

Metodologías para la localización de daño en vigas de hormigón pretensado

G. D. Ercolani^{1, 2 *}, N. F. Ortega^{1, 3}, D. H. Felix¹

*Autor de contacto: german.ercolani@uns.edu.ar

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.240>

Recepción: 03/08/2017 | Aceptación: 06/09/2017 | Publicación: 29/09/2017

RESUMEN

En este trabajo se evalúan metodologías para la detección de daño en estructuras de hormigón pretensado. Los métodos estudiados son el de variación de los desplazamientos y el de curvatura de la elástica, complementados con el uso de imágenes termográficas. A tal fin, dichos métodos se aplicaron sobre dos vigas de hormigón pretensado, construidas en laboratorio. Los resultados obtenidos permitieron detectar la presencia de daño y localizarlo con buena precisión. Si bien estos métodos ya se han aplicado sobre estructuras de hormigón armado, no se han encontrado aplicaciones sobre estructuras de hormigón pretensado. Se demostró la efectividad de las metodologías propuestas y se destaca la posibilidad y conveniencia de un uso combinado de las mismas.

Palabras clave: hormigón pretensado; detección de fisuras; ensayos estáticos; desplazamientos; elástica.

Citar como: G. D. Ercolani, N. F. Ortega, D. H. Felix (2017), “Metodologías para la localización de daño en vigas de hormigón pretensado”, Revista ALCONPAT, 7 (3), pp. 262-273, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.240>

¹ Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

³ Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires, Argentina.

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 segundo número del año 2018 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2018.

Methodologies for locating damage in prestressed concrete beams

ABSTRACT

This work evaluates methodologies for the detection of damage in prestressed concrete structures. The methods studied are the variation of the displacements and the curvature of the elastic, complemented by the use of thermographic images. To this end, these methods were applied on two prestressed concrete beams, built in the laboratory. The results obtained allowed to detect the presence of damage and to locate it with good precision. Although these methods have already been applied to reinforced concrete structures, no applications have been found to prestressed concrete structures. The effectiveness of the proposed methodologies was demonstrated and the possibility and convenience of a combined use of them are highlighted.

Keywords: prestressed concrete; crack detection; static tests; displacements; elastic.

Metodologias para a localização de danos em vigas de concreto pré-esforçado

RESUMO

Em este trabalho são avaliadas metodologias para a detecção de danos em estruturas de concreto pré-esforçado. Os métodos estudados são a variação dos deslocamentos e a curvatura da elástica, complementados com o uso de imagens termográficas. Para este fim, tais métodos foram aplicados em duas vigas de concreto pré-esforçadas, construídas em laboratório. Os resultados obtidos permitiram detectar a presença de dano e localizá-lo com boa precisão. Embora esses métodos já tenham sido aplicados em estruturas de concreto armado, não foram encontradas aplicações em estruturas de concreto pré-esforçado. A eficácia das metodologias propostas foi demonstrada e a possibilidade e a conveniência de um uso combinado delas são destacadas.

Palavras chave: concreto pré-esforçado; detecção de fissuras; testes estáticos; deslocamentos; elástica.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón pretensado es un material ampliamente utilizado en la industria de la construcción, siendo uno de sus usos más comunes la tipología estructural de vigas de eje recto. Estas estructuras frecuentemente sufren diversos tipos de daño a lo largo de su vida de servicio, por lo cual resulta sumamente importante identificar los mismos, con la mayor antelación posible, a los fines de tomar posteriores medidas de intervención.

Las patologías que pueden presentar las estructuras de hormigón pretensado son variadas, no obstante, al igual que en toda estructura de hormigón, la manifestación más corriente de las mismas es a través de la aparición de fisuras. Esto ha dado lugar a numerosos estudios acerca de la fisuración del hormigón pretensado, en distintas edades del mismo y por diversas causas (Karayannis y Chaliotis, 2013; Dai et al., 2016; Tong et al., 2016).

Si bien, en muchos casos, una estructura de hormigón que presenta fisuras puede igualmente cumplir su función estructural, dependiendo del grado de avance del daño y la velocidad de propagación del mismo; la sola presencia de dichas fisuras merece la atención, ya que pueden significar un riesgo potencial para la seguridad de la estructura. Además, en una estructura de hormigón armado o pretensado fisurada, se facilita el ingreso de agentes corrosivos que pueden alcanzar al acero, con el agravante, en el caso del acero de pretensar, que el mismo es mucho más sensible a la corrosión bajo tensión (Bertolini et al., 2014).

Una particularidad que poseen las estructuras de hormigón pretensado, respecto a las de hormigón armado, es que la acción del pretensado tiende a mantener a las fisuras cerradas, una vez que la causa que las originó ha desaparecido. Esto dificulta incluso las inspecciones visuales de la estructura, como un primer diagnóstico general. De esta manera, surge la necesidad de desarrollar y/o validar métodos que permitan inspeccionar el estado de estructuras, con la finalidad de, primero detectar la presencia de daño, luego localizarlo y en lo posible cuantificarlo. En el presente trabajo se estudian dos métodos de diagnóstico, basados en la respuesta estática de la estructura y aplicados específicamente a la detección de fisuras por flexión, en vigas de hormigón pretensado. Dichos métodos, son conocidos como el de variación de los desplazamientos (MVD) y el de curvatura de la elástica (MCE). La implementación de los mismos se llevó a cabo sobre dos vigas de hormigón pretensado, construidas en laboratorio. Los mencionados métodos han sido estudiados por diversos autores, entre los que se destacan los trabajos de (Pandey et al., 1991; Lu et al., 2002; Domínguez et al., 2007; Orbanich et al., 2009; Robles et. al., 2011; Dawari y Vesmawala, 2013; Ercolani et al., 2015). Sin embargo, no se han encontrado aplicaciones de dichos métodos sobre estructuras pretensadas.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los ensayos de laboratorio se realizaron sobre dos vigas de características similares, pero dañadas en dos posiciones distintas: La Viga 01 en la zona central y la Viga 02 en una posición cercana a uno de los apoyos. Dicho daño consistió en una fisura discreta provocada a través de la aplicación de una carga puntual.

