

Detección de fisuras en vigas de hormigón pretensado.

Ing. Germán Darío Ercolani¹

Ing. Néstor Francisco Ortega²

Ing. Daniel Horacio Felix³

Departamento de Ingeniería.
Universidad Nacional del Sur.

¹ Ingeniero Civil.
E-mail: german.ercolani@uns.edu.ar

² Dr. en Ingeniería.
E-mail: nfortega@criba.edu.ar

³ Dr. en Ingeniería.
E-mail: dhfelix@uns.edu.ar

RESUMEN

Al inspeccionar y garantizar la seguridad estructural existente, es importante aplicar las técnicas adecuadas para la detección temprana de posible presencia de daños. En este trabajo el método de variación de los desplazamientos, para detectar la presencia de grietas producidas por la flexión en vigas de hormigón pretensado fue validado mediante modelos numéricos 3D. Los modelos 3D fueron construidos y resueltos mediante el método de elementos finitos. La sensibilidad de cada parámetro utilizado en este estudio se obtuvo por medio de varios análisis. Desde el presente trabajo, se concluye que el método en estudio, parece ser muy apropiado para la detección temprana de grietas, en las vigas de hormigón pretensado.

Palabras clave: Hormigón pretensado; detección de daño; fisuras.

ABSTRACT

When inspecting and ensuring the existing structural security, it is important to apply the adequate techniques to early detection of possible presence of damage. In this job the displacements variation method, to detect the presence of cracks produced by bending in prestressed concrete beams was validated by means of numerical 3D models. The 3D models was built and solved by using the finite element method. The sensitivity of each parameter used in this study was obtained by means of several sensitivity analyses. From the present job, it is concluded that the method under study, seems to be very appropriate for early detection of cracking, in prestressed concrete beams.

Keywords: Prestressed concrete; damage detection; cracks.

I. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón pretensado, pueden verse afectadas por distintas patologías, entre ellas, una de las que más preocupa es la fisuración. Son varias las causas que pueden dar origen a la aparición de fisuras, encontrándose entre las más frecuentes la pérdida en la fuerza de pretensado que se da con el paso del tiempo, posibles excesos en las solicitaciones de servicio, defectos constructivos y asentamientos diferenciales en estructuras hiperestáticas, entre otras. Dichas causas pueden darse en forma individual o bien combinadas entre sí, agravando la situación.

El estado de fisuración puede llegar a ser importante, y si bien, la acción del pretensado tiende a mantener las fisuras cerradas, las mismas están en condiciones de llegar a ser un riesgo potencial para la durabilidad de la estructura, fundamentalmente, porque facilitan el ingreso de agentes corrosivos que, en el caso de alcanzar al acero de pretensado, tendrían graves consecuencias.

Por dicha razón, surge la necesidad de desarrollar y/o validar métodos que permitan inspeccionar el estado de la estructura en servicio y así

poder detectar la presencia de daño, para luego localizarlo y cuantificarlo, a los fines de tomar posteriores medidas de intervención.

Se ha encontrado un número importante de publicaciones que analizan el cambio de la respuesta dinámica de estructuras de hormigón armado, originadas por la presencia de daño. Entre las mismas, aparece a fines de los '70 Cawley y Adams (1979) [1], que resultó ser un trabajo pionero y varios años después se publica el trabajo de Doebling et al. (1998) [2]. Desde principios del siglo XXI se incrementa la realización de trabajos en esta línea, entre los cuales cabe mencionar: Yam et al. (2002) [3]; Chang y Chen (2004) [4]; Kim et al. (2005) [5] y Kim et al. (2006) [6].

Por otro lado, entre las publicaciones más destacadas, encontradas sobre identificación de daño, basadas en el análisis de la respuesta estática de una estructura de hormigón armado se encuentran: Chou y Ghaboussi (2001) [7]; Sain y Chandra Kishen (2003) [8]; Choi et al. (2004) [9]; Maity y Saha (2004) [10]; Caddemi y Morassi (2005) [11]; Domínguez et al. (2007) [12]; Eun y Lee (2007) [13]; Robles et al. (2008) [14]; Orbanich et al. (2009) [15]; Robles et al. (2011) [16].

