



*Certificación ISO 9001:2008 ‡*

---

---

# **Análisis del agrietamiento en concreto a través de la técnica de emisiones acústicas**

**Saúl Enrique Crespo Sánchez  
Arbey Octavio Méndez García  
Francisco Javier Carrión Viramontes  
Juan Antonio Quintana Rodríguez  
Jorge Alberto Hernández Figueroa  
Héctor Miguel Gasca Zamora  
Jorge Terán Guillén**

**Publicación Técnica No. 479  
Sanfandila, Qro. 2016**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Análisis del agrietamiento en concreto a través de  
la técnica de emisiones acústicas**

**Publicación Técnica No. 479**  
**Sanfandila, Qro. 2016**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el M. C. Saúl Enrique Crespo Sánchez, el M. en C. Arbey Octavio Méndez García, el Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, el Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, el Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, el Lic. Héctor Miguel Gasca Zamora. Además se contó con la participación del Dr. Jorge Terán Guillén en la ejecución de las pruebas mecánicas en el material.

Se agradece la colaboración del Dr. Miguel Martínez Madrid, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural.

# Índice

---

Resumen .....	v
Abstract .....	vii
Resumen ejecutivo .....	ix
1 Introducción .....	9
1.1 Concreto como material estructural.....	11
1.2 Deterioro estructural del concreto	
1.2.1 Efectos de contracción y expansión.....	13
1.2.2 Efectos de carbonatación.....	14
1.2.3 Efectos de reacción álcali-agregado .....	14
1.2.4 Efectos por carga.....	16
1.2.5 Efectos de fatiga.....	17
1.3 Evaluación no destructiva	
1.3.1 Clasificación de las Técnicas No Destructivas.....	21
1.3.2 Inspección visual.....	23
1.3.3 Líquidos penetrantes.....	23
1.3.4 Inspección por ultrasonido.....	23
1.3.5 Inspección por emisiones acústicas.....	24
1.4 Evaluación por emisiones acústicas	
1.4.1 Análisis paramétrico.....	28
1.4.2 Análisis de formas de onda.....	28
1.5 Emisiones acústicas en concreto.....	31
2. Metodología	
2.1 Recursos materiales (Material y equipo).....	32
2.2 Procedimiento de pruebas.....	35
3. Análisis de resultados.....	45

---

3.1 Módulo de ruptura.....	45
3.2 Microfisuración final.....	47
3.3 Evolución de la degradación estructural.....	48
4. Conclusiones.....	57
5. Referencias bibliográficas.....	58
6. Anexos.....	64

# Resumen

---

En ingeniería civil, el concreto es uno de los materiales más utilizados en la constitución de sistemas estructurales diversos. Éste es un material pétreo y artificial, compuesto de agregados gruesos y finos, pasta cementante (cemento y agua) y ocasionalmente, aditivos. Las ventajas que ofrece su capacidad de moldeabilidad y adaptación a las formas de la cimbra que lo contiene, permiten su empleo tanto en estructuras pequeñas como de gran envergadura. Aunque el concreto requiere de elementos de refuerzo adicionales, que absorban los esfuerzos de tensión debido a su poca capacidad resistente ante estos efectos, su uso extendido se debe además a la alta disponibilidad de sus materiales constitutivos.

Los factores que contribuyen al deterioro de este material, asociados a la carga y a condiciones ambientales se clasifican en efectos mecánicos, efectos físicos, efectos químicos y electroquímicos.

En elementos de concreto, las fisuras se originan en los puntos más débiles, ya que la heterogeneidad del material hace que la resistencia de cada sección sea distinta, por esta razón, la progresiva microfisuración se debe a concentraciones de esfuerzos normales de tensión.

En diversos estudios de seguimiento de deformaciones aunado a observaciones microscópicas en el concreto, muestran que la respuesta macroscópica del concreto ante esfuerzos, está relacionada con la propagación interna de microfisuras y su evolución en el mismo.

En el presente trabajo, se estudiaron las respuestas acústicas asociadas a los mecanismos de agrietamiento y deterioro en el concreto, a través de la instrumentación y monitoreo de 30 probetas de concreto simple sometidas a esfuerzos normales de flexión hasta su fractura final, encontrando que los procesos de microfisuración en este material comienzan entre el 15 y 30% de la resistencia final de la resistencia final a la ruptura y estos se intensifican a partir del 75% de la resistencia final. Se analizó la evolución de la energía acústica liberada durante el proceso de deterioro en el material y las correlaciones entre estos parámetros y algunas características físicas de las superficies de falla en el mismo.

# Abstract

---

In civil engineering, concrete is one of the most used materials in the formation of various structural systems. Concrete is a combination between a stone and artificial material, it is composed by coarse and fine cementitious paste aggregates (cement and water) and occasionally additives. The advantages offered by its moldability and ability to adapt to the ways of the falsework allow its use in both small and major structures. Although concrete requires additional reinforcing elements, which absorb tensile forces due to the low capacity resistance of the concrete to these effects, their widespread use is also due to the high availability of its constituent materials.

Factors contributing to the deterioration of this material, associated with the load and environmental conditions are classified in mechanical, physical, chemical and electrochemical effects.

In concrete elements, cracks are originated from the weakest points, due to the heterogeneity of the material causes the resistance of each section is different, for this reason, the progressive microcracking is due to concentrations of normal tensile stress.

Several studies of monitoring deformations and microscopic observations in concrete have shown that the macroscopic response of the concrete due to stress is related to the internal microcracks propagation and their evolution.

In this paper, it was studied the acoustic responses associated with the mechanisms of cracking and deterioration in concrete, through the experimental tests and monitoring of 30 plain concrete specimens bring under normal bending stresses until a final fracture, results shown that the microcracking processes in this material begin between 15 and 30% of the ultimate rupture strength, and these were intensified from 75% to the end of the ultimate strength. Also it was analyzed the acoustic energy released evolution during the material deterioration process and the correlations between these parameters and some physical characteristics of the failure surfaces.

# Resumen ejecutivo

---

En la configuración de la infraestructura carretera de México, el concreto como material de constitución de los sistemas domina sobre cualquier otro material, en cualquiera de sus formas: concreto simple, reforzado o presforzado.

Tan sólo en el inventario de los puentes que configuran la Red Federal de Carreteras de México, tan sólo un 3% de estos están constituidos en su totalidad por acero estructural, mientras que el resto contiene como material de composición principal o secundario el concreto.

El concreto es uno de los materiales más usados para estructuras tales como puentes, presas y edificios, estas estructuras son expuestas a deterioros que afectan las condiciones y su desempeño durante la vida de servicio. Uno de los deterioros más comunes en el concreto es producido por el agrietamiento y es uno de los mayores problemas de diseño y durabilidad (Yasir Alam, et al., 2014), este fenómeno está fuertemente ligado a la naturaleza heterogénea del material y es producto de una respuesta natural ante condiciones de esfuerzos desarrollados en éste (Goszcyn'ska, 2014). Dichos esfuerzos pueden originarse principalmente por las condiciones ambientales o de carga.

Todas las estructuras -independientemente del material- sufren deterioro, en el caso de las estructuras de concreto, los factores que contribuyen a su deterioro asociado a la carga y a condiciones ambientales, se clasifican en:

- Efectos mecánicos se manifiestan en agrietamiento y fracturas en el concreto, daños en el refuerzo y desprendimiento del recubrimiento.
- Efectos físicos incluyen el agrietamiento por contracción, gradientes de temperatura y presiones debidas a la recristalización de sales en los poros.
- Efectos químicos incluyen la contaminación por cloruros, reacción álcali-sílice y el ataque de sulfatos y ácidos. Mientras que los electroquímicos incluyen la corrosión del acero de refuerzo.

Por otro lado, el agrietamiento también se vincula con el proceso de fractura o falla, ya que la fractura es considerada como un continuo proceso de propagación de microgrietas internas que al nuclearse forman una grieta mayor, prosiguiendo con una macrofractura estructural hasta dar origen a la falla (Shaowei, et al., 2013), que es impredecible debido a las propiedades de los materiales de composición y su compleja estructura.

La respuesta macroscópica de una probeta de concreto sometida a un acortamiento creciente o esfuerzos de compresión de forma monótona es una consecuencia de la evolución del material en el micro-nivel. La progresiva microfisuración se debe a concentraciones de esfuerzos de tensión debidas a la propia heterogeneidad del material, formado por partículas de agregado embebidas en una matriz de cemento.

La aparición de microgrietas en la dirección perpendicular a la principal de compresión, en la que es cargada la probeta (Zanuy, 2008) puede ser debido a la existencia de poros con microfisuras, a las diferencias de rigidez entre las partículas de agregado y la pasta de cemento, a las pérdidas de contacto en la interface agregado-pasta o a las zonas de deslizamiento en la propia pasta de cemento.

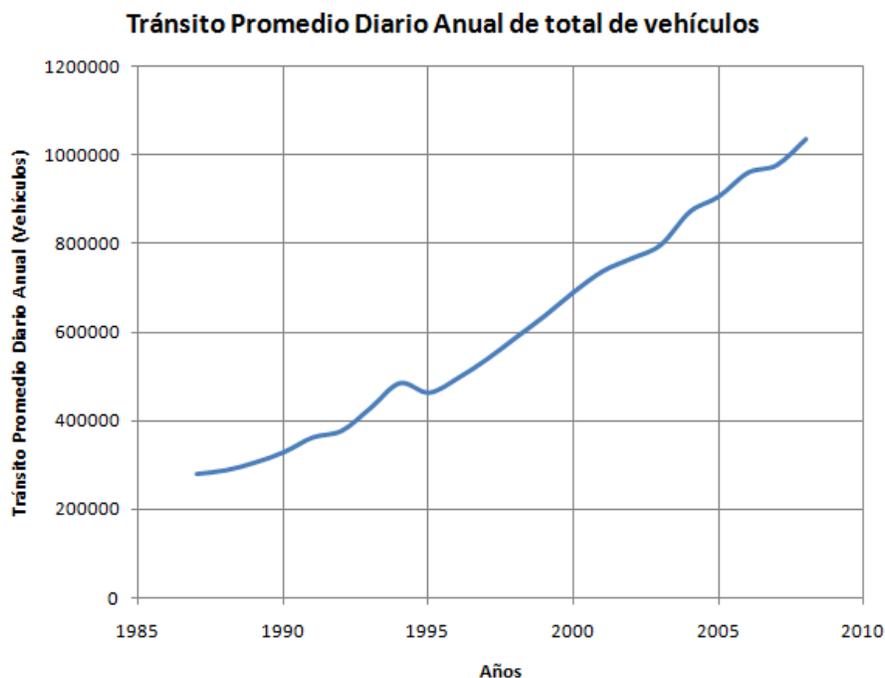
El presente trabajo consiste en el estudio de la degradación de este material, se estudiaron las respuestas acústicas asociadas a los mecanismos de agrietamiento y deterioro, a través de la instrumentación y monitoreo de 30 probetas de concreto simple sometidas a esfuerzos normales de flexión hasta su fractura final, encontrando que los procesos de microfisuración en este material comienzan entre el 15 y 30% de la resistencia final de la resistencia final a la ruptura y estos se intensifican a partir del 75% de la resistencia final. Se analizó la evolución de la energía acústica liberada durante el proceso de deterioro en el material y las correlaciones entre estos parámetros y algunas características físicas de las superficies de falla en el mismo.



# 1 Introducción

---

Con el crecimiento demográfico actual, incrementan las necesidades de transporte de mercancías y productos. En México, el desarrollo tecnológico ha propiciado la aparición de vehículos cada vez más pesados en respuesta a la demanda de los transportistas que encuentran más lucrativa la operación de vehículos de mayor peso y, por otra parte, el desarrollo económico reflejado en un notable incremento del parque vehicular (Figura 1.1) llevan a la infraestructura carretera a altas demandas tanto de flujo como de peso, lo cual deriva en solicitudes mayores a los sistemas estructurales (pavimentos, puentes, etc.) que componen las redes carreteras.



**Figura 1.1 Tránsito Promedio Diario Anual, total de vehículos, México (Anuarios estadísticos, SCT)**

Aunque en el desarrollo de la infraestructura carretera estos fenómenos pueden ser considerados en el diseño de estructuras nuevas, en estructuras existentes este escenario deriva en múltiples cuestionamientos en torno a la capacidad portante y los deterioros sufridos en los sistemas por estos escenarios extraordinarios a las condiciones iniciales de diseño.

Existe una tendencia natural en posicionar el estudio de los mecanismos de degradación estructural que disminuyen las capacidades y la vida útil de servicio

de los sistemas en el área de ingeniería estructural, esto debido a las necesidades por parte de los gobiernos y organismos administradores de la infraestructura carretera de los países en torno a la priorización y optimización en la aplicación de los recursos económicos y humanos enfocados al mantenimiento y conservación de la infraestructura.

En México, en materia de infraestructura carretera, encontramos un escenario en torno a los puentes carreteros que conforman la Red Federal de Carreteras, en el que más del 62% de ellos fue construido entre los años 1931 y 1980, lo cual implica que más de la mitad de estos puentes oscila entre los 35 y 85 años de servicio, sobrepasando su vida útil. Esta perspectiva, nos lleva a reconocer la importancia del estudio de los mecanismos de degradación de los materiales que constituyen estos sistemas, toda vez que interrupciones e intervenciones mayores ante fallas globales, deriva en pérdidas económicas importantes, además de los riesgos en materia de seguridad asociados a los usuarios de esta red.

Otro aspecto importante en torno a los puentes que conforman la Red Federal de Carreteras en México es que su material constitutivo involucra en más del 90% de los casos al concreto en sus diferentes formas (concreto reforzado, concreto presforzado, compuestos, entre otras).

En términos generales, durante la vida útil de una estructura, ésta es susceptible de presentar deterioro y acumulación de daño, ya que tanto las características de los materiales como las condiciones reales a las que se encuentra sometida pueden discrepar de las consideraciones iniciales hechas por el ingeniero estructural.

En las estructuras de concreto se identifican básicamente tres grupos principales de procesos de deterioro, los procesos físicos, los procesos químicos y los procesos mecánicos (Mehta y Monteiro 2001). Los primeros, están relacionados con las variaciones de temperatura, las cuales inducen efectos de contracción y expansión, las variaciones de humedad y su efecto asociado de contracción, efectos por ciclos de congelamiento y descongelamiento, abrasión y desgaste, entre otras. Mientras que los procesos químicos de degradación, están relacionados con la corrosión de los elementos de acero de refuerzo incluidos, la penetración de cloruros, el ataque de sulfatos, la carbonatación y las reacciones álcali-sílice en el material. Por último, los procesos mecánicos son aquellos que comprometen a los sistemas a través de la aplicación de sobrecarga, por efectos de impacto, cargas cíclicas de fatiga, asentamientos diferenciales de los apoyos o efectos derivados de actividad sísmica o eólica.

Estos procesos de deterioro en los sistemas estructurales constituidos de concreto, son capaces de alterar la porosidad y permeabilidad del material y causar o agravar posibles defectos en éste, como desprendimientos, pérdidas de adherencia entre los materiales y agrietamiento, con lo cual se pone en peligro la integridad y/o estabilidad de los mismos, reduciéndose significativamente las capacidades portantes de sus elementos (Chen, 2006).

## **1.1 Concreto como material estructural**

Por definición, el concreto es un material pétreo, artificial, obtenido de la mezcla, en proporciones determinadas, de cemento, agregados y agua. El cemento y el agua forman una pasta que rodea los agregados, constituyendo un material heterogéneo (Cuevas, 2005). Este material presenta una alta resistencia ante esfuerzos de compresión, pero una muy baja ante esfuerzos de tensión, por lo que se adicionan elementos de refuerzo, como acero, en forma de varillas (concreto reforzado) o tendones de presfuerzo con el fin de brindar a los elementos estructurales compuestos por este material, un buen comportamiento ante efectos de tensión.

Debido a su constitución heterogénea, las dimensiones y formas de los materiales de composición del concreto son diferentes y sus ubicaciones están distribuidas de forma aleatoria, por lo que existe una alta probabilidad de que los defectos y daños existan en el material previo a la aplicación de carga (Shah, 2009).

Esta aleatoriedad en la constitución final del concreto está determinada desde la elección de la granulometría en el diseño de la mezcla, toda vez que amplias diferencias en tamaños y pesos volumétricos en los agregados derivan en fenómenos de segregación en los materiales constitutivos de la misma, sin duda, derivado de lo anterior, se tiene que las mezclas con una relación agua/cemento baja, son menos propensas a presentar este fenómeno de segregación.

Otros de los factores que influyen en alcanzar las propiedades mecánicas esperadas en el concreto, son la manipulación y colocación del concreto. Para este material es fundamental la elección adecuada de los métodos de manejo, transporte y colocación en su posición final para evitar segregación entre sus componentes. La misma atención requiere los tiempos y formas de vibrado como métodos de compactación del material, toda vez que un vibrado excesivo puede causar el mismo efecto.

El concreto es uno de los materiales más usados para estructuras tales como puentes, presas y edificios (Goscyn'ska, 2014), estas estructuras son expuestas a deterioros que afectan las condiciones y su desempeño durante la vida de servicio. Uno de los deterioros más comunes en el concreto es producido por el agrietamiento (Yasir Alam, et al., 2014), este fenómeno está fuertemente ligado a la naturaleza heterogénea del material y es producto de una respuesta natural ante condiciones de esfuerzos desarrollados en éste (Goscyn'ska, 2014). Dichos esfuerzos pueden originarse principalmente por las condiciones ambientales o de carga, y según sea el efecto, se clasifican en mecánicos, físicos y químicos.

La fractura en este material es considerada como un continuo proceso de propagación de microgrietas internas que al nuclearse forman una grieta mayor, prosiguiendo con una macrofractura estructural hasta dar origen a la falla (Shaowei, et al., 2013), que es impredecible debido a las propiedades de los materiales de composición y su compleja estructura.

## **1.2 Deterioro estructural del concreto**

El deterioro estructural en el concreto, puede ser producto de factores externos o de causas internas dentro del concreto mismo. Estas acciones, como se mencionó, pueden ser físicas, químicas o mecánicas.

Los procesos físicos y químicos del deterioro actúan en sinergia. El deterioro del concreto raramente es producto de una causa aislada, exceptuando el daño mecánico, todas las influencias adversas sobre la durabilidad en el material comprenden el transporte de fluidos a través del concreto (Neville A., 1999).

