

UTILIZACIÓN DE LA EMISIÓN ACÚSTICA EN LA INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Ing. Víctor M. Fariña

Dirección Nacional de Vialidad

Av. Julio A. Roca 738 (C1067ABP) Buenos Aires. República Argentina.

Tel: 54 11 4343-8521 al 9 (int. 1709) - Fax: 54 11 4343-2145

Email: vfarina@vialidad.gov.ar

Ing. Mariano Semorile

IRAM – Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

Perú 556 (C1068AAB) Buenos Aires. República Argentina.

Tel: 54 11 4346-0664 - Fax: 54 11 4346-0667

Email: msemorile@iram.org.ar

Resumen

Aunque durante mucho tiempo se había pensado que las estructuras de hormigón no requerían mantenimiento, se ha comprobado que pueden sufrir un progresivo deterioro debido a los siguientes factores:

- cargas producidas por el tránsito pesado (en puentes),
- fatiga (fluencia lenta o “creep”),
- reacciones químicas (dentro de su conformación interna o por interacción con el medio ambiente),
- siniestros impredecibles,
- mala praxis constructiva.

En primer lugar se debe mencionar que la teoría aplicada al cálculo estructural pasó de considerarlo como un material que no admitía deformaciones permanentes (método elástico) a un material que las admite (método plástico o cálculo a rotura). En segundo lugar, se debe tener en cuenta que los avances alcanzados en el conocimiento de sus materiales componentes (cemento, agregados, agua y aditivos) ha posibilitado la ejecución de estructuras cada vez más esbeltas.

Asimismo, la creciente demanda en todo el mundo para refuncionalizar y restaurar las estructuras, ha generado la necesidad de avanzar con técnicas de inspección eficaces, que permitan la correcta planificación y ejecución de las obras de reparación. Con esa finalidad, se estudiaron las técnicas de emisión acústica (EA) aplicadas en la ingeniería del hormigón, que contribuyen a la detección de ondas elásticas debidas a fisuras y a la evaluación de daños.

Se conoce que las técnicas de EA fueron aplicadas anteriormente en la ciencia de los materiales, sismología e ingeniería mecánica, aunque muy eventualmente fueron utilizadas en hormigón y en las estructuras que con él se construyen. Es por ello que en este documento se presenta un método de medición normalizado para detectar señales de EA en el hormigón.

1. Introducción

La aplicación de los distintos métodos y técnicas de ensayos no destructivos para analizar el estado de las estructuras, alcanzará el objetivo buscado cuando permitan obtener rápidamente la información para su evaluación. Algunos de ellos podrán utilizarse para la monitorización de las estructuras a corto y a largo plazo, razón por la cual se requiere de un estudio previo para seleccionar el método correcto y los parámetros de medición, como así también tener en cuenta los factores que puedan influir en los resultados a obtener con cada técnica.

En la actualidad las estructuras de hormigón, cualquiera sea su función, se someten a distintos ensayos y pruebas de recepción antes de su puesta en servicio. Haciendo foco en la detección de fisuras y la evaluación de daños, en este documento se propone el empleo de la emisión acústica como una técnica que permite complementar y/o ampliar los alcances de esos ensayos, mediante la detección de ondas elásticas debidas a las fisuras o a la acumulación de microfisuras, técnica que originalmente había sido desarrollada para la ciencia de los materiales, la sismología y la ingeniería mecánica.

Sabemos que la emisión acústica (EA) consiste en la generación de ondas elásticas transitorias debidas a la liberación de energía dentro de un material. En el hormigón son producidas, entre otras causas, por las fisuras, deformaciones, pérdida de adherencia, desprendimiento de agregados de la matriz de cemento, contracciones o dilataciones por fraguado o por variaciones de temperatura.

Las ondas elásticas se propagan dentro del material hacia la superficie y son detectadas por un sensor de EA, como se muestra en la figura 1.

