

Evaluación de daños en estructuras de concreto utilizando sensores piezoeléctricos

A. Narayanan¹, K. V. L. Subramaniam*¹

*Autor de Contacto: kvls@iith.ac.in

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.173>

Recepción: 10-08-2016 | Aceptación: 19-12-2016 | Publicación: 31-01-2017

RESUMEN

Los sensores inteligentes PZT (Lead Zirconate Titanate) basados en piezoeléctricos ofrecen un potencial significativo para monitorear continuamente el desarrollo y la progresión de los daños internos en estructuras de concreto. Se investigan los cambios en el comportamiento resonante a través de la conductancia eléctrica medida, obtenida a partir de la respuesta electromecánica (EM) de un PZT unido a un sustrato de concreto para aumentar los niveles de daño. Los cambios en la resonancia de la conductancia EM se detectan antes de que aparezcan signos visibles de agrietamiento. La desviación cuadrática media de la raíz de la conductancia en los picos resonantes refleja con precisión el nivel de daño en el sustrato. Los hallazgos presentados aquí proporcionan una base para desarrollar una metodología de detección utilizando parches PZT para el monitoreo continuo de estructuras de concreto.

Palabras clave: PZT; impedancia electromecánica; conductancia; microfisuras.

Citar como: A. Narayanan, K. V. L. Subramaniam (2017). “Evaluación de daños en estructuras de concreto utilizando sensores piezoeléctricos”, Revista ALCONPAT, 7 (1), pp. 25-35, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.173>

¹Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Hyderabad, INDIA.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2017.

Damage assessment in concrete structures using piezoelectric based sensors

ABSTRACT

Piezoelectric based PZT (Lead Zirconate Titanate) smart sensors offer significant potential for continuously monitoring the development and progression of internal damage in concrete structures. Changes in the resonant behavior in the measured electrical conductance obtained from electro-mechanical (EM) response of a PZT bonded to a concrete substrate is investigated for increasing levels of damage. Changes in the conductance resonant signature from EM conductance measurements are detected before visible signs of cracking. The root mean square deviation of the conductance signature at resonant peaks is shown to accurately reflect the level of damage in the substrate. The findings presented here provide a basis for developing a sensing methodology using PZT patches for continuous monitoring of concrete structures.

Keywords: PZT; electro-mechanical impedance; conductance; microcracks.

Avaliação de danos em estruturas de concreto usando sensores piezoelétricos

RESUMO

Os sensores piezoelétricos inteligentes PZT (Lead Zirconate Titanate) oferecem um potencial significativo para o monitoramento contínuo do desenvolvimento e progressão de danos internos em estruturas de concreto. As alterações de ressonância através da medida da condutância elétrica obtida a partir da resposta eletromecânica (EM) de um PZT ligado a um substrato de concreto é investigada para níveis crescentes de danos.

As alterações no perfil de ressonância de condutância EM são detectadas antes de sinais visíveis de fissuras. O desvio quadrático médio da raiz do perfil de condutância nos picos ressonantes é mostrado para refletir com precisão o nível de dano no substrato. Os resultados aqui apresentados fornecem uma base para o desenvolvimento de uma metodologia de detecção usando PZT para monitoramento contínuo de estruturas de concreto

Palavras chave: PZT; impedância eletromecânica; condutância; microfissuras.

1. INTRODUCTION

El Monitoreo de la calidad Estructural (SHM) es un proceso de evaluación de la integridad estructural y del nivel de daños en la estructura durante su vida útil. El SHM está basado en procedimientos de evaluación no-destructiva (NDE) y su monitoreo continuo de los parámetros estructurales para determinar la intensidad y ubicación de los daños. Eso incluye sensores, sistema de adquisición de datos y herramientas de procesamiento de la señal.

Señales de pérdidas de resistencia en concreto son frecuentemente cambios con fisuras visibles. Una vez que el concreto es un material frágil, que es débil a tracción, la fisuración es la manifestación de daños en el material que resulta de las tensiones de tracción en el material. Los daños inducidos por la tracción del concreto pueden resultar de la aplicación de cargas o de fuentes internas tales como retracción o corrosión de la armadura.

El inicio de daños ocurre en forma de microfisuras distribuidas, que eventualmente se localizan para formar fisuras. Muchas veces, el daño, particularmente en la fase inicial, no es directamente visible y al momento de aparecer las señales de pérdida de resistencia en la superficie de la estructura, puede haber daños significativos de la estructura presentando una degradación importante de la capacidad estructural.

La detección precoz de los daños, antes que las señales sean visibles superficialmente en la estructura es esencial para iniciar la intervención precoz, lo que podrá efectivamente aumentar la

vida útil de las estructuras. Métodos para detectar daño incipiente en forma de microfisuras son necesarios para brindar métodos eficaces de monitoreo de la calidad estructural y vida útil de las estructuras.