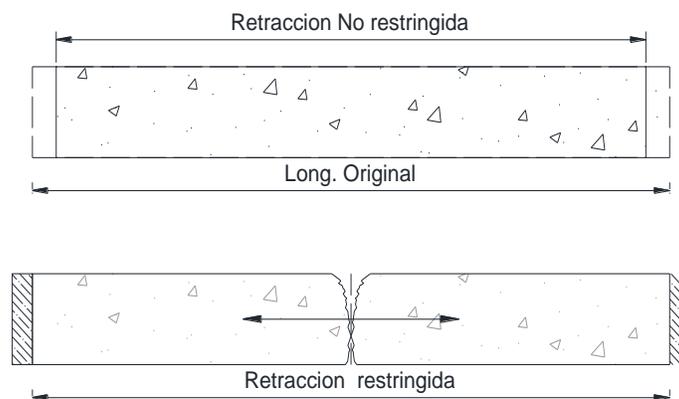
El concreto es un material altamente heterogéneo y complejo, se ha reconocido que sus propiedades macroestructurales dependen de las propiedades de los materiales que lo constituyen (agregados gruesos, matriz de pasta de cemento y zona de interface) y las interacciones existentes entre ellos (Erdem, 2012).

En términos generales, el comportamiento a nivel macro del concreto, se encuentra asociado a la presencia de fisuras en él y su evolución. Estas fisuras se originan en la zona de interface entre los agregados y la matriz de pasta cementante hasta alcanzar la matriz, provocando fisuración múltiple, la cual deriva en planos de falla hasta la fractura del material.

La constitución de la llamada zona de interface entre los agregados y la matriz de cemento, deriva del llamado efecto de pared del agregado, el cual genera gradientes en la relación agua cemento y por ende en la porosidad en esta zona, la cual presenta cristales más grandes y bien formados, con lo que la porosidad en la misma es mayor que en la pasta cementante. Como consecuencia de lo anterior, esta zona, llamada de interface, se constituye como la zona más débil en la constitución del material, desarrollándose en ella las primeras fisuras y por tanto, la penetración o difusión de agentes agresivos, lo cual acelera el mecanismo de degradación en el concreto. La zona de interface ocupa desde un tercio hasta un medio del volumen total de la pasta de cemento endurecido (Neville A., Tecnología del concreto, 1999).

### 1.2.1 Efectos de contracción y expansión

El concreto, antes de encontrarse en estado sólido, pasa por el proceso de fraguado donde se da origen a cambios volumétricos, en este proceso, la pasta cementante experimenta un endurecimiento. Durante el fraguado, el concreto atraviesa por procesos químicos que conllevan a la liberación de calor y por consiguiente pérdida de agua, esta pérdida causa la variación en su volumen o la contracción. La temperatura y la contracción producen esfuerzos de tensión en los elementos estructurales cuando existe algún tipo de restricción (Figura 1.2). Cuando estos esfuerzos son superiores a los que soporta el concreto se presentan agrietamientos.



**Figura 1.1 Efectos térmicos en el concreto simple**

Otro fenómeno de contracción que se presenta en el concreto y puede derivar en agrietamientos en el mismo, es el efecto de *contracción plástica*, el cual se presenta generalmente, más no exclusivamente, en zonas con climas cálidos. Este efecto se presenta ya que en temperaturas ambientales altas, el tiempo de fraguado del material es corto y la demanda de agua es mayor, con lo que se

eleva la temperatura del concreto en estado fresco y puede provocarse una evaporación rápida del agua en la superficie. Se dice que si este proceso se presenta a una rapidez mayor a la que el agua de sangrado en la mezcla se eleva a la superficie, la probabilidad de desarrollar agrietamientos en la superficie del material es alta.

En el caso contrario, donde el colado del concreto es desarrollado en climas fríos, si el efecto de congelación se da posterior al fenómeno de fraguado en el material pero posterior a que el concreto haya tomado una resistencia considerable, la expansión que se presentará por la formación de hielo, provocará agrietamiento en el mismo (Neville A., 1999).

### **1.2.2 Efectos de carbonatación**

La carbonatación en el concreto se entiende como la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio (alto pH) a carbonato de calcio (pH más neutral). Llevándolo de valores promedio de 13 hasta 9. Si bien, por sí mismo, el efecto de la carbonatación no causa de forma directa deterioro en el material, su efecto es desencadenante de otro mecanismo de degradación importante en el material combinado con acero de refuerzo.

En el concreto reforzado, el acero de refuerzo embebido en la pasta cementante en proceso de hidratación, forma una capa de pasividad delgada de óxido, la cual se adhiere al acero, otorgándole protección contra la reacción con oxígeno y agua, es decir, lo cual se conoce como corrosión. No obstante, esta protección depende de la conservación del estado del pH alto del agua de poros que tiene contacto con la capa de pasivación formada, por lo que el efecto de carbonatación puede ser el detonante del proceso corrosivo en el acero, a través de este mecanismo de acción, provocando agrietamientos en el concreto o despostillamientos en el mismo.

Aunque este fenómeno puede requerir de años antes de que ocurra el daño por corrosión en el acero, resulta importante su identificación y diagnóstico.

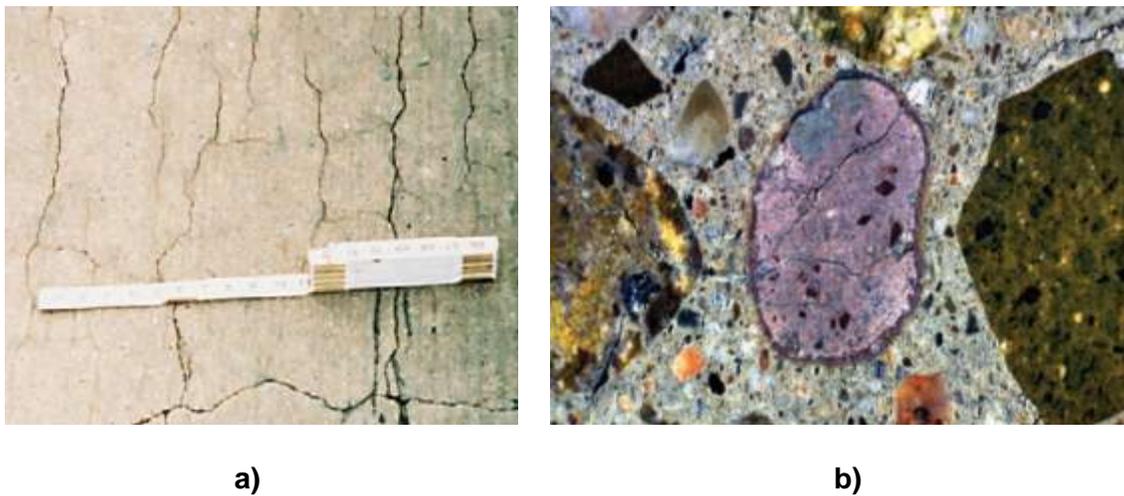
### **1.2.3 Efectos de reacción álcali-agregado**

Esta reacción en el material ocurre cuando los constituyentes minerales activos de algunos agregados proporcionados en la mezcla, reaccionan con los hidróxidos de

álcalis en el concreto. La reactividad es potencialmente peligrosa sólo cuando produce expansión considerable.

La reactividad álcali-agregado ocurre de dos formas, reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC). La primera presenta mayor ocurrencia debido a la cantidad de agregados que incluyen minerales de sílice.

A consecuencia de la reacción álcali-sílice entre los materiales de constitución del concreto se produce un gel que al humedecerse genera presiones internas en la matriz de cemento, las cuales derivan en deformaciones, expansiones y micro y macrogrietamientos en el material (Figura 1.3)



**Figura 1.3 Reacción álcali-sílice en concreto. a) Patrón de agrietamiento típico en concreto por reacción álcali-sílice b) Formación de gel y agrietamientos en pasta cementante de concreto (Farny)**

Este tipo de reacción genera agrietamientos con anchos que varían de 0.1 mm hasta 10 mm en los casos más graves, sin embargo, las profundidades máximas alcanzadas por las grietas son de 50 mm, por lo que esta reacción afecta la apariencia de una estructura antes que su integridad (Neville A.,1999). Sin embargo, como los efectos de carbonatación, este mecanismo degradante puede desencadenar otros que deriven en una pérdida de capacidad en el material.

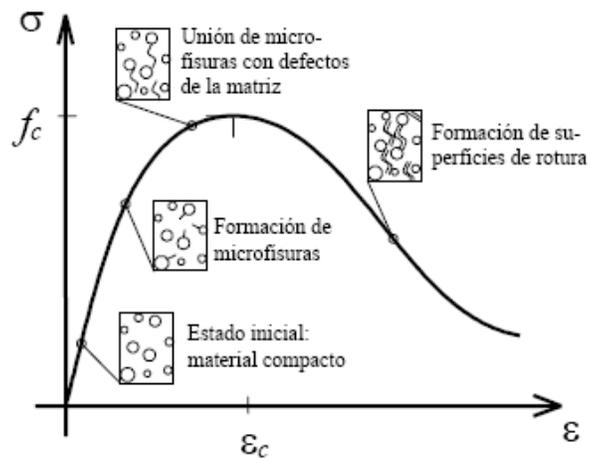
#### 1.2.4 Efectos por carga

Se dice que la fenomenología del proceso de degradación ante carga en el concreto incluye migroagrietamientos en el mismo, los cuales se mantienen estables hasta aproximadamente el 30% de la carga final, sin embargo con

porcentajes mayores a ésta, estos agrietamientos comienzan a incrementar en número, longitud y ancho. A esta etapa se le conoce como de propagación lenta del agrietamiento. Sin embargo, cuando la carga aplicada alcanza entre el 70 y el 90% de la carga final, las grietas se propagan a través de la pasta de cemento y se unen con las grietas de adherencia, formando patrones continuos de agrietamiento, en una etapa rápida de propagación de agrietamientos, hasta alcanzar la falla en el material (Neville A.,1999)

La respuesta macroscópica (diagrama esfuerzo - deformación) de una probeta de concreto sometida a un acortamiento creciente o esfuerzos de compresión de forma monótona (Figura 1.4) es una consecuencia de la evolución del material en el micro-nivel. La progresiva microfisuración se debe a concentraciones de esfuerzos de tensión debidas a la propia heterogeneidad del material, formado por partículas de agregado embebidas en una matriz de cemento. La aparición de microgrietas en la dirección perpendicular a la principal de compresión, en la que es cargada la probeta, según (Zanuy, 2008) puede ser debido a:

- Existencia de poros con microfisuras
- Diferencias de rigidez entre las partículas de agregado y la pasta de cemento
- Pérdidas de contacto en la interface agregado – pasta
- Zonas de deslizamiento en la propia pasta de cemento



**Figura 1.2 Grafico Esfuerzo-Deformación de cilindros de concreto en compresión (Zanuy, 2008)**

### 1.2.5 Efectos de fatiga

La fatiga, es otro de los agentes precursores del agrietamiento. Ésta es definida como un proceso de cambio estructural interno en el material, el cual es

progresivo y es provocado por cargas repetidas (Santosh & Chandra, 2012). La resistencia de fatiga está influenciada por el rango de magnitudes de carga, la tasa de aplicación de la carga, características propias del uso, comportamiento de la estructura y propiedades de los materiales. El mecanismo de fatiga en el concreto aún no ha sido claramente entendido debido a su microestructura heterogénea y la presencia de fallas internas en forma de microgrietas como una propiedad inherente (Santosh & Chandra, 2012). Por lo tanto el efecto provocado por este fenómeno produce un progresivo aumento de las fisuras y, por último, la fractura total si las repeticiones de los esfuerzos son lo suficientemente numerosas. (IDU, 2007)

El estudio del agrietamiento para diversos materiales es tratado por la Mecánica de Fractura Elástica Lineal MFEL, la cual fue propuesta por Griffith en 1920, con su criterio energético de propagación de grietas (Hernández, 2002) el cual plantea la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \sqrt{2TE/\pi c} \quad \text{Ec. 1.1}$$

En donde  $T$  es la energía específica de superficie y  $c$  es la longitud de la grieta y  $E$  el módulo elástico del material en cuestión (Kaplan, 1961).

Posteriormente hubo grandes aportes en la MFEL al desarrollarse diversos modelos de propagación grietas, uno de los más sobresalientes fue propuesto por Paris (P.C & F., 1960), el cual se expresa con la ecuación de propagación de grieta:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde  $C$  y  $n$  son constantes que dependen del material, y  $\Delta K$ , es la variación del factor de intensidad de esfuerzo en un ciclo de carga.

Otros modelos han sido propuestos basados en esta ley, ejemplo de ellos son la ley de Walker (Walker, 1970) y la ley de Forman (Forman & Kearney, 1967.)

La ley de Walker está definida por la expresión:

$$\frac{da}{dN} = CK_{I_{max}}^m \Delta K_I^n \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde  $K_{I_{max}}$  es el factor de intensidad de esfuerzos correspondiente al límite de carga por fatiga más alto y  $C$ ,  $m$  y  $n$  son parámetros correspondientes al material.

Mientras que la ley de Forman está dada por:

$$\frac{da}{dN} = \frac{K_{I_{max}}^m \Delta K_I^m}{K_{IC} - K_{max}} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Sin embargo, fueron (Bazant & Xu, 1991) quienes propusieron la siguiente modificación a la ley de Paris, para su aplicación en concreto:

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{\Delta K_I}{K_{IC}} \right)^n \quad \text{Ec. 1.5}$$

Donde

$$K_{IC} = K_{If} \left( \frac{\beta}{1 + \beta} \right)^{1/2} ; \beta = \frac{d}{d_0} \quad \text{Ec. 1.6}$$

$K_{If}$  es la tenacidad a la fractura de una estructura infinitamente grande,  $d$  es la dimensión característica de la estructura y  $d_0$  es una constante empírica. La constante  $C$  no necesita ser ajustado si  $\Delta K_I$  lo ha sido.

(Slowik, et al., 1996), desarrollaron un modelo elástico lineal simplificado basado también en la ley de París. El cual describe el incremento de la longitud de grieta equivalente a en la región en la que  $K_1 < K_{IC}$  y se enuncia de la siguiente manera:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{K_{I_{max}}^m \Delta K_I^m}{K_{IC} - K_{I_{sup}}} + F(a, \Delta\sigma) \quad \text{Ec. 1.7}$$

Donde  $C$  es un parámetro que da una medida del crecimiento de grieta por ciclo de carga,  $K_{I_{sup}}$  es el máximo factor de intensidad de esfuerzo jamás alcanzado por la estructura en su historial de carga,  $K_{IC}$  es la tenacidad a la fractura,  $K_{I_{max}}^m$  es el

máximo factor de intensidad de esfuerzo en un ciclo,  $N$  es el número de ciclos de carga,  $a$  es la longitud de la grieta,  $\Delta K$  es el rango de factores de intensidad de esfuerzo y  $m$ ,  $n$ , y  $p$  son constantes.

Desde este campo, se observa que el fenómeno de fatiga depende fundamentalmente de las siguientes variables (Zanuy, 2008):

- La oscilación de esfuerzos, comprobándose a través de las curvas S-N que el número de ciclos resistentes hasta la falla disminuye drásticamente cuando esta oscilación de esfuerzos aumenta.
- En elementos de comportamiento no lineal como el concreto, influye además el nivel máximo de esfuerzo, difiriendo de la respuesta clásica de los metales, ya que ante igual amplitud de esfuerzos, es más desfavorable que los límites de oscilación sean mayores.
- La geometría de la pieza, en la cual se engloban las características del defecto inicial que crece a medida que aumenta el número de ciclos de carga.
- El comportamiento del material, ya que es distinta la acumulación del daño en un material como el acero, en el que buena parte de su respuesta se encuentra en el rango elástico y lineal, que un material fuertemente no lineal como el concreto.
- El fallo por fatiga de los materiales que cumplen los requisitos de Mecánica de Fractura Elástico Lineal (metales) es frágil, con la dificultad de aviso previa que ello conlleva.

Sin embargo, la respuesta del concreto ante cargas cíclicas es diferente a lo observado, dado su comportamiento mecánico complejo, fuertemente no lineal y caracterizado por diferencias entre el trabajo a compresión y a tensión (Zanuy, 2008).

Como se comentó, el trabajo del concreto a tensión provoca agrietamiento. Al ensayar una probeta sometida al alargamiento creciente de forma monótona, se observa que la fuerza aplicada sigue dos fases: en la primera, el esfuerzo es creciente hasta que se alcanza la resistencia a tensión  $f_{ct}$ ; después de ella, se produce un ablandamiento en los esfuerzos hasta que la probeta finalmente se

parte en dos. La fisura se origina en el punto más débil de la probeta, ya que la heterogeneidad del material hace que la resistencia de cada sección sea distinta.

En la Figura 1.5, puede verse el comportamiento del concreto, el cual es un material que no cumple el criterio de plastificación a pequeña escala, necesario para seguir la teoría clásica de Mecánica de Fractura Elástica Lineal, por lo que es claro que el estudio de propagación de grietas por efecto de fatiga no puede hacerse siguiendo las hipótesis de esta teoría (Zanuy, 2008).

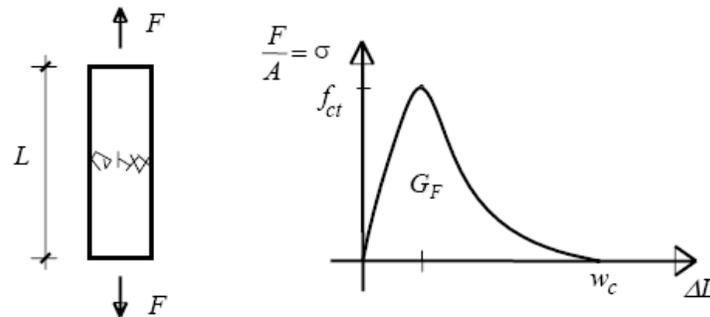


Figura 1.5 Prueba de tensión en cilindro de concreto (Zanuy, 2008)

### 1.3 Evaluación no destructiva

En una evaluación o monitoreo estructural es vital utilizar una prueba no destructiva (PND) que sea segura y que provea información en tiempo real de las condiciones de la estructura. Entre las PND más comunes se encuentra la inspección visual, líquidos penetrantes, radiografía industrial, ultrasonido y emisiones acústicas (Shahidan, et al., 2013).

Es importante distinguir entre una evaluación y una inspección no destructiva, en el caso de la primera se incluye, además de la ejecución de la inspección, el análisis correspondiente del producto de la inspección, con el fin de evaluar la integridad estructural del elemento a través de la inspección y así calificar la condición estructural del mismo.

En toda END se deben tener en consideración dos aspectos fundamentales: la capacidad de la técnica para la IND, y el fundamento teórico de la ciencia de los materiales e ingeniería mecánica estructural para el análisis. El éxito de una END

depende, por un lado, de una adecuada selección e interpretación de la técnica empleada en la inspección no destructiva, comúnmente llamada técnica no destructiva o método no destructivo.

Es importante destacar que el objetivo de una IND, no es determinar el tamaño más pequeño que se puede encontrar, sino más bien, establecer el tamaño de defecto más grande que se puede dejar de detectar. (Carrion, et al., 2003).

