

## Avaliação de danos em estruturas de concreto usando sensores piezoelétricos

A. Narayanan<sup>1</sup>, K. V. L. Subramaniam\*<sup>1</sup>

\* Autor de Contacto: [kvls@iith.ac.in](mailto:kvls@iith.ac.in)

DOI: xxxxx

Recebido: 10-08-2016 | Aceito: 19-12-2016 | Publicado: 31-01-2017

### 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.

**Citado como:** A. Narayanan, K. V. L. Subramaniam (2017). “Avaliação de danos em estruturas de concreto usando sensores piezoelétricos”, Revista ALCONPAT, 7 (1), pp. 25-35, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.173>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Hyderabad, India.

### Informação Legal

Revista ALCONPAT é uma publicação da Associação Latino-americana Controle de Qualidade, Recuperação Patologia e Construção, Internacional, A. C., Km. 6, antiga carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos ao No. 04-2013-011717330300-203 uso exclusivo, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional do Direito de Autor. Responsável pela atualização mais recente deste número, ALCONPAT Unidade Computing, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e imagens publicadas sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C é proibida. Qualquer discussão, incluindo a réplica dos autores, serão publicados na terceira edição do 2017, desde que a informação é recebida antes do encerramento da segunda edição de 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.

## Evaluación de daños en estructuras de concreto utilizando sensores piezoeléctricos

### 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.

## 1. INTRODUÇÃO

O Monitoramento de Saúde Estrutural (SHM) é um processo de avaliação da integridade estrutural e do nível de danos na estrutura durante sua vida útil. O SHM baseia-se em procedimentos de avaliação não-destrutiva (NDE) e monitoramento contínuo dos parâmetros estruturais para determinar a intensidade e localização dos danos. Isso envolve sensores, sistema de aquisição de dados e ferramentas de processamento de sinal.

Sinais de perdas de resistência em concreto são frequentemente associados com fissuras visíveis. Uma vez que o concreto é um material frágil, que é fraco na tração, a fissuração é a manifestação de danos no material que resulta das tensões de tração no material. Os danos induzidos pela tração no concreto podem resultar da aplicação de cargas ou de fontes internas tais como retração ou corrosão da armadura.

A iniciação de danos ocorre na forma de microfissuras distribuídas, que eventualmente se localizam para formar fissuras. Muitas vezes, o dano, particularmente nos estádios incipientes, não é diretamente visível e, no momento em que os sinais de perda de resistência surgem na superfície da estrutura, pode já haver danos significativos na estrutura e pode haver uma degradação significativa da capacidade da estrutura.

A detecção precoce dos danos, antes que os sinais visíveis apareçam na superfície da estrutura é essencial para iniciar a intervenção precoce, o que pode efetivamente aumentar a vida útil das estruturas. Métodos para detectar dano incipiente na forma de microfissuras são necessários para fornecer métodos eficazes de monitoramento da saúde estrutural e vida útil das estruturas.

O uso de segmentos de PZT e pastilhas se tornou popular no monitoramento da saúde estrutural. Devido à resposta eletromecânica acoplada de um material PZT, a resposta mecânica de um adesivo PZT sujeito a um potencial elétrico aplicado é influenciado pela restrição elástica proporcionada pelo material do substrato.

O acoplamento do segmento PST a uma estrutura altera a impedância mecânica do PZT, o que produz alterações em suas características de vibração. O monitoramento de mudanças no perfil de impedância elétrica devido a mudanças na impedância mecânica efetiva do substrato é a base para medições em impedância eletromecânica (EM).

As informações sobre o material envolvente estão contidas no perfil de impedância eletromecânica (EMI) de um PZT. Comparando a assinatura de impedância assumida no estado puro e em qualquer outro momento, o dano estrutural pode ser determinado. De um modo geral, produzem-se deslocamentos de frequência e de amplitude relativos ao estado puro (sem danos) (Ayres et al., 1998, Chaudhry et al., 1995, Sun et al., 1995, Park et al., 2000, Zagrai e Giurgiutiu, 2001, Giurgiutiu et al., 2002, 2004, Peairs et al., 2004, Narayanan e Subramaniam, 2016a).

