testing techniques for structural health monitoring. *Applied Sciences*, 17(6), 1-28.
- [6] Pallarés, F., Betti, M., Bartoli, G. & Pallarés, L. (2021). Structural health monitoring (SHM) and nondestructive testing (NDT) of slender masonry structures: a practical review. *Construction and Building Materials*, 297(2021), 1-33.
- [7] Liu, S., Wu, C., Zhou, J., Liu, T., Zhuang, S., Luo, Y. & Yang, X. (2020). Relation between the shear stress distribution and the resulting acoustic emission variation in concrete beams. *Structural Control and Health Monitoring*, 27(6), 1-8.
- [8] Higo, Y., Kazama, S. & Nunomura, S. (1991). Non-destructive evaluation of materials and structures by the elastic-wave transfer function method. *Materials Science and Engineering: A*, 146(1-2), 327-333.
- [9] Lochner, J. & Keet, W. (1955). A simple method of measuring the dynamic Young's modulus of concrete. *Journal of Scientific Instruments*, *32*(8), 296-299.

- [10] Overview of acoustic emission NDT technology. (2022). Physical Acoustics AE Technology. [Consulta en línea]. https://www.physicalacoustics.com/ae-technology/
- [11] Banjara, N., Sasmal, S. & Srinivas, V. (2019). Investigations on acoustic emission parameters during damage progression in shear deficient and GFRP strengthened reinforced concrete components. *Measurement*, 137(1), 501-514.
- [12] Arora, V., Wijnant, Y. & de Boer, A. (2014). Acoustic-based damage detection method. *Applied Acoustics*, *80*(1), 23-27.
- [13] Canel, V. (2021). *Acoustic monitoring of damage in cemented granular materials: experiments and simulations*. Francia: PhD Thesis, Université Grenoble Alpes.
- [14] Ai, L., Soltangharaei, V. & Ziehl, P. (2021). Evaluation of ASR in concrete using acoustic emission and deep learning. *Nuclear Engineering and Design*, *380*(1), 1-8.
- [15] Abouhussien, A. & Hassan, A. (2016). Detection of bond failure in the anchorage zone of reinforced concrete beams via acoustic emission monitoring. *Smart Materials and Structures*, 25(7), 1-8.
- [16] Ramadan, S., Gaillet, L., Tessier, C. & Idrissi, H. (2008). Assessment of the stress corrosion cracking in a chloride medium of cables used in prestressed concrete structures by the acoustic emission technique. *Measurement Science and Technology*, 19(11), 1-8.
- [17] Shi, F., Wang, J., Cui, W. & Qin, L. (2019). The influence of different factors on acoustic emission signal in the process of monitoring steel corrosion. *Materials Science and Engineering*, *612*(3), 1-7.
- [18] Sharma, G., Sharma, S. & Sharma, S. (2020). Monitoring structural behaviour of concrete beams reinforced with steel and GFRP bars using acoustic emission and digital image correlation techniques. *Structure and Infrastructure Engineering*, *18*(2), 1-16.
- [19] Peñaloza-Peña, S., Galvis, C. & Quiroga, J. (2019). Failure detection in a pressure vessel using acoustic emissions technology. *Revista UIS Ingenierías*, 18(4), 147-56.
- [20] Tra, V. & Kim, J. (2020). Pressure vessel diagnosis by eliminating undesired signal sources and incorporating GA-based fault feature evaluation. *Access, 8*(1), 134653-134667.