### **1.3.1 Clasificación de las Técnicas No Destructivas**

Las inspecciones no destructivas (IND) en materiales o estructuras, tienen como objetivo identificar defectos, irregularidades, discontinuidades o imperfecciones, tanto en su interior como en el exterior, sin alterar de manera permanente las condiciones físicas, químicas o mecánicas del elemento analizado. La información que de éstas se obtiene, sirve generalmente para determinar la funcionalidad u operatividad del elemento en estudio con base en algún criterio de evaluación específico, y se debe elegir la técnica adecuada según las necesidades y resultados que se pretendan de dicha inspección.

Existen muchas técnicas para la IND y se clasifican conforme a criterios como el tipo de defecto que se puede identificar, la localización de éste o el tipo de energía empleada para excitar la respuesta en la pieza

De acuerdo con el tipo o forma del defecto, las técnicas de inspección no destructiva (IND) se dividen en dos grupos:

1. *Técnicas de IND para defectos volumétricos.* Son las que se utilizan para detectar defectos con magnitudes significativas en sus tres dimensiones (largo, alto y ancho), es decir, tienen un volumen definido.

Defectos volumétricos	Métodos de Inspección No Destructiva
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Porosidades</li> <li>-Inclusiones</li> <li>-Contracciones</li> <li>-Agujeros, o vacíos</li> <li>Adelgazamientos por corrosión</li> <li>-Picaduras por corrosión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Visual</li> <li>-Líquidos penetrantes</li> <li>-Partículas magnéticas</li> <li>-Campo magnético</li> <li>-Corrientes de Eddy</li> <li>-Microondas</li> <li>-Ultrasonido</li> <li>-Radiografía</li> <li>-Termografía</li> <li><b>-Emisión acústica</b></li> <li>-Procesamiento digital de imagen</li> </ul>

Figura 1.6 Métodos de inspección no destructivas para defectos volumétricos

2. *Técnicas de IND para defectos planos.* Corresponden a las que se aplican a defectos, cuya característica principal es que una de sus dimensiones es pequeña o poco significativa, en comparación con las otras dos.

Defectos planos	Métodos de Inspección No Destructiva
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Discontinuidades</li> <li>-Grietas</li> <li>-Laminaciones</li> <li>-Discontinuidades por solidificación</li> <li>-Grietas por:</li> <li>+Tratamientos térmicos</li> <li>+Trabajo mecánico</li> <li>+Fatiga</li> <li>+Corrosión bajo esfuerzo</li> <li>+En soldaduras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Visual</li> <li>-Partículas magnéticas</li> <li>-Campo magnético</li> <li>-Corrientes de Eddy</li> <li>-Microondas</li> <li>-Perturbación de corriente eléctrica</li> <li>-Ultrasonido</li> <li><b>-Emisión acústica</b></li> <li>-Termografía</li> </ul>

Figura 1.7 Métodos de inspección no destructivas para defectos planos

### **1.3.2 Inspección visual**

La definición más aceptada del concepto de inspección visual es: *El proceso de examen y evaluación de un sistema o sus componentes, mediante el cual se utilizan los sentidos humanos auxiliados únicamente con algún dispositivo que magnifique la capacidad sensorial del inspector. El proceso de inspección puede constituirse por acciones, como observar, escuchar, sentir, oler, agitar o revolver. Incluye una componente cognoscitiva que, con las observaciones, se correlacionan con la información técnica del sistema o la estructura y de los datos sobre las condiciones de servicio pasadas y presentes* (Spencer, 1996)

La inspección visual es la técnica IND más utilizada y en la industria es la que permite detectar el 80% de las grietas o defectos que se presentan en los componentes mecánicos o estructurales (Bray & McBride, 1992)

### **1.3.3 Líquidos penetrantes**

La inspección por líquidos penetrantes (PT) es una técnica versátil y de simple aplicación para una gran variedad de materiales y diseños que permite localizar defectos o grietas superficiales. El método se basa en los principios básicos de la acción capilar y la capacidad de humectación de un líquido de baja viscosidad, propiedades que permiten que éste penetre por hendiduras o grietas imperceptibles a la vista para resaltarlas y evidenciarlas.

En general, la viscosidad, la capilaridad y la humectación están íntimamente relacionadas entre sí, y dependen de la tensión superficial del líquido y su capacidad para mojar la superficie de un material determinado. Una forma directa para medir dicha capacidad es a través del ángulo que hay en el punto de contacto de una gota con una superficie sólida, y que entre más pequeños sean, es mejor la capacidad de humectación del líquido.

### **1.3.4 Inspección por ultrasonido**

Es una de las técnicas de inspección no destructiva más poderosas, ya que permite localizar y cuantificar el tamaño de los defectos internos para diferentes tipos de geometrías y materiales. En general, el procedimiento es relativamente sencillo, y no representa riesgo para el inspector o para el material. Existe una diversidad de técnicas que se pueden adaptar a cada aplicación en particular. La inspección por ultrasonido mide en varios puntos el efecto del paso de las ondas acústicas de alta frecuencia a través del material de la pieza que se evalúa. Dicha propagación se controla electrónicamente por pulsos que un transductor convierte en energía acústica que se aplica en puntos específicos. Posteriormente, el mismo

transductor u otro similar, recibe el reflejo de esa onda acústica y la convierte nuevamente en una señal eléctrica. La interpretación del reflejo de dicha onda sonora permite inferir información sobre discontinuidades en el material. Debido a que las ondas sonoras viajan en casi todos los materiales, esta técnica es una de las más empleadas en la identificación de defectos internos.

Típicamente, las frecuencias de inspección por ultrasonido son de 200 kHz a 25 MHz, que no son audibles para el ser humano por estar limitado a frecuencias entre 20 y 20,000 Hz. Por lo anterior, las ondas de ultrasonido no representan riesgo alguno para la salud del inspector, a diferencia de los rayos X que se considerarán adelante. Adicionalmente, como las señales acústicas de respuesta se convierten en señales electrónicas, existen muchas posibilidades de análisis mediante el procesamiento mismo de dichas señales.

La evaluación no destructiva por ultrasonido es un método versátil que permite aplicar técnicas que se pueden adaptar en la inspección de un problema particular, por ejemplo, son factibles de emplear los diferentes tipos de ondas para evaluar la respuesta de una señal. Más aún, como se discutirá más adelante, la señal de ultrasonido puede ser transmitida, recibida, interpretada y mostrada en varias formas.

### **1.3.5 Inspección por emisiones acústicas**

De manera general, aunque existen diversas técnicas muy avanzadas para una inspección, la inspección visual es la más utilizada de todas, mediante el cual se utilizan los sentidos humanos auxiliados únicamente con algún dispositivo que magnifique la capacidad sensorial del inspector. Por otro lado la inspección visual también puede apoyarse con otras técnicas para resaltar defectos.

La técnica de Emisiones Acústicas, al igual que el ultrasonido utiliza la energía acústica como principal factor de funcionamiento, se contempla dentro de las técnicas de inspección volumétrica y no destructiva, la característica principal es que puede identificar y localizar defectos internos de un material a través de todo su volumen, cuando la energía de deformación fluye provocando microagrietamientos que originan las emisiones, fundamentando esto con el hecho de que casi todos los materiales emiten pulsos sonoros cuando están siendo sometidos a una carga. El sonido está formado por ondas mecánicas elásticas que se propagan mejor en un medio sólido, pero que no sea completamente rígido. Para permitir vibraciones y para nuestro propósito es una ventaja el hecho de ser una onda tridimensional o esférica, ya que esto implica que no haya lugar alguno del espécimen que no sea atravesado por una onda que al propagarse en todo

lugar tendrá la función similar a un escáner, detectando imperfecciones internas a través de las variaciones de intensidad y tiempos registrados, y aunque las emisiones acústicas no determinen el tamaño de los defectos como lo hace el ultrasonido, es útil para detectar fácilmente puntos con potencial daño.

## **1.4 Evaluación por emisiones acústicas**

Las emisiones acústicas, por el hecho de generarse y propagarse a través de un medio continuo, pueden determinar según la intensidad de éstas, la evolución y el comportamiento de un material en la condición de carga en que se encuentre, incluso aún, sin que estén sujetos a una carga (Goszcyn'ska, 2014).

El fenómeno de emisiones acústicas es definido como la propagación de ondas elásticas debido a la liberación de energía localizada internamente en el material producido por microfracturas.

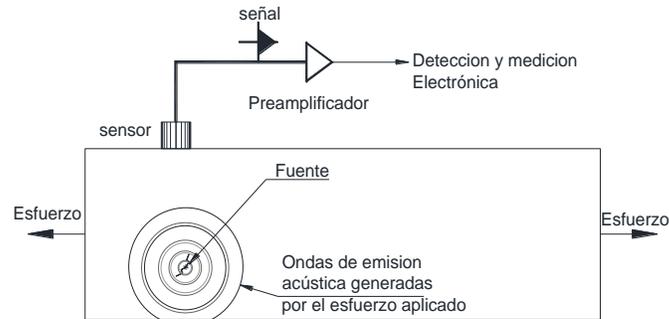
Las fuentes de actividad de EA incluyen procesos de deformación estructural como deformación plástica, expansión de grietas y otros tipos de degradación del material (Behnia, et al., 2014).

La fuente de energía de EA es el campo de esfuerzo elástico en el material, sin esfuerzo no hay emisión. Por lo tanto una inspección de emisiones acústicas es usualmente realizada durante el control de carga de una estructura, por ejemplo una prueba de carga antes de poner en servicio una estructura, un control de variación de carga cuando la estructura está en servicio, pruebas de fatiga, pruebas de contracción o un complejo programa de carga (Company, 205).

El principio básico de las EA es la detección de ondas elásticas radiadas por la propagación de una grieta, ocurriendo no sólo en la superficie sino también en la sección interna de una estructura. A diferencia de las pruebas de ultrasonido, los equipos de EA son diseñados para monitorear emisiones acústicas producidas dentro del material durante la falla o inducción de esfuerzos, más que transmitir ondas activamente. Los componentes principales del equipo de EA incluye transductores, amplificador de señal, procesador de señal, monitor, interpretación y evaluación, Figura 1.8 (Shaowei, et al., 2013).

Los sensores responden al movimiento dinámico causado por un evento de EA. Esto es logrado a través de transductores los cuales convierten el movimiento mecánico en una señal de voltaje.

Numerosos experimentos han probado que la técnica de Emisiones Acústicas (EA) es una poderosa herramienta para evaluación de algunos sistemas sin alterar las condiciones del material de composición (Shahidan, et al., 2013).



**Figura 1.8 Esquema de principio de emisión acústica**

La técnica de emisiones acústicas está basada en el análisis de señales acústicas que se propagan en forma de ondas elásticas y que además vienen acompañadas de cambios en la estructura del material (concreto), el cual es generado por una liberación local de energía en el que su fuente se encuentra dentro del material y son comúnmente grietas o deformaciones (Albdelrahman, et al., 2014)

Las grietas iniciales y las subsecuentes, producidas por una acción externa, derivan en cambios de energía, los cuales pueden ser adquiridos como ondas acústicas en la superficie del miembro.

Las señales de EA pueden ser reunidas a través de sensores puestos sobre la superficie del material y una vez registradas dichas señales (hit) (Albdelrahman, et al., 2014) se pueden calcular ciertos parámetros: amplitud en mV o dB, tiempo de incremento, duración, fuerza de señal, frecuencia promedio de señal, número de cuentas y energía (ElBatanouny, et al., 2014).

Estas señales pueden ser divididas en un enfoque clásico, basadas en parámetros, así como también bajo un enfoque cuantitativo, basadas en señales en bruto (Behnia, et al., 2014). Estos enfoques sirven para poder determinar un tipo de análisis y tratamiento a las EA (ElBatanouny, et al., 2014).

### 1.4.1 Análisis paramétrico

La implementación de este tipo de análisis se recomienda cuando se tiene una gran cantidad de datos de EA en un corto periodo de tiempo, dicho de otra manera, la adquisición y tratamiento de la señal bruta no es adecuada (Behnia, et al., 2014). En el análisis paramétrico la amplitud en mV o dB, tiempo de incremento, duración, fuerza de señal, frecuencia promedio de señal, número de cuentas (ElBatanouny, et al., 2014) y energía caracterizan la señal de EA (Figura 1.9). En este enfoque, los parámetros característicos de la señal son usados para evaluar el grado de daños así como para identificar de la naturaleza del mismo.

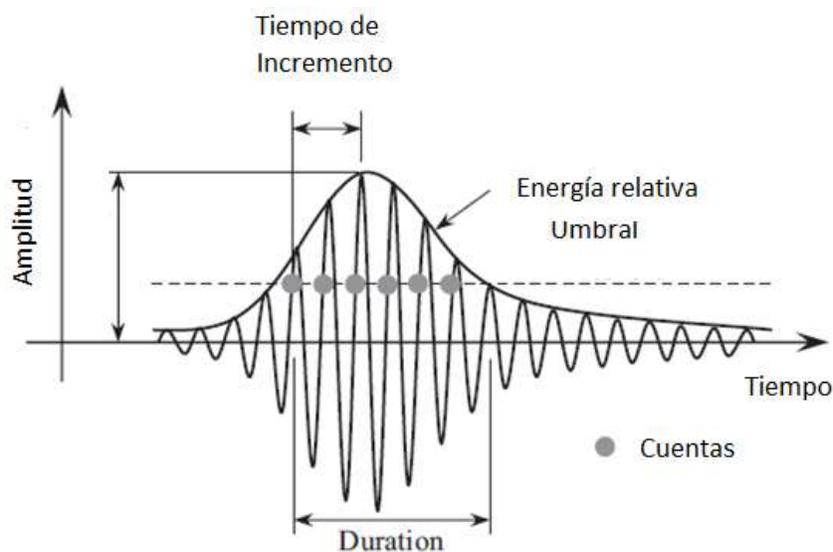


Figura 1.9 Variables de análisis paramétrico

### 1.4.2 Análisis de formas de onda

En el tipo de análisis paramétrico, sólo algunos de los parámetros de EA son adquiridos o grabados durante el monitoreo, pero no así la señal misma. Este enfoque dispone de una base de datos rápida, sin embargo, es posible la adquisición cruda de formas de onda en multicanales. La característica más importante de este enfoque es que se puede obtener un mejor desempeño en la discriminación de ruido, ofreciendo una mejor interpretación en algunos casos (Behnia, et al., 2014).

Para el caso del análisis paramétrico la premisa es que la señal sea enteramente definida por la configuración de los parámetros, y el almacenamiento de estos

parámetros requiere menos tiempo y espacio de almacenamiento. Además, en este enfoque hay posibilidades de grabar una gran cantidad de datos con suficiente rapidez de almacenamiento que puede facilitar la visualización. Aunque en la práctica puede ser difícil discriminar el ruido de una señal, es decir, dentro de los parámetros puede ir incluido el ruido.

Este enfoque también es muy dependiente del material y de las propiedades geométricas.

Por otro lado, el enfoque de forma de onda permite una mayor comprensión de los datos ya que usualmente se debe invertir más tiempo en un post-procesamiento. La característica más importante del enfoque de forma de onda es la capacidad de discriminación de ruido ya que la señal cruda original esta aun disponible y esta no se ha convertido en parámetros representativos.

Ciertos parámetros por si solos pueden ofrecer una medida cuantitativa del daño progresivo en un material, mientras que algunos se deben relacionar con otros para proporcionar información sobre el fenómeno.

Las emisiones acústicas se diferencian de la mayoría de las pruebas no destructivas TND en dos aspectos clave: En primer lugar, la señal tiene su origen en el material mismo, no en una fuente externa y por otro lado, las EA detectan actividad en los defectos, mientras que otros detectan la existencia de discontinuidades geométricas.

Otro beneficio importante en el uso de las emisiones acústicas es que permite que el volumen completo de la estructura sea inspeccionado en una simple operación de carga. Típicamente la inspección global de EA es usado para identificar áreas con problemas estructurales mientras que otros métodos de PND son usados para identificar más precisamente la naturaleza del defecto.

<b>Emisiones Acústicas</b>	<b>Otros métodos</b>
<b>Detecta movimiento de defectos</b>	Detecta geometría de defectos
<b>Requiere esfuerzo</b>	No requiere esfuerzo
<b>Cada aplicación de carga es único</b>	Inspección es directamente repetible
<b>Más sensible al material</b>	Menos sensible al material
<b>Menos sensible a la geometría</b>	Más sensible a la geometría
<b>Requiere acceso sólo al sensor</b>	Requiere acceso al área completa de inspección
<b>Inspecciona la estructura completa</b>	Explora regiones locales en secuencia
<b>Principal problema relacionado al ruido</b>	Principal problema relacionado a la geometría

**Figura 1.10 Comparativa técnica emisión acústica**

## 1.5 Emisiones acústicas en concreto

A diferencia de las otras técnicas no destructivas, las emisiones acústicas son aplicadas usualmente durante los periodos de carga completos y usadas para detectar falla desde estados tempranos. Además, esta técnica detecta las ondas elásticas radiadas por la propagación de grietas que ocurren no sólo en la superficie sino en el interior de la estructura. A diferencia de las pruebas de ultrasonido convencional, esta herramienta está diseñada para el seguimiento de las emisiones acústicas producidas dentro del material en caso de falla o esfuerzo, en lugar de transmitir de forma activa las ondas, proceden a su adquisición después de que han viajado a través del material. En el concreto, las microgrietas de la pasta de cemento, los agregados y la interface entre el agregado y la pasta son las mayores fuentes observadas por la técnica de emisiones acústicas (Shaowei Hu, 2013).

La técnica de emisiones acústicas, ha sido empleada como una herramienta por los investigadores, en campos como el estudio del agrietamiento tanto en su etapa inicial, como la forma en que se propaga (Goszcyn'ska, 2014), su localización (Goszcyn' ska, et al., 2012), (Carpinteri, et al., 2012), (Kocur, et al., 2011); así como su clasificación dependiendo del elemento mecánico que lo genere, flexión o cortante (Kentaro & Masayasu, 2010).

En años recientes, la forma en la que el daño se propaga a través de los elementos estructurales, así como la fractura de los mismos han sido temas estudiados a través de esta técnica, ciertos estudios tratan de determinar dicho daño a través de la forma de propagación de las ondas acústicas en los materiales, así como el comportamiento que las señales acústicas van teniendo ante un daño progresivo, hasta llegar a la fractura (Santosh & Chandra, 2010), (Viday & Raghu, 2011), (Aggelis, et al., 2011).

## **2 Metodología**

---

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el proceso de degradación del concreto ante esfuerzos normales de tensión y compresión por efectos de flexión, para lo cual se elaboraron probetas de concreto simple, con el objeto de someterlas a efectos de flexión en 4 puntos y medir a su vez las respuestas en emisiones acústicas durante el proceso de carga, hasta la falla en el material.

### **2.1 Recursos materiales (Material y equipo)**

Los recursos materiales del proyecto incluyen todos los materiales usados en: la creación de probetas de ensaye, el equipo de emisiones acústicas, equipo de aplicación de carga y equipo de seguridad.