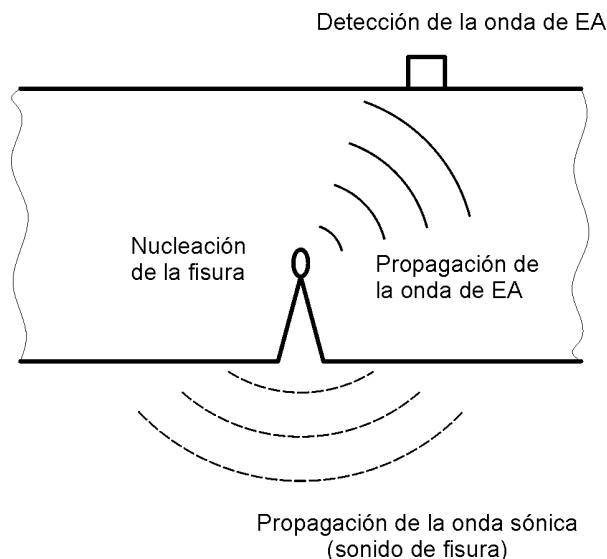


Figura 1. Detección de ondas de EA

2. Definiciones

2.1 Evento de EA

Cambio localizado en el material que produce un aumento de EA

2.2 Conteo de EA

Número de veces que la señal de EA excede un umbral prefijado durante una parte seleccionada de un ensayo o inspección.

2.3 Hit

Detección y medición de una señal de EA en un canal.

2.4 Número de pulsos

Número de veces que una señal discreta cruza el umbral de detección

2.5 Efecto Felicity

Aparición de EA significativa a un nivel de carga inferior al nivel máximo aplicado previamente, por ejemplo, el que se observa en los materiales compuestos.

2.6 Efecto Kaiser

Ausencia de EA detectable hasta el momento en el que se excede el nivel de carga máxima previamente aplicada.

3. Tipos de falla

Para poder detectar y localizar fisuras activas en una estructura existente, la medición debe realizarse bajo un estado de cargas que no comprometa las funciones de la estructura. Si se tratara de puentes, se pueden realizar mediciones con el empleo de EA cuando se lleva a cabo la Prueba de Recepción de la Estructura (denominada genéricamente como Prueba de Carga), que es el requisito previo a su apertura al tránsito, en el cual se somete a la estructura a una carga estática controlada (que es un porcentaje de la carga de diseño) y se observa su comportamiento.

En general, cuando se trata de vigas de hormigón armado, se pueden reconocer dos modos de falla, que se deben tener muy en cuenta porque la actividad de EA que se pone de manifiesto es de suma importancia.

3.1 Falla por flexión

Una vez iniciada la carga, aparecen fisuras en la zona sometida a tracción cuando se supera la resistencia que le ofrece el hormigón (las fisuras se situarán en la parte inferior de la pieza si se trata de momentos flectores de signo positivo o en la parte superior si se trata de momentos flectores negativos. En la figura 2, se observa una viga rectilínea con extremos en voladizo con un sistema de cargas verticales, y los diagramas de momentos flectores y de esfuerzos de corte resultantes).