A aplicação da técnica EMI para a detecção de danos em estruturas de concreto requer um estudo cuidadoso da alteração da conformidade do substrato para diferentes formas de danos no material do substrato desde os estádios incipiente até os estáveis visíveis. O uso de PZTs para o monitoramento de saúde da estrutura de concreto foi demonstrado pela habilidade da técnica EMI de registrar mudanças devido à formação de fissuras bem antes da falha (Park et al., 2000; Narayanan e Subramaniam, 2016b).

Diversos outros estudos de danos no concreto usando medições baseadas em impedância de PZTs foram conduzidos usando defeitos incorporados e danos artificiais sob a forma de cortes de máquina (Tseng e Wang, 2004; Dongyu et al., 2010; Wang et al., 2013). O método de impedância EM também tem sido usado para determinar a localização de uma fissura, induzindo fissuras em diferentes posições e profundidades e realizando uma correlação cruzada como índice de dano (Wang et al., 2013). Embora o uso de dano artificial forneça uma percepção significativa, ele não é representativo da conformidade do substrato sob tensão/carga induzindo danos no material.

O uso potencial de EMI em medições baseadas em superfície montada de PZT para identificar a formação de dano incipiente em estruturas de concreto é avaliado neste artigo. São investigadas as relações entre formas de dano material, indicação visual de danos, conformidade mecânica do material e modos ressonantes no perfil de condutância de PZT ligado a um substrato de concreto. A variação nas tensões superficiais para níveis incrementais de carga é monitorada usando a Correlação de Imagem Digital (DIC) e comparada com a parcela de condutância do PZT. O desvio quadrático médio (RMSD) da condutância EM próximo ao pico ressonante é usado como um índice de danos e é apresentada variação na RMSD em diferentes estados de dano.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados com cubos de concreto de 150 mm. Seis cubos foram moldados e curados por 90 dias antes do ensaio. Os cubos foram conectados com segmentos de PZT exatamente no centro da face lateral do cubo usando um epóxi bicomponente. As propriedades do concreto e do epóxi são apresentadas na Tabela 1. Três cubos foram ensaiados até a ruptura para determinar a resistência à compressão do concreto.

Tabela 1. Propriedades dos materiais

Tipo	Tensão de ruptura média (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade ( $\rho$ ) ( $kg/m^3$ )	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )
Cubo de concreto	52	36	2300	0.2
Epóxi	-	2	1400	0.36

As faces frontais dos cubos foram suavizadas e um padrão pulverizado foi criado para a medição de deslocamentos de superfície usando a técnica ótica de campo completa conhecida como correlação de imagem digital (mostrada na Figura 1a). Os perfis de linha de base do PZT quando ligadas ao substrato foram tomadas. Utilizaram-se no estudo experimental placas de PZT de 20 mm x 20 mm de 1 mm de espessura. Numa medição de impedância típica, a frequência variou entre 1 kHz e 0,5 MHz a uma tensão aplicada de 1 V e os dados foram recolhidos a 800 frequências discretas. A média de cinco medidas foi coletada.

Os dados de impedância foram coletados a partir do adesivo PZT no estado livre antes de ligar o PZT ao cubo de concreto. O perfil de condutância EM e a imagem foram tomadas antes do início do carregamento. Os cubos foram submetidos à carga de compressão cíclica de magnitude crescente onde a amplitude da carga foi aumentada em incrementos de 10% da resistência à compressão média em cada ciclo. O processo de carregamento consistiu em ciclos de carga e descarga alternados como mostrado na Figura 1b. Durante o carregamento, os perfis de condutância e a imagem para DIC foram gravadas no topo do ciclo de carga e após a descarga.