- [21] Ahmad, M., Amin, M. & Amran, T. (2018). Application of acoustic emission technology (AET) in Malaysian nuclear agency: An overview. *Research and Development Seminar 2018, 1*(1), 1-8.
- [22] Grigg, S., Featherston, C., Pearson, M. & Pullin, R. (2021). Advanced acoustic emission source location in aircraft structural testing. *Materials Science and Engineering*, *1024*(1), 1-8.
- [23] Zhang, H., Wang, Y. & Zhu, L. (2020). Research of acoustic emission health monitoring test of plane welding joint. *Journal of Physics: Conference Series*, *1650*(1), 1-6.
- [24] Li, J., Yan, J., Xue, G. & Niu, J. (2021). Acoustic emission behavior of polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced calcium sulphoaluminate cement mortar under flexural load. *Journal of Building Engineering*, 40(1), 1-8.
- [25] Li, H., Lv, H., Sun, H., Qin, Z., Xiong, J., Han, Q., Liu, J. & Wang, X. (2021). Nonlinear vibrations of fiber-reinforced composite cylindrical shells with bolt loosening boundary conditions. *Journal of Sound and Vibration*, 496(1), 1-8.
- [26] Carrasco, Á., Méndez, F., Leaman, F. & Molina Vicuña, C. (2021). Short review of the use of acoustic emissions for detection and monitoring of cracks. *Acoustics Australia*, *49*, 273-280.
- [27] Perfilov, V. (2020). Measurement of crack growth speed in concrete by acoustic emission and mechanics of damage methods. *Materials Science and Engineering*, *962*(1), 1-6.
- [28] Twardowski, P., Tabaszewski, M., Wiciak-Pikuła, M. & Felusiak-Czyryca, A. (2021). Identification of tool wear using acoustic emission signal and machine learning methods. *Precision Engineering*, 72(1), 738-744.
- [29] Zaman, S., Hazrati, J., Rooij, M., Matthews, D. & Boogaard, T. (2021). Investigating AlSi coating fracture at high temperatures using acoustic emission sensors. *Surface and Coatings Technology*, 423(2021), 1-13.
- [30] Addamani, R., Ravindra, H., Gayathri Devi, S. & Gonchikar, U. (2021). Assessment of weld bead performance for pulsed gas metal arc welding (P-GMAW) using acoustic emission (AE) and machine vision (MV) signals through NDT methods for SS 304 material. Proceedings of the *International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Advanced Manufacturing.*

- [31] Ding, H., Liang, Z., Qi, L., Sun, H. & Liu, X. (2021). Spacecraft leakage detection using acoustic emissions based on empirical mode decomposition and support vector machine. Proceedings of the *International Instrumentation and Measurement Technology Conference 2021.*
- [32] Shanbhag, V., Meyer, T., Caspers, L. & Schlanbusch, R. (2021). Defining acoustic emission - based condition monitoring indicators for monitoring piston - rod - seal and bearing wear in hydraulic cylinders. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *115*(1), 2729-2746.
- [33] Massaro, A., Panarese, A. & Galiano, A. (2021). Technological platform for hydrogeological risk computation and water leakage detection based on a convolutional neural network. Proceedings of the *International Workshop on Metrology for Industry 2021*.
- [34] Kandukuri, S., Shanbhag, V., Meyer, T., Caspers, L., Noori, N. & Schlanbusch, R. (2021). Automated and rapid seal wear classification based on acoustic emission and support vector machine. *Society European Conference, 6*(1), 1-8.
- [35] Hou, S., Fan, J., Wu, G., Wang, H. & Han, Y. (2021). Laboratory investigation of early damage detection for an old-aged reinforced concrete beam using acoustic emission and digital image correlation. *Journal of Advanced Concrete Technology*, *19*(6), 700-713.
- [36] Liu, C. (2010). A tutorial of the wavelet transform. *NTUEE Taiwan*, *1*(1), 25-28.
- [37] Lilly, J. & Olhede, S. (2012). Generalized morse wavelets as a superfamily of analytic wavelets. *Transactions on Signal Processing*, 60(11), 6036-6041.
- [38] Prabahar, A., Dhanya, R., Ramasamy, N. & Dhanasekar, S. (2017). An experimental study of self-healing of cracks in concrete using sodium silicate capsule. *Rasayan Journal of Chemistry*, *10*(2), 577-583.
- [39] Soil resistivity meter, 400A Part #44500. (2022). M.C. Miller Trusted by Corrosion Engineers Worldwide, Miller 400A. [Consulta en línea]. <u>https://www.mcmiller.com/miller-400a-44500</u>
- [40] Uller, L., Trocónis de Rincón, O., Romero de Carruyo, A., Andrade, C., Helene, P. y Díaz, I. (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.*

Durabilidad de la Armadura [DURAR] red temática XV. B, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.





Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo" San Fandila, Pedro Escobedo C.P. 76703 Querétaro, México Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

http://www.imt.mx/