2.1 Características de las vigas ensayadas

Las vigas se componen de una vigueta premoldeada de hormigón pretensado, de sección tipo T, a la cual se le adicionó una cabeza de compresión hormigonada in situ, resultando en una viga de sección rectangular. Para lograr una buena adherencia entre el hormigón fresco y el de la vigueta premoldeada, se utilizó un puente de adherencia epoxi. La longitud total de las vigas es 2,20 m. La trayectoria de los cordones pretensado es recta. En la Figura 1 se muestra la sección transversal de las vigas.

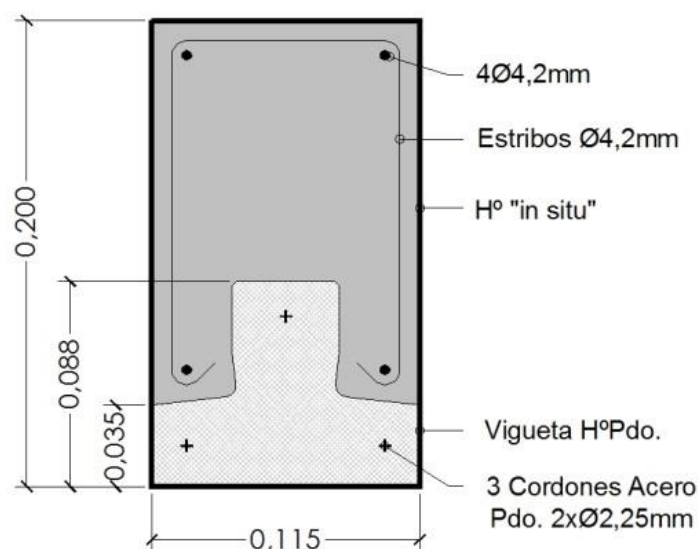


Figura 1. Sección transversal de las vigas ensayadas.

Las características de los materiales que componen las vigas, de acuerdo con el reglamento CIRSOC 201 (Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, 2005), son las siguientes:

- Hormigón premoldeado: H30
- Hormigón “in situ”: H30
- Acero de pretensado: C1950

En cuanto a la fuerza de pretensado, la misma no se conoce con exactitud, aunque fue estimada. Siendo que es habitual una tensión inicial de tracción del acero de pretensado del orden de 1000 MPa, y dado que la sección total del acero es de $23,86 \text{ mm}^2$, resulta una fuerza total de pretensado estimada en 23900 N. De todos modos, esta incertidumbre también suele tenerse en estructuras en servicio, donde se conoce la fuerza de pretensado de diseño, pero se han tenido pérdidas durante su vida, hasta el momento del estudio. Cabe acotar que, el no conocer con precisión el valor de la fuerza de pretensado, no resulta un limitante para la aplicación de los métodos de detección de daño aquí empleados.

2.2 Ensayo sobre Viga 01

La viga se dispuso en forma simplemente apoyada, con una distancia entre apoyos de 2,00 m y se la sometió a una carga puntual en el centro de la luz. Sobre la misma se instalaron un total de 10 flexímetros, con una precisión de 0,01 mm, equidistantes entre sí, los cuales permitieron medir los desplazamientos verticales a medida que se incrementó la carga aplicada.

La carga fue en incremento hasta provocar una fisura localizada en la zona central de la viga. En esta instancia se midió la profundidad alcanzada por la fisura y su ancho máximo en la zona inferior de la viga, así como la posición precisa de la misma. Luego la viga fue descargada y en ese momento pudo observarse, cómo, gracias a la acción del pretensado, la fisura se cerró y la configuración previa a la carga, se recuperó casi en su totalidad. Cabe mencionar que el incremento de la carga se suspendió cuando fue posible observar una fisura de magnitud significativa respecto a la altura total de la viga.

A continuación, la viga ya dañada, fue sometida nuevamente a carga, midiendo los desplazamientos verticales en los mismos puntos. La información obtenida fue utilizada luego para la aplicación de los métodos de detección de daño.

En la Figura 2.a) se observa la Viga 01 durante el ensayo. En la misma puede verse la prensa con la cual se aplicó la carga puntual, la celda de carga y los flexímetros instalados sobre la viga. Dado que la estructura que sirve de apoyo a la viga, también puede sufrir deformaciones, dos de los flexímetros fueron instalados en coincidencia con los apoyos de la viga, a los efectos de poder corregir las lecturas de los desplazamientos obtenidos.

En la Figura 2.b) puede verse la fisura provocada para la carga máxima aplicada con la indicación de la profundidad alcanzada, que resultó ser de 0,062 m ($a/h = 0,31$). Cabe mencionar que cuando se alcanzó dicha profundidad de fisura, se suspendió el incremento de la carga, ya que la magnitud de la misma era lo suficientemente significativa. El ancho máximo de la fisura fue 0,35 mm y su posición se originó en $x/L = 0,485$.