El uso de segmentos de PZT y pastillas se volvió popular en el monitoreo de la calidad estructural. Debido a la respuesta electromecánica acoplada de un material PZT, la respuesta mecánica de un adhesivo PZT sujeto a un potencial eléctrico aplicado es influenciado por la restricción elástica proporcionada por el material de la base.

El acoplamiento del segmento PST a una estructura altera la impedancia mecánica del PZT, lo que produce alteraciones en sus características de vibración. El monitoreo de cambios en el perfil de impedancia eléctrica debido a cambios en la impedancia mecánica efectiva del sustrato es la base para mediciones en Impedancia electromecánica (EM).

Las informaciones sobre el material que circunda están contenidas en el perfil de impedancia electromecánica (EMI) de un PZT. Comparando el rastro de impedancia asumida en su estado original y en cualquier otro momento, el daño estructural puede ser determinado. De manera general, se producen dislocaciones de frecuencia y de amplitud relativos al estado puro (sin daños) (Ayres et al., 1998, Chaudhry et al., 1995, Sun et al., 1995, Park et al., 2000, Zagrai y Giurgiutiu , 2001, Giurgiutiu et al., 2002, 2004, Peairs et al., 2004, Narayanan y Subramaniam, 2016a).

La aplicación da técnica EMI para la detección de daños en estructuras de concreto requiere un estudio cuidadoso de la alteración de la conformación del sustrato para diferentes formas de daños del material del sustrato desde los estados incipientes hasta los estables visiblemente. El uso de PZTs para el monitoreo de la calidad de la estructura de concreto fué demostrado por la habilidad de la técnica EMI de registrar cambios debido a la formación de fisuras antes de la falla (Park et al., 2000; Narayanan y Subramaniam, 2016b).

Diversos estudios de daños del concreto usando mediciones basadas en impedancia de PZTs fueron llevados usando los defectos incorporados y daños artificiales sobre la forma de cortes de máquina (Tseng y Wang, 2004; Dongyu et al., 2010; Wang et al., 2013). El método de impedancia EM también ha sido usado para determinar la ubicación de una fisura, induciendo fisuras en diferentes posiciones y profundidades realizando una correlación cruzada como índice de daño (Wang et al., 2013). Aún cuando el uso de daño artificial brinde una percepción significativa, no es representativo de la conformidad del sustrato bajo tensión/carga induciendo daños al material.

El uso del potencial de EMI en mediciones basadas en superficies montadas de PZT para identificar la formación de daño incipiente en estructuras de concreto es evaluado en este artículo. Son investigadas las relaciones entre formas de daño material, indicación visual de daños, conformidad mecánica del material y modos resonantes del perfil de conductancia de PZT relacionado al sustrato de concreto. La variación en las tensiones superficiales para niveles de incremento de carga es monitoreada usando la Correlación de Imagen Digital (DIC) y comparada con la parcela de conductancia del PZT. El desvío cuadrático promedio (RMSD) de la conductancia EM próximo al pico resonante es usado como un índice de daños y se presenta variación en la RMSD en diferentes estados de daño.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Los experimentos fueron realizados con cubos de concreto de 150 mm. Seis cubos fueron vaciados y curados por 90 días antes del ensayo. Los cubos fueron conectados con segmentos de PZT exactamente en el centro de la cara lateral del cubo usando epóxi bicomponente. Las propiedades del concreto y del epóxi son presentadas en la Tabla 1. Tres cubos fueron ensayados hasta la ruptura para determinar la resistencia a la compresión del concreto.

Tabla 1. Propiedades de los materiales

Tipo	Tensión de ruptura promedio (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Densidad (ρ) (kg/m^3)	Coefficiente de Poisson (ν)
Cubo de concreto	52	36	2300	0.2
Epóxi	-	2	1400	0.36

Las caras frontales de los cubos fueron suavizadas y un patrón pulverizado fue creado para la medición de dislocaciones de superficie usando la técnica óptica de campo completa conocida como correlación de imagen digital (mostrada en la Figura 1a). Los perfiles de línea de base del PZT cuando se conectaron al sustrato fueron medidas. Se usaron en el estudio experimental placas de PZT de 20 mm x 20 mm de 1 mm de espesor. En una medición de Impedancia típica, la frecuencia varió entre 1 kHz y 0,5 MHz a una tensión aplicada de 1 V y los datos fueron recogidos a 800 frecuencias discretas. El promedio de cinco medidas fué tomado.