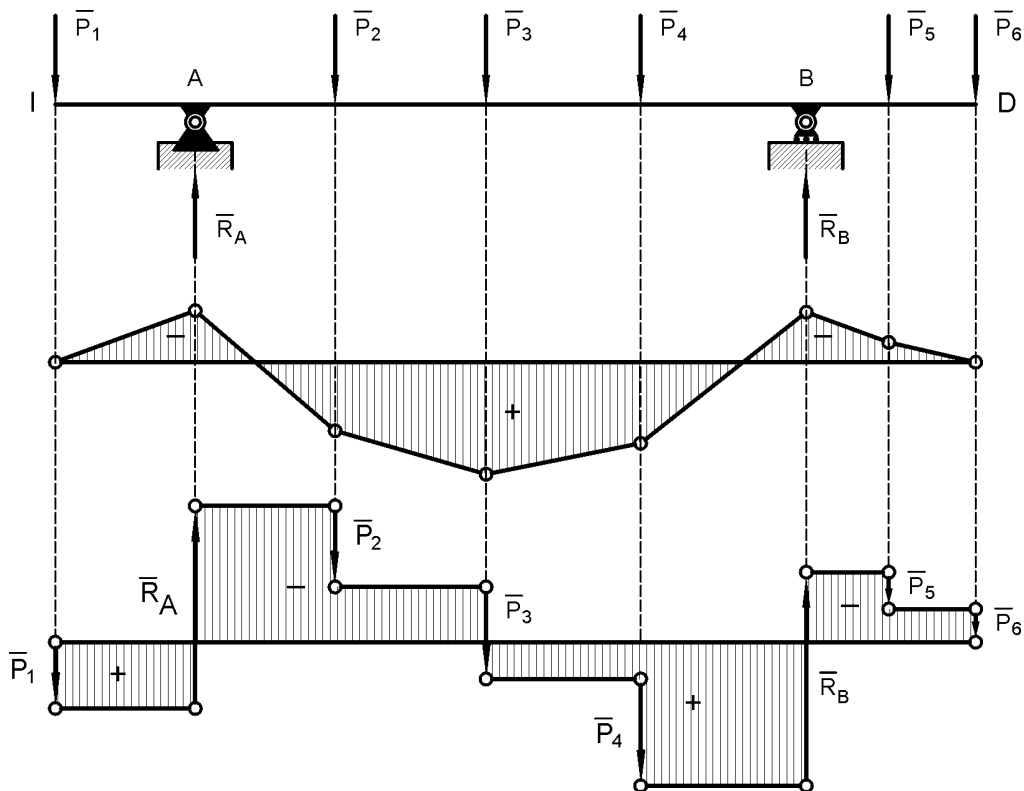


Figura 2. Diagrama de momentos flectores y esfuerzos de corte

Cuando la viga está insuficientemente armada a flexión o está extremadamente armada para el corte, se producen fisuras de tracción más localizadas que luego se propagan hacia arriba. En el modo de falla por flexión en una viga aumenta el conteo de EA aceleradamente con el aumento de la carga.

3.2 Fractura por corte

Si el momento flector es variable (como se ve en la figura 2) aparece una sollicitación adicional que es el esfuerzo de corte, haciendo que el estado de tensiones varíe a lo largo de la pieza. En el caso de que la viga esté sobredimensionada o subdimensionada al corte, la falla es consecuencia de la generación repentina de fisuras diagonales, sin ceder el refuerzo. El aumento en el conteo de EA se observa a velocidad constante, porque la armadura resiste hasta el estado último. Inmediatamente antes del mismo, se observa un rápido aumento de la EA pero las fisuras de corte diagonal no muestran elementos que precedan la falla.

4. Evaluación de daños

Con respecto a la actividad de EA en la viga de hormigón armado, se conoce una relación entre el desplazamiento de apertura de la fisura (CMOD, crack mouth opening displacement) y la presencia del efecto Kaiser. En el caso de falla por flexión el efecto Kaiser desaparece, con valores de CMOD que son mayores que 0,1 mm a 0,2 mm, también se observa en el caso de falla por distorsión.

Cabe señalar que estos valores de $CMOD > 0,1$ mm no se corresponden necesariamente con el límite de capacidad de servicio de una viga de hormigón armado, lo que podría inducir a error. Por esta razón tal vez sea más conveniente buscar otra magnitud que sea más representativa para correlacionarla con el efecto Kaiser, por ejemplo la energía de deformación en la flexión:

$$\Phi = \int_0^l \frac{M^2 \cdot dx}{2 \cdot E \cdot J_n}$$

Donde:

- Φ energía de deformación
- l largo de la pieza
- M momento flector
- E módulo de elasticidad del hormigón
- J_n momento de inercia respecto al eje neutro de la sección transversal, para poder cuantificar el efecto Kaiser en la monitorización de EA.

En principio se propuso la relación de Felicity, que debe ser igual a 1,0 siempre que esté presente el efecto Kaiser. También se comentó que la relación es $< 1,0$ debido a los daños que aparecen en las vigas de hormigón armado, de donde puede inferirse que las estructuras intactas son estáticamente estables.

Dado que el efecto Kaiser está estrechamente asociado con la estabilidad estructural, la relación podría ser $> 1,0$ en una estructura muy sólida. Pero debido a la acumulación de daños, la proporción disminuye a $< 1,0$ y genera eventos de EA, incluso con niveles más bajos de carga que antes. Así, la relación es un buen indicador de la acumulación de daños e inestabilidad estructural. Además, la actividad de EA durante la descarga es otro indicio de integridad estructural. En el caso de que la estructura sea estáticamente estable, rara vez se observa la actividad de EA en el proceso de descarga.

