

Metodologias para a localização de danos em vigas de concreto protendido

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

Em este trabalho são avaliadas metodologias para a detecção de danos em estruturas de concreto protendido. 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 protendidas, 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 protendido. A eficácia das metodologias propostas foi demonstrada e a possibilidade e a conveniência de um uso combinado delas são destacadas.

Palavras chave: concreto protendido; detecção de fissuras; ensaios estáticos; deslocamentos; elástica.

Citar como: G. D. Ercolani, N. F. Ortega, D. H. Felix (2017), “Metodologias para a localização de danos em vigas de concreto protendido”, Revista ALCONPAT, 7 (3), pp. 262-273, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.240>

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

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

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

Informações legais

ALCONPAT Magazine é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização desta questão, ALCONPAT IT Unit, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada na segunda edição do ano de 2018, desde que a informação seja recebida antes do encerramento do primeiro ano de 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.

Metodologías para la localización de daño en vigas de hormigón pretensado

RESUMO

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.

1. INTRODUÇÃO

O concreto protendido é um material amplamente utilizado na indústria da construção, sendo um dos seus usos mais comuns o tipo estrutural de vigas de eixo reto. Essas estruturas frequentemente sofrem diversos tipos de danos ao longo de sua vida útil, por isso é extremamente importante identificá-los, com a maior antecedência possível, para tomar medidas de intervenção posteriores.

As manifestações patológicas que as estruturas de concreto protendidas podem apresentar são variadas, no entanto, como em qualquer estrutura de concreto, a manifestação mais comum é através da aparência de fissuras. Isso tem gerado numerosos estudos sobre a fissuração do concreto protendido, em diferentes idades do mesmo e por várias razões (Karayannis e Chalioris, 2013, Dai et al., 2016, Tong et al., 2016).

Embora, em muitos casos, uma estrutura de concreto que apresenta fissuras também pode cumprir sua função estrutural, dependendo do grau de avanço do dano e da velocidade de sua propagação; A mera presença dessas fissuras merece atenção, pois podem significar um risco potencial para a segurança da estrutura. Além disso, em uma estrutura de concreto armado ou protendido fissurada, a entrada de agentes corrosivos que podem chegar ao aço é facilitada, com a circunstância agravante, no caso do aço de protensão, que é muito mais sensível à corrosão por tensão (Bertolini et al., 2014).

Uma característica especial das estruturas de concreto protendido, em comparação com o concreto armado, é que a ação de protensão tende a manter as fissuras fechadas, uma vez que a causa que as originou desapareceu. Isso faz com que as inspeções visuais da estrutura sejam difíceis, como um primeiro diagnóstico geral. Desta forma, surge a necessidade de desenvolver e / ou validar métodos que permitam inspecionar o estado das estruturas, a fim de primeiro detectar a presença de dano, depois localizá-lo e quantificá-lo o máximo possível.

No presente trabalho são estudados dois métodos de diagnóstico, com base na resposta estática da estrutura e aplicado especificamente à detecção de fissuras por flexão, em vigas de concreto protendidas. Estes métodos são conhecidos como variação de deslocamento (MVD) e curvatura de elasticidade (MCE). A implementação destes foi realizada em duas vigas de concreto protendido, construídas no laboratório.

Os métodos mencionados foram estudados por vários autores, entre os quais os trabalhos de (Pandey et al., 1991, Lu et al., 2002, Domínguez et al., 2007, Orbanich et al., 2009, Robles et. al., 2011; Dawari e Vesmawala, 2013; Ercolani et al., 2015). No entanto, as aplicações dos referidos métodos em estruturas protendidas não foram encontradas.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os ensaios laboratoriais foram realizados em duas vigas com características semelhantes, mas danificadas em duas posições diferentes: Viga 01 na zona central e Viga 02 em uma posição próxima a um dos suportes. Este dano consistiu em uma fissura discreta causada pela aplicação de uma carga pontual.

2.1 Características das vigas ensaiadas

As vigas são compostas por uma viga pré-moldada de concreto protendido, de seção tipo T, a qual foi adicionada uma cabeça de compressão concretada in situ, resultando em uma viga de seção retangular. Para obter uma boa aderência entre o concreto fresco e o da viga pré-moldada, utilizou-se uma ponte de ligação de epóxi. O comprimento total das vigas é de 2,20 m. O traçado do cabo protendido é reto. Na Figura 1, a seção transversal das vigas é mostrada.