#### **2.1.1 Especímenes de concreto**

Para la elaboración de los especímenes de concreto simple se empleó 1 m<sup>3</sup> de concreto premezclado con una resistencia a la compresión  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  un tamaño máximo de agregados T.M.A.=3/4".

Para la elaboración de los especímenes de concreto se implementó el colado en moldes estándar de acero con dimensiones de 15x15x50 cm. Para la verificación de resistencia y revenimientos en la recepción del material en laboratorio, se hizo uso de moldes y conos para las pruebas de revenimiento in situ. Los especímenes una vez elaborados fueron curados por inmersión en tinas de curado con hidróxido de calcio.

#### **2.1.2 Equipo servo hidráulico de carga**

Para la aplicación de la carga con el fin de producir el efecto de flexión en 4 puntos en las probetas de concreto se empleó un equipo servohidráulico marca Instron modelo 8503, la cual cuenta con una capacidad máxima de carga de 10 ton.

Para la adaptación a la celda de carga, se empleó un accesorio metálico para proporcionar la descarga en dos puntos y apoyar las probetas a las distancias establecidas en la norma ASTM C78.

### 2.1.3 Equipo de emisiones acústicas

En materia de equipos de emisión acústica, el sistema empleado en la prueba es de la marca Physical Acoustics Corporation (Figura 2.1). El equipo de adquisición multicanal empleado es el modelo  $\mu$ Disp con preamplificadores con ganancias de 20, 40 y 60 dB (Figura 2.1).



Figura 2.1 Equipo de medición de emisión acústica

Los sensores empleados en las pruebas desarrolladas son de tipo piezoeléctricos, y pertenecen a la serie WS  $\alpha$ , con un rango de frecuencia de operación de 100 a 1000 kHz y una frecuencia de resonancia de 125 kHz.

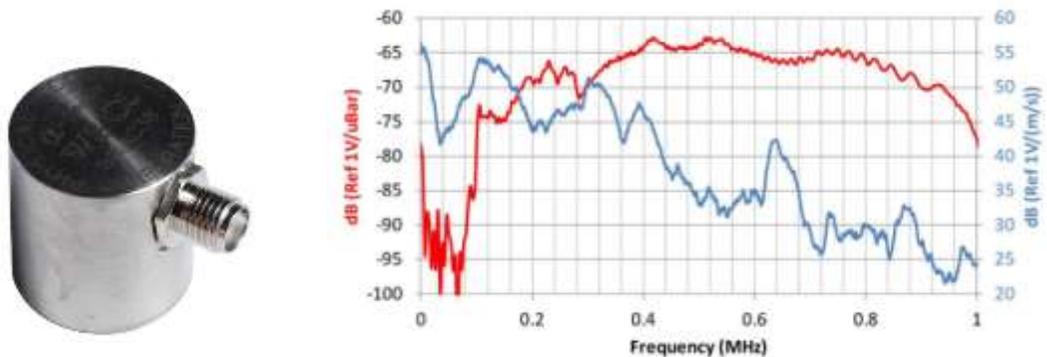


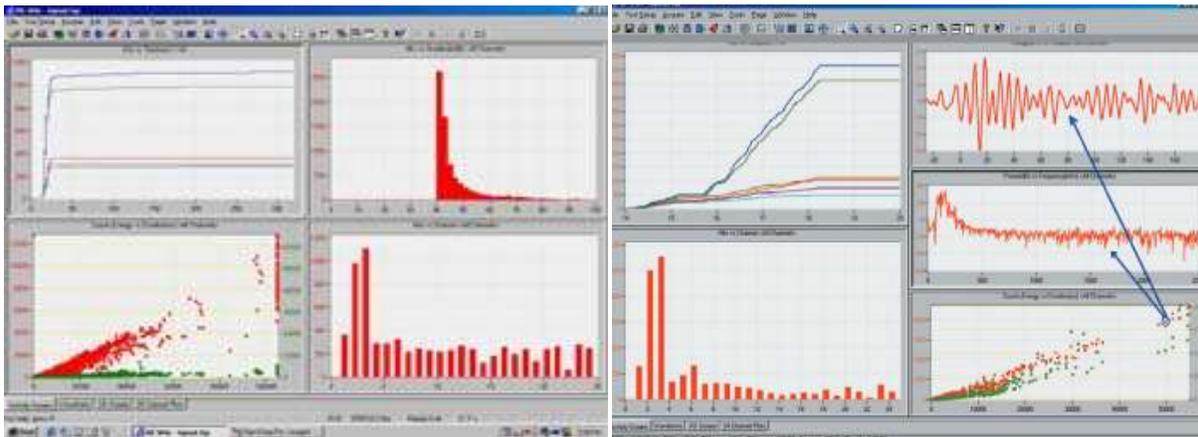
Figura 2.2 Equipo de medición de emisión acústica

La unidad de adquisición y almacenamiento de la información se realizó a través de un equipo IBM portátil con 1Gb de RAM. La interconexión periférica CIP se realizó con el componente marca MAGMA (Figura 2.3) el cual cuenta con una tasa de transferencia de datos de hasta 132 Mb/s a la unidad de almacenamiento.



**Figura 2.3 Equipo de adquisición y almacenamiento**

Para la adquisición en tiempo real de las emisiones acústicas durante las pruebas realizadas y el pre procesamiento de las señales adquiridas, se empleó el software AEWIn de la compañía Physical Acoustics.



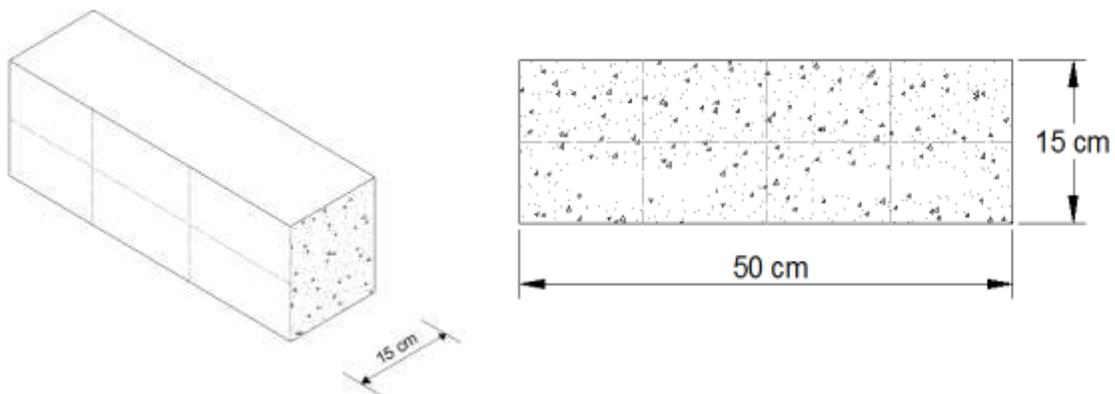
**Figura 2.4 Interfaz Software AEWIn (Physical acoustics web)**

## 2.2 Procedimiento de pruebas

### 2.2.1 Elaboración de especímenes de prueba

Las características del espécimen de prueba se definen a continuación

- Tamaño máximo de agregado (TMA): 20 mm (3/4")
- Tipo de agregado: Calizo
- Concreto simple (premezclado):  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$
- Revenimiento: 10 cm
- Dimensiones: 15x15x50 cm
- Curado: inmersión en agua saturada con hidróxido de calcio, 28 días



**Figura 2.5 Geometría de especímenes de prueba**

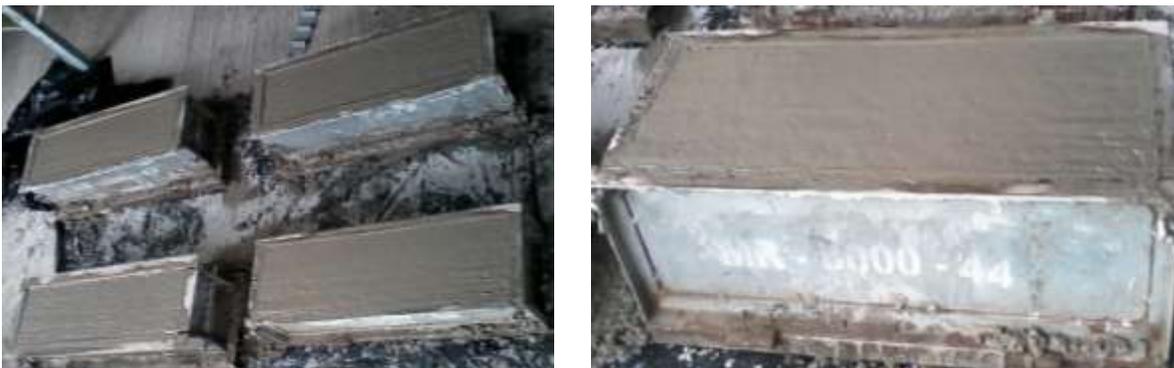
La fabricación de especímenes tuvo origen con la preparación de moldes, actividad que realizó aplicando grasa a manera de desmoldante sobre las paredes de cada recipiente.

Siguiendo la norma ASTM C-143, se llevó a cabo la prueba de revenimiento al concreto premezclado, teniendo como punto de referencia aceptable 10 cm como máximo, mientras que el vertido del concreto se realizó aplicando las indicaciones mencionadas en la prueba ASTM C-31 (Práctica para Elaboración y Curado en el Campo de Especímenes de Concreto para Ensayo) en la que de manera relevante recomienda realizar el vertido en 3 capas varillando aproximadamente a cada 2 in<sup>2</sup> y penetrando la capa inferior aproximadamente 1 in (25 mm).



**Figura 2.6 Fabricación de especímenes de prueba**

Después de haber varillado la última capa, se realizó un enrase con una varilla o regla, para eliminar excedentes y así dar el acabado final al espécimen. Estos se dejaron reposar en forma horizontal para el fraguado como mínimo 24 horas, en los que transcurrido este tiempo es posible desmoldar cuidadosamente para no dañar al espécimen.



**Figura 2.7 Enrase y acabado de especímenes de prueba**

Se marcó cada espécimen con un número consecutivo con el fin de tener la identificación de cada uno al momento de ensayarlo.

El proceso de curado se realizó sumergiendo las probetas de ensaye en agua saturada con hidróxido de calcio, manteniendo la temperatura a  $23 \pm 2$  °C durante 28 días.



**Figura 2.8 Curado por inmersión de especímenes de prueba**

Preparación previa (Figura 3.11) al ensaye de flexión a los tercios del claro, se marcó cada tercio de la probeta como referencia a las posiciones en la máquina de aplicación de carga, así como posición en instrumentación de sensores.



**Figura 2.9 Preparación previa de especímenes**

## 2.2.2 Diseño de prueba

Como se mencionó, con el fin de someter el material a esfuerzos normales de tensión y compresión por flexión, la prueba planteada fue la correspondiente a flexión en cuatro puntos, la cual cuenta con un procedimiento de prueba estandarizado según ASTM C78, en la cual se establecen las dimensiones recomendadas y las relaciones de distancias en las cuales debe de apoyarse y aplicarse la carga (Figura 2.10).

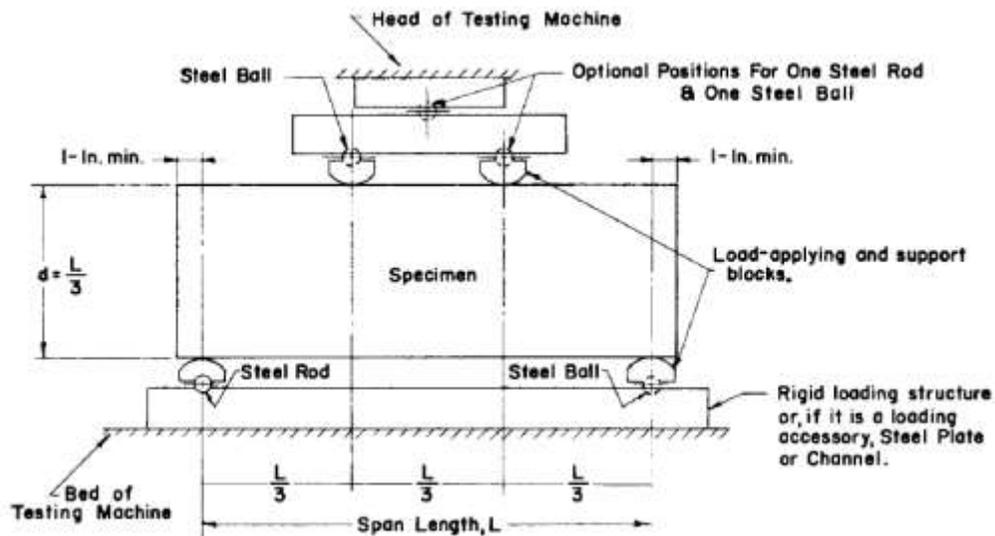


Figura 2.10 Configuración de prueba de carga espécimen (ASTM C78)

En la configuración de carga planteada, la distribución de fuerzas permite generar en el tercio central del claro de la viga un efecto de flexión pura, con lo cual pueden garantizarse distribuciones de esfuerzos normales en esta zona, esperando la falla en la misma.

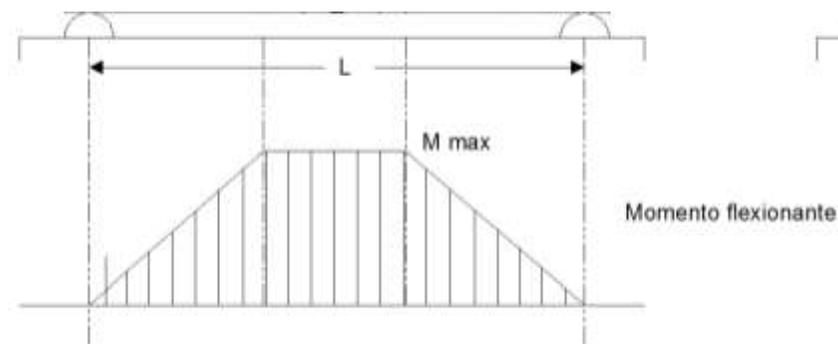
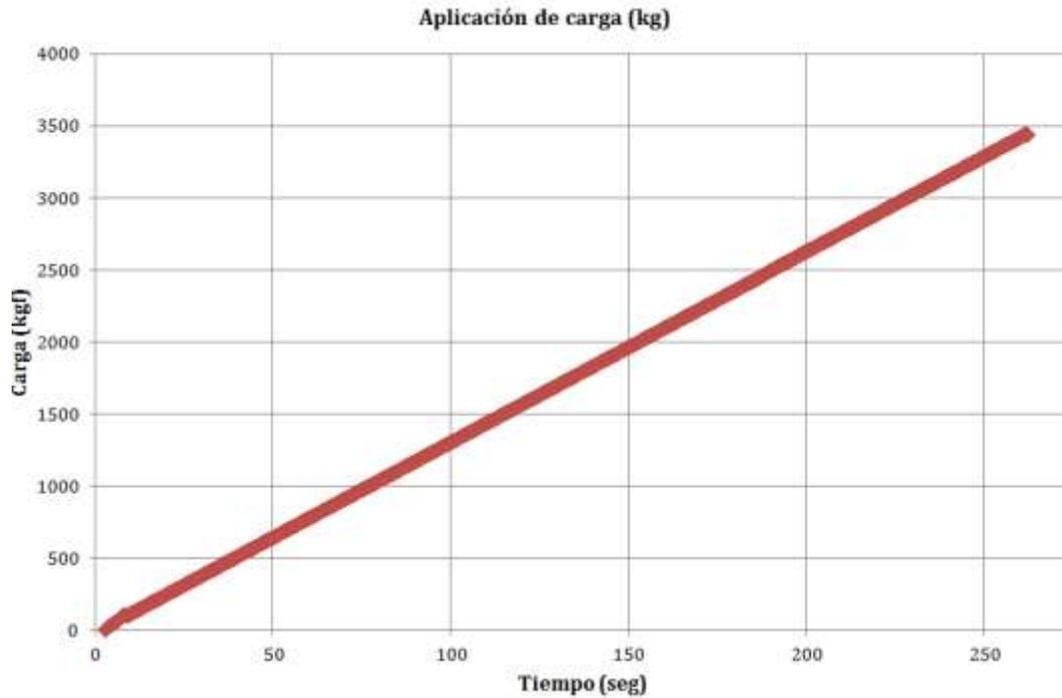


Figura 2.11 Efecto de flexión pura en prueba de flexión en cuatro puntos

La aplicación de carga al espécimen, fue transmitida de forma continua y sin golpes, ésta se aplicó de forma monótona hasta la falla en los especímenes. La tasa de aplicación de la carga por el equipo servo hidráulico fue de 6986 N/min hasta la ruptura de cada espécimen (Figura 2.12).

Para asegurar el contacto de las superficies de la probeta y los bloques de aplicación de carga, se puso una lámina de neopreno con una sección máxima de 6.4x50x150 mm.