En la Figura 3 se muestran las curvas de Desplazamiento vertical vs. Carga aplicada, obtenidas para los dos puntos de medición más cercanos al centro, para la viga sin daño previo (VSDP) y para la viga ya fisurada o con daño previo (VCDP).



Figura 2. Ensayo sobre la Viga 01.
a) Vista general. b) Medición de la fisura.

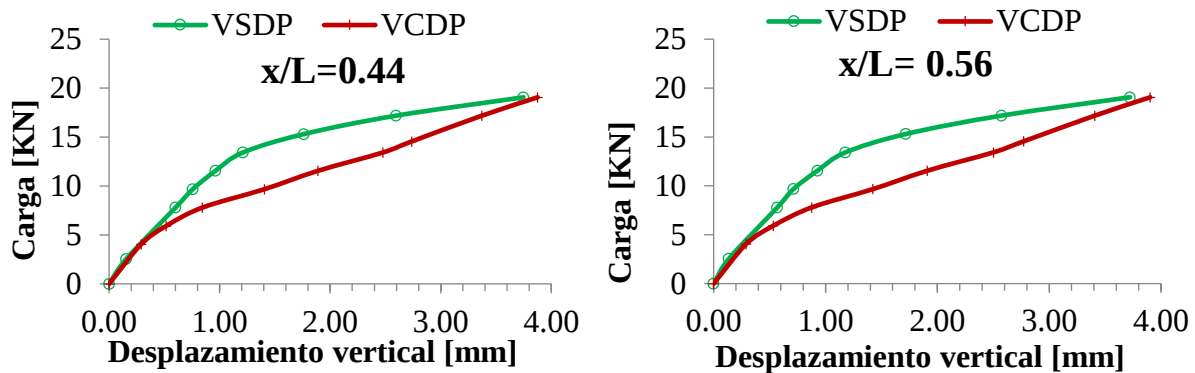


Figura 3. Curvas de desplazamientos verticales en los dos puntos de la zona central de la Viga 01.

Puede notarse la simetría de los desplazamientos obtenidos, ya que la fisura se originó muy cercana al centro de la viga. Para las cargas aplicadas sobre la viga sin daño previo, se aprecia una primera zona de comportamiento lineal y luego una zona no lineal, que se da a partir del inicio de la fisuración. Cuando se aplicó la carga sobre la viga previamente dañada, las curvas de los desplazamientos obtenidos mostraron que los mismos se incrementaron rápidamente, pero cuando la carga aplicada se acercó a la carga que causó la fisura, ambas curvas de desplazamiento se acercaron a un mismo valor. Esto último, indica que la fisura no siguió propagándose.

Adicionalmente, con el fin de poder detectar discontinuidades (fisuras, distintos materiales, etc.), sobre la Viga 01, se puso en práctica otro modo de diagnóstico de la salud estructural, a través del uso de la termografía (Tashan y Al-Mahaidi, 2014; Kabir, 2010; Abudayyeha et al., 2004). Para que el daño se ponga de manifiesto en una imagen termográfica, es necesario que exista una transferencia de calor en el elemento estudiado, en este caso en la masa del hormigón. En una estructura que separa dos condiciones climáticas diferentes, esto puede resultar suficiente para notar la mayor transferencia de calor que se da a través de la zona dañada (Pérez y Piedecausa, 2016). En el caso de una viga en condiciones ambientales exteriores, el gradiente térmico también podría existir, por ejemplo, debido a la exposición al sol. En la viga en estudio, debido a que la misma se encontraba a una temperatura uniforme dentro del laboratorio, fue necesario realizar una aplicación de calor sobre su superficie, lo cual se hizo a través de una pantalla de calentamiento eléctrica. Luego se procedió a observar la viga mediante la cámara termográfica (marca Testo-890) y se capturaron las imágenes que luego fueron procesadas mediante los softwares IRSoft 3.1 y Mathematica (Wolfram, 2015). Cabe mencionar, que la inspección se

realizó sobre la viga sometida a solicitaciones de flexión, a fin de que la fisura se encontrara abierta con un ancho de fisura máximo de 0,30 mm. Los resultados obtenidos, para una diferencia de temperatura máxima de 17°C entre el hormigón y el ambiente, se muestran en la Figura 4. En la misma puede notarse claramente la fisura en la zona inferior de la viga, e incluso se aprecian discontinuidades térmicas en la zona de unión entre el hormigón de la vigueta y el hormigón “in situ”. Además, se aprecia la variación brusca de temperatura en coincidencia con la fisura.