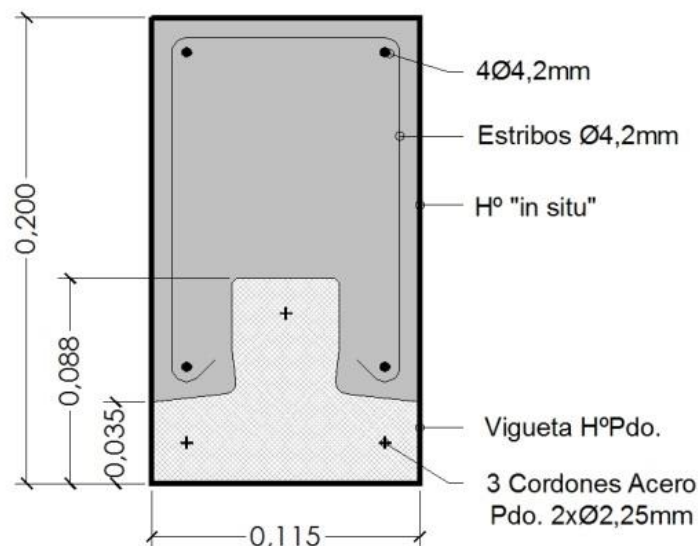


Figura 1. Seção transversal das vigas ensaiadas.

As características dos materiais que compõem as vigas, de acordo com a norma do CIRSOC 201 (Centro de Pesquisa para Regulamentos Nacionais de Segurança Civil, 2005) são as seguintes:

- Concreto pré-moldado: H30
- Concreto moldado in loco: H30
- Aço de protensão: C1950

Quanto à força de protensão, não se sabe com exatidão, embora tenha sido estimada. Sendo usual uma tensão de tração inicial do aço de protensão da ordem de 1000 MPa, e dado que a seção total do aço é de 23,86 mm², uma força de protensão total é estimada em 23900 N. Em qualquer caso, esta incerteza também é geralmente encontrada nas estruturas em serviço, onde a força de protensão do projeto é conhecida, mas houve perdas durante sua vida, até o momento do estudo. Deve-se notar que, mesmo sem saber com precisão o valor da força de protensão, não é uma limitação para a aplicação dos métodos de detecção de danos usados aqui.

2.2 Ensaio sobre Viga 01

A viga foi disposta simplesmente apoiada, com uma distância entre apoios de 2,00 m e sujeita a uma carga pontual no centro do vão. Um total de 10 defletores foram instalados sobre ele, com uma precisão de 0,01 mm, equidistantes um do outro, o que permitiu medir os deslocamentos verticais à medida que a carga aplicada foi aumentada.

A carga foi incrementada até provocar uma fissura localizada na região central da viga. Neste caso, mediu-se a profundidade alcançada pela fissura e sua largura máxima na área inferior da viga, bem como a posição precisa da viga. Em seguida, a viga foi descarregada e, nesse momento, observou-se, como, graças à ação do protensão, a fissura foi fechada e a configuração anterior ao carregamento foi recuperada quase na sua totalidade. Vale ressaltar que o aumento da carga foi suspenso quando foi possível observar uma fissura de magnitude significativa em relação à altura total da viga.

Então, a viga já danificada foi submetida a carregamento novamente, medindo os deslocamentos verticais nos mesmos pontos. A informação obtida foi então utilizada para aplicar os métodos de detecção de danos.

Na Figura 2.a), a viga 01 é observada durante o ensaio. Na mesma pode-se observar a prensa com a qual se aplicou a carga pontual, a célula de carga e os defletores instalados na viga. Dado que a estrutura que suporta a viga também pode sofrer deformações, dois dos defletores foram instalados em coincidência com os apoios da viga, para poder corrigir as leituras dos deslocamentos obtidos.

Na Figura 2.b) pode-se observar a fissura causada pela carga máxima aplicada com a indicação da profundidade alcançada, que foi de 0,062 m ($a/h = 0,31$). Deve-se mencionar que, quando essa profundidade de fissura foi alcançada, o aumento de carga foi suspenso, uma vez que a magnitude da carga foi suficientemente significativa. A largura máxima da fissura foi de 0,35 mm e sua posição foi originada em $x/L = 0,485$.

A Figura 3 mostra as curvas de deslocamento vertical vs. carga aplicada, obtida para os dois pontos de medição mais próximos do centro, para a viga sem dano prévio (VSDP) e para a viga já fissurada ou com dano prévio (VCDP).



Figura 2. Ensaio sobre a Viga 01.
a) Vista geral. b) Medição da fissura.

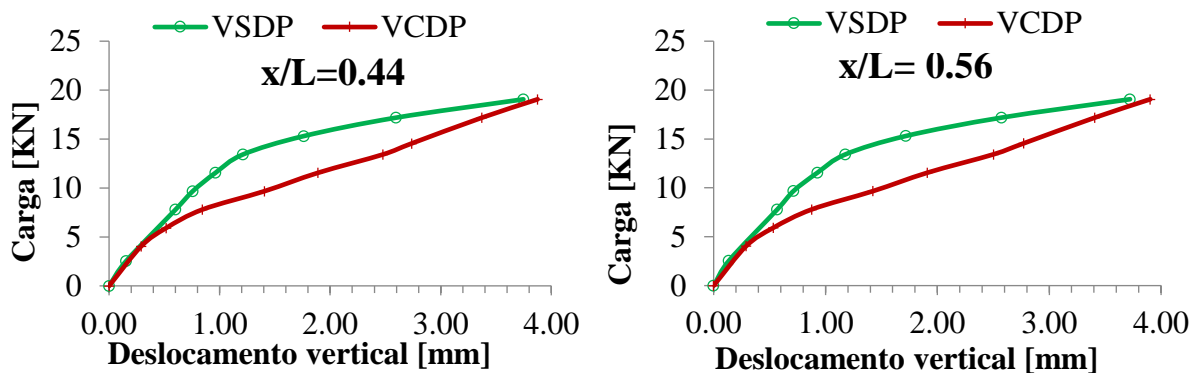


Figura 3. Curvas de deslocamentos verticais nos dois pontos da zona central da Viga 01.