Sin embargo, en el caso de estructuras de hormigón pretensado, la existencia de publicaciones referidas a las técnicas experimentales y numéricas para la detección de daño es mucho más escasa. Se mencionan entre los hallados, los siguientes trabajos, publicados en los últimos años, en los cuales se han aplicado y analizado diversas técnicas, tanto estáticas, como dinámicas, de detección de daño: Abdel Wahab et al. (1999) [17]; Jeyasehar et al. (2006) [18]; Yuyama et al. (2007) [19]; Gharrighoran et al. (2009) [20]; Elfergani et al. (2013) [21]; Kulprapha et al. (2012) [22] y El Batanouny et al. (2014) [23].

En este primer trabajo se evalúa, en particular, mediante modelos numéricos tridimensionales, la aplicabilidad de un método estático, que se basa en la Variación de los Desplazamientos y las consideraciones que se deben tener en cuenta, para detectar una fisura discreta en vigas de hormigón pretensado.

Con este fin, se modeló mediante el método de los Elementos Finitos, una viga típica de un puente de Hormigón Pretensado, simplemente apoyada, de sección tipo T. En primer lugar, se modeló y analizó la viga no fisurada y luego se introdujo una fisura discreta, en la zona inferior de la misma, en

distintas posiciones de su longitud y con profundidades variables. Un detalle de la misma puede observarse en las Figuras 1.a y 1.b. Posteriormente, se aplicó el método mencionado con el fin de validarlo, y de determinar su eficacia para detectar, localizar y cuantificar la presencia de daño.

2. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

La modelización numérica de la estructura en estudio queda definida mediante la geometría, las propiedades mecánicas, los estados de carga y la configuración del estado de fisuración.

2.1. Geometría de la viga

El estudio se realizó sobre una viga simplemente apoyada de Hormigón Pretensado, de sección tipo T, pretensada a través de cuatro cables rectos adherentes. Las características geométricas de la viga con sus dimensiones se muestran en las Figuras 1.a y 1.b.

En cuanto a la armadura de pretensado, las características de la misma son las siguientes:

- Área total del acero de pretensado: 55,42 cm²
- Distancia desde la fibra superior al baricentro de la armadura de pretensado: 1,20 m
- Fuerza total de pretensado: 5,542 MN

Si bien la estructura descrita corresponde al diseño del tablero de un puente, Categoría A-30 [24], formado por un total de 5 vigas T longitudinales, en el presente trabajo se estudia el comportamiento de una viga en forma aislada. Las vigas fueron proyectadas para una condición de pretensado total, bajo cargas de servicio, considerando las pérdidas de pretensado correspondientes, tales como el acortamiento elástico del hormigón, la contracción de fragüe, la fluencia lenta del hormigón, el acuanamiento de los anclajes del acero de pretensado en el momento de la transferencia de carga y la relajación de la tensión en los cables de pretensado [25].

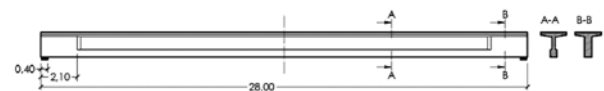


Figura 1.a – Vista y secciones de la viga.

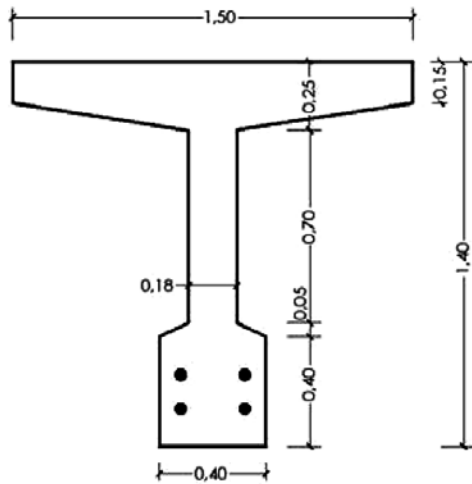


Figura 1.b – Sección transversal de la viga.

2.2. Estados de carga

La estructura fue analizada bajo dos estados de carga, por un lado, sometida solo a las cargas de peso propio y por otro, adicionándole fuerzas concentradas que simulan la acción de una aplanadora que podría emplearse en un ensayo de cargas y que caracteriza al tipo de puente, ante la Dirección Nacional de Vialidad [24]. Los dos estados de carga considerados pueden verse en la Figura 2.