Se definen las siguientes relaciones para calcular el efecto Kaiser:

a) relación de la carga en el inicio de la actividad de EA respecto de la carga anterior:

$$\text{Relación de carga} = \frac{\text{carga en el inicio de la actividad de EA en la carga posterior}}{\text{carga anterior}}$$

b) relación entre la actividad de EA acumulada durante el proceso de descarga y la actividad del último ciclo de carga máxima:

$$\text{Relación de calma} = \frac{\text{actividad de EA acumulada en la descarga}}{\text{actividad de EA total durante todo el ciclo}}$$

En la práctica, se propone clasificar la evaluación de los niveles de daño, tal como se muestra en la figura 3.

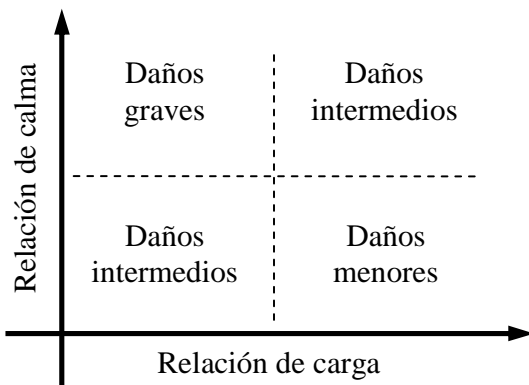


Figura 3. Evaluación de daños por dos relaciones.

5. Sistema de medición

El sistema de medición de EA debe tener dispositivos con funciones preestablecidas. Un sistema básico se ilustra en la figura 4, donde se muestran sólo los dispositivos analógicos. Después de este sistema, por lo general está equipado un procesador de señal digital.

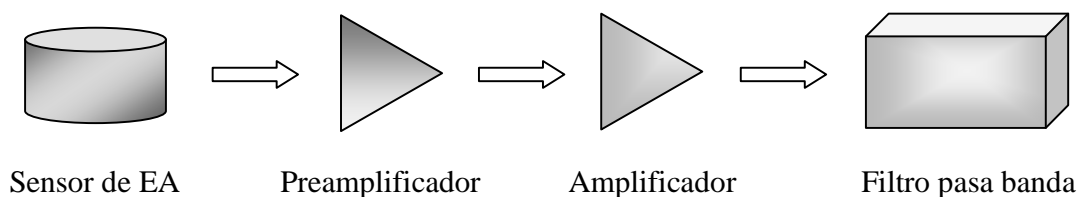
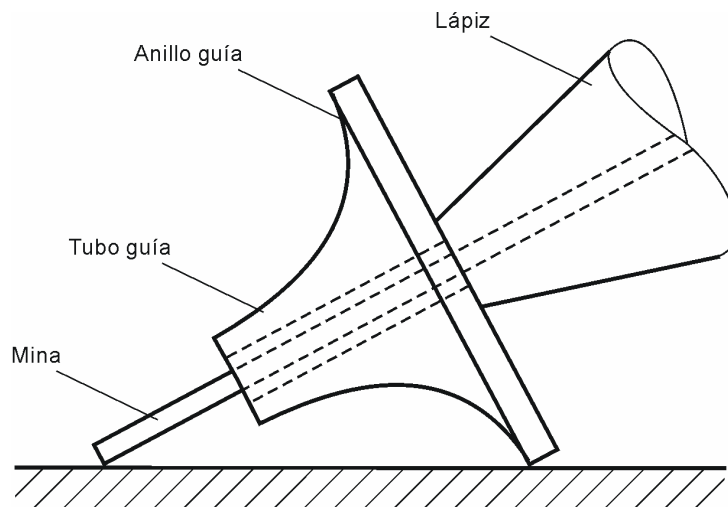


Figura 4. Sistema de medición de EA

5.1 Sensor

Los sensores de EA deben ser lo suficientemente sensibles como para detectar señales de EA generadas en la estructura de destino, teniendo en consideración la acústica de acoplamiento. Convierten las ondas elásticas (señales) en la superficie de un material en señales eléctricas, preferentemente, sin distorsiones. Un sensor de resonancia tipo es más sensible alrededor de la frecuencia resonante, mientras que un sensor de banda ancha tiene respuesta aproximadamente plana en el rango, pero es menos sensible que el tipo de resonancia. El sensor de EA deberá ser suficientemente resistente frente a los cambios de temperatura, condiciones de humedad y las vibraciones mecánicas del entorno.