A simetria dos deslocamentos obtidos pode ser observada, uma vez que a fissura se originou muito perto do centro da viga. Para as cargas aplicadas na viga sem danos prévios, é observada uma primeira zona de comportamento linear e, em seguida, uma zona não linear, que ocorre desde o início da fissuração. Quando a carga foi aplicada na viga previamente danificada, as curvas dos deslocamentos obtidos mostraram que os mesmos aumentaram rapidamente, mas quando a carga aplicada se aproximou da carga que causou a fissura, ambas as curvas de deslocamento aproximaram-se do mesmo valor. O último indica que a fissura não continuava a se propagar.

Além disso, para detectar discontinuidades (fissuras, materiais diferentes, etc.), na Viga 01, foi implementado outro modo de diagnóstico de estado estrutural, através da termografia (Tashan e Al-Mahaidi, 2014; Kabir, 2010; Abudayyeha et al., 2004). Para que o dano seja evidente em uma imagem termográfica, é necessário que exista uma transferência de calor no elemento estudado, neste caso na massa do concreto. Em uma estrutura que separa duas condições climáticas diferentes, isso pode ser suficiente para notar a maior transferência de calor que ocorre através da área danificada (Pérez e Piedecausa, 2016).

No caso de uma viga sob condições ambientais externas, o gradiente térmico também poderia existir, por exemplo, devido à exposição ao sol. Na viga em estudo, que estava a uma temperatura uniforme dentro do laboratório, era necessário realizar a aplicação de calor na sua superfície, que foi feita através de uma tela de aquecimento elétrico. Em seguida, procedemos a observar a viga usando a câmera termográfica (marca Testo-890) e as imagens foram capturadas e depois processadas usando o software IRSoft 3.1 e Mathematica (Wolfram, 2015).

Deve-se mencionar que a inspeção foi realizada na viga submetida a solicitações de flexão, de modo que a fissura estava aberta com uma largura máxima de fissura de 0,30 mm. Os resultados obtidos, para uma diferença de temperatura máxima de 17 ° C entre o concreto e o ambiente, são mostrados na Figura 4. Nela, a fissura na área inferior da viga pode ser claramente vista, e até mesmo as discontinuidades térmicas podem ser vistas na área de união entre o concreto da viga e o concreto moldado in loco. Além disso, a variação brusca da temperatura coincide com a fissura.

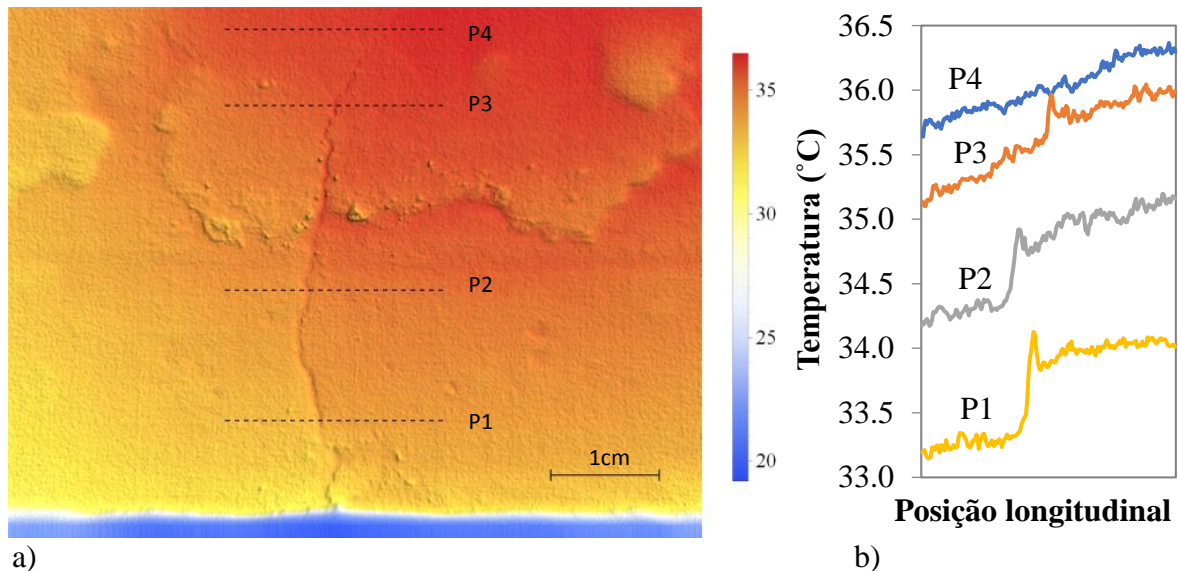


Figura 4. Estudo termográfico da Viga 01.
a) Vista da zona da fissura. b) Perfis de temperatura.