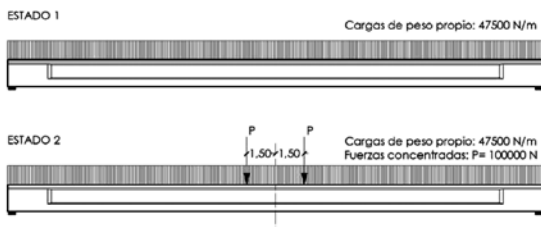


Figura 2 – Estados de carga considerados.

2.3. Hipótesis de daño

En primer término, se modeló la viga sin presencia de daño y posteriormente, se la analizó agregando una fisura discreta en la zona inferior de la misma. Se consideraron para este estudio diferentes ubicaciones de la fisura y distintas profundidades de la misma.

En la Figura 3 se indican los parámetros que definen la configuración de la viga fisurada. El valor de los mismos se da en forma adimensional como sigue:

- Ubicación: x/L
- Profundidad: a/h

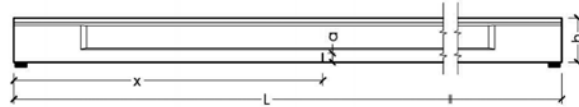


Figura 3 – Vista longitudinal de la viga, con los parámetros de definición de la fisura.

2.4. Modelo de Elementos Finitos

El modelo desarrollado con el Método de Elementos Finitos se realizó mediante el software Comsol Multiphysics, Versión 4.4 FNL [26].

Se trabajó con un modelo en 3D, con un mallado formado por elementos tetraédricos para ambos materiales (hormigón y acero). Fue realizado un refinamiento en la zona cercana a los cables de pretensado y en la posición de la fisura, como se muestra en la Figura 4. Para simular el efecto del pretensado se aplicó una deformación inicial a dichos cables.

Se realizaron varios modelos con distintas densidades de mallas, con el fin de encontrar una relación eficiente entre el esfuerzo computacional requerido y la precisión de los resultados. Como producto de este estudio se obtuvo la malla adoptada en el presente trabajo.

El trabajo propuesto no contempló una modelación especial de la interface hormigón – acero, considerándose en consecuencia, una adherencia perfecta entre ambos materiales. La aplicación de este criterio se sustenta en el hecho de que los resultados obtenidos con el modelo propuesto para validar el método en estudio fueron altamente satisfactorios. Debe tenerse en cuenta que todo nivel de refinamiento sobre el modelo, genera un incremento en forma exponencial del esfuerzo computacional y en este caso, la inclusión de una malla que modele la interface hormigón-acero, parece no generar una diferencia significativa de los resultados.

En cuanto a los materiales del modelo, se los consideró homogéneos, continuos e isotrópicos, con las siguientes propiedades:

- Hormigón:
 - o Módulo de Elasticidad: $E= 25 \text{ GPa}$
 - o Coeficiente de Poisson: $\nu= 0.20$
- Acero:
 - o Módulo de Elasticidad: $E= 200 \text{ GPa}$
 - o Coeficiente de Poisson: $\nu= 0.30$

Los análisis estructurales realizados en esta instancia fueron lineales, tanto geométrica como constitutivamente. Cabe aclarar que esta última consideración es válida en el comportamiento

del hormigón, solo hasta un determinado valor de deformaciones (zona de proporcionalidad), la cual se deben verificar para que el modelo sea representativo de la realidad. Si las deformaciones del hormigón salen de ese rango, sería más apropiado pasar a un análisis de tipo no lineal, en el cual se introduzca la curva tensión – deformación característica. Por tratarse de hormigón pretensado, en el cual las tensiones de tracción en el hormigón quedan limitadas debido a la fuerza de pretensado, puede decirse que asumir un comportamiento lineal, si bien no representa estrictamente la realidad, se considera suficientemente aceptable.

En este caso, el pretensado aplicado es tal que, para la máxima carga aplicada en la simulación del ensayo, se tienen en la fibra inferior de la viga (zona precomprimida) tensiones de tracción limitadas en el orden de 3 MPa. Para un Hormigón tipo H-30 este podría considerarse un valor admisible, ya que es usual considerar una resistencia a tracción del 10 al 13 % de la resistencia de compresión.

