

CORRELACION DIGITAL DE IMÁGENES APLICADA A ENSAYOS DE ESTRUCTURAS DE MATRIZ CEMENTICIA

Morel, Claudia A.; Vallejos Juan Manuel

MSc. Ing. en Construcciones; Dr. Ing. Electromecánico

Instituto de Estabilidad, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste.

cmorel@ing.unne.edu.ar

RESUMEN

En el campo de la ingeniería civil, el uso de técnicas avanzadas como la correlación digital de imágenes (CDI) ha revolucionado la forma en que se pueden medir y monitorear diversos aspectos de la infraestructura. La correlación digital se basa en la comparación de imágenes de alta resolución tomadas antes y después de aplicar cargas a la estructura. Al analizar los cambios en los patrones de textura, se puede determinar con precisión la magnitud y la dirección de los desplazamientos y deformaciones, así como identificar la aparición de fisuras. Esta técnica ofrece varias ventajas sobre los métodos convencionales, ya que es no invasiva y requiere de equipamiento de menor costo. En este trabajo se presentan las mediciones realizadas en distintos ensayos mecánicos efectuados sobre cuerpos de prueba de matriz cementicia. Se determinó para cada configuración de carga el parámetro que permite identificar más tempranamente la aparición de fisuras. Se compararon además los desplazamientos medidos y calculados por CDI con los resultados obtenidos por los métodos tradicionales de medición en ensayos de matriz cementicia.

ABSTRACT

Advanced techniques such as Digital Image Correlation (DIC) in civil engineering introduced a new technique to measure and monitor different aspects of infrastructure. Digital correlation relies on comparing high-resolution images taken before and after applying loads to the structure. By analysing changes in texture patterns, one can accurately determine both the magnitude and direction of displacements and deformations while also identifying the appearance of cracks. This technique offers several advantages over traditional methods, as it is non-invasive and requires lower-cost equipment. This paper presents measurements of various mechanical tests conducted on cementitious matrix specimens. We determined the parameter that allows for earlier identification of crack appearance for each loading configuration. Additionally, we compared the displacements measured and calculated by DIC with the results obtained by traditional measurement methods in cementitious matrix specimens.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

Para caracterizar el comportamiento de los materiales, se utilizan pruebas y ensayos de laboratorio que buscan cuantificar distintos aspectos tales como su resistencia mecánica o capacidad de deformación. Las mediciones de deformaciones pueden ser efectuadas mediante instrumentos en contacto con los especímenes, tales como transductor de deformación, galgas extensiométricas o flexímetros (o indicador de dial), que permiten lecturas con precisiones de centésimas de milímetros¹. Estos instrumentos son equipamientos de alto costo y mantenimiento.

En las últimas décadas se han incorporado otras técnicas de medición de deformación que no requiere contacto. Entre ellas, la correlación digital de imágenes (CDI) utiliza capturas con cámaras digitales que permiten la determinación de las elongaciones y desplazamientos². La CDI es una técnica sin contacto en la que se comparan dos imágenes para identificar patrones, deformaciones o cambios a lo largo del tiempo. Utiliza algoritmos de registro de imágenes para seguir los desplazamientos relativos entre una imagen de referencia, normalmente la imagen no deformada, y una imagen deformada. Este método permite estudiar la deformación en probetas a diferentes escalas de longitud, desde metros hasta la nanoescala, siempre y cuando se pueda desarrollar un patrón de manchas adecuado sobre el material³.