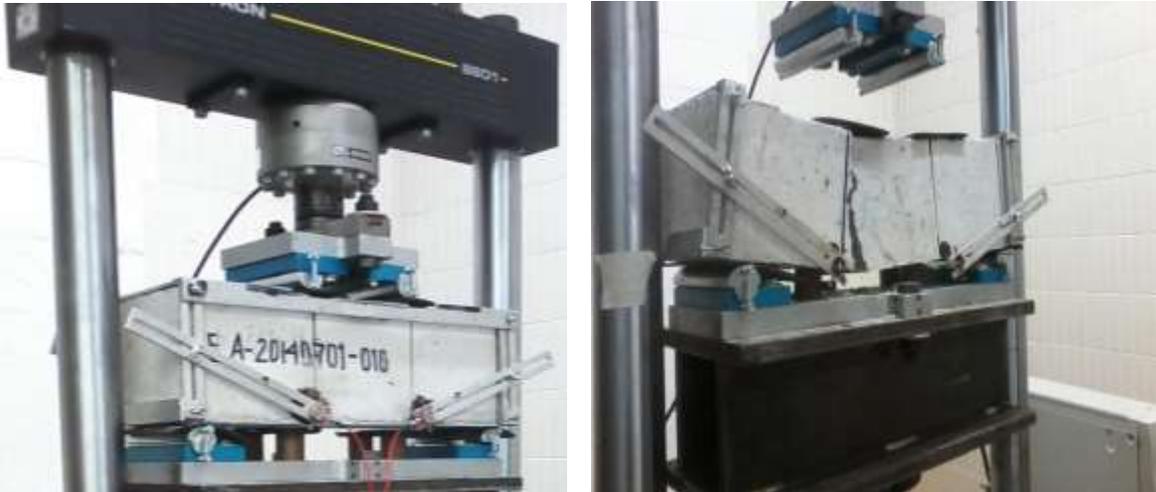


**Figura 2.12 Patrón de aplicación de carga**

### 2.2.3 Instrumentación de especímenes

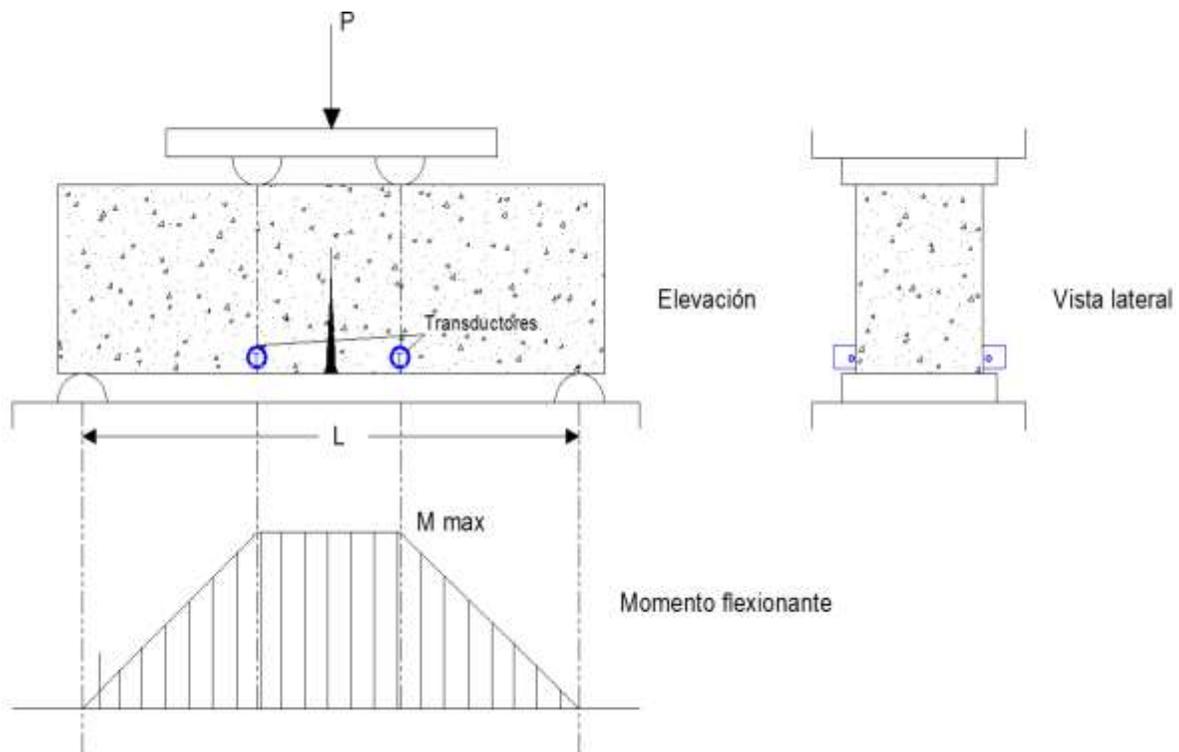
La instrumentación de los especímenes de prueba se realizó colocando los sensores acústicos sobre la superficie de concreto de la probeta empleando como acoplante grasa automotriz, la cual permitió eliminar la falta de contacto debida a la superficie rugosa inherente al concreto.

La sujeción de los sensores a los especímenes de prueba se realizó a través de una armadura de aluminio diseñada para retenerlos a presión sobre las superficies (Figura 2.13).



**Figura 2.13 Montaje de sensores en especímenes**

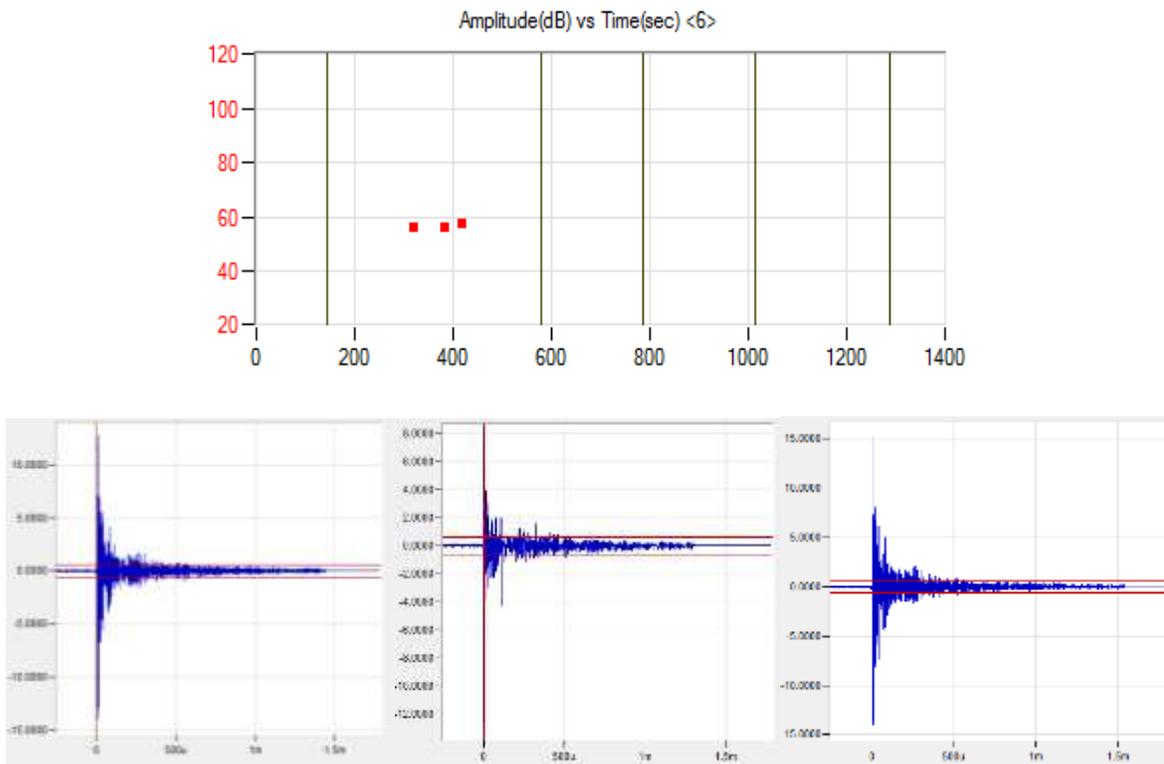
Los sensores fueron colocados longitudinalmente en los límites del tercio central, en la frontera inferior de la base del espécimen, zona donde se presentan los máximos esfuerzos normales de tensión por efecto de la flexión inducida, este patrón se implementó en la cara lateral frontal y posterior (Figura 2.14).



**Figura 2.14 Ubicación de sensores en especímenes**

Los sensores se dispusieron de forma simétrica por medio del sujetador de sensores, con un brazo auto ajustable para cualquier posición dentro de la probeta (Figura 2.13).

Para garantizar que durante la fase de instalación de los sensores estos estuvieran acoplados de manera adecuada sobre las superficies de los elementos, se llevaron a cabo un conjunto de pruebas de rompimiento de mina en la zona aledaña a los sensores, repitiendo esto en 3 repeticiones para verificar consistencia en su respuesta. Este procedimiento, está descrito en la norma ASTM F2174 “Standars Practice for Verifying Acoustic Emission Sensor Response”. Al romper la puntilla se espera que la señal acústica registrada cuente con las mismas características en las 3 repeticiones (Figura 2.15).



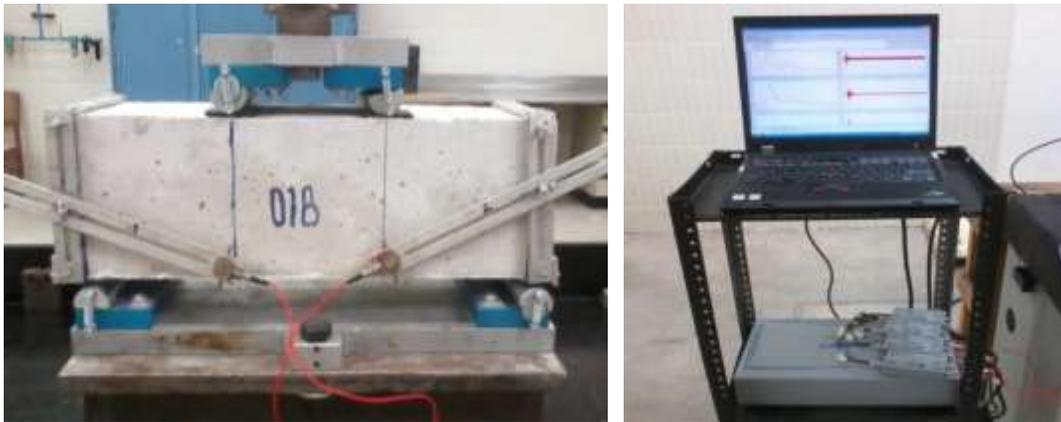
**Figura 2.15 Respuesta acústica registrada durante prueba de rompimiento de minas**

En la Figura 2.15, puede verse que las señales adquiridas en las pruebas tienen amplitud y forma de onda similar en las repeticiones por cada sensor, por lo que se garantiza un acoplamiento adecuado del sensor con la superficie de concreto en el espécimen.

## 2.2.4 Ejecución de pruebas

Dentro de la técnica de emisiones acústicas, existen dos formas de adquisición de las señales, en una de ellas se favorece el análisis paramétrico de la información de manera sintética, mientras que en la adquisición de formas de onda, el análisis se realiza a través de las señales adquiridas con un post-procesamiento de la información a la medida de las necesidades del experimento. Para los fines del proyecto, se optó por adquirir las respuestas en *forma de onda* (waveform), ya que en un enfoque paramétrico, la señal propia no es adquirida, sino más bien se obtiene un reporte con valores de parámetros a través de una conversión de la señal bruta, lo que implica que dentro de esta conversión, el ruido también forme parte de estos valores con lo cual las interpretaciones pueden presentar incertidumbre. Cabe mencionar que el trabajo computacional del post procesamiento es una actividad bastante extensa y se buscó sistematizar actividades por medio de algoritmos que se presentan en los apéndices.

Una vez centrado el espécimen respecto a los puntos de apoyo y aplicación de carga, se colocó la instrumentación de EA sujetando los sensores con un dispositivo en forma de diadema Figura 2.16.



**Figura 2.16 Probeta de concreto instrumentada**

Previo a la adquisición de datos de cada prueba se corroboró que no hubiera ningún problema de posición o acoplamiento de sensores, así como que estos estuvieran adquiriendo de forma correcta, la verificación se realizó basándose en la norma ASTM E995.

Dentro de las opciones de configuración en el Software AEwin, se asignaron las opciones de adquisición en modo waveform, además se configuraron los parámetros mostrados en la Figura 2.17.

<b>Parámetro de configuración</b>	<b>Magnitud</b>
Trigger	35 dB
Pre amplificación	40 dB
Filtro analógico	10-400 kHz
Frecuencia de muestreo	1 MHz
Pre-Trigger	500
Tamaño de muestra	15k

**Figura 2.17 Parámetros de adquisición de señales de EA**

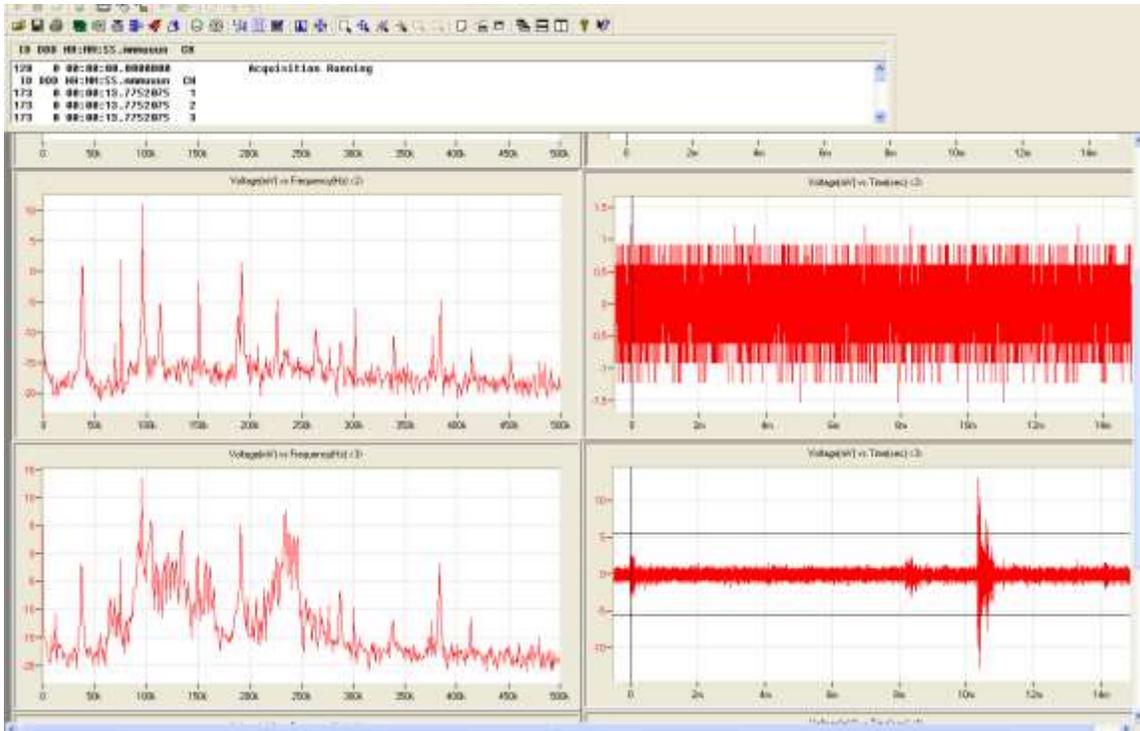
La adquisición se realizó de forma sincronizada para los cuatro sensores. Otra especificación importante en los parámetros de adquisición tiene que ver con el nivel del umbral, a partir del cual los eventos acústicos serán registrados por el sistema. El nivel de umbral fue fijado con base en el nivel de ruido registrado durante pruebas preliminares sin aplicación de carga, el cual alcanzó los 33 dB aproximadamente, por lo que el umbral, basado en esta medición preliminar se estableció en los 35 dB.

Las celdas de “Pre-Trigger” hacen referencia al lapso de tiempo de grabación, previo al instante de tiempo en que la señal rebasa el umbral, en el cual es suficiente para registrar la evolución de crecimiento de la señal (rise time o tiempo de arribo). Se definió también el tamaño del archivo igual a 15 k (15,360 datos).

Una vez realizadas las configuraciones mencionadas, éstas se conservaron para las 30 pruebas ejecutadas. Las adquisiciones fueron sincronizadas de forma manual con el inicio de aplicación de carga del equipo servo hidráulico Instron.

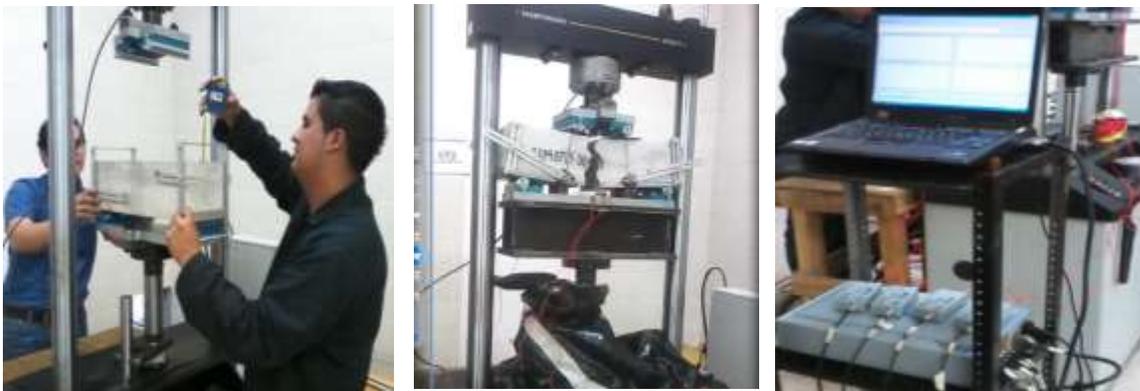
La interfaz gráfica al momento de la adquisición se muestra en la Figura 2.18, en la que se observa por la parte izquierda de la imagen, los gráficos en el dominio de frecuencia, mientras que por la parte derecha se muestra la señal graficada sobre el dominio de tiempo de dos de los cuatro sensores.

Cada evento de EA, genera un reporte por cada sensor, en el cual se contiene el vector Tiempo-Voltaje ( $\mu\text{seg-mV}$ ). Cada reporte puede ser manipulado para extraer las propiedades que se deseen, con su respectivo tratamiento.



**Figura 2.18 Interfaz gráfica de Adquisición de EA**

Una vez establecida la configuración del sistema de adquisición y sus parámetros, se procedió al montaje de las diferentes probetas de concreto para su prueba (Figura 2.19).



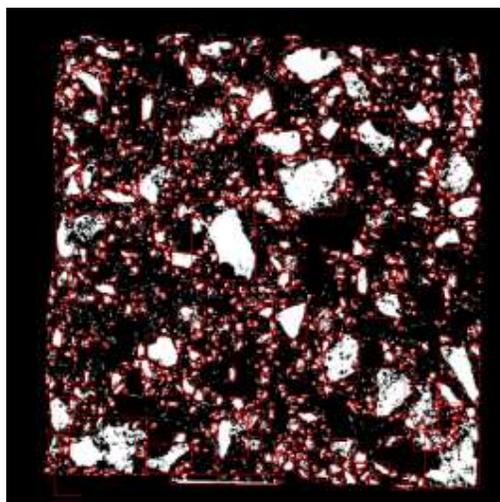
**Figura 2.19 Ejecución de prueba**

Por último, se recabaron imágenes de las superficies de falla de cada espécimen de prueba posterior a su falla, en vistas laterales y de las secciones transversales de falla, con el fin de estudiar las particularidades de las superficies y los patrones de falla en los elementos (Figura 2.20).



**Figura 2.20 Sección Transversal de falla en espécimen**

Posteriormente la ejecución de ensayos, se realizó la adquisición de imagen digital en cada cara de fractura, las cuales al ser procesadas por medio de NI visión Builder, se obtuvieron los parámetros de interés, en este caso el contenido de agregados presentes en dicha zona, así como también se relacionó ambas áreas con los agregados fracturados y los que tuvieron un desprendimiento en la zona de transición del agregado, a través de una diferencia de reconocimiento de áreas y espacios vacíos entre las caras (Figura 2.21).