2.3 Ensaio sobre a Viga 02

A viga foi disposta simplesmente apoiada, com uma distância entre apoios de 2,00 m e sujeito a uma carga pontual no centro do vão. Da mesma forma que para a viga 01, os deslocamentos verticais foram medidos à medida que a carga aplicada foi incrementada. A referida carga foi controlada para não causar danos à viga. A viga foi descarregada e, em seguida, aplicou-se outro ponto de carga, em uma posição próxima ao apoio direito. Neste caso, a carga aumentou para causar uma fissura discreta na referida área, de magnitude significativa em relação à altura total da viga. A profundidade alcançada pela fissura foi medida, bem como a posição precisa da fissura. Então a viga foi descarregada e poderia ser observado como, graças à ação de protensão, a fissura fechando. A fissura já gerada é mostrada na Figura 5.a). A profundidade da mesma resultou de uma relação com $a/h = 0,535$, na posição relativa $x / L = 0,80$.

Então, a viga já danificada foi novamente submetida a uma carga centrada, medindo os deslocamentos verticais nos mesmos pontos que para a condição não danificada. Figura 5.b) mostra as curvas de deslocamento vertical versus vertical. Carga aplicada, obtida para o ponto de medição mais próximo da posição da fissura, para a viga sem dano prévio (VSDP) e para a viga já fissurada ou com dano prévio (VCDP).

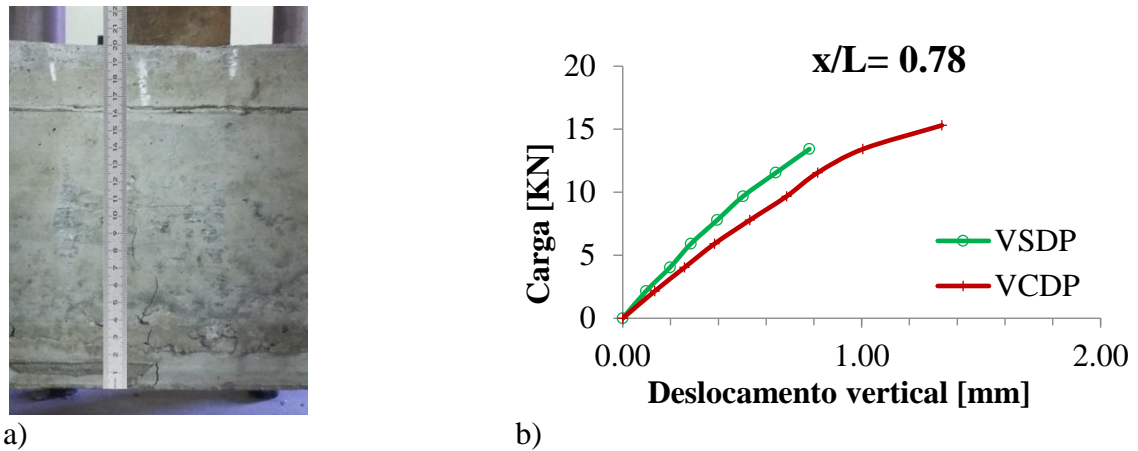


Figura 5. Ensaio sobre a Viga 02.

a) Medição da fissura. b) Curvas de deslocamentos no ponto $x/L=0,78$.

Pode-se observar que o ensaio realizado na viga sem danos foi mantido dentro da zona de comportamento linear, precisamente para conservar a viga sob essas condições. Para este efeito, foi muito útil ter a informação do ensaio previamente realizado na Viga 01.

3. MÉTODO DE VARIAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

Este método consiste em encontrar os deslocamentos verticais na viga danificada e compará-los com aqueles da viga sem danos. Esse parâmetro pode ser considerado como um índice da variação na rigidez da estrutura e é definido como:

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

onde w_{iCD} é o deslocamento vertical do ponto i na estrutura com dano e w_{iSD} é o deslocamento do mesmo ponto na estrutura sem danos, ambos causados por um mesmo aumento nas cargas aplicadas. Representando esta diferença de valores nos deslocamentos verticais, a presença de dano pode ser detectada, observando o ponto em que a variação dos deslocamentos é máxima.

Vale ressaltar que, para aplicar este método, é necessário ter a magnitude dos deslocamentos da viga sem danos (w_{iSD}), para fazer a comparação. Pode-se contar com esta informação quando as inspeções da estrutura são feitas com certa frequência ou existem outras vigas idênticas sem danos, nas quais essas medições podem ser feitas.