Los investigadores, Ranson et al.² fueron los primeros en utilizarlo en la década de 1980 como una herramienta para determinar campos de deformación basados en movimientos relativos de características aleatorias en una superficie. Los avances tecnológicos en la última década, han hecho del CDI una herramienta muy práctica para que los investigadores la utilicen en estudios de mecánica experimental. Sutton et al.⁴ describen en su trabajo los detalles básicos del funcionamiento de la CDI. El software de análisis calcula los desplazamientos discretizando la región de interés moteada en grupos superpuestos conocidos como subconjuntos. Los subconjuntos son regiones pequeñas, típicamente cuadradas, con su propio patrón de escala de grises único generado a partir del patrón moteado. Utilizando la imagen de referencia, se determina el punto central de cada subconjunto. En cada imagen posterior tomada durante la deformación de la muestra, se utiliza un algoritmo de correlación para calcular las ubicaciones actualizadas de los subconjuntos deformados y sus centros correspondientes. La diferencia entre las coordenadas de referencia y las actualizadas devuelve un vector de desplazamiento. El tamaño del paso, que es la distancia entre los centros de los subconjuntos, dicta la cantidad de puntos de datos utilizados en el análisis del software. Para determinar los campos de deformación, el software CDI diferenciará los campos de desplazamiento. Esto normalmente se hace mediante una operación de filtrado de promedio ponderado gaussiano que suaviza los datos de desplazamiento a lo largo de una longitud de filtrado seleccionada. Un tamaño de paso grande reducirá la resolución espacial, lo que reducirá la precisión de la diferenciación utilizada para los cálculos de deformación. La operación de filtrado reduce el ruido, pero puede dar lugar a mediciones erróneas, por lo que es necesario el criterio del usuario para determinar la validez de los resultados de deformación, especialmente alrededor de discontinuidades como grietas o muescas⁵.

Organiza:

Las deformaciones en materiales cuasi frágiles, como el hormigón, son caracterizadas por una combinación de comportamiento elástico y comportamiento frágil. A diferencia de los materiales totalmente frágiles, que experimentan una fractura abrupta una vez que alcanzan su límite de resistencia, el hormigón y otros materiales cuasi frágiles muestran cierta capacidad de deformación antes de la falla final. Esto se debe principalmente a la presencia de microfisuras y fisuras en el material, que se desarrollan progresivamente bajo cargas aplicadas. A medida que aumenta la carga, estas fisuras se propagan y pueden eventualmente conducir a la fractura completa del material. La comprensión de las características de deformación en materiales cuasi frágiles ayuda al diseño y la evaluación de estructuras de hormigón, ya que influye en su capacidad de carga, resistencia y durabilidad.

El CDI tienen el potencial de detectar fisuras en materiales antes de que sean visibles a simple vista. Al analizar cambios sutiles en los patrones de imágenes, puede identificar deformaciones locales, incluidas las fisuras incipientes, que pueden no ser fácilmente perceptibles a simple vista. Este enfoque proporciona una capacidad de detección temprana de defectos y fisuras en el material, lo que permite una evaluación más precisa de su integridad estructural y la implementación oportuna de medidas correctivas.

En este artículo se presentan los resultados de estudios de CDI sobre vigas de hormigón armado ensayadas a flexión. Se comparan y discuten los resultados de los desplazamientos medidos por CDI y por medidor de dial. Se muestra además la detección temprana de fisuras y el patrón de fisuras final al momento de la fractura para cada una de las estructuras ensayadas.

METODOLOGÍA

Cuerpos de prueba

Se llevaron a cabo ensayos destructivos en cuatro vigas de hormigón para investigar su comportamiento bajo flexión. Se realizaron ensayos de flexión en tres puntos, como se muestra en el esquema de la Figura 1.

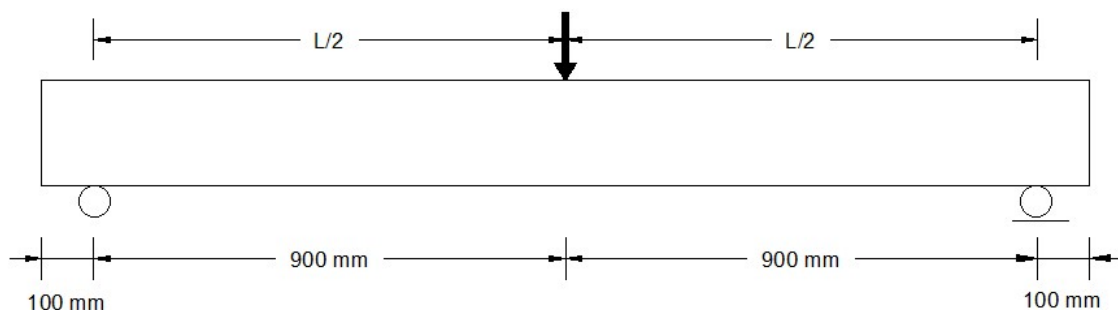


Figura 1. Sistema de ensayos a flexión de tres puntos.