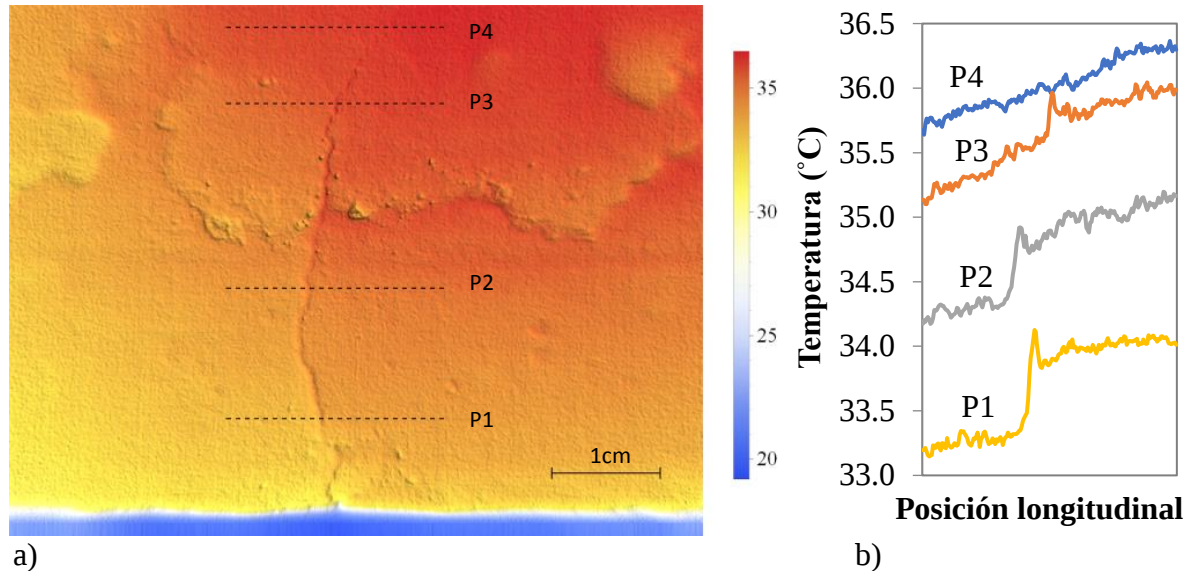


Figura 4. Estudio termográfico de la Viga 01.
a) Vista de la zona de la fisura. b) Perfiles de temperatura.

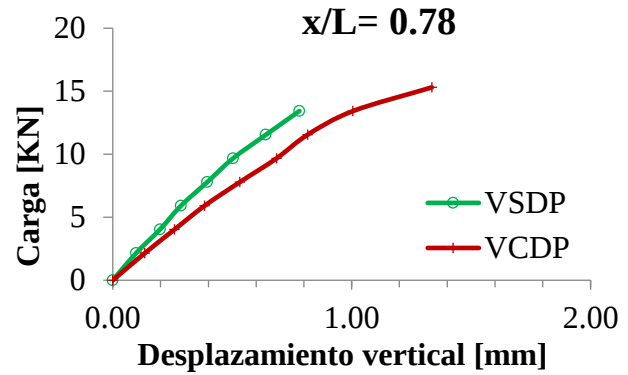
2.3 Ensayo sobre Viga 02

La viga se dispuso simplemente apoyada, con una distancia entre apoyos de 2,00 m y se la sometió a una carga puntual en el centro de la luz. De igual manera que para la Viga 01, se midieron los desplazamientos verticales a medida que se incrementó la carga aplicada. Dicha carga fue controlada a fin de no provocar daño sobre la viga. La viga se descargó y a continuación se le aplicó otra carga puntual, en una posición cercana al apoyo derecho. En esta instancia, la carga se incrementó hasta causar una fisura discreta en dicha zona, de magnitud significativa respecto a la altura total de la viga. Se midió la profundidad alcanzada por la fisura, así como la posición precisa de la misma. Luego la viga fue descargada y pudo observarse, cómo, gracias a la acción del pretensado, la fisura se cerró. En la Figura 5.a) se muestra la fisura ya generada. La profundidad de la misma resultó de una relación $a/h = 0,535$, en la posición relativa $x/L = 0,80$.

A continuación, la viga ya dañada, fue sometida nuevamente a una carga centrada, midiendo los desplazamientos verticales en los mismos puntos que para la condición sin daño. En la Figura 5.b) se muestran las curvas de Desplazamiento vertical vs. Carga aplicada, obtenidas para el punto de medición más cercano a la posición de la fisura, para la viga sin daño previo (VSDP) y para la viga ya fisurada o con daño previo (VCDP).



a)



b)

Figura 5. Ensayo sobre la Viga 02.

a) Medición de la fisura. b) Curvas de desplazamientos en el punto $x/L=0,78$.

Puede apreciarse que el ensayo realizado sobre la viga sin daño se mantuvo dentro de la zona de comportamiento lineal, justamente a fin de conservar la viga en dichas condiciones. A tal efecto, resultó muy útil disponer de la información del ensayo realizado previamente sobre la Viga 01.

3. MÉTODO DE VARIACIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS

Este método consiste en hallar los desplazamientos verticales en la viga dañada y compararlos respecto a los que posee la viga sana. Este parámetro puede considerarse como un índice de la variación en la rigidez de la estructura y se define como:

$$\delta_i = |w_{iCD}| - |w_{iSD}| \quad (1)$$

donde w_{iCD} es el desplazamiento vertical del punto i en la estructura con daño y w_{iSD} es el desplazamiento del mismo punto en la estructura sin daño, ambos provocados por un mismo incremento en las cargas aplicadas. Graficando esta diferencia de valores en los desplazamientos verticales, se puede detectar la presencia de daño, observando el punto en el cual la variación de los desplazamientos es máxima.

Cabe mencionar que, para poder aplicar este método, es necesario disponer de las magnitudes de los desplazamientos de la viga sana (w_{iSD}), a los efectos de realizar la comparación. Puede contarse con esta información cuando se hacen inspecciones de la estructura con cierta frecuencia o existen otras vigas idénticas sin daño, sobre las cuales se pueden realizar estas mediciones.

La aplicación de este método se llevó a cabo a partir de los desplazamientos obtenidos experimentalmente en la estructura, al pasar de un estado de cargas "A" a un estado de cargas "B" (Ercolani et al., 2015). En este caso se consideró el estado "A", al correspondiente a la carga puntual de 7,79 KN y el estado "B" al de la carga puntual de 9,67 KN.