A aplicação deste método foi realizada a partir dos deslocamentos obtidos experimentalmente na estrutura, quando se deslocam de um estado de cargas "A" para um estado de cargas "B" (Ercolani et al., 2015). Neste caso, considerou-se o estado "A", o que corresponde à carga pontual de 7,79 kN e ao estado "B" ao da carga pontual de 9,67 kN.

A Figura 6 mostra o gráfico obtido ao aplicar este método para a viga 01. Pode-se ver que o MVD permite detectar a presença de dano e também localizá-lo com boa aproximação. A posição real da fissura em $x / L = 0.485$ é indicada no mesmo gráfico, enquanto a localização $x / L = 0.505$ é obtida aplicando o método.

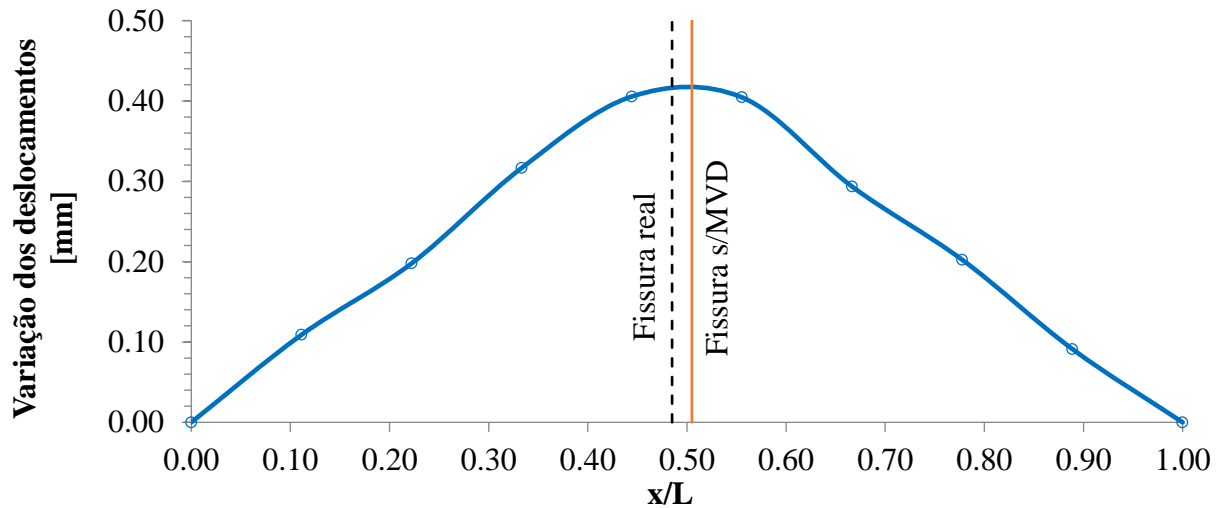


Figura 6. MVD aplicado sobre a Viga 01.

A Figura 7 mostra o gráfico obtido aplicando o MVD na viga 02. A posição real da fissura em $x / L = 0,80$ é indicada no mesmo gráfico, enquanto a localização é obtida aplicando o método $x / L = 0,77$.

Pode ser visto na Figura 7 uma área na qual a variação dos deslocamentos é negativa, embora muito próxima de ser zero; isto é, nessa zona, os deslocamentos da viga danificada, devido ao aumento da carga, foram um pouco inferiores aos da viga sem danos. Isso pode ser devido ao fato de que o dano à viga é tão significativo que os deslocamentos aumentam repentinamente na área mais próxima da fissura, enquanto a área mais afastada sofre poucas alterações. Para fornecer informações adicionais a este respeito, está prevista a Figura 8, em que os deslocamentos causados pelo aumento da carga da viga 02 podem ser vistos em ambas as condições, sem danos prévios (VSDP) e com dano prévio (VCDP). Pode-se observar que os deslocamentos máximos aumentam para a área fissurada, dando origem ao cruzamento de ambas as curvas de deslocamento.