Organiza:

Se pusieron a prueba dos tipologías de vigas: hormigón convencional y hormigón pretensado. Las vigas de hormigón armado convencional poseían, a su vez, tres configuraciones diferentes de armadura, que se detallan en la Figura 2 (vigas 1 a 3). Estas están constituidas por 4 barras de acero rectas de 1,9 m de longitud (sin ganchos de anclaje en los extremos) de diámetros 6 mm, 8 mm y 12 mm. Dos de ellas llevan estribos de 6 mm que forman una figura rectangular de 11 cm y 16 cm de lado y se unen con alambre a las barras longitudinales, con una separación de 20 cm. Para la viga pretensada (viga 4 en la Figura 2) se utilizaron cables 3x2,25 mm Acero C-1950 con una tensión de fluencia $f_y = 1680$ MPa, tensión de rotura $f_u = 1950$ MPa y una carga de pretensado en cada cable de 1862 kgf.

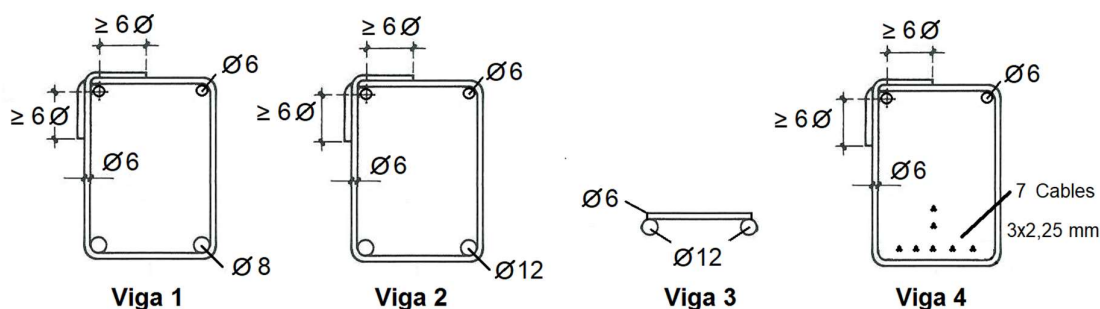


Figura 2. Esquema armaduras de las vigas de hormigón convencional (Vigas 1 a 3) y la viga de hormigón pretensado (viga 4).

Las estructuras fueron confeccionadas con un hormigón que poseía una resistencia característica $f'_c = 22$ MPa de acuerdo a ensayos en probetas efectuadas en el laboratorio. La proporción de materiales componentes: 45% de piedra basáltica triturada, 27% de arena gruesa, 9% de arena fina, 13% de cemento, 6% de agua (relación agua/cemento 0.5), aditivo plastificante en una dosis de 0.25% y aditivo superfluidificante a pie de obra en una dosis de 0.24%. El cemento CPF 40 de Puesto Viejo – Jujuy, agregado grueso es de la cantera Promin de Felipe Yofre – Corrientes con un TMN de 19mm. Los agregados finos son del río Paraná Puerto Vilelas – Chaco, sus diámetros característicos y módulos de finura son para arena gruesa de 2.36mm y 2.3, y para arena fina de 1.18mm y 1.9. Los aditivos son de la línea GCP, la densidad del aditivo plastificante MIRA 300 es de 1.34 kg/lit y del superfluidificante DARACEM 100 es de 1.23 kg/lit.

Las vigas fueron ensayadas a una edad de 365 días. La carga fue aplicada a través de un marco de carga movido por un sistema hidráulico. La transmisión de la fuerza P se midió con una celda de carga SU/PECAR de 10 toneladas de capacidad. El descenso de las vigas en la mitad de la luz de apoyo se midió utilizando un medidor de dial con una precisión de 0,01mm. La Figura 3 expone una fotografía de la configuración experimental para el ensayo de tres puntos.