En la Figura 6 se muestra el gráfico obtenido al aplicar este método para la Viga 01. Puede verse que el MVD permite detectar la presencia del daño y también localizarlo con buena aproximación. En el mismo gráfico se indica la posición real de la fisura en $x/L= 0,485$, mientras que, mediante la aplicación del método, se obtiene la localización $x/L= 0,505$.

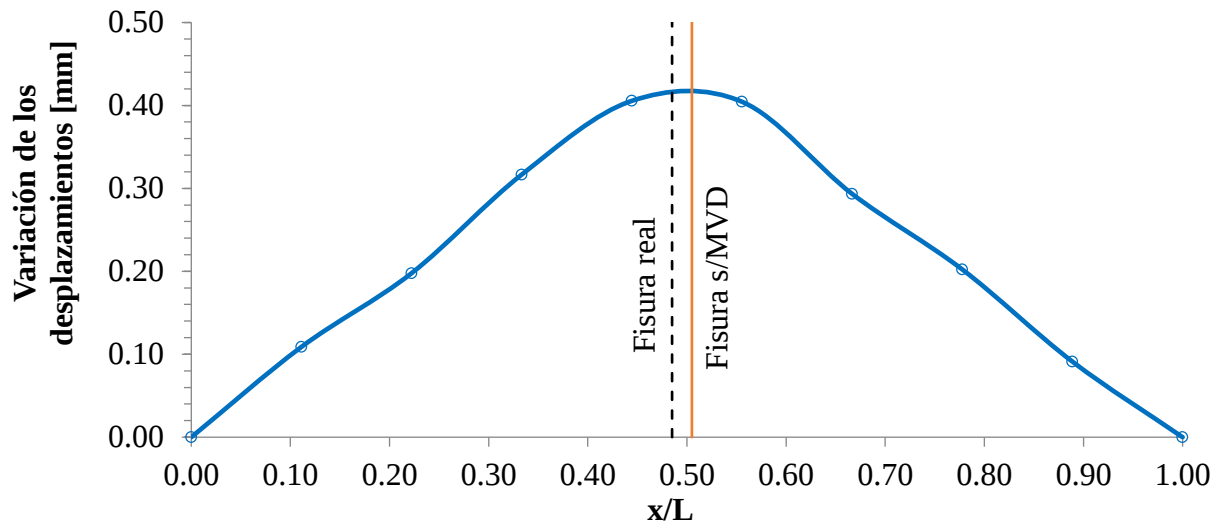


Figura 6. MVD aplicado sobre la Viga 01.

En la Figura 7 se muestra el gráfico obtenido al aplicar el MVD sobre la Viga 02. En el mismo gráfico se indica la posición real de la fisura en $x/L=0,80$, mientras que mediante la aplicación del método se obtiene la localización $x/L=0,77$.

Puede notarse en la Figura 7, una zona en la cual la variación de los desplazamientos es negativa, aunque muy próxima a ser nula; es decir, en dicha zona los desplazamientos de la viga dañada, debidos al incremento de la carga, fueron algo menores a los de la viga sin daño. Esto puede deberse a que el daño en la viga es tan significativo que los desplazamientos se incrementan repentinamente en la zona más próxima a la fisura, mientras que la zona más alejada a la misma sufre pocas alteraciones. Para brindar información adicional al respecto se incluye la Figura 8, en la cual pueden verse los desplazamientos causados por el incremento de carga de la Viga 02 en ambas condiciones, sin daño previo (VSDP) y con daño previo (VCDP). Puede observarse que los desplazamientos máximos se incrementan hacia la zona fisurada, dando lugar al cruce de ambas curvas de desplazamientos.

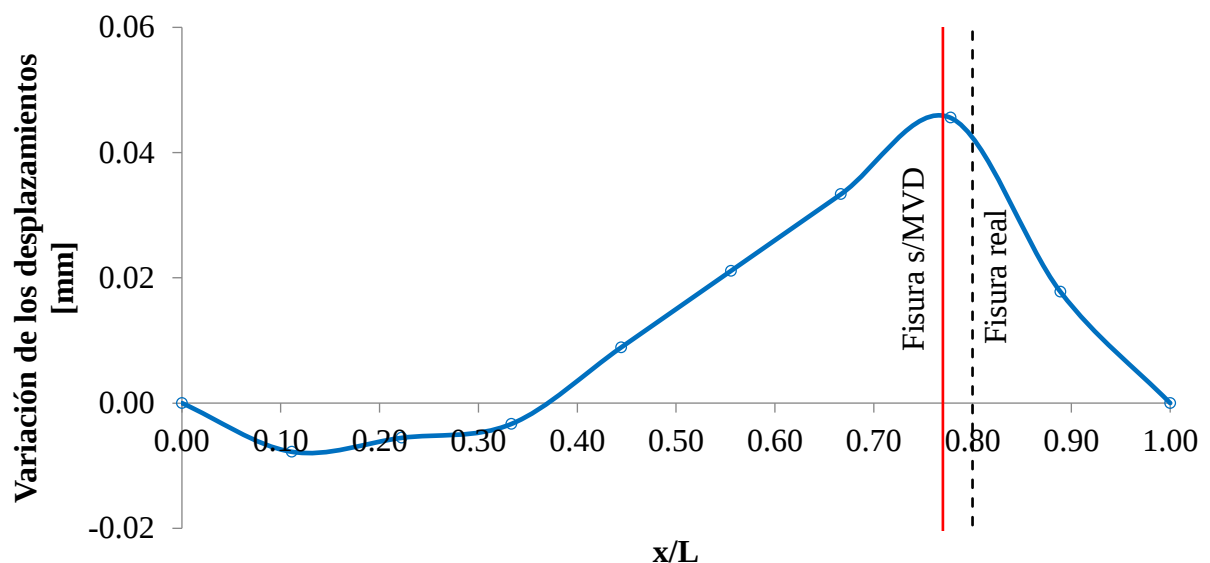


Figura 7. MVD aplicado sobre la Viga 02.