La calibración de sensibilidad de los sensores de EA se efectúa utilizando una fuente normalizada. La fuente de EA es un dispositivo para simular un evento de EA utilizando la rotura de una mina de grafito sostenida por un soporte adecuado con las características indicadas en la figura 5, de acuerdo a la norma IRAM 779 / Mercosur NM 302 ⁽¹⁾, donde se recomienda emplear esta variante de anillo guía de la fuente Hsu-Nielsen.



Condiciones:

Mina = 2H

Diámetro = 0,5 mm (alternativamente 0,3 mm)

Largo (l) = 3mm ± 0,5 mm

$\alpha = 30^\circ$

Figura 5. Fuente de EA normalizada

5.2 Amplificador

Los amplificadores normalmente están compuestos por el preamplificador y el amplificador principal, como se muestra en la figura 4. El preamplificador debe estar colocado lo más cerca posible al sensor de EA. El ruido interno del amplificador será de valor intrínsecamente bajo y menor de $20 \mu\text{V}$ (26 dB para $0 \text{ dB} = 1 \mu\text{V}$) como la tensión máxima convertida por tensión de entrada. Aquí, la ganancia del amplificador se expresa en dB (decibeles), que resulta de la siguiente relación entre la tensión de salida V_0 para la tensión de entrada V_i :

$$\text{dB} = 20 \log_{10} (V_0 / V_i)$$

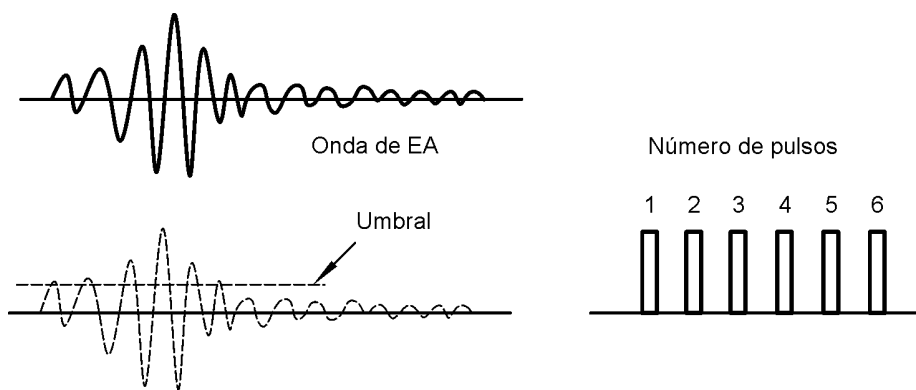
El amplificador debe ser lo suficientemente resistente frente a las condiciones ambientales y se debe proteger adecuadamente.

5.3 Filtro

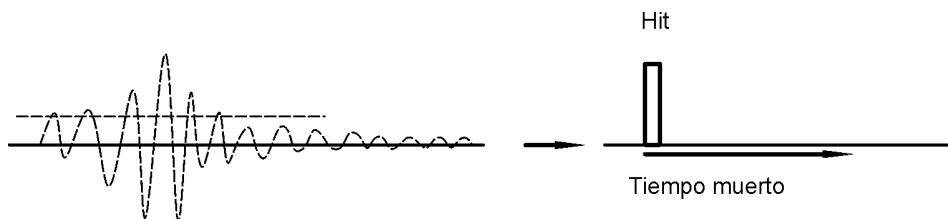
El rango de frecuencia se determina antes a la medición, teniendo en cuenta el rendimiento de los amplificadores y sensores de EA. La selección del rango de frecuencia está relacionado con la eliminación de ruidos. En efecto, se recomienda el uso de un filtro pasa banda entre unos pocos kHz y 100 kHz.