Organiza:



Figura 3. Configuración experimental del ensayo de flexión en tres puntos.

Adquisición y procesamiento de imágenes

La superficie de los cuerpos de prueba fue pintada a mano con una base de color blanco mate utilizando pintura latex. El patrón de manchas también fue confeccionado a mano con pintura de color negro mate.

Las fotos fueron adquiridas utilizando un celular Samsung A12 cuya cámara principal posee una resolución máxima de 48 MP. La cámara fue configurada para disparar una imagen cada 1 segundo. Se utilizaron reflectores LED de luz cálida para mejorar la iluminación de la superficie de la muestra ensayada.

Las imágenes fueron procesadas mediante el programa de CDI 2D de código abierto Ncorr⁶, desarrollado en MATLAB. Con esta herramienta se determinaron los campos de desplazamientos y deformaciones en todas las vigas ensayadas para cada paso de carga e imagen adquirida.

RESULTADOS

Es bien sabido que, en términos de comportamiento mecánico, la viga 1 exhibe la carga de rotura más baja y la mayor ductilidad entre los cuatro casos analizados. Este comportamiento es previsible, dado que su refuerzo consiste en acero de menor sección transversal en comparación con los otros casos estudiados⁷. En contraste, la viga 2, que cuenta con un refuerzo de mayor sección transversal, presenta un comportamiento frágil. Aunque esta viga alcanza una carga última mayor, su fase de deformación plástica es prácticamente inexistente. Las vigas 3 y 4 muestran un comportamiento intermedio, con una resistencia similar a la viga 2 y un rango de

Organiza:

deformación plástica considerable. La Tabla 1 resume los valores de carga de fisuración, determinados a partir de los resultados obtenidos con CDI, y los valores máximos de carga de las cuatro vigas ensayadas, obtenidos mediante la lectura de la celda de carga ubicada en el centro del tramo. Se observó un valor bajo de carga de fisuración en la viga pretensada la cual, cabe señalar, fue confeccionada en condiciones diferentes a las de las vigas convencionales. Una de las posibles causas, son las fisuras de contracción por fragüe, que pudieron haber ocurrido debido a altas temperaturas ambientales durante este proceso. Las altas temperaturas pueden acelerar la evaporación del agua superficial, lo que a su vez puede llevar a la formación de fisuras tempranas que debilitan el espécimen. Otro factor que pudo influir en este resultado es la falta de adherencia entre los cables, que hace que la tensión de pretensado no se aplique de manera uniforme o insuficiente disminuyendo la capacidad para soportar cargas mayores de fisuración. Se encontró que en la sección donde se produjo la fisura, los estribos se encontraban más separados que en el resto de la estructura. Esta mayor separación puede haber contribuido a una menor capacidad de la viga para resistir la formación de fisuras, al reducir el confinamiento y la resistencia a las cargas transversales en esa zona específica.

Nomenclatura	P _{cr} [kN]	P máx [kN]
Viga 1	5,1	23,4
Viga 2	4,8	42,6
Viga 3	8,6	45,8
Viga 4	1,1	37,4

Tabla 1: Valores de cargas de fisuración, P_{cr} y cargas máximas P_{máx}.

En la Figura 4 se muestran las curvas carga-deflexión de los ensayos de flexión de tres puntos para las cuatro vigas analizadas. La destacada en color rojo corresponde a la deflexión medida directamente con el medidor de dial y en color negro se observa la medición de los descensos por CDI. La medición con el instrumento mecánico se realizó hasta la detección visual de la primera fisura durante el ensayo. A partir de ese momento, se lo retira a fines de preservarlo de potenciales daños por desprendimientos de material. Los resultados obtenidos de la deflexión mediante ambos métodos de medición son muy cercanos, presentando diferencias porcentuales que van del 3 al 10%. En varios tramos de las curvas se observa una notable superposición de valores, lo que destaca la precisión de la técnica CDI para medir desplazamientos.