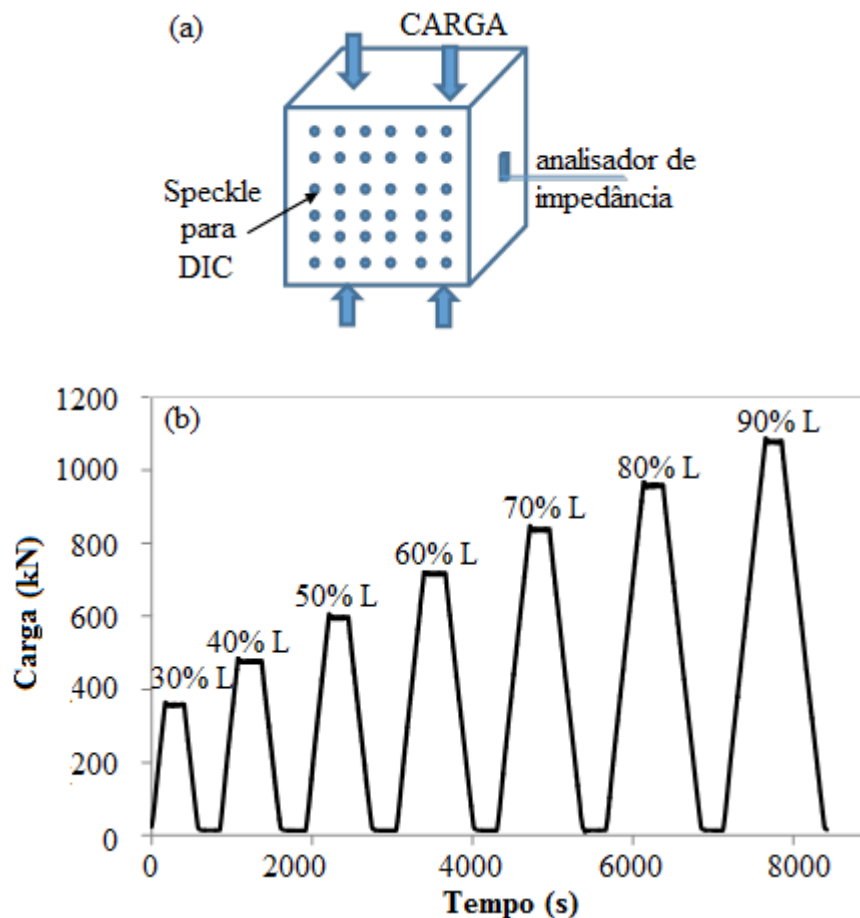


Figura 1. (a). Configuração experimental (b). Histórico do carregamento aplicado

### 3. IMPEDÂNCIA ELETROMECAÑICAS DOS PZT

Num material PZT, a aplicação de um campo elétrico resulta em deformação mecânica no material devido às relações constitutivas eletromecañicas acopladas. Para um segmento PZT ligado a um substrato sujeito a uma entrada elétrica aplicada, o movimento da interface sujeito a condições de continuidade  governado pela impedância mecânica combinada da estrutura e do PZT. O movimento limitado, por sua vez, produz uma alteração na impedância elétrica medida.

A primeira tentativa sistemática para derivar a impedância elétrica do PZT que é conectada mecanicamente a uma estrutura usando uma idealização 1D do sistema foi desenvolvida por Liang et al., 1994. As melhorias subsequentes na modelagem da resposta PZT incluíram o efeito 1-D eficaz Modelo de PZT e níveis variáveis de idealização da impedância estrutural (Bhalla et al., 2004, Xu e Liu, 2002, Yang et al., 2005, 2008).

A maioria das soluções analíticas disponíveis  aplicável para idealizações 1 ou 2-D do PZT, substrato ou ambos. Tipicamente, a entrada elétrica complexa ( $\bar{Y}$ ) do segmento PZT para uma dada entrada elétrica a uma frequência pode ser representada como uma função de  $\bar{Y}(Z_A, Z_S, \omega, l_i, E)$  onde  $Z_A$  e  $Z_S$  são a impedância mecânica do PZT e do substrato, respectivamente.  $l_i$  representa as dimensões do segmento (comprimento, largura ou espessura) e  $E$   o campo elétrico aplicado para atuação com frequência circular  $\omega$ .