**Figura 2.21 Sección Transversal de falla analizada con NI Vision Builder**

## 3 Análisis de resultados

---

### 3.1 Módulo de ruptura

Para el concreto, la resistencia a la flexión, también conocida como módulo de ruptura, es considerado un parámetro de medición del esfuerzo máximo que se produce en la fibra de tensión del elemento. Valor que se ve afectado principalmente por la dimensión de la sección transversal. Para ensayos realizados a flexión en los tercios del claro, la norma ASTM C-78 provee dos expresiones para su estimación.

Si la fractura se inicia en la superficie de tensión dentro del tercio central de la longitud del claro, el módulo de ruptura  $R$  se calcula con la siguiente ecuación

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad \text{Ec. 0.1}$$

Si la fractura ocurre en la superficie de tensión fuera del tercio central por no más del 5% de la longitud del claro, el módulo de ruptura  $R$  se calcula con la siguiente ecuación

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad \text{Ec. 0.2}$$

Donde  $R$  es el módulo de ruptura,  $P$  es la carga máxima aplicada al final de la prueba (psi o MPa),  $L$  es la distancia entre apoyos,  $b$  es la dimensión del ancho (in o mm),  $d$  es el peralte de la sección (in o mm) y  $a$  es el promedio de la distancia entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la superficie de tensión de la viga.

En los casos donde la fractura ocurre en la zona de tensión fuera del tercio central, por más del 5% de la longitud de la viga, el resultado de ese ensaye debe ser descartado.

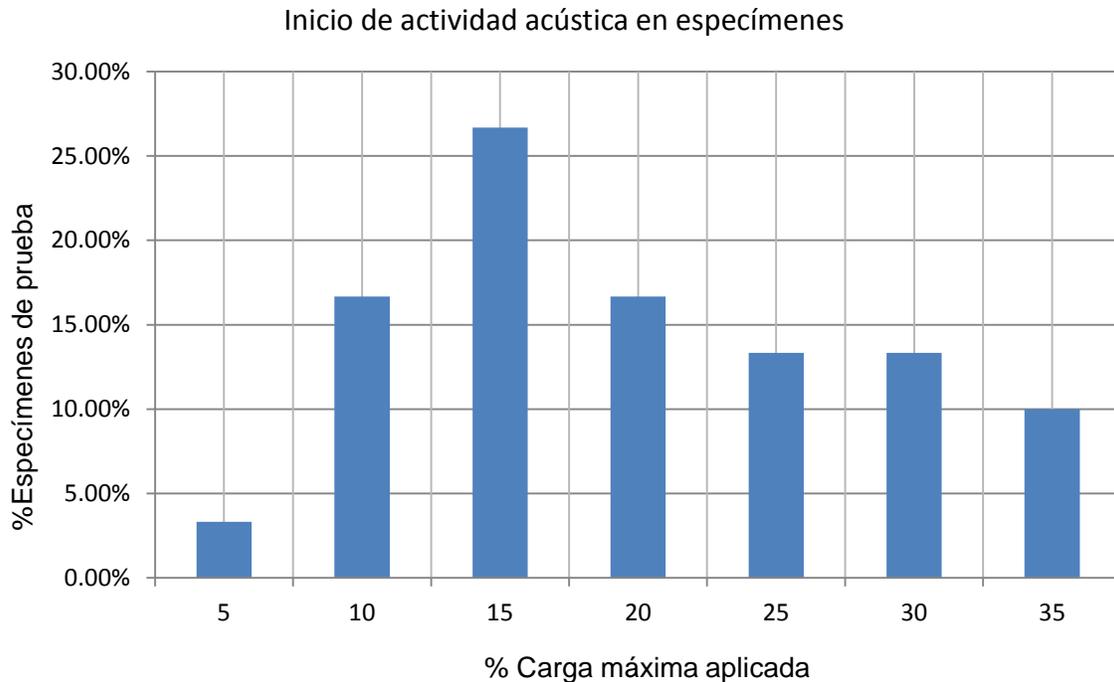
<b>Ensaye</b>	<b>b(mm)</b>	<b>d(mm)</b>	<b>p(kN)</b>	<b>Módulo (MPa)</b>
1	151.7	153.5	-35.08	<b>4.42</b>
2	151.7	151	-26.56	<b>3.45</b>
3	151	148	-28.08	<b>3.82</b>
4	151.7	150.5	-25.59	<b>3.35</b>
5	151	150	-31.00	<b>4.11</b>
6	149.6	151.4	-29.96	<b>3.93</b>
7	152.2	151.3	-31.86	<b>4.11</b>
8	151.5	151.3	-30.37	<b>3.94</b>
9	152	151.5	-30.37	<b>3.92</b>
10	151.5	151	-27.18	<b>3.54</b>
11	152	150	-36.44	<b>4.79</b>
12	150	151	-38.30	<b>5.04</b>
13	151	151	-35.69	<b>4.66</b>
14	151.8	151	-36.80	<b>4.78</b>
15	150	151	-37.91	<b>4.99</b>
16	151	149	-34.17	<b>4.59</b>
17	151	149	-38.82	<b>5.21</b>
18	151	149.5	-34.76	<b>4.64</b>
19	151	151	-39.24	<b>5.13</b>
20	151.5	149.5	-35.78	<b>4.76</b>
21	151	150	-35.55	<b>4.71</b>
22	150	151	-40.17	<b>5.29</b>
23	150.5	148	-35.23	<b>4.81</b>
24	151.5	149	-40.39	<b>5.40</b>
25	152	149		
26	152	151.5		
27	151	150		
28	152.5	150		
29	152	147.5		
30	152	150		

**Figura 3.1 Modulo de ruptura**

Puede verse que el módulo de ruptura promedio para los especímenes ensayados es de 4.47 MPa (43.85 kg/cm<sup>2</sup>).

### 3.2 Microfisuración inicial

La actividad acústica en el universo de 30 especímenes sometidos a las pruebas de flexión en cuatro puntos fue registrada desde el inicio de aplicación de carga hasta la ruptura final de cada espécimen. En este proceso, se pudo observar que el inicio de la actividad acústica se presentó entre el 5 y el 35% de los valores de carga máxima aplicada en este universo de estudio (Figura 3.2). En más del 50% de los especímenes probados, el primer evento acústico se registró entre el 10 y el 20% de la carga máxima total aplicada en estos. Estos eventos acústicos podrían estar relacionados con el inicio de reajustes internos entre los elementos de composición del concreto o el surgimiento de los primeros defectos en la llamada zona de transición en este material.



**Figura 3.2 Inicio de actividad acústica en especímenes de prueba**

Además, un análisis de las amplitudes asociadas a los primeros eventos acústicos registrados en los especímenes de prueba, muestran que estos primeros eventos están asociados a eventos físicos de agrietamiento inicial en el material, ya que las amplitudes registradas en estos eventos acústicos iniciales son menores al

10% de las amplitudes máximas que se desarrollaron a lo largo del periodo de degradación del material durante la prueba.

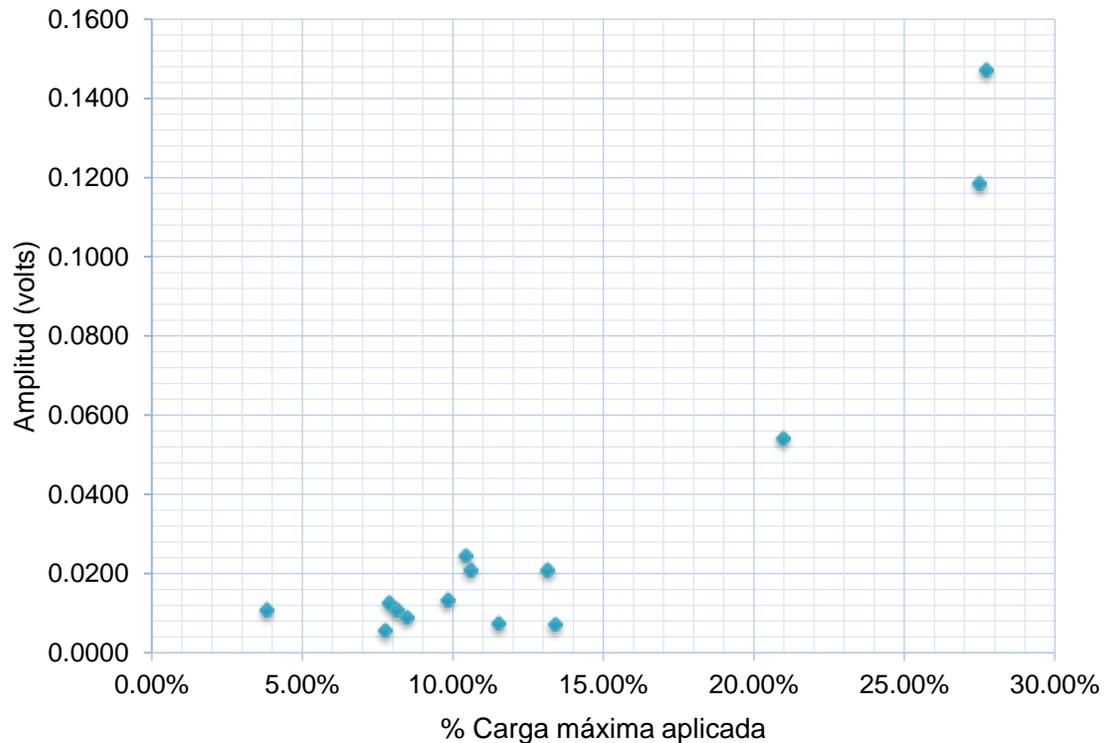


Figura 3.3 Amplitudes de primeros eventos acústicos registrados en pruebas

### 3.3 Evolución de la degradación estructural

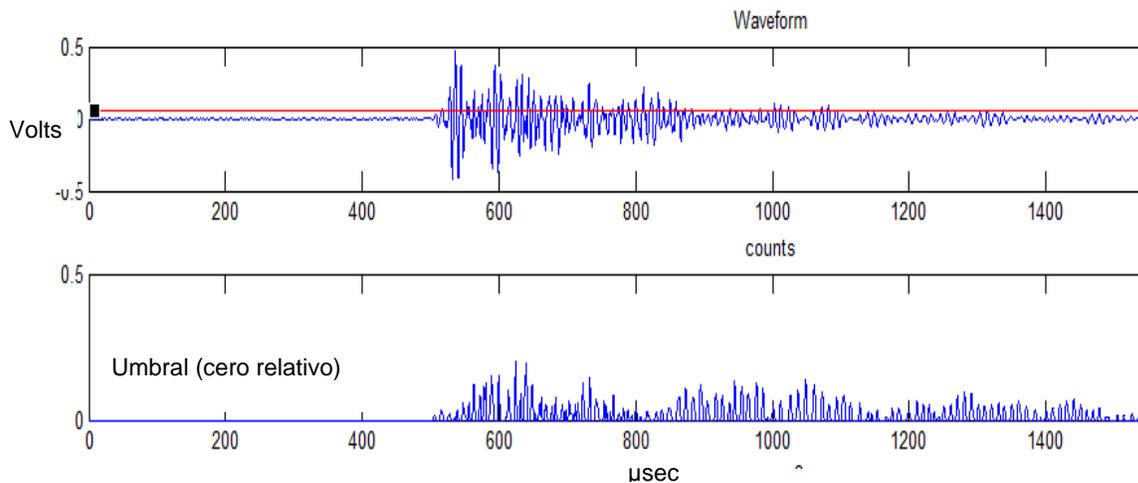
Para el análisis de la evolución de la degradación estructural en los especímenes de concreto sometidos a efectos de flexión en cuatro puntos, se estudió la evolución de dos parámetros acústicos, por un lado, se estudió el comportamiento de las cuentas acústicas, las cuales se contabilizaron a partir de que los eventos registrados sobrepasaron los niveles de umbral establecidos durante las pruebas, por otro lado, para cuantificar el impacto de los diversos eventos registrados se calculó la energía acústica asociada a cada evento, dándole seguimiento durante el periodo de prueba.

Las cuentas acústicas son unos de los parámetros más usados en el análisis de las señales de emisiones acústicas, las cuales se definen como el número de veces en que la señal atraviesa el valor del umbral determinado, considerando como una cuenta desde que la señal incrementa hasta que decae.

Las cuentas son la forma más fácil y usada a través de los años para cuantificar las señales de EA. Las cuentas dependen de la magnitud del evento fuente, pero también tienen una gran dependencia de las propiedades acústicas y de su naturaleza reverberante del espécimen y del sensor (Company, 2005).

Para el análisis de las señales adquiridas durante las pruebas se programaron diversas rutinas para el filtrado y análisis de los diversos parámetros acústicos, las cuales se desarrollaron en la plataforma Matlab.

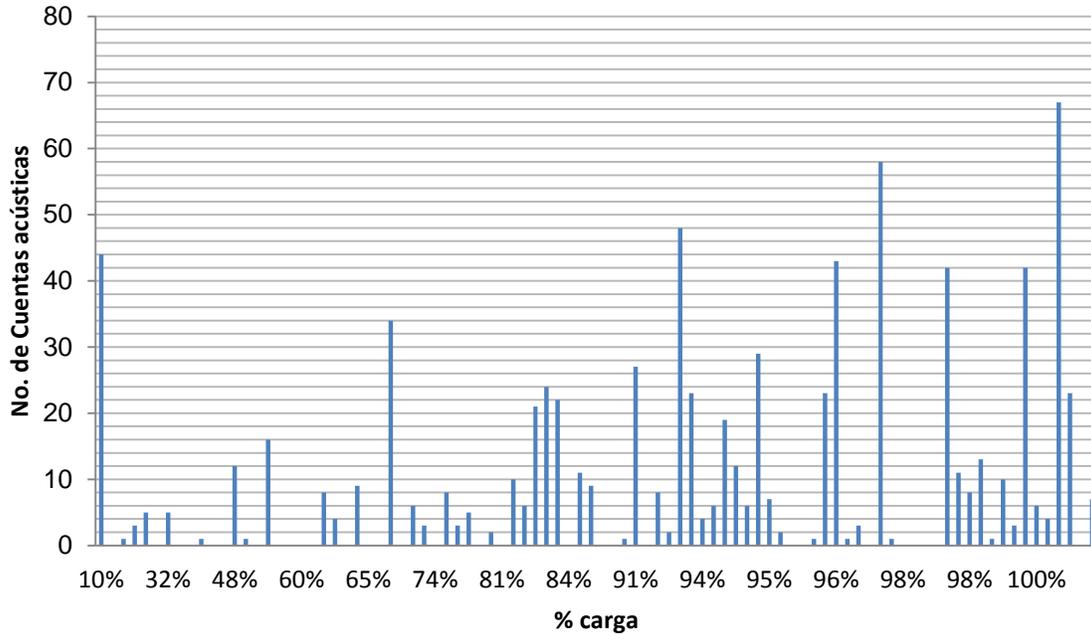
El primer algoritmo desarrollado tuvo por objetivo la estimación de las cuentas acústicas en las señales adquiridas, en el cual se realiza el conteo del número de veces que la señal alcanza o rebasa el cero relativo, el cual se fija en el nivel del umbral definido a partir de las condiciones de prueba (Figura 3.4).



**Figura 3.4 Análisis de cuentas acústicas en señal adquirida**

A través del seguimiento de las cuentas acústicas en cada una de las pruebas, pudo observarse cómo a medida que se va incrementando la carga aplicada en los especímenes de prueba, este parámetro acústico aumenta su frecuencia (Figura 3.5).

Este incremento de eventos acústicos conforme la carga aplicada aumenta de forma monótona, muestra la evolución de la degradación en el concreto, a través de la progresión de los procesos de microfisuración y fracturas internas, los cuales derivan en actividad acústica debido a la liberación de energía elástica en cada evento de fisuración individual o de evolución de crecimiento de estos defectos generados.



**Figura 3.5 Frecuencia de cuentas acústicas en prueba a espécimen No. 15**

Otro de los algoritmos desarrollados para el análisis paramétrico de las respuestas adquiridas, consistió en la estimación de la energía acústica asociada a cada uno de los eventos acústicos registrados durante las pruebas. La energía acústica está definida el área medida bajo la envolvente de la señal rectificada. Éste parámetro es sensible a la amplitud, así como a la duración y es menos dependiente de la configuración del umbral y de la frecuencia de operación. La actividad total de EA, a menudo debe ser medida por una sumatoria de magnitudes de todos los eventos detectados.

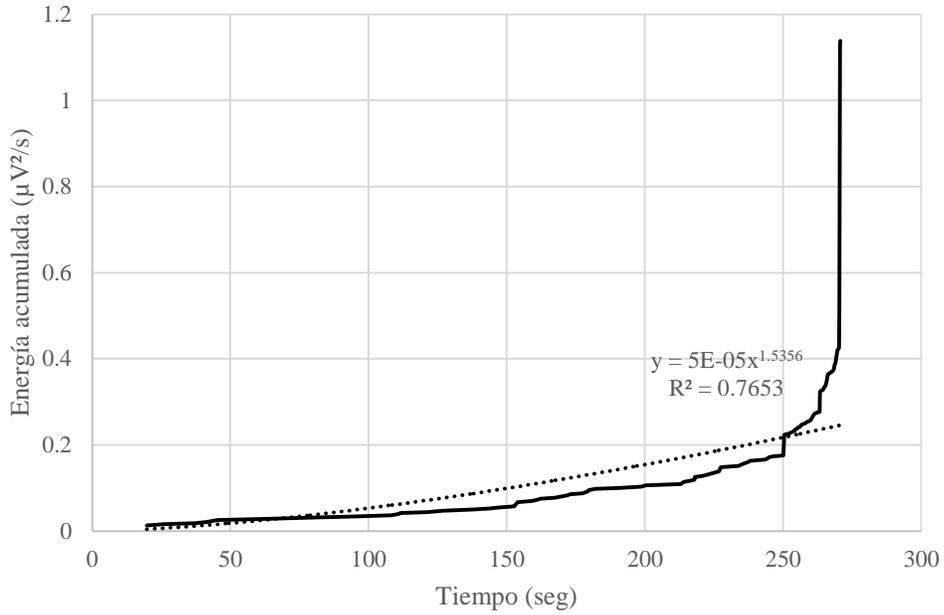
La energía elástica queda definida entonces como:

$$E_i = \int_{t_0}^{t_i} V^2(t) dt$$

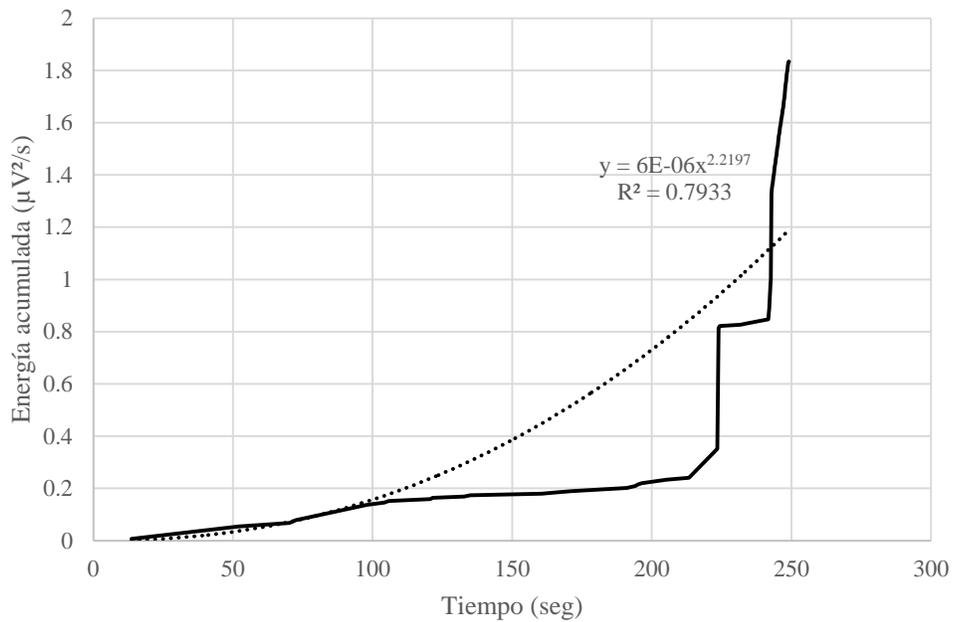
Donde V es voltaje transitorio de cada canal, y t<sub>0</sub>, t<sub>1</sub> es el tiempo de inicio y fin respectivamente del voltaje transitorio grabado.