Organiza:

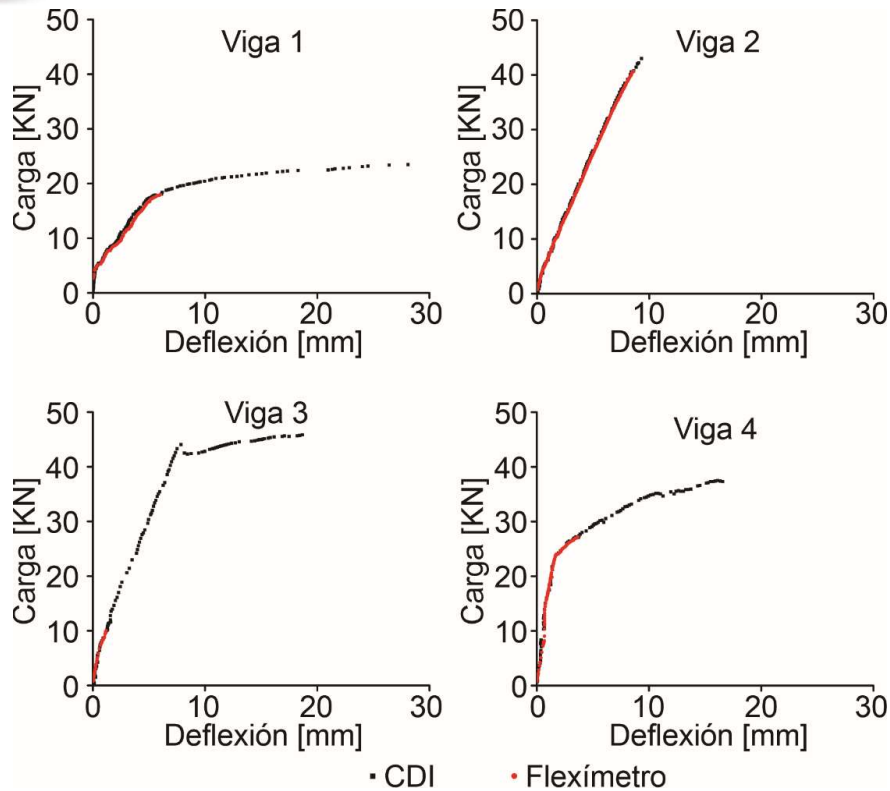


Figura 4. Curvas carga-deflexión de los ensayos de flexión de tres puntos para las 4 vigas analizadas.

La técnica CDI permite determinar los campos de desplazamientos y deformaciones en una estructura o probeta sometida a un ensayo mecánico. En las Figuras 5a-d se muestran los campos de deformaciones ϵ_{xx} en las Vigas 1 a 4, respectivamente. En cada caso se muestran dos imágenes de los campos de deformaciones ϵ_{xx} : la imagen superior corresponde a la aparición de la primera fisura y la imagen inferior al finalizar el ensayo. En todos los casos, la primera fisura detectada por CDI se propaga a medida que avanza el ensayo. En la Figura 5 se observa que los patrones de fisuración difieren en los cuatro casos. Para el caso 1 (Figura 5a), se observan dos fisuras principales en el centro de la viga, una a cada lado del estribo central junto con fisuras secundarias en zonas más alejadas del centro. Todas las grietas observadas son verticales, debidas al esfuerzo de flexión⁷. En los casos de las Vigas 2 y 3 (Figura 5b y 5c), se observan fisuras verticales de flexión en el centro y grietas inclinadas cerca de los extremos de la viga, estas últimas debido a la combinación de esfuerzos de corte y flexión. La viga 4 (Figura 5d), presentó dos fisuras verticales de flexión en el centro y una inclinada en una distancia situada entre uno de los apoyos y la carga aplicada, que llevó a la falla de la estructura. Algunas de estas grietas identificadas por CDI pueden ser observadas en los patrones de fisuras de las vigas, tal como se muestra en la Figura 6.