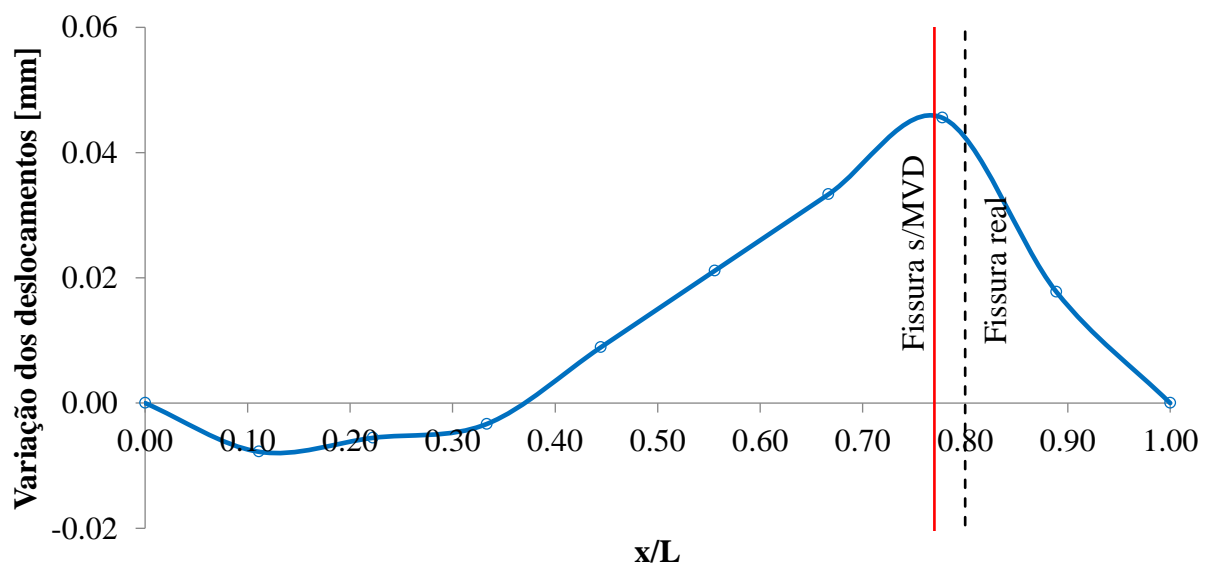


Figura 7. MVD aplicado sobre a Viga 02.

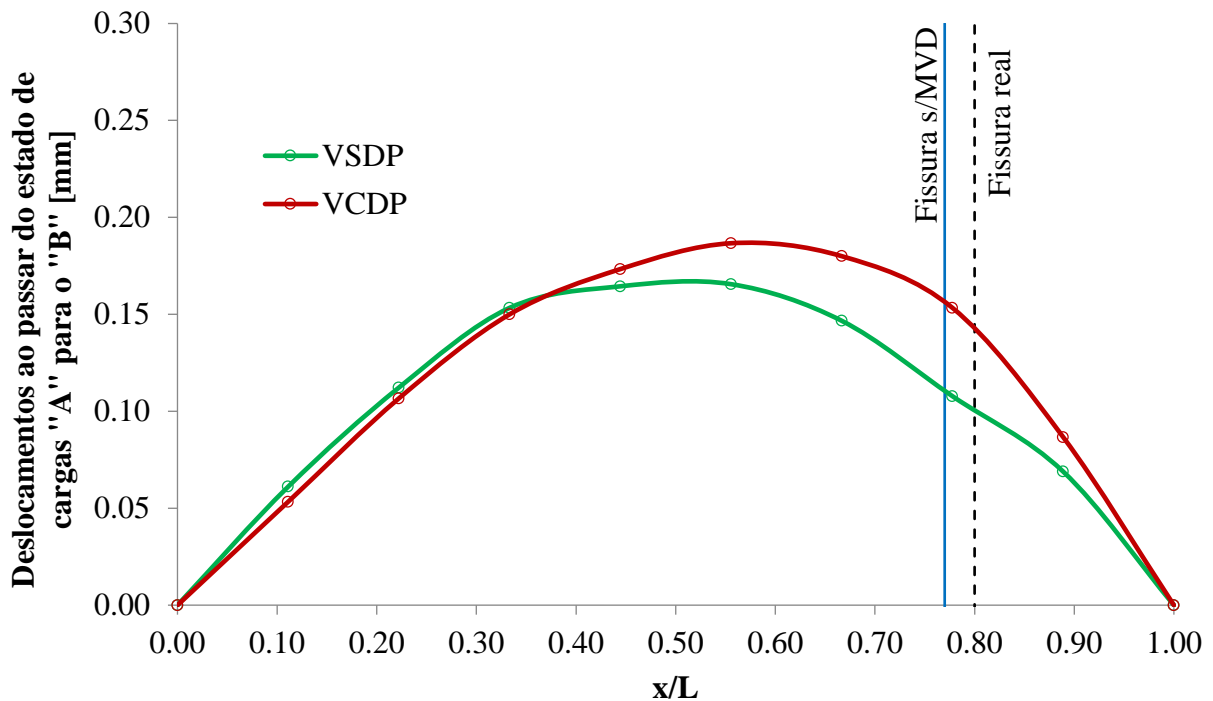


Figura 8. Curvas que dão origem a aplicação do MVD sobre a Viga 02.

Deve-se mencionar que o número de pontos de medição nas vigas e, portanto, a distância entre elas, foi condicionada ao equipamento disponível para esse fim. Neste caso, os pontos de medição foram espaçados a cada $L/9$ e pode-se notar que resultou ser uma distância adequada para a aplicação experimental deste método, embora uma maior densidade de medidas possa permitir uma localização ainda mais precisa do dano (Ercolani et al. al., 2015).