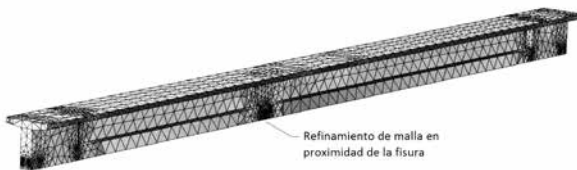


Figura 4 – Vista en 3D de la viga con refinamiento de malla en la zona fisurada.

3. DETECCIÓN DE DAÑO POR EL 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 dicha diferencia de valores de los desplazamientos verticales, se puede detectar la presencia de daño, observando el cambio de pendiente de la curva.

Nótese 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.

En este trabajo se analizaron varios casos, con distintas magnitudes y ubicaciones del daño. Además, se estudió la densidad de mediciones conveniente que hace posible la detección y localización del daño, así como la precisión requerida en las mediciones al momento de ser llevado a la práctica. También se consideró la aplicación del método cuando los desplazamientos son medidos en la fibra superior de la viga. A continuación se analiza la sensibilidad del método de Variación de los Desplazamientos a diferentes parámetros de configuración del modelo.

3.1. Sensibilidad a la densidad de mediciones

Una de las cuestiones a definir al momento de llevar a cabo la aplicación del método, es la cantidad de mediciones a realizar a lo largo de la viga. Para analizar dicha incidencia, se lo implementó en una viga con una fisura de profundidad $a/h=0.15$, ubicada en $x/L=0.50$, realizando mediciones cada $L/20$, $L/40$ y $L/80$. Los gráficos se muestran en la Figura 5.

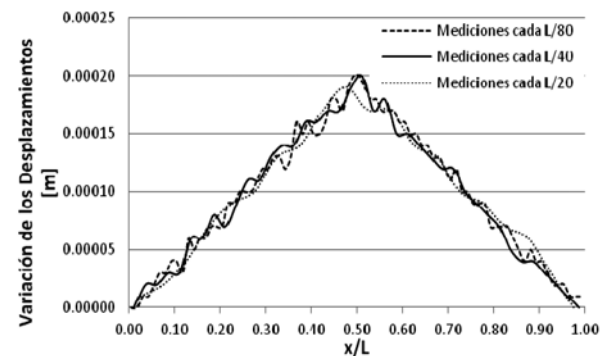


Figura 5 – Variación de los Desplazamientos para distintas densidades de medición. $x/L=0.50$, $a/h=0.15$.

Como puede notarse en la Figura 5, para mediciones cada $L/40$ se detecta y localiza la fisura adecuadamente, e incluso mediciones cada $L/20$ son suficientes para evidenciar el daño, aunque se comienza a perder precisión en cuanto a la localización, debido a la mayor distancia entre las mediciones.

3.2. Sensibilidad a la precisión de las mediciones

Se analizó lo que sucede en la medida que se modifica la precisión en las magnitudes de los desplazamientos. De esta forma podremos determinar el instrumental de medición adecuado al momento de realizar las mediciones en la práctica. En la Figura 6, pueden observarse los resultados obtenidos con distintas precisiones en las mediciones, para una viga fisurada en $x/L=0.50$, con una profundidad $a/h=0.15$. Se aprecia la gran diferencia entre los resultados obtenidos con las precisiones de 1×10^{-4} m y 1×10^{-5} m. Se concluye que es necesario y suficiente trabajar con una precisión del orden de 1×10^{-5} m, a los efectos de detectar la fisura, por lo que no se justifica una lectura de mayor precisión.

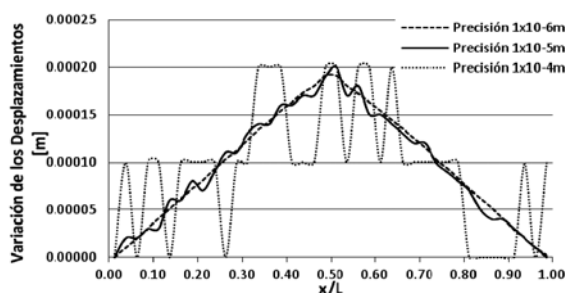


Figura 6 – Variación de los Desplazamientos para distintas precisiones en la medición. $x/L=0.50$, $a/h=0.15$.