A condutância, que é a parte real da admitância do PZT livre e do PZT ligado ao cubo de concreto de 150 mm, está ilustrada na Figura 2. Pode-se observar que os picos de ressonância associados à vibração livre do PZT também podem ser identificados em resposta ao PZT anexado ao cubo de concreto. Apenas três picos proeminentes são identificados no espectro de condutância do PZT ligado. Os picos 1 e 2 no espectro de condutância do PZT ligado correspondem aos modos 1 e 3, respectivamente, do PZT. O terceiro pico na resposta de condutância do PZT ligado tem contribuições dos modos 5 e 6 estreitamente espaçados do PZT.

Existem várias mudanças proeminentes associadas com a frequência dos modos ressonantes e a magnitude relativa dos picos ressonantes. Há uma diminuição notável nos valores de condutância, uma tendência de linha de base crescente que aumenta a magnitude da condutância com frequência crescente e uma alteração nas magnitudes relativas dos picos ressonantes no estado ligado. Existe também um alargamento significativo dos picos de ressonância em comparação com o estado livre.

Os picos de ressonância mudam para frequências mais altas, com um maior desvio de frequência em modos mais baixos.

A resistência ao movimento do PZT pelo substrato se reflete na diminuição global do valor de condutância. Embora a condutância do PZT livre seja essencialmente nula entre picos ressonantes, a condutância não é nula entre os picos ressonantes para o PZT ligado. A resistência ao movimento de um ponto localizado na superfície do cubo, dada pela impedância do ponto de acionamento, influencia o movimento do PZT ligado. A dependência da frequência da impedância do ponto de acionamento do substrato se reflete nas variações relativas nas amplitudes e na tendência geral de aumento no fundo da condutância medida. A influência do substrato pode também ser identificada com o aumento global da frequência e alargamento dos picos ressonantes.