6. Análisis de la señal y parámetros de EA

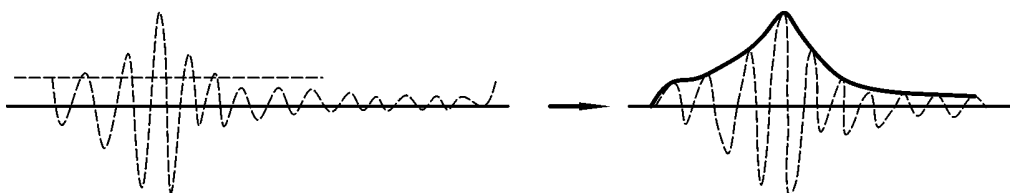
Una onda que se debe considerar como un evento de EA, es aquella donde los ciclos exceden el umbral prefijado y se denomina número de pulsos de EA o simplemente “conteo”. Aquí, el umbral es un nivel de tensión preestablecido, que debe ser superado antes de que se detecte y procese una señal de EA. Los métodos para el recuento de EA se ilustran en la figura 6. En el caso de la observación multicanal, la aparición de EA se controla en la ubicación de cada sensor. En algunos sensores, no pueden observarse las señales de EA debido a la atenuación o a un camino de propagación indetectable. El número de los eventos que se cuentan en uno de los canales corresponde al número de hits de EA definido anteriormente.



a) Método de conteo de EA



b) Evento de EA o hit contado por pulso



c) Evento de EA o hit contado por envolvente

Figura 6. Métodos de conteo de EA

Además del conteo de EA, hit de EA y eventos de EA, se deben obtener los siguientes parámetros de EA mediante el sistema de medición.

- a) Amplitud máxima
- b) Energía EA
- c) Tiempo de subida
- d) Tiempo de duración
- e) Las diferencias de tiempo de llegada a la matriz de sensores de EA
- f) Parámetros externos: el sistema de medición debe ser capaz de obtener la información del tiempo junto con los parámetros EA. Además, aquellos parámetros externos como carga, sollicitación y otros, preferentemente se registran en el sistema.

Los parámetros de onda del tiempo de llegada, la duración y la amplitud de pico se muestran en la figura 7, que muestra el nivel de umbral. El tiempo de subida comprende la duración desde la llegada hasta el pico. Existe una variedad de definiciones sobre la energía de EA. En principio, la energía de EA corresponde a un área de la envolvente de la onda.

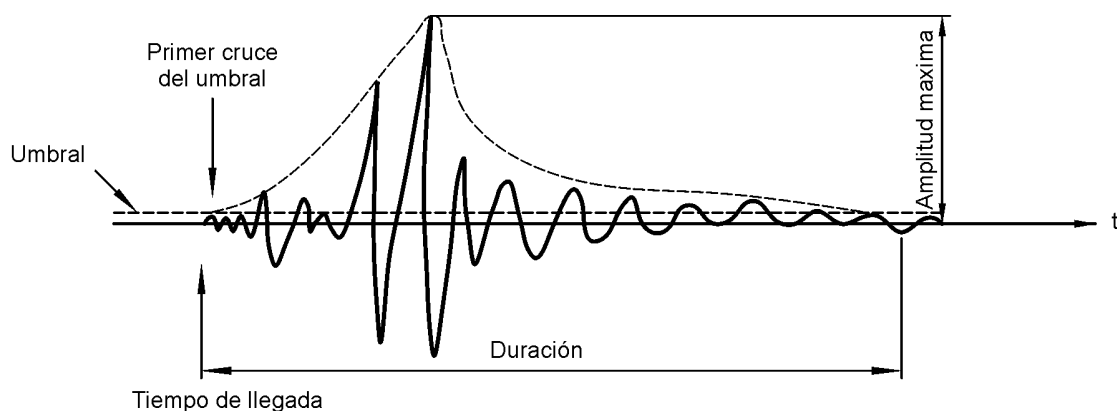


Figura 7. Parámetros de onda de EA

7. Preparación y medición

7.1 Preparación de sensores

Los sensores de EA se calibrarán o contrastarán adecuadamente antes de la medición. Estos se fijarán en ubicaciones adecuadas para cubrir el área a evaluar. El período de medición debe ser prefijado, dependiendo de las condiciones siguientes:

- a) propiedad de propagación de las señales de EA en la estructura a evaluar
- b) distribución de sollicitaciones en la estructura bajo inspección

7.2 Ruidos ambientales

Previo a la medición de EA, se estimará el nivel de ruido. Luego se deben contrarrestar los ruidos externos, viento, lluvia, luz solar y otros, para disminuir el nivel de ruido hasta lo más bajo posible. En el caso que los ruidos tengan un componente similar de frecuencia, amplitudes de señales de EA o fuentes de los ruidos de origen desconocido, entonces las características de los ruidos se estimarán previo a la medición.