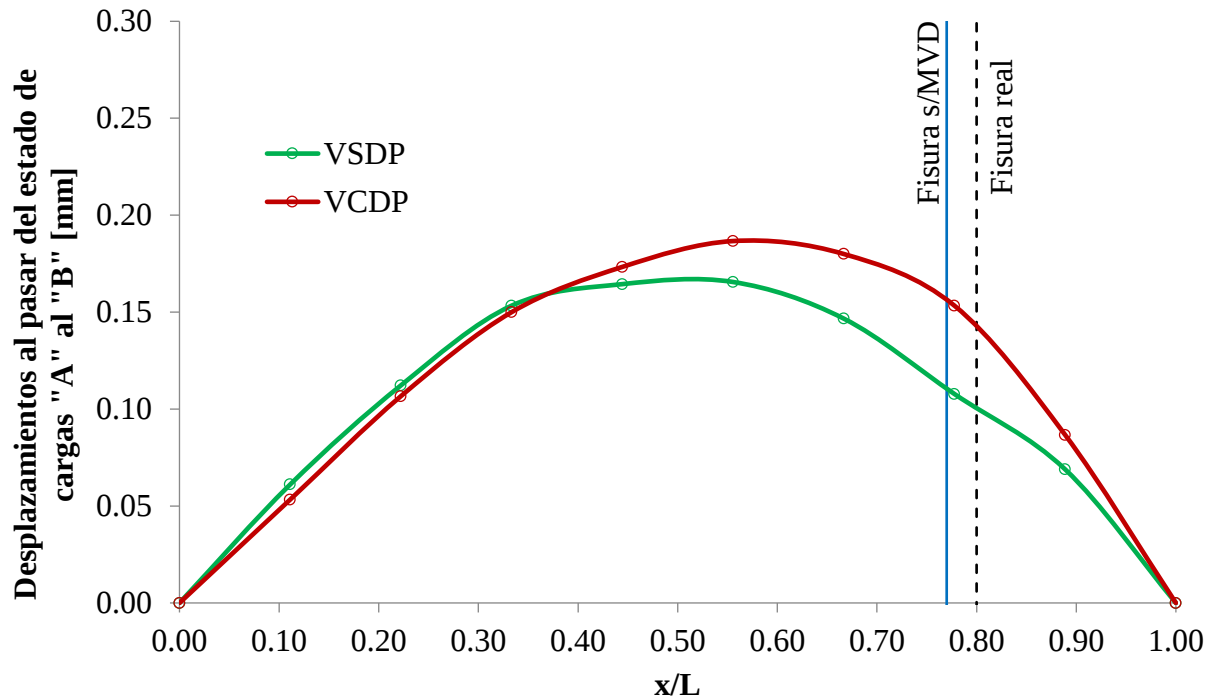


Figura 8. Curvas que dan origen a la aplicación del MVD sobre la Viga 02.

Cabe mencionar que la cantidad de puntos de medición sobre las vigas y por ende la distancia entre los mismos, resultó condicionada al equipamiento disponible para tal fin. En este caso, los puntos de medición estaban distanciados cada $L/9$ y puede notarse que resultó ser una separación adecuada para la aplicación experimental de este método, si bien una mayor densidad de mediciones puede permitir una localización aún más precisa del daño (Ercolani et al., 2015).

4. MÉTODO DE CURVATURA DE LA ELÁSTICA

La curvatura de la elástica de una estructura está dada por:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{M}{EI} \quad (2)$$

donde w es el desplazamiento de la estructura, M es el momento flector solicitante, E es el módulo de elasticidad del material e I es el momento de inercia de la sección. Luego EI representa la rigidez flexional de la estructura y se puede apreciar que, si la estructura presenta un daño localizado, dicha rigidez disminuirá en el lugar del daño y por lo tanto, la magnitud de la curvatura en ese lugar aumentará. Además, cuanto mayor sea la magnitud del daño, mayor será el aumento de la curvatura.

El cálculo de la curvatura de la elástica sobre la estructura dañada puede llevarse a cabo a través de la medición de los desplazamientos para una cierta cantidad de puntos de la estructura y luego, a partir de los mismos, realizar una aproximación mediante diferencias finitas centrales, es decir:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{w_{(x-s)} - 2w_{(x)} + w_{(x+s)}}{s^2} \quad (3)$$

en la cual s es la distancia entre dos puntos adyacentes de medición. De esta manera, el MCE consiste en medir los desplazamientos verticales para una cierta cantidad de puntos de la estructura y a partir de los mismos, obtener la curvatura de la estructura deformada, con la finalidad de detectar anomalías en la misma. Por lo dicho, puede notarse que este método, no requiere conocer los desplazamientos de la estructura sin daño, siendo esto una ventaja importante respecto al MVD, ya que resulta frecuente no disponer de los mismos.

En los casos en estudio, la precisión de las mediciones, así como la separación entre los puntos de medición, se encuentran condicionadas al equipamiento disponible para tal fin, pudiendo no ser las más convenientes para la aplicación de este método. No obstante, para compensar esto, el método no solo se aplicó sobre la viga ya dañada, sino que también se lo aplicó sobre la viga en condiciones sin daño, a fin de poder comparar los resultados en ambas condiciones.