Organiza:

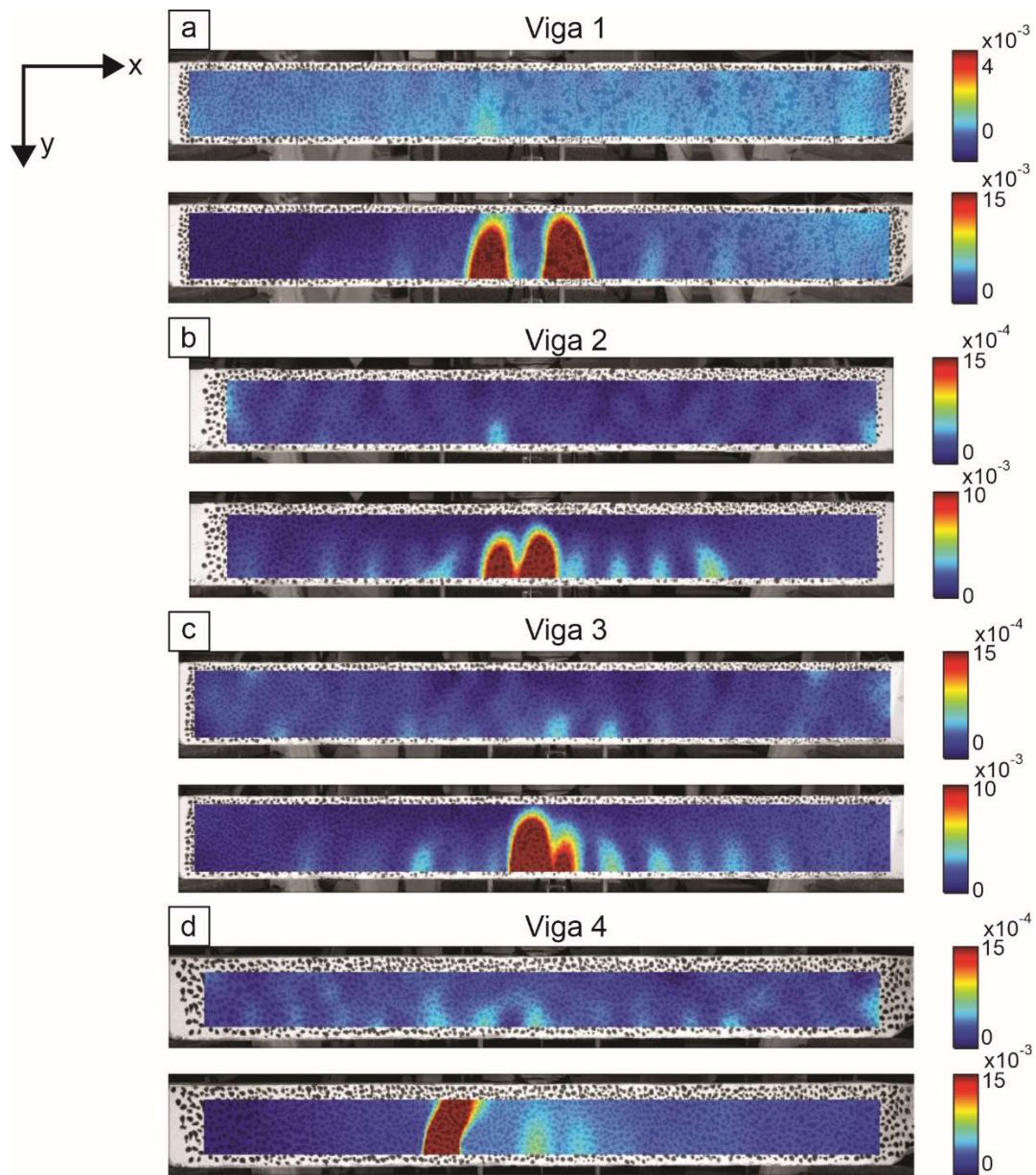


Figura 5. Campos de deformaciones ϵ_{xx} desarrollados durante los ensayos de flexión en tres puntos al inicio de la fisuración y al final del ensayo para las vigas: a. 1; b. 2; c. 3; d. 4

Organiza:



Figura 6. Fisuración de las vigas ensayadas.