Basado en este resultado, se debe conseguir la separación de las señales de EA de los ruidos. En este sentido, es aplicable el uso de filtros después de determinar el rango de frecuencia adecuada.

7.3 Medición

En una estructura existente, normalmente la medición es realizada bajo carga, la cual no debe generar un daño crítico sobre la funcionalidad de la estructura, para detectar y ubicar fisuras activas. Basada sobre un área espacial a ser cubierta por los sensores de EA, se seleccionan las características de la frecuencia adecuada. Previamente al ensayo, se estimarán las propiedades de atenuación de la estructura a evaluar, utilizando la fuente normalizada.

Basándose en esta información, la disposición de los sensores se determinará para mantener las sensibilidades equivalentes en todos los sensores. Las señales de EA debido a fisuras deben detectarse adecuadamente en función de la duración de la medición. Con respecto a los parámetros de EA detectados, se monitoriza la tendencia, la distribución, la correlación, y las ubicaciones. Además, proporciona la observación multicanal para localizar fuentes de EA, aplicando la rutina de ubicación disponible.

7.4 Inspección del sistema

La sensibilidad de los canales de EA se revisa rutinariamente empleando la fuente normalizada. La variación dentro de los canales debe ser menor que 3%.

7.5 Almacenamiento de datos

El sistema debe tener una memoria suficiente para registrar los datos medidos. Se recomienda que todos los datos registrados sean analizados digitalmente por computadora.

8. Informe del ensayo

El informe con los resultados de la inspección, debe incluir los siguientes datos:

- a) fecha
- b) operador del ensayo
- c) dispositivos utilizados
- d) ubicación de los sensores de medición

e) resultados de la inspección del sistema antes y después de la preparación

f) resultados de datos analíticos antes y después de la preparación

9. Conclusiones

- Cuando se quiere conocer el estado de una estructura de hormigón y no se observa deterioro mediante la inspección visual, la emisión acústica permite la detección de las ondas elásticas debidas a fisuras y realizar la evaluación de daños.
- La puesta a punto de métodos rápidos, económicos y suficientemente reproducibles, como lo es la EA, es un permanente objetivo para poder conocer con el mayor grado de aproximación posible, las propiedades físicas y mecánicas del hormigón y de las estructuras que con él se construyen, permitiendo refuncionalizar y restaurar distintos tipo de construcciones civiles.
- Para ello es necesario el trabajo mancomunado de los técnicos e investigadores especializados en la tecnología del hormigón (sus materiales, dosificación, elaboración y puesta en obra), con sus pares en el campo de los END, para conocer y delinear los alcances de los ensayos a realizar, a los efectos de alcanzar conclusiones debidamente justificadas que permitan la incorporación de estas técnicas como criterios para el control de calidad.
- En el campo que nos ocupa, y en la medida que la aplicación de esta técnica lo amerite, puede ser necesaria la conformación de un sector de operadores de END según la norma IRAM-NM-ISO 9712 ⁽²⁾, especialmente dedicado a la evaluación de estructuras de hormigón.
- En este documento se presenta un método de medición normalizado para detectar señales de EA en estructuras de hormigón.

10 Referencias

1. IRAM 779:2007 / NM 302:2005 Ensayos no destructivos. Ensayo por emisión acústica (EA). Terminología. Segunda edición 2007-12-07
2. IRAM-NM-ISO 9712. Ensayos no destructivos. Calificación y certificación del personal. Primera edición 2009-10-20.

11 Bibliografía

1. ISO/TC 135/SC 09 N0043 Measurement Method for Acoustic Emission Signals in Concrete 2010-08-13
2. ISO/TC 135/SC 09 N0045 Test Method for Damage Qualification of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission 2010-08-13

3. ISO/TC 135/SC 09 N0047 Test Method for Classification of Active Cracks in Concrete Structures by Acoustic Emission 2010-08-13
4. ING. HUMBERTO MEOLI. Lecciones de Estática Gráfica.
5. ING. ENRIQUE D. FLIESS. Estabilidad II.
6. ING. OSVALDO J. POZZI AZZARO. Manual de Cálculo de Estructuras de Hormigón Armado.
7. DR. ING. FRANCISCO HOSTALET ALBA. Situación actual de las Técnicas de END del Hormigón.

Palabras clave: ensayos no destructivos, emisión acústica, inspección, estructura, hormigón.