La precisión requerida de 1×10^{-5} m es posible obtenerla, a través de flexímetros mecánicos o de sensores como los LVDT (Linear Variable Displacement Transducers), los cuales pueden tener precisiones incluso mayores.

3.3. Sensibilidad a la posición de la fisura, respecto a los puntos de medición

Dado que al momento de realizar las mediciones, en general, se desconoce si existen o no fisuras y la posible ubicación de las mismas, resulta de interés analizar la sensibilidad del método cuando varía la distancia desde la fisura al punto de medición más cercano. Esto se esquematiza en la Figura 7, siendo d la distancia desde la fisura al punto de medición más próximo y s la distancia entre dos puntos de medición sucesivos. En la Figura 8 se representó la incidencia que se tiene en la Variación de los Desplazamientos, en función de la relación d/s , para una viga fisurada en $x/L=0.50$, con una profundidad $a/h=0.15$.

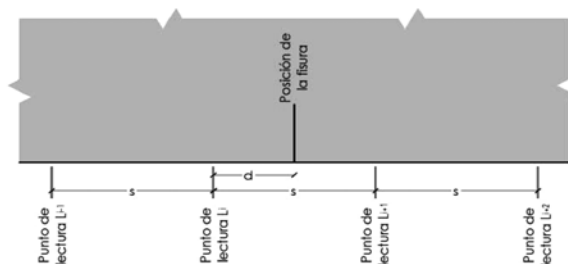


Figura 7 – Esquema de ubicación de la fisura respecto a punto de medición más cercano.

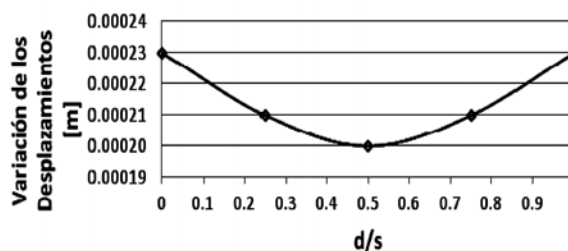


Figura 8 – Variación de los Desplazamientos, en función de la posición de la fisura respecto al punto de medición más próximo, para una viga fisurada en $x/L=0.50$ con una profundidad $a/h=0.15$.

En la Figura 8 puede observarse como disminuye la sensibilidad de detección a medida que la fisura se aleja de los puntos de medición, siendo el caso más desfavorable cuando se encuentra en una posición equidistante de los puntos de medición más próximos, dando la mayor diferencia entre lecturas ($d/s=0$ y $d/s=0.5$) del orden del 13%. Para cubrir esta posibilidad, en los demás estudios se trabajó con la fisura en la situación más desfavorable ($d/s=0.5$).

3.4. Sensibilidad a la ubicación de la fisura a lo largo de la viga

Se aplicó el método variando la ubicación del daño a lo largo de la viga y se evaluó la efectividad en la detección y localización del mismo. En la Figura 9 pueden verse distintos casos para una viga con fisura de profundidad $a/h=0.15$. Se trabajó con mediciones cada $L/40$, con precisión de 1×10^{-5} m y fisura centrada entre dos puntos de medición.

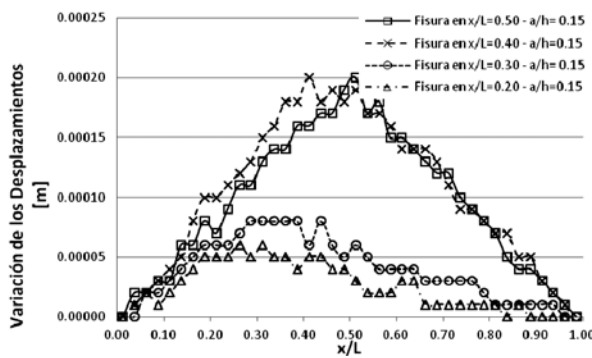


Figura 9 – Variación de los Desplazamientos para distintas ubicaciones de la fisura para $a/h=0.15$.