4. MÉTODO DA CURVATURA DA ELÁSTICA

A curvatura da elástica de uma estrutura é dada por:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{M}{EI} \tag{2}$$

onde w é o deslocamento da estrutura, M é o momento de flexão solicitante, E é o módulo de elasticidade do material e I é o momento de inércia da seção. Então, EI representa a rigidez flexional da estrutura e pode-se observar que, se a estrutura apresentar um dano localizado, a rigidez diminuirá no local do dano e, portanto, a magnitude da curvatura nesse local aumentará. Além disso, quanto maior a magnitude do dano, maior o aumento da curvatura.

O cálculo da curvatura da elástica na estrutura danificada pode ser realizado através da medição dos deslocamentos para um certo número de pontos da estrutura e, a partir deles, realizar uma aproximação por meio de diferenças finitas centrais, ou seja:

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

onde s é a distância entre dois pontos de medição adjacentes. Desta forma, o MCE consiste em medir os deslocamentos verticais para um certo número de pontos da estrutura e, obtendo a curvatura da estrutura deformada, para detectar anomalias nele. Pelo que foi dito, pode-se notar que este método não exige conhecer os deslocamentos da estrutura sem danos, sendo esta uma vantagem importante em relação ao MVD, já que é comum não tê-los.

Nos casos em estudo, a precisão das medições, bem como a separação entre os pontos de medição, são condicionadas ao equipamento disponível para este fim, que pode não ser o mais conveniente para a aplicação deste método. No entanto, para compensar isso, o método não foi aplicado apenas à viga já danificada, mas também foi aplicado à viga em condições intactas, para poder comparar os resultados em ambas as condições.

Quanto ao MVD, a aplicação do MCE foi realizada a partir dos deslocamentos obtidos na estrutura, quando se deslocam de um estado de cargas "A" (carga pontual de 7,79 KN) para um estado de carga "B" (ponto de carga de 9,67 KN).

A Figura 9 mostra a aplicação do MCE para a viga 01, para os estados sem danos e com danos. Pode-se observar que o MCE permitiu identificar a presença do dano na Viga 01 e aproximar a sua localização. O método dá como posição do dano o ponto $x/L = 0,51$, o que resulta num erro absoluto de 2,5%, em comparação com a localização verdadeira da fissura em $x/L = 0,485$.

Por outro lado, a Figura 10 mostra a aplicação do MCE para Viga 02 nas condições sem danos e com danos. Nesta figura, pode-se notar que o MCE permitiu identificar a presença do dano na viga 02 e ter uma boa aproximação da localização do mesmo. O método dá como posição de dano o ponto $x/L = 0,78$, o que resulta em um erro absoluto de 2% em relação à localização real da fissura em $x/L = 0,80$.

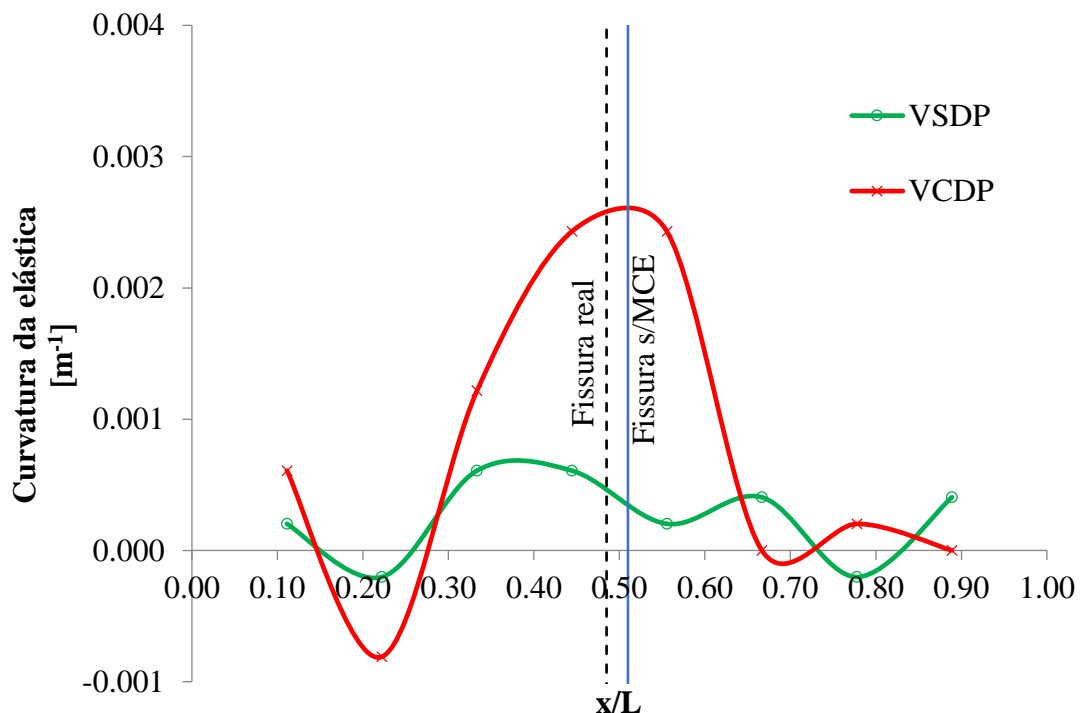


Figura 9. MCE aplicado sobre a Viga 01 experimental em condições fissurada e sem dano.