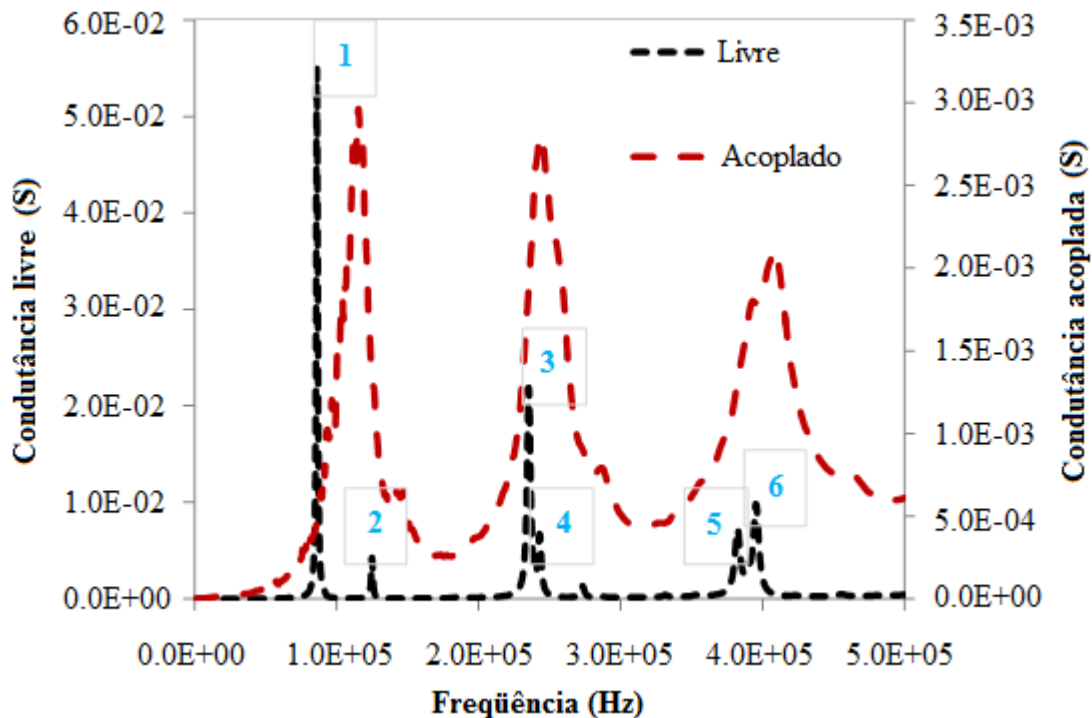


Figura 2. Espectro de condutância de PZT na condição livre e acoplado com um cubo de concreto de 150 mm.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos resultados da análise numérica do PZT ligado à superfície realizado em COMSOL multiphysics™, o primeiro pico não foi bem definido para o concreto. O segundo pico foi bem definido e sensível à alteração no módulo de elasticidade. O segundo pico na resposta de condutância EM do PZT ligado foi selecionado para avaliar a influência dos danos induzidos pela carga. Os perfis de condutância no segundo pico da resposta de PZT ligada após descarga a partir de diferentes níveis de carga são mostradas na Figura 3a, b.

O segundo pico é centrado em 255 kHz. A resposta entre 245 e 265 kHz é traçada nas figuras. Os contornos de deformação horizontal em carregamento distinto obtidos a partir da técnica DIC são mostrados na Figura 4. Pode ser claramente identificado a partir da plotagem que a assinatura de descarga a 40% mostra uma mudança para frequências mais baixas. Isto é devido ao dano incipiente produzido no concreto. O contorno de deformação horizontal mostra um aumento nos níveis de deformação (Figura 4). À medida que o nível de carga aumenta, o pico de ressonância no perfil de condutância mostra um deslocamento para a esquerda consistente.

Comparando com a resposta DIC medida, não há sinal visível de perda de resistência ou fissuras até 70% da resistência, enquanto alguns sinais de localização são evidentes a 60% do pico. A localização dos danos numa fissura ocorre a 70% da resistência. Observam-se alterações significativas no pico ressonante associado à localização. Após a localização, observam-se alterações significativas na forma do pico ressonante. A 90% da resistência à compressão, o pico mostrou uma diminuição significativa na amplitude e um achatamento do pico. O achatamento do pico está associado à formação de uma fissura maior na superfície. As assinaturas de condutância associadas ao pico ressonante têm um bom acordo com a indicação de danos obtidos a partir de medições de deformação superficial. Além disso, as alterações na condutância EM são observadas antes de qualquer sinal visível de perda de resistência.