Los datos de Impedancia fueron recogidos a partir del adhesivo PZT en estado libre antes de conectar el PZT al cubo de concreto. El perfil de conductancia EM y la imagen fueron tomadas antes del inicio de la carga. Los cubos fueron sometidos a carga de compresión cíclica de magnitud creciente donde la amplitud de la carga fué aumentada en incrementos de 10% de la resistencia a compresión promedio en cada ciclo. El proceso de carga consistió en ciclos de carga y descarga alternados como se aprecia en la Figura 1b. Durante la carga, los perfiles de conductancia y la imagen para DIC fueron grabadas en el tope del ciclo de carga y posteriormente a descarga.

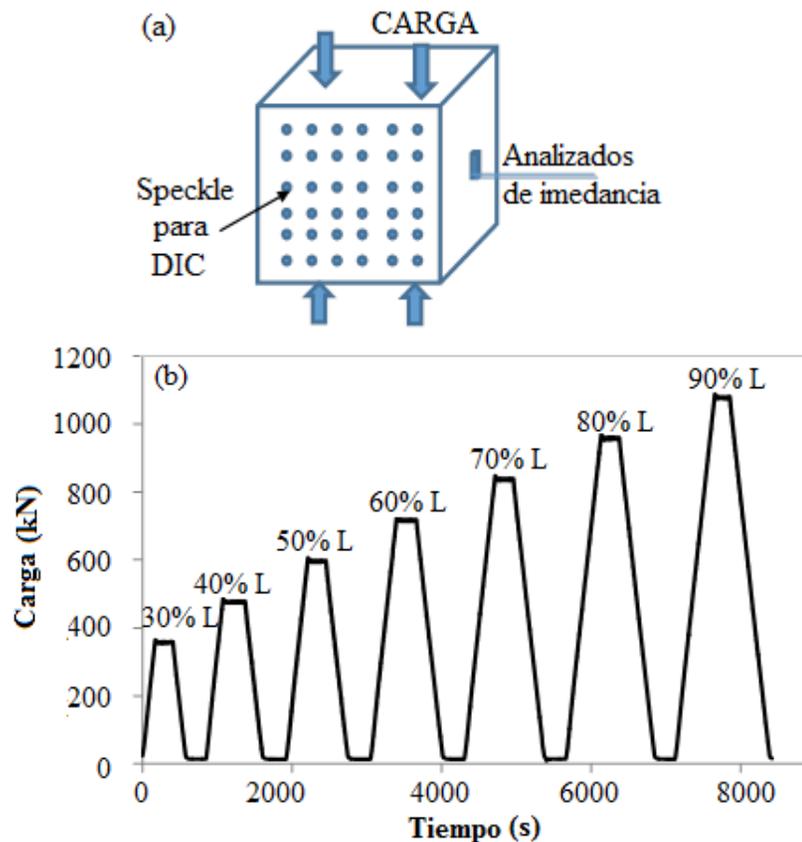


Figura 1. (a). Configuración experimental (b). Histórico de carga aplicada

3. IMPEDANCIA DEL PZT ELECTROMECAÁNICO

En un material PZT, la aplicación de un campo eléctrico resulta en deformación mecánica del material debido a las relaciones constitutivas electromecánicas acopladas. Para un segmento PZT conectado a un sustrato sujeto a una entrada eléctrica aplicada, el movimiento de la interface sujeto a condiciones de continuidad y conducido por la Impedancia mecánica combinada de la estructura y del PZT. El movimiento limitado, a su vez, produce una alteración en la Impedancia eléctrica medida.

El primer intento sistemático para derivar la Impedancia eléctrica del PZT que desconectada mecánicamente a una estructura usando una idealización 1D del sistema fué desarrollada por Liang et al., 1994. Las mejoras subsecuentes en el modelaje de la respuesta PZT incluyeron el efecto 1-D eficaz Modelo de PZT y niveles variables de idealización de la Impedancia estructural (Bhalla et al., 2004, Xu y Liu, 2002, Yang et al., 2005, 2008).

La mayoría de las soluciones analíticas disponibles y aplicable para idealizar 1 ó 2-D del PZT, sustrato ó ambos. Típicamente, la entrada eléctrica compleja (\bar{Y}) del segmento PZT para una dada entrada eléctrica a una frecuencia puede ser representada como una función de $\bar{Y}(Z_A, Z_S, \omega, l_i, E)$ donde Z_A y Z_S son la Impedancia mecánica del PZT y del sustrato, respectivamente. l_i representa las dimensiones del segmento (largo, ancho ó espesor) y E es el campo eléctrico aplicado para actuación con frecuencia circular ω .

La conductancia, que es la parte real de la admitancia del PZT libre y del PZT conectado al cubo de concreto de 150 mm, está ilustrada en la Figura 2. Se puede observar que los picos de resonancia cambian a la vibración libre del PZT también pueden ser identificados en respuesta al PZT anexado al cubo de concreto. Apenas tres picos prominentes son identificados en el espectro de conductancia del PZT conectado. Los picos 1 y 2 en el espectro de conductancia del PZT conectado corresponden a los modos 1 y 3, respectivamente, del PZT. El tercer pico en la respuesta de conductancia del PZT conectado tiene contribuciones de los modos 5 y 6 estrechamente espaciados del PZT.