Como puede notarse en la Figura 9, bajo dichas condiciones, el método resulta más efectivo para detectar la presencia del daño y su localización con buena definición, cuando la fisura se ubica en la zona central de la viga, y se torna menos sensible cuando la fisura se aproxima a la zona de los apoyos. Esto resulta intuitivamente evidente, ya que en la zona central de la viga los desplazamientos son mayores.

3.5. Sensibilidad a la profundidad de la fisura

Se analizó la respuesta del método para distintas magnitudes del daño. En la Figura 10 se aprecia la Variación de los Desplazamientos, para una viga fisurada en $x/L=0.40$ y para varias profundidades de fisuración. Nuevamente, se trabajó con mediciones cada $L/40$, precisión de 1×10^{-5} m y con ubicación de fisura equidistante de los puntos de medición más cercanos.

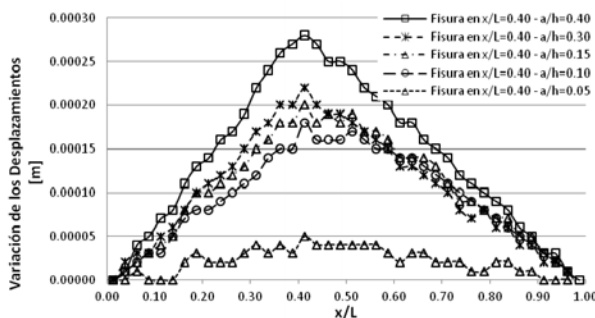


Figura 10 - Variación de los Desplazamientos para una viga con fisura ubicada en $x/L=0.40$ y distintas profundidades de la misma.

Como puede verse en la Figura 10, incluso una fisura de profundidad $a/h=0.05$ fue detectable con este método. Por otro lado, puede verse que además de detectar la posición de la fisura, se pueden

relacionar los valores obtenidos con la magnitud del daño. Esto puede ser de interés, una vez encontrada una fisura, para realizar un seguimiento del estado de la misma, es decir, evaluar si continua avanzando en profundidad o permanece estable. Para mayor claridad de lo expuesto, en la Figura 11, se representa la curva de variación de los desplazamientos vs. La profundidad de fisura, para distintas ubicaciones del daño.

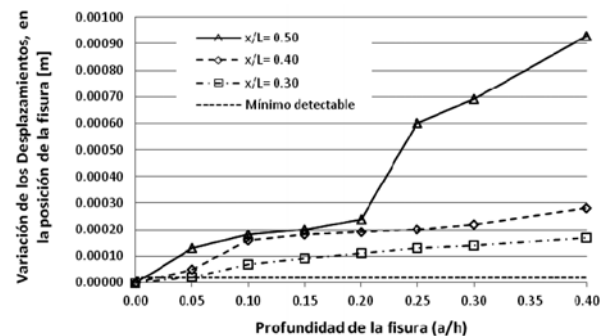


Figura 11 - Variación de los Desplazamientos en la posición de la fisura, en función de su profundidad y para diferentes ubicaciones de la misma.

3.6. Aplicación del método con mediciones en la fibra superior

Resulta de interés analizar la aplicación del método cuando los desplazamientos verticales son medidos sobre la fibra superior de la viga, en lugar de la inferior, ya que en ciertos casos realizar mediciones en la parte inferior de la misma puede resultar dificultoso. En tal sentido se realizó una comparación entre ambos tipos de medición, la cual puede verse en la Figura 12.

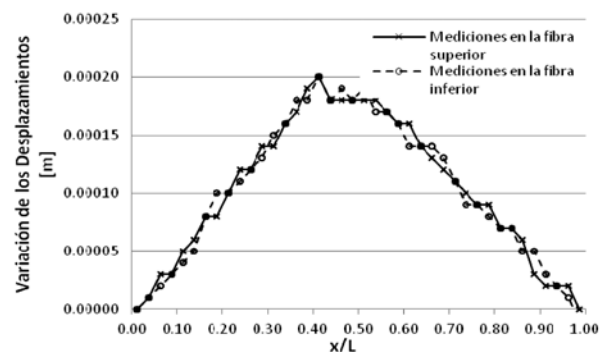


Figura 12 – Variación de los Desplazamientos para una fisura de profundidad $a/h=0.15$, ubicada en $x/L=0.40$, para lecturas en la fibra superior e inferior.