Empleando la expresión, pudo estimarse este parámetro acústico para todas las señales adquiridas en las 30 pruebas desarrolladas a los especímenes de concreto.

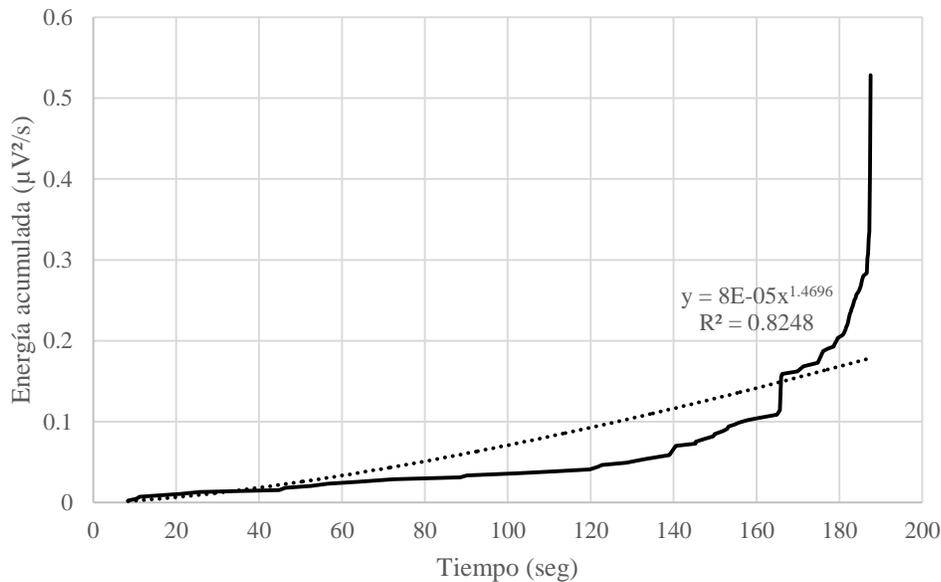
En las figuras 3.6 a 3.8 se muestran los gráficos de energía acumulada en diversos especímenes.



**Figura 3.6 Energía acústica acumulada en prueba a espécimen No. 15**



**Figura 3.7 Energía acústica acumulada en prueba a espécimen No. 16**

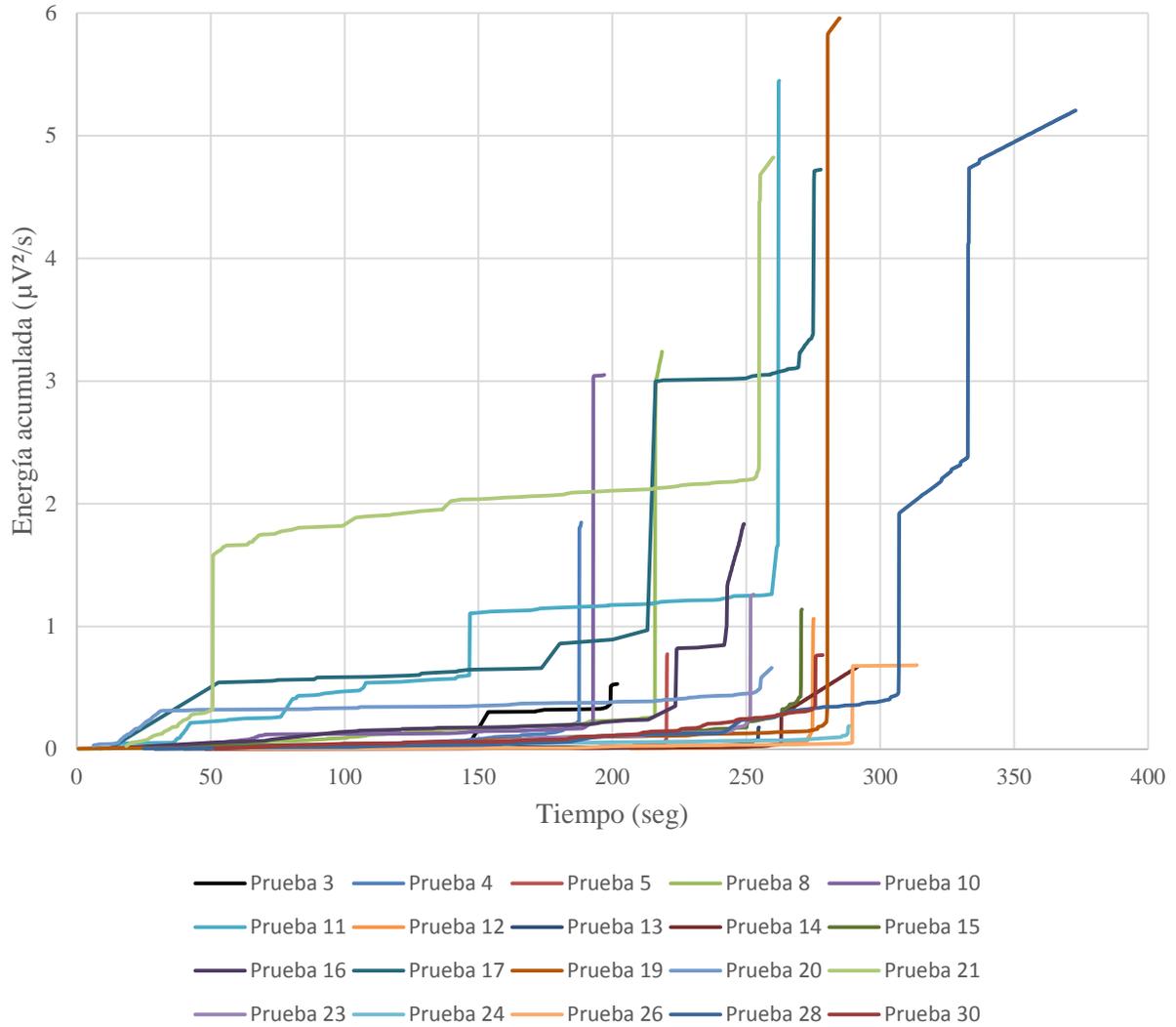


**Figura 3.8 Energía acústica acumulada en prueba a espécimen No. 15**

Al comparar los patrones de comportamiento de las cuentas acústicas y la energía elástica acumulada, asociada a éstas, puede observarse que la energía liberada en los primeros eventos acústicos registrados es de poca importancia, hasta que el daño en la probeta comienza a ser sustancial arriba del 85% de la carga máxima aplicada en el mismo, en este estado apreciamos que la energía acústica asociada a los eventos comienza a incrementarse hasta que el espécimen de concreto llega a su capacidad máxima por flexión (Módulo de ruptura).

En la Figura 3.9 se muestran las distribuciones de energía acumulada del conjunto de especímenes de prueba.

Puede observarse que aunque los niveles de energía acumulada varían dependiendo de la fenomenología interna de degradación y la proximidad de las fuentes a los puntos donde se localizan los sensores, en los especímenes probados, la cantidad de energía liberada aumenta considerablemente hacia el final de las pruebas, momento en el que la evolución del daño incrementa y se forma el plano de falla final en el material.



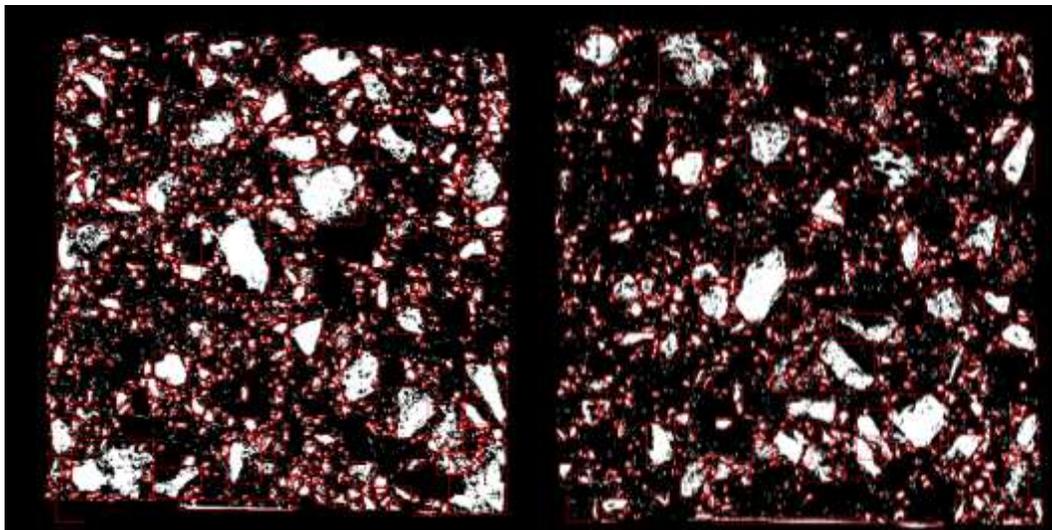
**Figura 3.9 Energía acústica acumulada en especímenes de concreto**

Otro de los parámetros analizados en la ejecución de las pruebas fue la influencia del tamaño máximo de agregado presente en las superficies de falla de las probetas ensayadas y su relación con las respuestas acústicas registradas.

Posterior a la ejecución de ensayos, se realizó la adquisición de imagen digital en cada superficie de fractura (Figura 3.10), las cuales fueron procesadas por medio del software NI visión Builder, de éstas se obtuvieron los parámetros como el contenido de agregados presentes en dicha zona, así como también, se relacionaron ambas áreas con los agregados fracturados y los que tuvieron un desprendimiento en la zona de transición del agregado, a través de una diferencia de reconocimiento de áreas y espacios vacíos en entre las superficies.

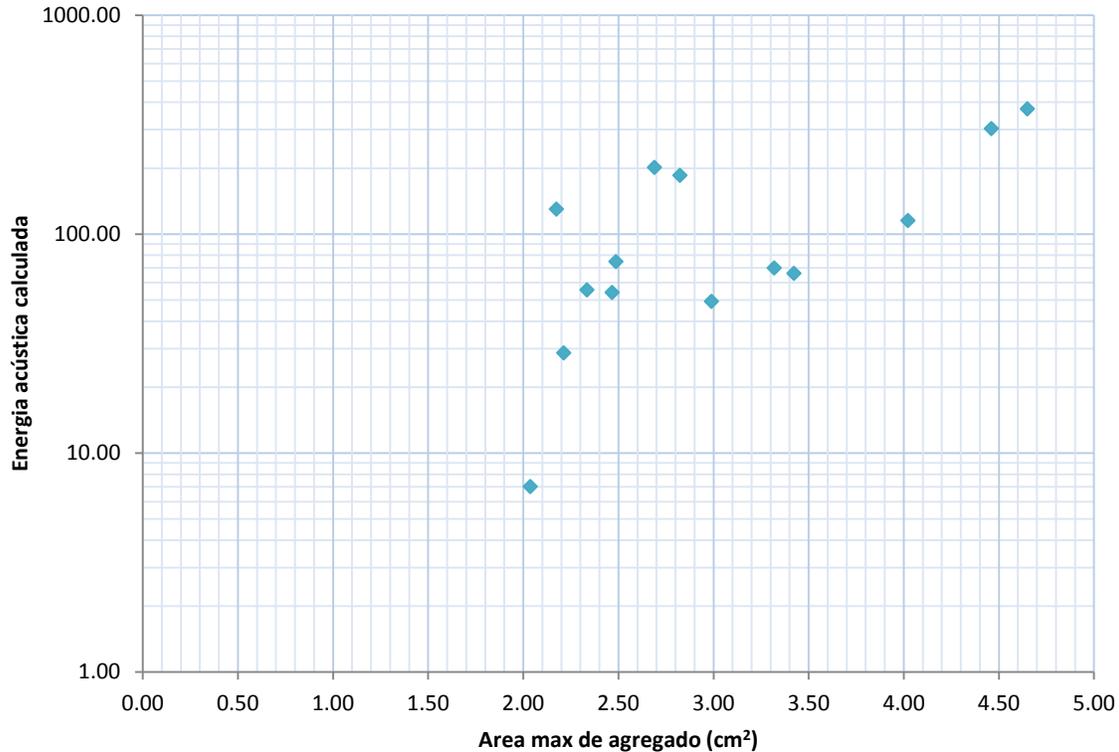


**Figura 3.10 Imagen de superficies de fractura sin procesamiento**



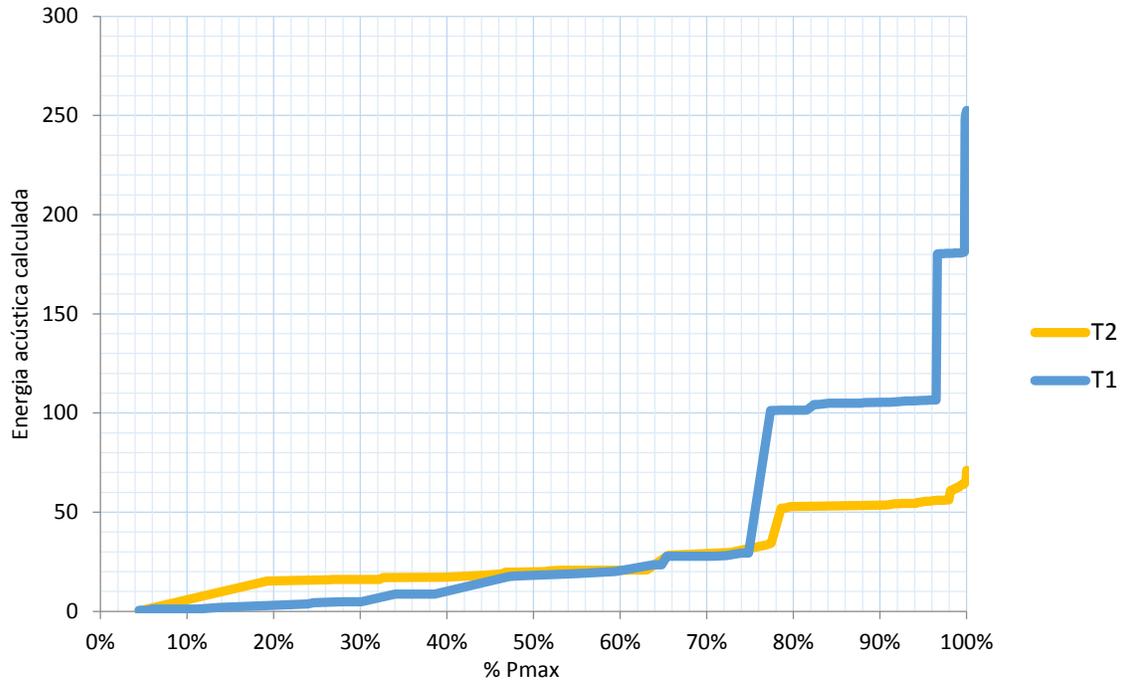
**Figura 3.11 Imagen de superficies de fractura procesadas**

Al realizar las correlaciones entre el tamaño máximo de agregados presentes en las superficies de falla analizados en cada probeta y el nivel de energía, pudo observarse que el nivel de energía acústica liberada es mayor en aquellos elementos de concreto con agregados más grandes en la trayectoria de falla.



**Figura 3.12 Relación entre TMA y energía acústica calculada**

En la Figura 3.13 se muestra el desarrollo de la energía acústica liberada durante el ensaye correspondiente a la serie T1 correspondiente a una probeta que contiene un área máxima de agregado de 5.73 cm<sup>2</sup>, mientras que el área máxima de agregado de la serie T2 es 4.02 cm<sup>2</sup>. Se aprecia claramente que el registro de energía acústica es mayor en T1 después del 75% del valor máximo de carga (Pmax) entre ambas probetas.



**Figura 3.12 Relación entre TMA y energía acústica calculada**

La siguiente relación obtenida entre agregados y energía, es la forma en que se encuentra el agregado sobre la superficie de ruptura, analizando si el agregado se encuentra fracturado o si éste fue desprendido de la interfaz de pasta cementante.

Cuando el agregado se fractura, conserva aproximadamente la misma proporción de área en ambas caras de falla, mientras que cuando se desprende, éste bordea la interfaz del agregado dejando un vacío en una de las caras, lo cual es detectado por el procesamiento de imágenes.

Ambas situaciones generan comportamientos diferentes en la energía acústica liberada. Por un lado, el desprendimiento manifestado a través de un mayor diferencial de áreas ( $\Delta A$ ) entre superficies de ruptura, deriva en una liberación menor de energía acústica, mientras que la fractura de los agregados (menor diferencia de área) genera una mayor liberación de energía acústica.

## 4 Conclusiones

---

A partir de las pruebas realizadas, pudo observarse que el proceso de agrietamiento temprano en el concreto comienza cuando se somete entre el 15 y 30% de la carga máxima aplicada en las pruebas de flexión en 4 puntos, lo cual pudo corroborarse a partir de la aparición de los primeros eventos acústicos registrados durante las pruebas de laboratorio. La asociación entre estos eventos y el proceso de microfisuración temprana en el concreto, pudo obtenerse a partir de los registros de amplitud máxima de los eventos registrados en esta etapa, los cuales presentaron magnitudes menores al 10% de las magnitudes máximas registradas durante el periodo de prueba.

A través de los registros continuos de emisiones acústicas a lo largo de las pruebas, fue posible conocer la evolución del deterioro en el concreto. Pudo observarse un incremento sustancial en frecuencia de eventos acústicos a partir del 75% de la carga máxima aplicada en cada elemento ensayado. Por otro lado, se vio que la energía acústica asociada a esos eventos se magnifica después del 75% de la capacidad final del elemento a flexión.