Existen varios cambios prominentes asociadas con la frecuencia de los modos resonantes y la magnitud relativa de los picos resonantes. Hay una disminución notable en los valores de conductancia, una tendencia de línea de base creciente que aumenta la magnitud de la conductancia con frecuencia creciente y una alteración en las magnitudes relativas de los picos resonantes en el estado conectado. Existe también un alargamiento significativo de los picos de resonancia en comparación con el estado libre.

Los picos de resonancia cambian para frecuencias mas altas, con un mayor desvío de frecuencia en modos mas bajos.

La resistencia al movimiento del PZT por el sustrato se refleja en la disminución global del valor de conductancia. Aún cuando la conductancia del PZT libre sea esencialmente nula entre picos resonantes, la conductancia no es nula entre los picos resonantes para el PZT conectado. La resistencia al movimiento de un punto localizado en la superficie del cubo, dada por la Impedancia del punto de accionamiento, influye en el movimiento del PZT conectado. La dependencia de la frecuencia de la Impedancia del punto de accionamiento del sustrato se refleja en las variaciones relativas en las amplitudes y la tendencia general de aumento en el fondo de la conductancia medida. La influencia del sustrato puede también ser identificada con el aumento global de la frecuencia y alargamiento de los picos resonantes.

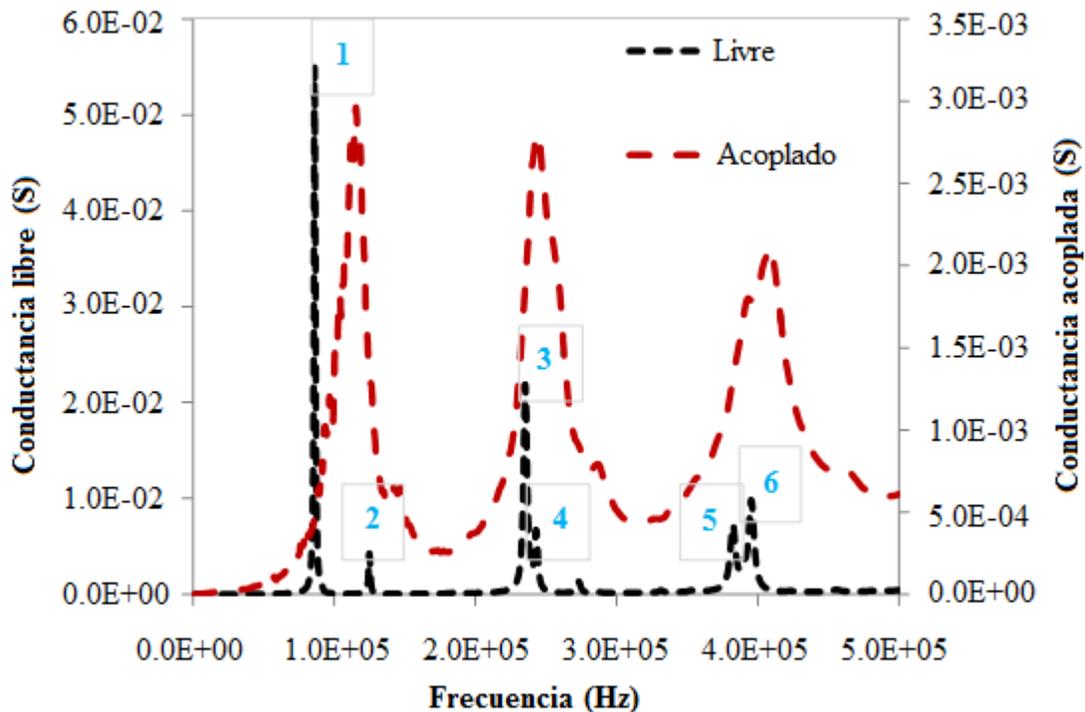


Figura 2. Espectro de conductancia de PZT en condición libre y acoplado con un cubo de concreto de 150 mm.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A partir de los resultados del análisis numérico del PZT conectado a la superficie realizado en COMSOL multiphysicsTM, el primer pico no fué bien definido para el concreto. El segundo pico fué bien definido y sensible a la alteración en el módulo de elasticidad. El segundo pico en la respuesta de conductancia EM del PZT conectado fué seleccionado para evaluar la influencia de los daños inducidos por la carga. Los perfiles de conductancia en el segundo pico de la respuesta de PZT conectada posterior a la descarga a partir de diferentes niveles de carga son mostradas en la Figura 3a, b.