Al igual que para el MVD, la aplicación del MCE se llevó a cabo a partir de los desplazamientos obtenidos en la estructura, al pasar de un estado de cargas “A” (carga puntual de 7,79 kN) a un estado de cargas “B” (carga puntual de 9,67 kN).

En la Figura 9 se presenta la aplicación del MCE para la Viga 01, para los estados sin daño y con daño. Puede verse que el MCE permitió identificar la presencia del daño en la Viga 01 y aproximar su ubicación. El método da como posición del daño el punto $x/L = 0,51$, el cual resulta con un error absoluto del 2,5%, frente a la verdadera localización de la fisura en $x/L = 0,485$.

Por otro lado, en la Figura 10 se muestra la aplicación del MCE para la Viga 02 en las condiciones sin daño y con daño. En dicha figura, puede notarse que el MCE permitió identificar la presencia del daño en la Viga 02 y tener una buena aproximación de la ubicación del mismo. El método da como posición del daño el punto $x/L = 0,78$, el cual resulta con un error absoluto del 2% frente a la verdadera localización de la fisura en $x/L = 0,80$.

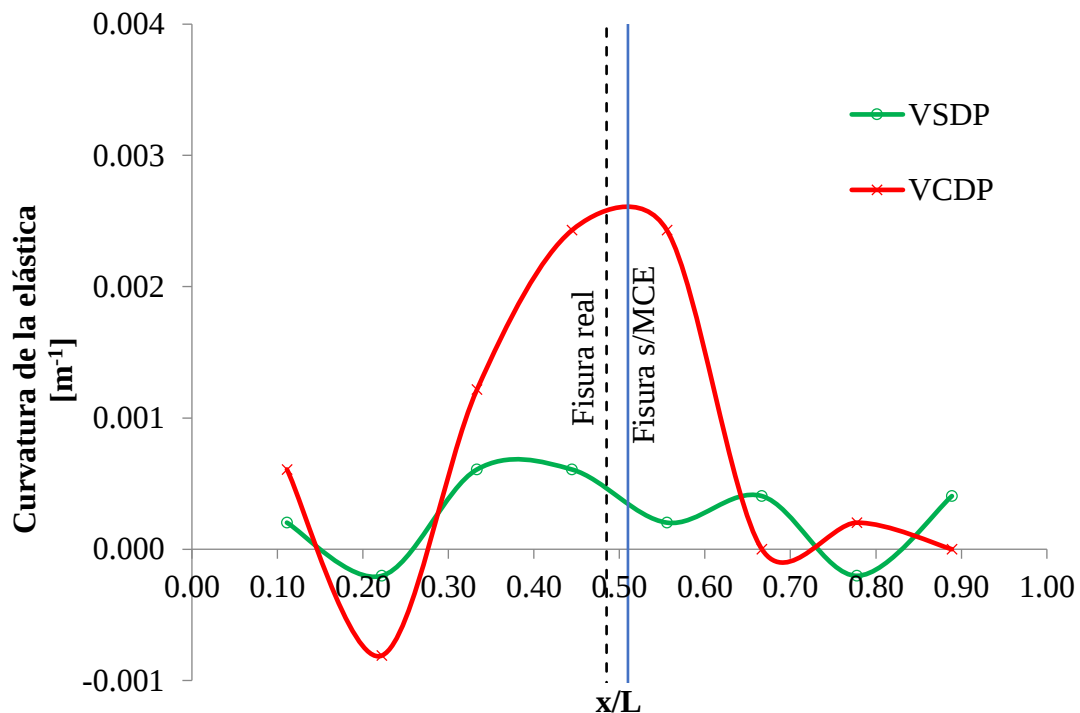


Figura 9. MCE aplicado sobre la Viga 01 experimental en condiciones fisurada y sin daño.