A través del análisis de imagen de las superficies de falla en el concreto, se analizó la relación entre el tamaño máximo de los agregados en estas superficies y las respuestas acústicas durante el proceso de degradación, encontrando que en general, en aquellas superficies de falla con los agregados de mayor tamaño, la liberación de energía acústica fue mayor.

Además, derivado de este análisis, se encontró que en los especímenes en los que la superficie de falla se formó en la zona de transición entre el agregado grueso y la pasta, la energía acústica liberada fue sustancialmente menor que en los especímenes en los que la superficie de falla incluyó la fractura de los agregados gruesos.

Aunque la respuesta de este material altamente heterogéneo depende de su constitución interna final en el elemento estructural, se pudieron establecer las correlaciones mencionadas y conocer la respuesta de emisiones acústicas durante todo el proceso de deterioro del material, hasta su falla final. Los resultados obtenidos en el estudio alientan en torno al uso de esta técnica no destructiva como una posible herramienta para la evaluación y detección de daño en elementos estructurales de concreto, sometidos a estados de esfuerzos diversos.

Debe estudiarse el efecto de la variación de las propiedades mecánicas del concreto en las emisiones acústicas, así como la influencia que tienen las proporciones de la mezcla de diseño de este material en las respuestas acústicas.

## 5 Referencias bibliográficas

---

Aggelis, D., Soulioti, D. & Sapouridis, N., 2011. Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete. *Const Build Mater*, pp. 4126-1131.

Albdelrahman, M., ElBatanouny, M. & Ziehl, P., 2014. Acoustic emission based damage assessment method for prestressed concrete structures: Modified index of damage. *Engin Estruc*, Issue 60, pp. 258-264.

Anon., 2010. Effectiveness of nonlinear ultrasonic and acoustic emission evaluation of concrete with distributed damages. *Mater. Design*, Volumen 31, p. 3777–3784.

Bazant, Z. P. & Xu, K., 1991. Size effect in fatigue fracture of concrete. *ACI Mater J*, 88(4), p. 390–399..

Behnia, A., Chai, H. & Shiotani, T., 2014. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. *Constr Bild Matter*, Issue 65, pp. 282-302.

Behnia, A. y otros, 2014. Integrated non-destructive assessment of concrete structures under flexure by acoustic emission and travel time tomography. *Const Build Mater*, Issue 67, pp. 202-215.

Bray, D. & McBride, D., 1992. *Nondestructive Techniques*. New York: John Wiley and Sons.

Carpinteri, A., Xu, J., Lacidogna, G. & Manuello, A., 2012. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures. *Cemet Conc Compos*, pp. 529-537.

Carrion, F. J., Lomelí, M. G., Quintana, J. A. & Martínez, M., 2003. La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes.. *Publicacion Tecnica No. 231*, Issue 231.

Chen, Computational framework for durability assessment of reinforced concrete structures under coupled deterioration processes, 2006 tesis doctoral

Company, M. H., 205. *Physical Acoustic Corporation*. s.l.:s.n.

Crespo, S. E., Carrión, F. & Quintana, J. A., 2013. Analisis del deterioro estructural por fatiga y prognosis de un puente tipico de concreto utilizando simulacion Montecarlo. *Publicacion Tecnica No. 379*, Issue 379.

ElBatanouny, M. y otros, 2014. Acoustic emission monitoring for assessment of prestressed concrete beams. *Constr Bild Mater*, Issue 58, pp. 46-53.

Farny J. and Beatrix Kerkhoff, Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, concrete technology, [http://www.cement.org/docs/default-source/fc\\_concrete\\_technology/is413-02---diagnosis-and-control-of-alkali-aggregate-reactions-in-concrete.pdf?sfvrsn=2](http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is413-02---diagnosis-and-control-of-alkali-aggregate-reactions-in-concrete.pdf?sfvrsn=2)

Forman, R. G. & Kearney, V. E., 1967.. Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures. J. Fluids Eng., 89(3), pp. 459-463.

Gonzalez, O. M., 2005. Aspectos fundamentales del concreto reforzado. Mexico: Limusa.

Goscyn'ska, B., 2014. Analysis of the process of crack initiation and evolution in concrete with acoustic emission testing. ARCH CIV MECH ENG, Volumen 14, p. 134–143.

Goszcyn´ ska, B. y otros, 2012. Experimental validation of concrete crack identification and location with acoustic emission method. Arch Civ Mech Eng, Volumen 12, pp. 23-28.

Haneef, T., Kumari, k. & Mukhopadhyay, C., 2013. Influence of damage in the acoustic emission parameters. Cem conc comp, pp. 09-16.

IDU, I. d. D. U., 2007. Consultoría para el diagnóstico, revisión de capacidad de carga y diseño de reforzamiento del puente vehicular de la avenida Boyacá con rio Tunjuelo costado oriental, Bogotá D.C., BOGOTA: s.n.

International, A., 1998. Nondestructive Evaluation and Quality Control. ASM Metals Handbook 9th ed. s.l.:s.n.

Kentaro, o. & Masayasu, O., 2010. Crack classification in concrete based on acoustic emission. Constr. Build Mater., Volumen 24, p. 2339–2346.

Kocur, G., Vogel, T. & Saenger, E., 2011. Crack localization in a double-punched concrete cuboid with time reverse modeling of acoustic emissions. Int J Fract, 171(DOI 10.1007/s10704-011-9621-y), pp. 1-10.

McLaskey, G., Glaser, S. & Grosse, C., 2010. Beamforming array techniques for acoustic emission monitoring of large concrete structures. Jour Sound Vibr, pp. 2384-2394.

Nor, M. y otros, 2014. Diagnostic of fatigue damage severity on reinforced concrete beam using acoustic emission technique. Engin Fail Analys, pp. 1--9.

P.C, P. & F., E., 1960. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Journal of Basic Engineering, Volumen 85.

Santosh, G. & Chandra, J., 2010. Fracture behavior of concrete–concrete interface using acoustic emission technique. Engi Fract Mech, pp. 908-924.

Aggelis, D., Soulioti, D. & Sapouridis, N., 2011. Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete. *Const Build Mater*, pp. 4126-1131.

Albdelrahman, M., ElBatanouny, M. & Ziehl, P., 2014. Acoustic emission based damage assessment method for prestressed concrete structures: Modified index of damage. *Engin Estruc*, Issue 60, pp. 258-264.

Anon., 2010. Effectiveness of nonlinear ultrasonic and acoustic emission evaluation of concrete with distributed damages. *Mater. Design*, Volumen 31, p. 3777-3784.

Bazant, Z. P. & Xu, K., 1991. Size effect in fatigue fracture of concrete. *ACI Mater J*, 88(4), p. 390-399.

Behnia, A., Chai, H. & Shiotani, T., 2014. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. *Constr Bild Matter*, Issue 65, pp. 282-302.

Behnia, A. y otros, 2014. Integrated non-destructive assessment of concrete structures under flexure by acoustic emission and travel time tomography. *Const Build Mater*, Issue 67, pp. 202-215.

Bray, D. & McBride, D., 1992. *Nondestructive Techniques*. New York: John Wiley and Sons.

Carpinteri, A., Xu, J., Lacidogna, G. & Manuello, A., 2012. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures. *Cemet Conc Compos*, pp. 529-537.

Carrion, F. J., Lomelí, M. G., Quintana, J. A. & Martínez, M., 2003. La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes. *Publicación Técnica No. 231*, Issue 231.

Company, M. H., 205. *Physical Acoustic Corporation*. s.l.:s.n.

Crespo, S. E., Carrión, F. & Quintana, J. A., 2013. Análisis del deterioro estructural por fatiga y pronóstico de un puente típico de concreto utilizando simulación Montecarlo. *Publicación Técnica No. 379*, Issue 379.

ElBatanouny, M. y otros, 2014. Acoustic emission monitoring for assessment of prestressed concrete beams. *Constr Bild Mater*, Issue 58, pp. 46-53.

Erdem, Influence of the micro- and nanoscale local mechanical properties of the interfacial transition zone on impact behavior of concrete made with different aggregates, *Cement and Concrete Research*, 2012.

Forman, R. G. & Kearney, V. E., 1967.. Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures. *J. Fluids Eng.*, 89(3), pp. 459-463.

Gonzalez, O. M., 2005. Aspectos fundamentales del concreto reforzado. Mexico: Limusa.

Goszcyn'ska, B., 2014. Analysis of the process of crack initiation and evolution in concrete with acoustic emission testing. *ARCH CIV MECH ENG*, Volumen 14, p. 134–143.

Goszczyńska, B. y otros, 2012. Experimental validation of concrete crack identification and location with acoustic emission method. *Arch Civ Mech Eng*, Volumen 12, pp. 23-28.

Haneef, T., Kumari, k. & Mukhopadhyay, C., 2013. Influence of damage in the acoustic emission parameters. *Cem conc comp*, pp. 09-16.

IDU, I. d. D. U., 2007. Consultoría para el diagnóstico, revisión de capacidad de carga y diseño de reforzamiento del puente vehicular de la avenida Boyacá con río Tunjuelo costado oriental, Bogotá D.C., BOGOTA: s.n.

International, A., 1998. Nondestructive Evaluation and Quality Control. *ASM Metals Handbook 9th ed.* s.l.:s.n.

Kentaro, o. & Masayasu, O., 2010. Crack classification in concrete based on acoustic emission. *Constr. Build Mater.*, Volumen 24, p. 2339–2346.

Kocur, G., Vogel, T. & Saenger, E., 2011. Crack localization in a double-punched concrete cuboid with time reverse modeling of acoustic emissions. *Int J Fract*, 171(DOI 10.1007/s10704-011-9621-y), pp. 1-10.

McLaskey, G., Glaser, S. & Grosse, C., 2010. Beamforming array techniques for acoustic emission monitoring of large concrete structures. *Jour Sound Vibr*, pp. 2384-2394.

Neville A., *Tecnología del concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1999.

Nor, M. y otros, 2014. Diagnostic of fatigue damage severity on reinforced concrete beam using acoustic emission technique. *Engin Fail Analys*, pp. 1--9.

P.C, P. & F., E., 1960. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Journal of Basic Engineering*, Volumen 85.

Santosh, G. & Chandra, J., 2010. Fracture behavior of concrete–concrete interface using acoustic emission technique. *Engi Fract Mech*, pp. 908-924.

Santosh, G. & Chandra, K., 2012. Use of acoustic emissions in flexural fatigue crack growth studies on concrete. *Eng Fract Mech*, Volumen 87, pp. 36-47.

Shah, Non-linear ultrasonic evaluation of damaged concrete based on higher order harmonic generation, *Materials and Design*, 2009.

Shahidan, S., Pulin, R., Bonori, M. & Holdfird, K., 2013. Damage classification in reinforced concrete beam by acoustic emission signal analysis. *Constr Build Mater*, Volumen 45, pp. 78-86.

Shaowei, H., Jun, L. & Feipeng, X., 2013. Evaluacion of concrete fracture procedure based on acoustic emission parameters. *Const. Build Mater.*, Volumen 47, pp. 1249-1256.

Slowik, V., Plizzari, G. & Saouma, V., 1996. Fracture of concrete under variable amplitude fatigue loading. *Mater J.*, 93(3), pp. 272-283.

Soulioti, D. y otros, 2009. Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending. *Const Build Mater*, Issue 23, pp. 3532-6.

Spencer, F., 1996. Visual Inspection Research Project on Benchmark Inspection. s.l.:Department of Transportation, Federal Aviation Administration.

Suzuki, T. & Ohtsu, M., 2014. Damage estimation of concrete canal due to earthquake effects by acoustic emission method. *Constr Build Mater*, pp. 186-191.

Viday, R. & Raghu, P., 2011. Fracture analysis of concrete using singular fractal functions with lattice beam network and confirmation with acoustic emission study. *Theor. Appl. Fract. Mec.*, Volumen 55, p. 192–205.

Vidya, R. & Raghu, B., 2012. Damage limit states of reinforced concrete beams subjected to incremental cyclic loading using relaxation ratio analysis of AE parameters. *Constr build Mater*, Volumen 35, p. 139–148.

Walker, E. K., 1970. Effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-t3 and 7075-t6 aluminum. *ASTM*, Volumen 462, pp. 1-14.

Yasir Alam, S., Saliba, J. & Loukili, A., 2014. Fracture examination in concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques. *Construc Build Mater*, pp. 232-242.

Zanuy, C., 2008. Analisis seccional de elementos de hormigon armado sometidos a fatiga, incluyendo secciones entre fisuras. s.l.:s.n.



## 6 Anexo

---

Con el fin de ejecutar el análisis paramétrico de las señales acústicas adquiridas durante las pruebas a los 30 especímenes ensayados, se desarrollaron algoritmos en Matlab.

La importación de todos los datos generados durante la adquisición se hace a través de las siguientes líneas de programación, entregando de forma ordenada en vectores columna la información útil para el análisis.

```
clc
%NOTA: cada vez que se use en diferente carpeta, hay que
cambiar la
%dirección o ruta de la carpeta de los archivos que se
pretende abrir
list=ls('H:\WAVELET_DATA\w19');
%%
for i=1:size(list,1);
    N{i}=strtok(list(i,:));%separa de uno en uno los elementos
de una lista
end

n=size(list,1)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%acá se jala los archivos tomando en cuenta los números que
da en carpeta
% arreglado para que jale tal como aparece el orden en las
carpetas
%tomando en cuenta las divisiones de cada sensor.
```

```
INI=1;%archivo de carpeta que se quiera jalar
FI=74; %final que se pretenda de carpeta
IN=INI+3;
FIN=FI+3;
S=IN-1;

for j=(IN:FIN)
%for j=(217:230) % comenzando a leer desde el archivo 5 hasta
n los primeros 4 son residuales.
M=importdata(N{j});
    vars = fieldnames(M);

for i = 1:length(vars)
    assignin('base', vars{i}, M.(vars{i}));
end
%%%%%% extrae el número de hit del textdata

M3=M.textdata;
M4=M3(7,:);%es la celda donde se encuentra el #de hit
[fi co]=size(M4);%como lo da en cellarray hay que saber que
columna se toma
if co==4
M41=M4(1,3);%se está tomando solo la columna de número
ej."000"
else
    MM4=M4(:,1);%en algunos archivos solo co=2 en lugar de
co=4
    MM41=char(MM4);
    [LE,LE1]=size(MM41);
    M41=MM41(1,13:LE1);
end
```

```
M42=char(M41);

M43=(sscanf(M42,'%f'));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
M6(j-S)=M43;
%M6(j-4)=M43;%% crea un vector con el número de hit
for i=9:15360 %desde la fila 9 del archivo hasta la 1032
final

    M1((i-8),(j-S))= M.textdata(i,1);
    M2((i-8),(j-S))= str2double(M1((i-8),(j-S)));

end

M7=[M6;M2];
%%para ordenar la matriz

[L,L1]=size(M2);
for q=1:L1-1
    V1=M7(1,q:L1);
    Mn=min(V1);
    aux=M7(:,q);
    u=q;
    while M7(1,u)~=Mn
        u=u+1;
    end
    M7(:,q)=M7(:,u);
    M7(:,u)=aux;
end
```

end

El código de programación para el análisis de cuentas acústicas de una señal a partir del umbral de 35dB=0.0056 mV. Para este procedimiento debe contarse con los datos generados en el vector columna A1.

```
%genera las cuentas
%se elimina los datos menores que el umbral rellorando la
matriz de cero
    % se debe correr ambos ciclos ya que son separados
    clc
A=input('SENSOR');
[fiA,coA]=size(A); % se debe contar con la matriz A para
correrlo
MCO=zeros(fiA,coA);
for i=1:fiA
for j=1:coA
if A(i,j)>=0.0056 % acá se aplica el valor del umbral
10^(dB/20)
MCO(i,j)=A(i,j);
End;end;end
ZCO=zeros(1,coA);%se aplica un contador de eventos por cada
hit(count)
for i=2:fiA-1
for j=1:coA-1
if MCO(i,j)~=0 & MCO(i+1,j)==0
ZCO(1,j)=ZCO(1,j)+1;% este es el contador de eventos
end;end;end
ZCO'
```

La energía elástica liberada en cada hit es identificada dentro de los parámetros característicos de análisis. Éste parámetro es considerado como el área debajo de la curva de la señal, tomando en cuenta que lo ideal es que ésta sea una señal purificada (Behnia, et al., 2014)

$$E_i = \int_{t_0}^{t_i} V^2(t) dt \quad \text{Ec. 0.1}$$

Donde  $V$  es voltaje transitorio de cada canal, y  $t_0$ ,  $t_1$  es el tiempo de inicio y fin respectivamente del voltaje transitorio grabado.

El código utilizado para las señales adquiridas fue el siguiente.

```
%rutina para generar energía sin ruido partiendo del umbral
máximo del
%ruido
E_SR1=ZPru1(2:15353,:);
E_SR2=ZPru2(2:15353,:);
E_SR3=ZPru3(2:15353,:);
E_SR4=ZPru4(2:15353,:);
E_SR5=ZPru5(2:15353,:);
E_SR6=ZPru6(2:15353,:);
[f1,c1]=size(E_SR1);
for i=1:1:f1
for j=1:1:c1
    b1= max(ZPru1(2:400,j));
    if ZPru1(i,j)<=b1
        E_SR1(i,j)=0;
    end
    b1= max(ZPru1(2:400,j));
    if ZPru1(i,j)<=b1
        E_SR1(i,j)=0;
```

```

end
b2= max(ZPru2(2:400,j));
if ZPru2(i,j)<=b2
    E_SR2(i,j)=0;
end
b3= max(ZPru3(2:400,j));
if ZPru3(i,j)<=b3
    E_SR3(i,j)=0;
end
b4= min(ZPru4(2:400,j));
if ZPru4(i,j)>=b4
    E_SR4(i,j)=0;
end
b5= min(ZPru5(2:400,j));
if ZPru5(i,j)>=b5
    E_SR5(i,j)=0;
end
b6= min(ZPru6(2:400,j));
if ZPru6(i,j)>=b6
    E_SR6(i,j)=0;
end
end
end
Energy1=[trapz(E_SR1);trapz(E_SR3);trapz(E_SR3)]';
Energy2=[trapz(E_SR4);trapz(E_SR5);trapz(E_SR6)]';
ESR=Energy1-Energy2;% energia total sin ruido
[f,c]=size(Energy1); EACUM=zeros(f,3); EACUM(1,:)=ESR(1,:);
for i=1:1:f-1
    for j=1:1:3
        EACUM(i+1,j)=EACUM(i,j)+ESR(i+1,j);
    end
end
;end

```



INSTITUTO  
MEXICANO DEL  
TRANSPORTE

SCT  
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES  
Y TRANSPORTES



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000  
CP 76700, Sanfandila  
Pedro Escobedo, Querétaro, México  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>