El segundo pico es centrado en 255 kHz. La respuesta entre 245 y 265 kHz es trazada en las figuras. Los contornos de deformación horizontal en carga distinto obtenidos a partir de la técnica DIC son mostrados en el Figura 4. Es claramente identificado a partir del ploteo que la marca de descarga a 40% muestra un cambio para frecuencias más bajas. Esto se debe al daño incipiente producido en el concreto. El contorno de deformación horizontal muestra un aumento en los niveles de deformación (Figura 4). En la medida que el nivel de carga aumenta, el pico de resonancia en el perfil de conductancia muestra una dislocación para la izquierda consistente.

Comparando con la respuesta DIC medida, no hay señal visible de pérdida de resistencia o fisuras hasta 70% de la resistencia, mientras que algunos señales de ubicación son evidentes a 60% del pico. La ubicación de los daños en una fisura ocurre a 70% de la resistencia. Se observan alteraciones significativas en el pico resonante asociado a la ubicación. Posterior a la ubicación, se onbservan alteraciones significativas en la forma del pico ressonante. A 90% de la resistencia a la compresión, el pico mostró una disminución significativa en la amplitud y un achatamiento del pico. Esse achatamiento del pico está asociado a la formación de una fisura mayor en la superficie. Las marcas de conductancia asociadas al pico resonante tienen un buen acuerdo con la indicación de daños obtenidos a partir de mediciones de deformación superficial. Además de eso,

las alteraciones en la conductancia EM son observadas antes de cualquier señal visible de pérdida de resistencia.