Como puede apreciarse en la Figura 12, ambas formas de medición permiten la detección y localización del daño con una precisión similar.

3.7. Sensibilidad al grado de pretensado

Dado que en este método se parte de la información de la estructura sin daño, podría suceder que la misma se disponga para un cierto grado de pretensado y que, por las pérdidas del mismo en el tiempo, al momento de realizar las mediciones sobre la estructura dañada, la fuerza de pretensado sea menor a la de partida.

A los efectos analizar esta posibilidad, se graficó la variación máxima de los desplazamientos en función del grado de pretensado para el caso de la fisura de profundidad $a/h=0.15$ ubicada en $x/L=0.40$. Dicho análisis puede verse en la Figura 13. Como se aprecia, en la medida que se pierde fuerza de pretensado, dado que los desplazamientos aumentan, la sensibilidad del método refleja un ligero incremento, por lo cual no solo sigue siendo válida su aplicación sino que incluso mejora su eficiencia bajo estas condiciones de pretensado.

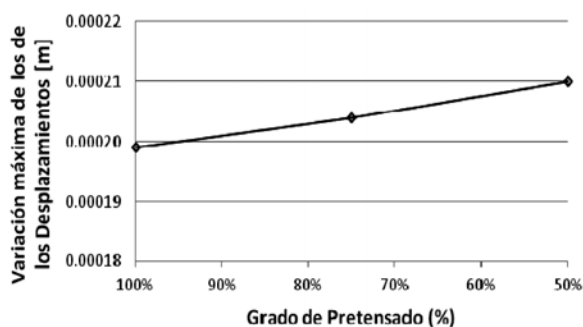


Figura 13 - Variación máxima de los Desplazamientos en la posición de la fisura, para una fisura de relación $a/h=0.15$ ubicada en $x/L=0.40$, en función del grado de pretensado.

3. CONCLUSIONES

Cabe mencionar que este primer estudio llevado a cabo pretende ser de aplicación a configuraciones de fisuras discretas o sectores de fisuración localizados, provocados por ejemplo, por la aparición de cargas no previstas, previéndose para futuros trabajos, el análisis y/o desarrollo de métodos de detección de fisuras distribuidas, como las que aparecen por ejemplo, por efectos reológicos del hormigón.

El estudio realizado permite, mediante la utilización de modelos numéricos tridimensionales, por una parte validar el método de los desplazamientos, utilizado para la detección y localización

de fisuras discretas de flexión, en vigas de hormigón pretensado y, además, mediante la información proporcionada por dichos modelos, muestra como puede facilitarse y hacerse más eficiente la configuración previa de los correspondientes ensayos experimentales. En el análisis realizado se destaca lo siguiente:

- En cuanto a la densidad de mediciones, para la aplicación del método de Variación de los Desplazamientos resultó adecuada una separación entre las mismas de, al menos, $L/40$,

- La precisión de las mediciones requeridas por el método fue del orden de 1×10^{-5} m, la cual resulta similar a la precisión que poseen los instrumentos de medición actuales.

- La pérdida de precisión debida a la distancia existente entre la ubicación del daño y el punto de medición más cercano se encuentra acotada en un máximo del 13 %.

- Las mediciones de los desplazamientos en la fibra inferior o superior de la viga, resultaron indistintas.

- La aplicabilidad del método no se ve afectada por la pérdida de pretensado, que se da con el paso del tiempo.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- [1] P. CAWLEY and A.D. ADAMS (1979). The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *Journal of Strain Analysis* 14 (2): 49-57.
- [2] S.W. DOEBLING, C.R. FARRAR and M.B. PRIME (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods. *The Shock and Vibration Digest* 30 (2): 91-105.
- [3] L.H. YAM, Y.Y. LI and W.O. WONG (2002). Sensitivity studies of parameters for damage detection of plate like structures using static and dynamic approaches. *Engineering Structures* 24: 1465-1475.