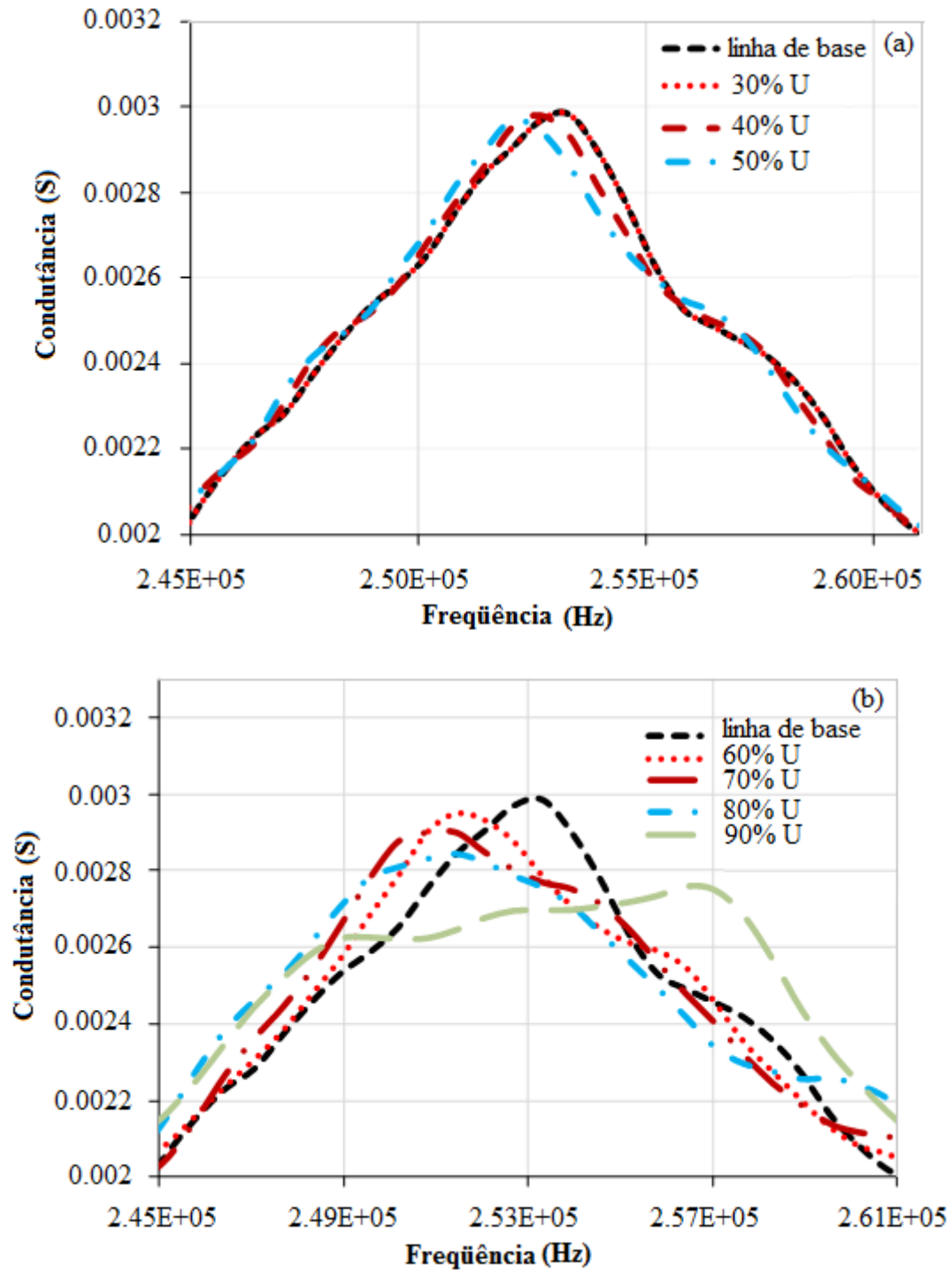


Figura 3. Perfis de condutância elétrica: a. 30% -50% da resistência b. 60% -90% da resistência