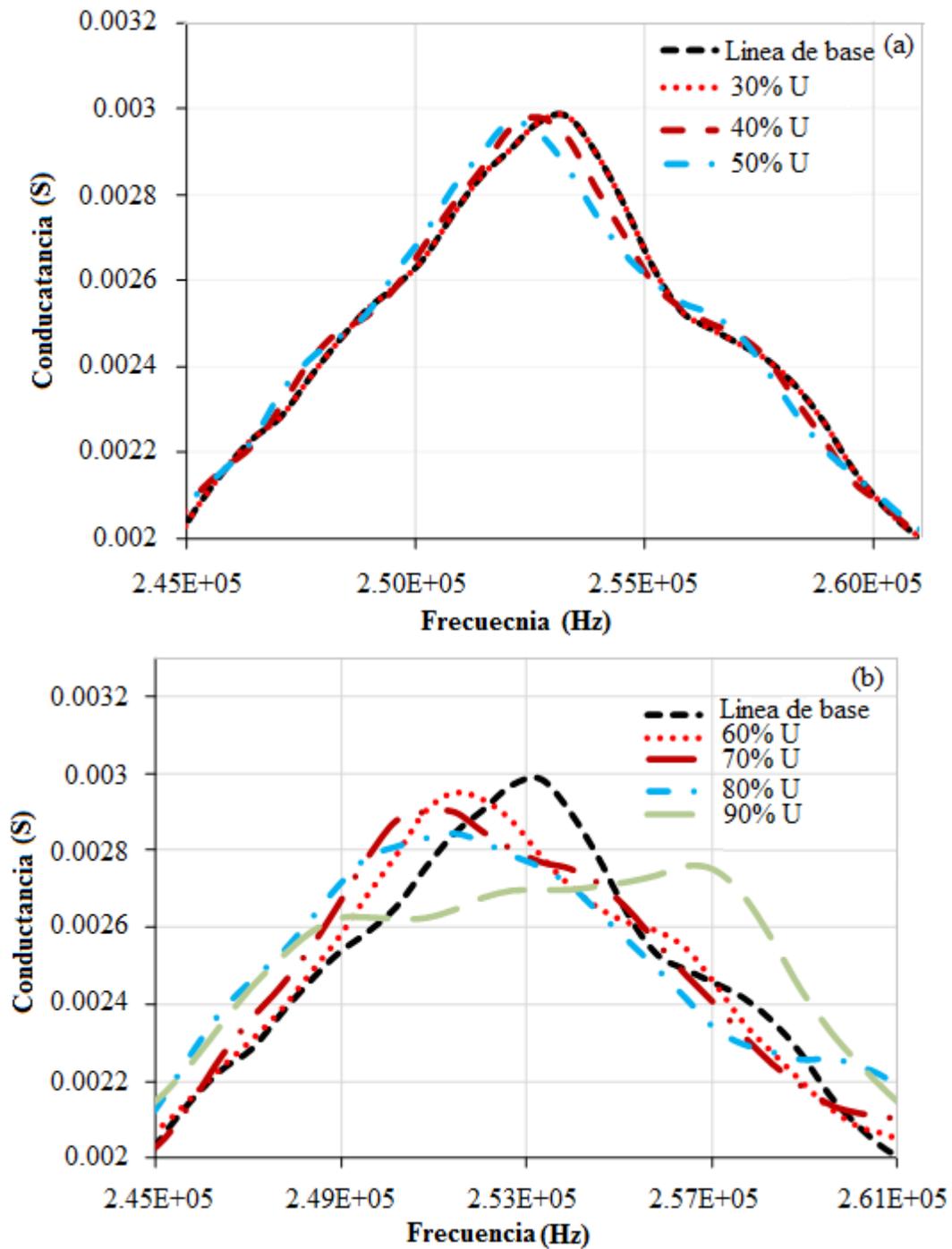


Figura 3. Perfiles de conductancia eléctrica: a. 30% -50% de la resistencia b. 60% -90% de la resistencia

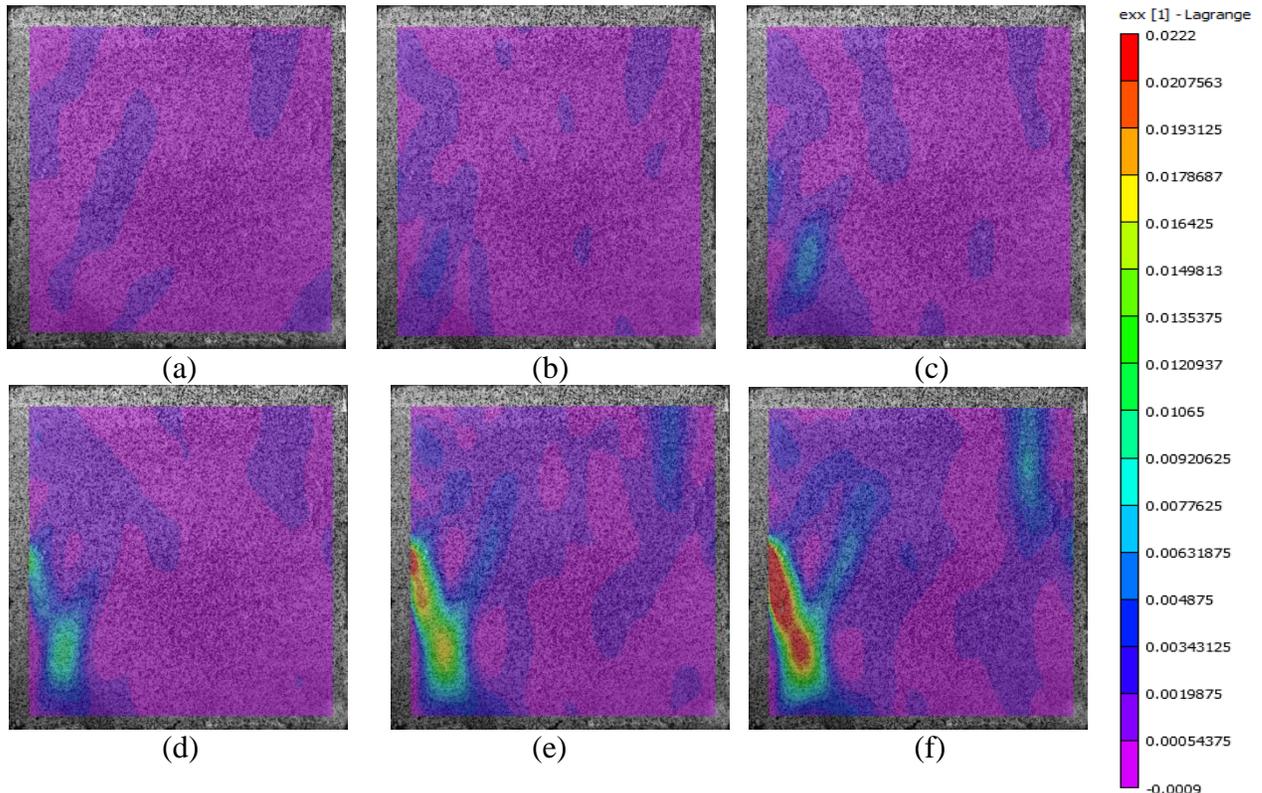


Figura 4. Contornos de deformación horizontal (e_{xx}) obtenidos utilizando a correlación de imagen digital (a) a 40%; (B) a 50%; (C) a 60%; (D) a 70%; (E) a 80%; E (f) a 90% de la resistencia.

El desvío cuadrático de la raíz (RMSD) es usado para medir las diferencias entre los valores de medición de línea de base del perfil de conductancia en el segundo pico resonante y los perfiles correspondientes en diferentes niveles de carga. El RMSD para el rango de frecuencia de 245 kHz a 260 kHz en relación a la medición de la línea de base fué calculado utilizando la ecuación (1), en que x_i y y_i son los perfiles obtenidos del transductor PZT conectado a la estructura antes y después del daño (o carga) con largo N . La dispersión en los resultados obtenidos de todos los especímenes está también trazada en la figura.