- [4] C.C. CHANG and L.W. CHEN (2004). Damage detection of a rectangular plate by spatial wavelet based approach. *Applied Acoustics* 65: 819-832.
- [5] B.H. KIM, N. STUBBS and T. PARK (2005). Flexural damage index equation of a plate. *Journal of Sound and Vibration* 283: 341-368.
- [6] B.H. Kim, H. Kim and T. Park (2006). Nondestructive damage evaluation of plates using the multi-resolution analysis of two-dimensional Haar wavelet. *Journal of Sound and Vibration* 292: 82-104.
- [7] J. CHOU and J. GHABOUSSI (2001). Genetic algorithm in structural damage detection. *Computers & Structures* 79: 1335-1353.
- [8] T. SAIN and J.M. CHANDRA KISHEN (2003). Damage and residual life assessment of structures using fracture mechanics. *Proceedings of the 16th ASCE Engineering Mechanics Conference (EM03 Electronic Proceedings)*, University of Washington, Seattle, July, 13 pp.
- [9] Y. CHOI, J.S. LEE, E. CHOI and H.N. CHO (2004). Development of elastic damage load theorem for damage detection in statically determinate beam. *Computers & Structures* 82: 2483-2492.
- [10] D. MAITY and A. SAHA (2004). Damage assessment in structures from changes in static parameter using neural networks. *Sadhana*, 29, No. 3: 315-327.
- [11] A. CADDEMI and A. MORASSI (2005). A procedure for multiple damage identification in elastic beams. *Proceedings of 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Río de Janeiro, Brazil, May, 10 pp.
- [12] P.N. DOMÍNGUEZ, C.J. ORBANICH and N.F. ORTEGA (2007). Localización de fallas en vigas de fundación de hormigón armado. *Mecánica Computacional* 26: 1373-1386.
- [13] H.C. EUN and E.T. LEE (2007). Damage Detection of Flexural Member by Estimated Moment Diagram. *The Open Construction & Building Technology Journal* 1: 1-7.
- [14] S.I. ROBLES, N.F. Ortega and C.J. Orbanich (2008). Damage Identification in 2D Structures Through Static Response. *Open Construction & Building Technology Journal* 2: 176-184.
- [15] C.J. ORBANICH, S.I. ROBLES and N.F. ORTEGA (2009). Detección de Fallas en Plateas de Fundación Elástica. *Mecánica Computacional* 28: 1897-1917.
- [16] S.I. ROBLES and N.F. Ortega (2011). Damage evaluation in shells from changes in its static parameters. *The Open Construction & Building Technology Journal*, Bentham Publishers 5: 182-189.
- [17] M.M. ABDEL WAHAB and G. DE ROECK (1999). Damage detection in bridges using modal curvatures: Application to a real damage scenario. *Journal of Sound and Vibration* 226 (2): 217-235.
- [18] C.A. JEYASEHAR and K. SUMANGALA (2006). Damage assessment of prestressed concrete beams using artificial neural network (ANN) approach. *Computers and Structures* 84: 1709-1718.
- [19] S. YUYAMA, K. YOKOYAMA, K. NIITANI, M. OHTSU and T. UOMOTO (2007). Detection and evaluation of failures in high-strength tendon of prestressed concrete bridges by acoustic emission. *Construction and Building Materials* 21: 491-500.
- [20] A. GHARIGHORAN, F. DANESHJOO and N. KHAJI (2009). Use of Ritz method for damage detection of reinforced and post-tensioned concrete beams. *Construction and Building Materials* 23: 2167-2176.
- [21] H. ELFERGANI, P. RHYS and K. HOLFORD (2013). Damage assessment of corrosion in prestressed concrete by acoustic emission. *Construction and Building Materials* 40: 925-933.
- [22] N. KULPRAPHA and P. WARNITTHAI (2012). Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridges using ambient thermal responses. *Engineering Structures* 40: 20-38.
- [23] M.K. ELBATANOUNY, P.H. ZIEHL, A. LAROSCHE, J. MANGUAL, F. MATTA and A. NANNI (2014). Acoustic emission monitoring for assessment of prestressed concrete beams. *Construction and Building Materials* 58: 46-53.
- [24] VIALIDAD NACIONAL (1952). Bases para el cálculo de puentes de hormigón armado.
- [25] CIRSOC 201 (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.
- [26] COMSOL (2013). Versión 4.4 FNL. Multiphysics User's Guide.