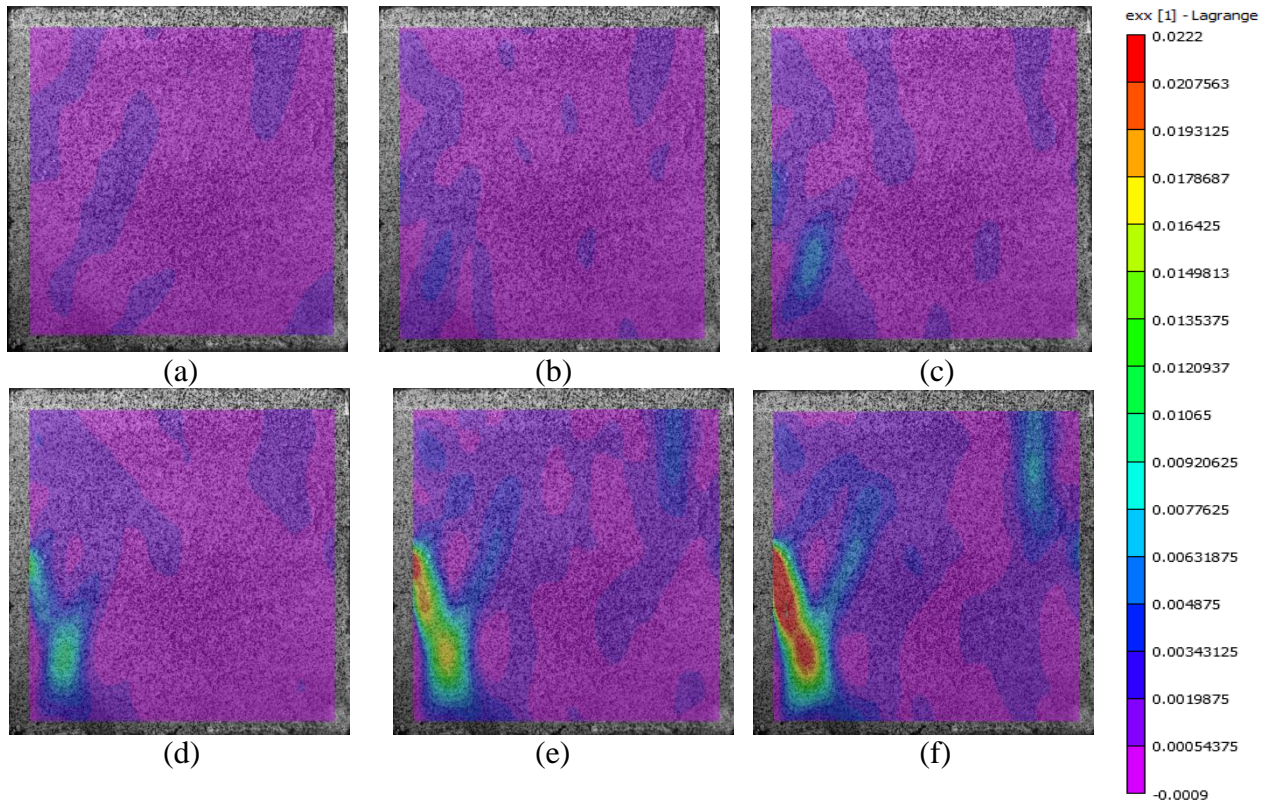


Figura 4. Contornos de deformação horizontal ( $e_{xx}$ ) obtidos utilizando a correlação de imagem digital (a) a 40%; (B) a 50%; (C) a 60%; (D) a 70%; (E) a 80%; E (f) a 90% da resistência.

O desvio quadrático da raiz (RMSD) é usado para medir as diferenças entre os valores de medição de linha de base do perfil de condutância no segundo pico ressonante e os perfis correspondentes em diferentes níveis de carga. O RMSD para a faixa de frequência de 245 kHz a 260 kHz em relação à medição da linha de base foi calculado utilizando a equação (1), em que  $x_i$  e  $y_i$  são os perfis obtidas do transdutor PZT ligado à estrutura antes e depois do dano (ou carregamento) com o comprimento N. A dispersão nos resultados obtidos de todos os espécimes está também traçada na figura.

Pode ser observado que, apesar da dispersão, existe uma tendência crescente de RMSD com cada nível de carga como mostrado na Figura 5a. A variação nas tensões verticais médias registradas no topo e no fundo dos ciclos de carga obtidos a partir de medições DIC também é representada na Figura 5b. Pode ser visto que o nível de dano avaliado usando a variação RMSD do segundo pico ressonante compara bem com a evolução da deformação plástica e aumento na conformidade mecânica. Existe um aumento exponencial na evolução da deformação plástica com carga.

A deformação plástica é um indicador do nível de danos no material. Isto corresponde à tendência observada na RMSD medida com carga.