Se puede observar que, a pesar de la dispersión, existe una tendencia creciente de RMSD con cada nivel de carga como se aprecia en la Figura 5a. La variación en las tensiones verticales promedio registradas en el tope y al final de los dos ciclos de carga obtenidos a partir de mediciones DIC también es representada en la Figura 5b. Puede ser visto que el nivel de daño evaluado usando la variación RMSD del segundo pico resonante compara la evolución de la deformación plástica y aumento en la conformidad mecánica. Existe un aumento exponencial en la evolución de la deformación plástica con carga.

La deformación plástica es un indicador del nivel de daños en el material. Esto corresponde a la tendencia observada en la RMSD medida con carga.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2}} \quad (1)$$

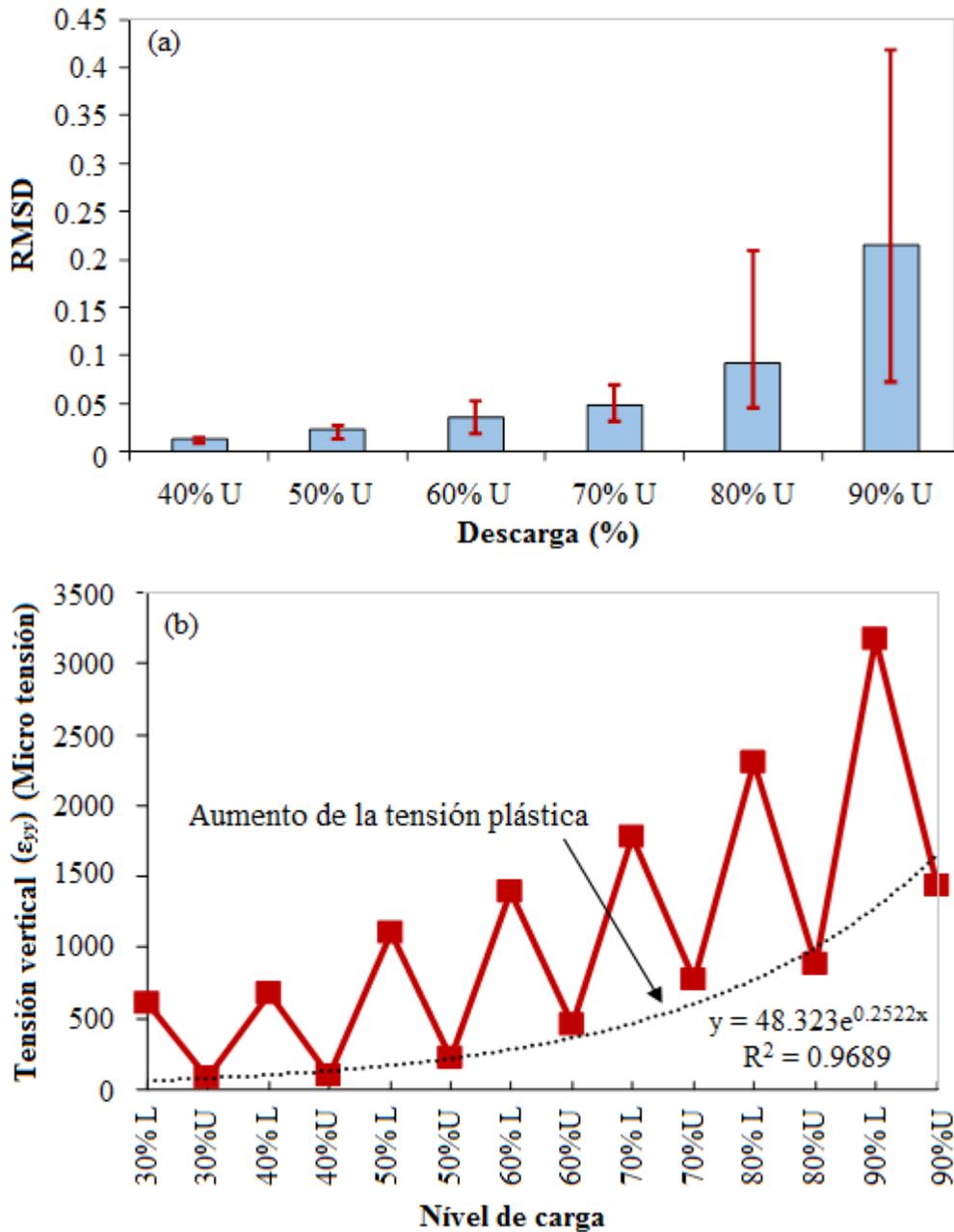


Figura 5. (a). RMSD del segundo pico de resonancia (b). Razón vertical promedio (ε_{yy}) obtenida de la DIC