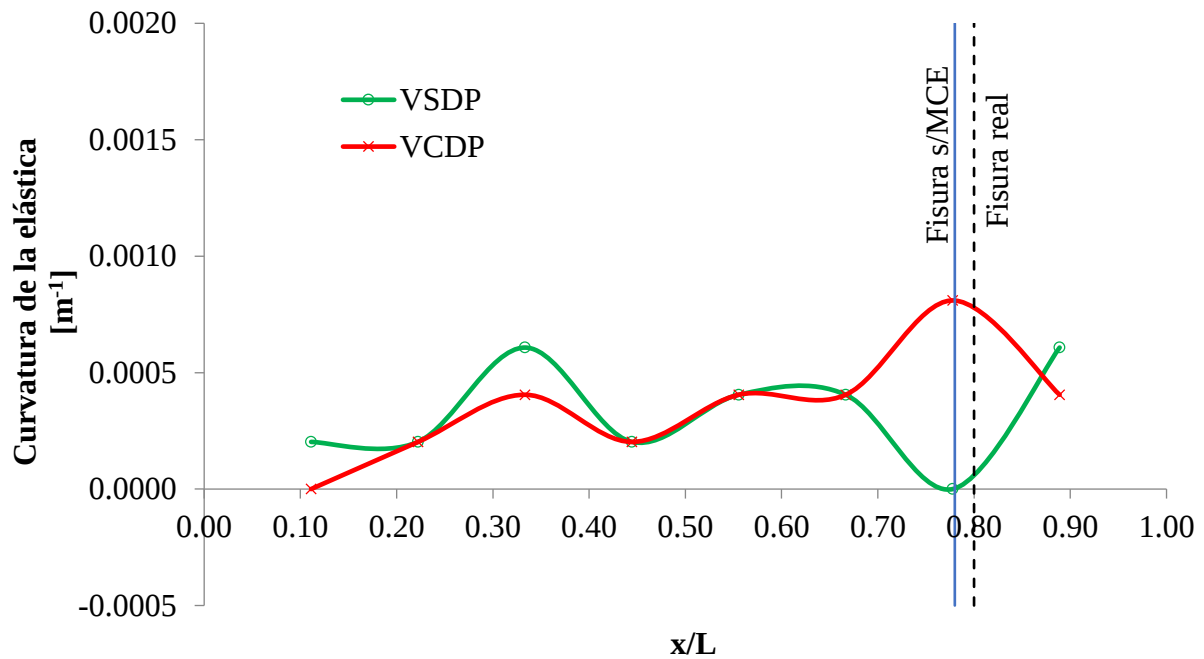


Figura 10. MCE aplicado sobre la Viga 02 experimental en condiciones fisurada y sin daño.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó experimentalmente la potencialidad de dos métodos de detección de daño basados en sus respuestas estáticas, aplicados sobre dos vigas de hormigón pretensado construidas en laboratorio. Dichos métodos son el de variación de los desplazamientos y el de curvatura de la elástica. Además, sobre una de las vigas se aplicó exitosamente termografía infrarroja, para la visualización del daño. Del análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- La aplicación de ambos métodos es de sencilla implementación. Además, pueden ser utilizados en forma conjunta, si se disponen de los datos necesarios, lo cual permite un mejor diagnóstico.
- Como es de suponer, la fuerza de pretensado, al tender a cerrar la fisura, hace que la manifestación del daño, en ambos métodos, sea de una manera menos notable que para el caso de vigas de hormigón armado. Sin embargo, dicha manifestación fue suficiente para evidenciar la existencia de daño, mediante los métodos empleados, tanto para la viga fisurada en la zona central, como para la fisurada en proximidad a uno de los apoyos.
- En cuanto a la determinación de la posición del daño con el MVD, las diferencias obtenidas, entre la ubicación real de la fisura y la localización indicada por el MVD, fueron del 2,0% y del 3,0%, para las vigas V01 y V02, respectivamente. Por otro lado, con el MCE, se obtuvieron diferencias del 2,5% y del 2,0%, para estas vigas. Dichos errores se encuentran dentro de un margen más que aceptable para un trabajo experimental.
- Se demostró que el procesamiento de imágenes termográficas puede ser una valiosa herramienta para la detección de fisuras o anomalías, así como alteraciones en la homogeneidad del material.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (UNS), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires (CIC), por el apoyo brindado para el desarrollo de estas investigaciones.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abudayyeha O., Al Batainehb M., Abdel-Qaderc I. (2004), *An imaging data model for concrete bridge inspection*, Advances in Engineering Software 35, pp. 473-480.
- Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E., Polder R. B. (2014), *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, 2nd Edition, Wiley-VCH, p. 434.
- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, (2005), *CIRSOC 201 Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*, INTI.
- Dai L., Wang L., Zhang J., Zhang H. (2016), *A global model for corrosion-induced cracking in prestressed concrete structures*, Engineering Failure Analysis 62, pp. 263-275.
- Dawari V. B., Vesmawala G. R. (2013), *Modal curvature and modal flexibility methods for honeycomb damage identification in reinforced concrete beams*, Procedia Engineering 51, pp. 119-124.
- Domínguez P. N., Orbanich C. J., Ortega N. F. (2007), *Localización de fallas en vigas de fundación de hormigón armado*, Mecánica Computacional 26, pp. 1373-1386.
- Ercolani G. D., Ortega N. F., Felix D. H. (2015), *Detección de fisuras en vigas de hormigón pretensado*, RADI – Revista Argentina de Ingeniería 6, PP. 90-97.
- Kabir S. (2010), *Imaging-based detection of AAR induced map-crack damage in concrete structure*, NDT and E International 43, pp. 461-469.
- Karayannis C. G., Chalioris C. E. (2013), *Design of partially prestressed concrete beams based on the cracking control provisions*, Engineering Structures 48, pp. 402-416.
- Lu Q., Ren G., Zhao Y. (2002), *Multiple damage location with flexibility curvature and relative frequency change for beam structure*, Journal of Sound and Vibration 253 (5), pp. 1101-1114.
- Orbanich C. J., Robles S. I., Ortega N. F. (2009), *Detección de Fallas en Plateas de Fundación Elástica*, Mecánica Computacional 28, pp. 1897-1917.
- Pandey A. K., Biswas M., Samman M. M. (1991), *Damage detection from changes in curvature mode shapes*, Journal of Sound and Vibration 145, pp. 312-332.
- Pérez Sanchez J. C., Piedecausa García B. (2016), *Termografía infrarroja aplicada en cúpulas históricas: identificación y análisis de sistemas constructivos*. Informes de la Construcción 68, pp. 1-9.
- Robles S. I., Ortega N. F., Orbanich C. J. (2011), *Damage evaluation in shells from changes in its static parameters*, The Open Construction and Building Technology Journal 5, pp. 182-189.
- Tashan J., Al-Mahaidi R. (2014), *Detection of cracks in concrete strengthened with CFRP systems using infra-red thermography*, Composites: Part B 64, pp. 116-125.
- Tong T., Liu Z., Zhang J., Yu Q. (2016), *Long-term performance of prestressed concrete bridges under the intertwined effects of concrete damage, static creep and traffic-induced cyclic creep*, Engineering Structures 127, pp. 510-524.
- Wolfram S. (2015), *An Elementary Introduction to the Wolfram Language*. Wolfram Media, Inc.