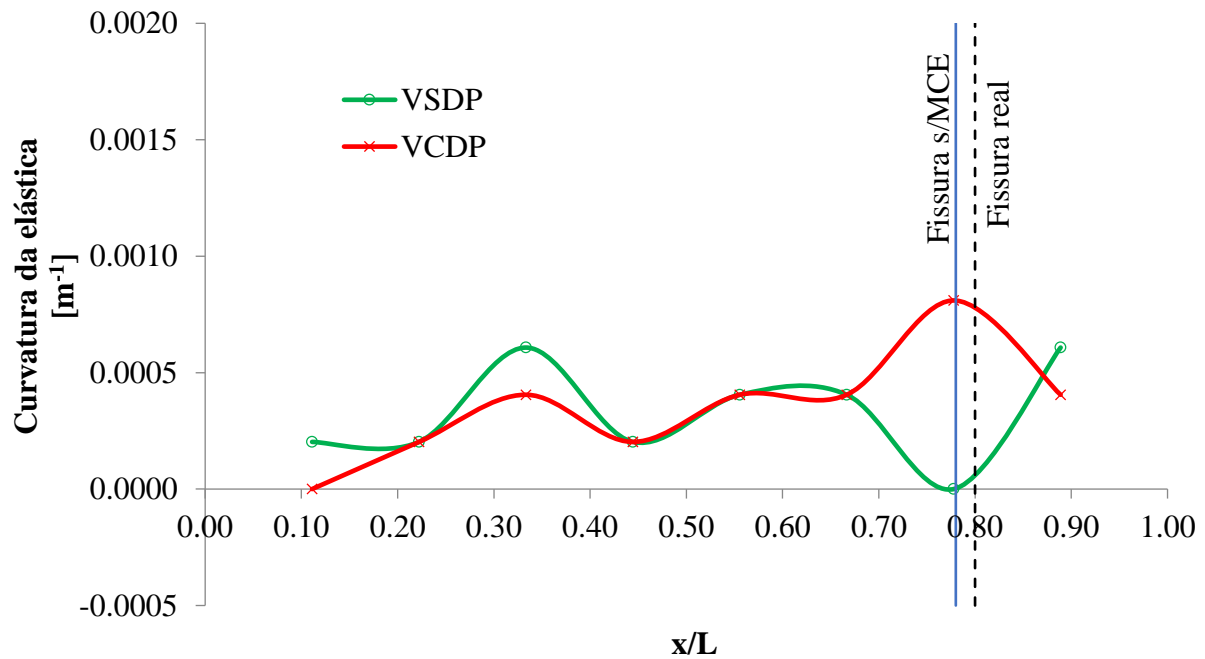


Figura 10. MCE aplicado sobre a Viga 02 experimental em condições fissurada e sem dano.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, a potencialidade de dois métodos de detecção de danos com base em suas respostas estáticas, aplicada em duas vigas de concreto protendido construídas no laboratório, foi avaliada experimentalmente. Estes métodos são a variação dos deslocamentos e a curvatura da elástica. Além disso, em uma das vigas, a termografia infravermelha foi aplicada com sucesso para visualizar o dano. A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir o seguinte:

- A aplicação de ambos os métodos é fácil de implementar. Além disso, eles podem ser usados em conjunto, se os dados necessários estiverem disponíveis, o que permite um melhor diagnóstico.
- Como é de se esperar, a força de protensão, por tender a fechar a fissura, faz com que a manifestação do dano, em ambos os métodos, seja menos perceptível do que no caso de vigas de concreto armado. No entanto, essa manifestação foi suficiente para mostrar a existência de dano, usando os métodos utilizados, tanto para a viga fissurada na área central quanto para a fissura na proximidade de um dos apoios.
- Quanto à determinação da posição do dano com o MVD, as diferenças obtidas, entre a localização real da fissura e a localização indicada pelo MVD, foram 2,0% e 3,0%, para as vigas V01 e V02, respectivamente. Por outro lado, com o MCE, foram obtidas diferenças de 2,5% e 2,0% para essas vigas. Estes erros estão dentro de uma margem mais do que aceitável para o trabalho experimental.
- Foi demonstrado que o processamento de imagens termográficas pode ser uma ferramenta valiosa para a detecção de fissuras ou anomalias, bem como alterações na homogeneidade do material.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia e à Secretaria-Geral de Ciências e Tecnologia da Universidade Nacional do Sul (UNS), do Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Técnica (CONICET) e da Comissão de Investigações Científicas da Província de Buenos Aires (CIC), pelo apoio oferecido para o desenvolvimento dessas investigações.

7. BIBLIOGRAFIA

- 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.