5. CONCLUSIONES

El potencial de uso de mediciones de Impedancia EM de segmentos de PZT montados en la superficie para el monitoreo estructural de la condición de las estructuras de concreto es establecido. Se muestra que hay cambios en el comportamiento de resonancia en la respuesta de conductancia EM del PZT conectado al sustrato de concreto con daños crecientes. El sensor PZT detecta daños incipientes significativamente mas temprano que la aparición de señales visibles de daños. Existe una reducción de amplitud y desvío de frecuencia del pico de resonancia PZT con

un aumento en el daño del sustrato de concreto. En niveles de daño más elevados, hay achatamiento del pico de resonancia asociado a la ubicación y formación de una fisura mayor.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fué financiado por la donación SB / S3 / CEE / 0013/2013 de la Unidad SERB del Departamento de Ciencia y Tecnología del Ministério da Ciencia y Tecnología de la Índia.

7. REFERENCIAS

- Ayres, J. W., Lalande, F., Chaudhry, Z., and Rogers, C. A. (1998), “*Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures*”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No.5, pp.599-605.
- Bhalla, S., and Soh, C. K. (2004), “*Structural health monitoring by Piezo-Impedance Transducers. I: Modeling*”, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 17, No.4, pp.154–165.
- Chaudhry, Z., Joseph, T., Sun, F., and Rogers, C. A. (1995), “*Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/sensor patches*”, *Proceedings, SPIE North American Conference on Smart Structures and Materials*, pp.268-276.
- Dongyu, X., Chenga, X., Huanga, H., and Jiang, M. (2010), “*Identifying technology for structural damage based on the impedance analysis of piezoelectric sensor*”, *Construction and Building Materials*, Vol.24, No.12, pp. 2522-2527.
- Giurgiutiu, V., Zagrai, A. N., and Bao, J. J. (2002), “*Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring*”, *Structural Health Monitoring*, Vol.1, No.1, pp.41-61.
- Giurgiutiu, V., Zagrai, A. N., and Bao, J. J. (2004), “*Damage identification in aging aircraft structures with piezoelectric wafer active sensors*”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.15, No.9, pp.673-687.
- Liang, C., Sun, F. P., and Rogers, C. A. (1994), “*An impedance method for dynamic analysis of active material systems*”, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.116, No.1, pp.120-128.
- Lim, Y. Y., Bhalla, S., and Soh, C. K. (2006), “*Structural identification and damage diagnosis using self-sensing piezo-impedance transducers*”, *Smart Materials and Structures*, Vol.15, No.4, pp.987-995.
- Narayanan, A. and Subramaniam, K. V. L. (2016a), “*Experimental evaluation of load-induced damage in concrete from distributed microcracks to localized cracking on electro-mechanical impedance response of bonded PZT*”, *Construction and Building Materials*, Vol. 105, pp.536-544.
- Narayanan, A. and Subramaniam, K. V. L. (2016b), “*Sensing of damage and substrate stress in concrete using electro-mechanical impedance measurements of bonded PZT patches*”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 9, p.095011.
- Park, G., Cudney, H., and Inman, D. (2000), “*Impedance-based health monitoring of civil structural components*”, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.6, No.4, pp.153–160.
- Peairs, D. M., Park, G., and Inman, D. J. (2004), “*Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method*”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.15, No.2, pp.129-139.
- Sun, F. P., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C. A. (1995), “*Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator*”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.6, No.1, pp.134-139.
- Tseng, K. K., and Wang, L. (2004), “*Smart piezoelectric transducers for in situ health monitoring of concrete*”, *Smart Materials and Structures*, Vol.17, No.5, pp.1017-1024.

- Wang, D., Song, H., and Zhu. H. (2013), “*Numerical and experimental studies on damage detection of a concrete beam based on PZT admittances and correlation coefficient*”, Construction and Building Materials, Vol.49, pp.564–574.
- Xu, Y. G., and Liu, G. R. (2002), “*A modified electro-mechanical impedance model of piezoelectric actuator-sensors for debonding detection of composite patches*”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.13, No.6, pp.389-396.
- Yang, Y., Hu, Y., Lu, Y., (2008), “*Sensitivity of PZT impedance sensors for damage detection of concrete structures*,” Sensors, Vol. 8, No. 1, pp. 327-346.
- Yang, Y., Xu, J., and Soh, C. K. (2005), “*Generic impedance-based model for structure-piezoceramic interacting system*”, Journal of Aerospace Engineering, Vol.18, No.2, pp.93-101.
- Zagrai, A.N., and Giurgiutiu, V. (2001), “*Electro-mechanical impedance method for crack detection in thin plates*”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.12, No.10, pp.709-718.