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



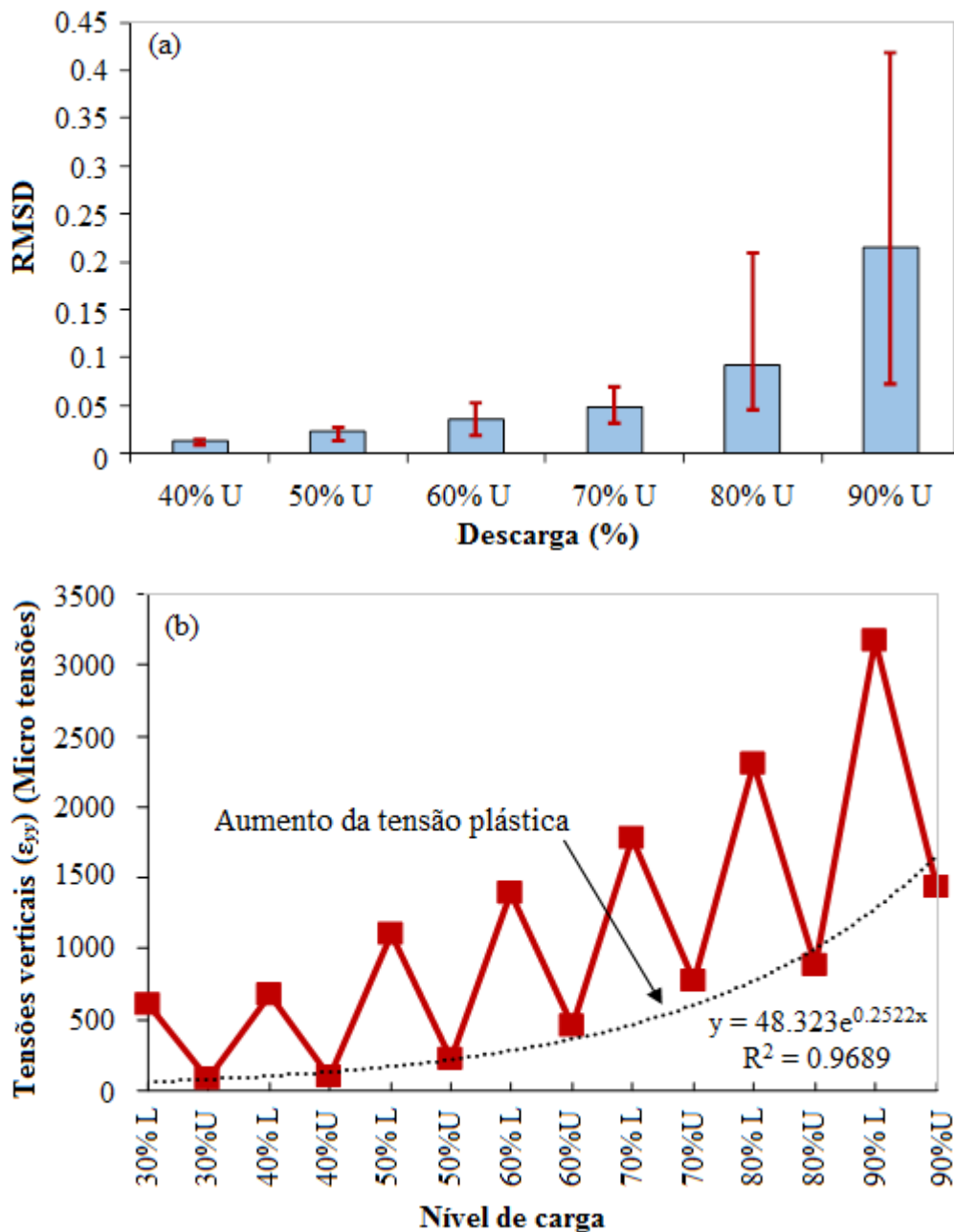


Figura 5. (a). RMSD do segundo pico de ressonância (b). Estirpe vertical média (ε<sub>yy</sub>) obtida da DIC

## 5. CONCLUSÕES

O potencial da utilização de medições de impedância EM de segmentos de PZT montados na superfície para o monitoramento estrutural da saúde de estruturas de concreto é estabelecido. Mostra-se que há mudanças no comportamento de ressonância da resposta de condutância EM do PZT ligado a um substrato de concreto com danos crescentes. O sensor PZT detecta danos incipientes significativamente mais cedo do que a aparência de sinais visíveis de danos. Existe uma redução de amplitude e desvio de frequência do pico de ressonância PZT com um aumento no dano no substrato de concreto. Em níveis de dano mais elevados, há achatamento do pico de ressonância associado à localização e formação de uma fissura maior.

## 6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela doação SB / S3 / CEE / 0013/2013 da Unidade SERB do Departamento de Ciência e Tecnologia do Ministério da Ciência e Tecnologia da Índia.

## 7. REFERÊNCIAS

- 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., Huang, 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.