A fin de investigar el potencial de los campos de deformaciones ϵ_{xx} , ϵ_{yy} y ϵ_{xy} desarrollados por la técnica CDI, estos se calcularon mediante NCORR y compararon entre sí para todas las vigas ensayadas. A modo de ejemplo, en la Figura 7 se muestran los campos de deformaciones ϵ_{xx} , ϵ_{yy} y ϵ_{xy} para cinco puntos de interés en la curva Momento flector vs. Curvatura del ensayo de flexión de la Viga 1. La deformación en la dirección ϵ_{xx} es una medida fundamental en los ensayos de flexión, ya que refleja la respuesta estructural del material a las fuerzas de tracción en esa dirección. Por lo tanto, comparar los diferentes valores de ϵ_{xx} puede proporcionar información sobre la capacidad del material para resistir la deformación. Al utilizar esta medida como criterio de comparación, se puede evaluar objetivamente la precisión y confiabilidad de los resultados de DIC. Tiene una interpretación física directa en el contexto de ensayos de tracción indirecta de muestras de concreto porque está directamente relacionado con la resistencia a la tracción del concreto y su capacidad para resistir el agrietamiento y la fractura bajo carga. En este sentido, de la Figura 7 se observa que es el parámetro más eficiente para identificar fisuras debido a que la mayoría de estas sigue patrones verticales u oblicuos, es decir perpendiculares al esfuerzo normal σ_x . Del mismo modo, la deformación ϵ_{yy} nos permite identificar los patrones de fisuración oblicuos u horizontales. Por la naturaleza del ensayo de flexión, la mayoría de las grietas siguen patrones verticales o ligeramente oblicuos, por lo que este parámetro no es eficiente en la identificación de las grietas y su forma, como se observa en la Figura 7.

Por otro lado, ϵ_{xy} se refiere a la deformación cortante en un material. Es la deformación angular que ocurre en un cuerpo debido a la aplicación de fuerzas de corte o tensiones cortantes. Esta deformación transversal unitaria es un parámetro que indica la cantidad de deformación angular por unidad de longitud en el material. Se produce como consecuencia de la existencia de tensiones cortantes en el material, que resultan de fuerzas aplicadas en direcciones paralelas, pero en sentido opuesto, causando que las capas del material se deslicen unas sobre otras. En este caso, permite observar de forma clara las fisuras centrales en la Viga 1, ligeramente oblicuas, pero sin la capacidad de detección temprana de ϵ_{xx} , como se muestra en la Figura 7.

Organiza:

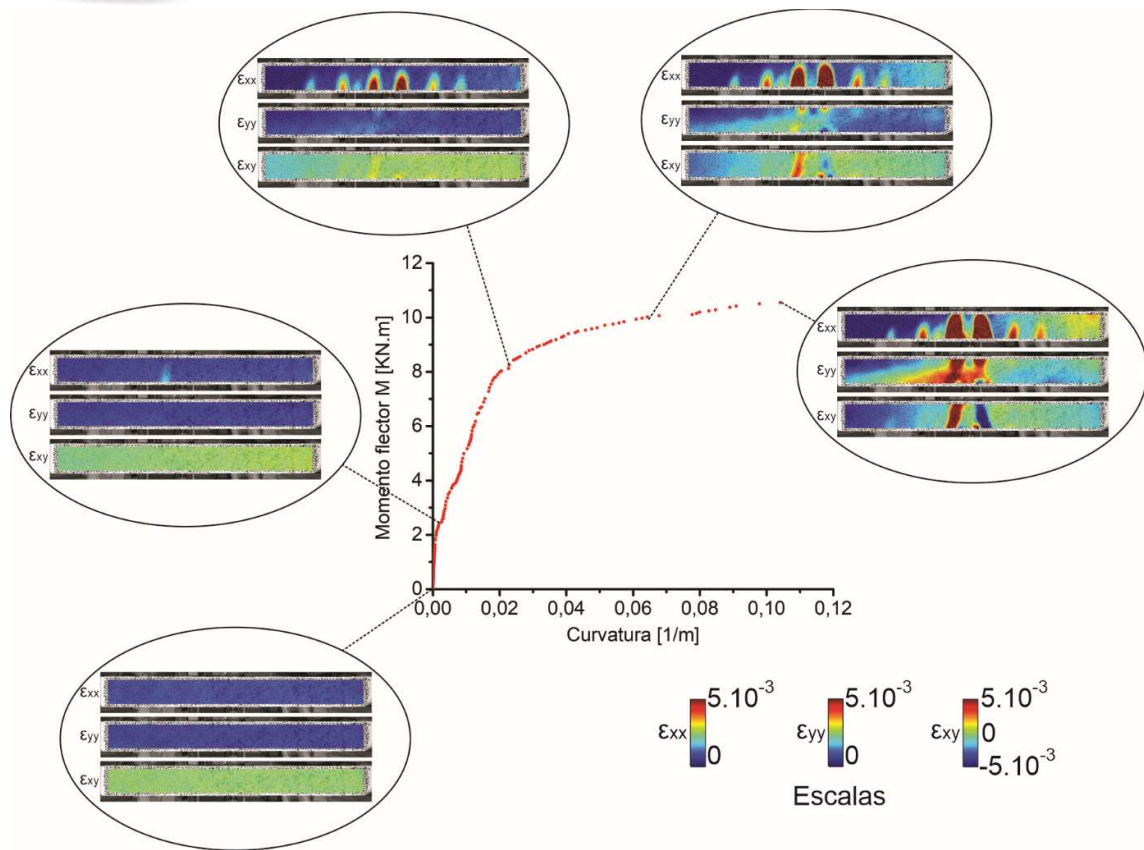


Figura 7. Curva Momento flector vs. Curvatura para del ensayo de flexión de la Viga 1. Se muestran además los campos de deformación ϵ_{xx} , ϵ_{yy} y ϵ_{xy} calculados por CDI para cinco puntos de interés en la curva.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados de mediciones, utilizando una técnica tradicional de contacto, el indicador de dial, junto con una técnica sin contacto, la correlación digital de imágenes (CDI), para cuantificar y analizar las deformaciones experimentadas por cuatro vigas sujetas a ensayos de flexión de tres puntos.

La comparación de resultados entre ambas técnicas permitió evaluar la precisión y confiabilidad de la CDI en la medición de desplazamientos verticales. Los ensayos se realizaron en vigas de hormigón convencional y pretensado, con el objetivo de mostrar la respuesta estructural bajo cargas de flexión y proporcionar información relevante para el diseño y análisis de estructuras de hormigón en aplicaciones prácticas. La aplicación de la CDI se expone como una alternativa viable a los métodos tradicionales de medición en pruebas de laboratorio, puesto que ha mostrado una alta precisión en

Organiza:

la determinación de deformaciones y desplazamientos verticales de un material cuasi-frágil sometido a ensayos de flexión. Esta técnica permite analizar patrones de deformación sin afectar el material subyacente, convirtiéndose en una herramienta confiable para la investigación en mecánica experimental.

La capacidad de la CDI para medir deformaciones sin contacto presenta ventajas significativas en términos de precisión y preservación del material de prueba. Sin embargo, el proceso de confección del patrón de manchas, el procesamiento de imágenes y la selección adecuada de parámetros, como el tamaño del subset y el step, son aspectos críticos que requieren atención para garantizar resultados precisos y confiables. Además, la evaluación de la validez de los resultados en áreas con discontinuidades, como grietas o muescas, sigue siendo un desafío que requiere la intervención del usuario.

La identificación de las grietas que ocurren en el material se puede realizar tomando los campos de deformación en la dirección de los mayores esfuerzos normales en la probeta, en este caso en la dirección horizontal (eje x).

La capacidad de la CDI para caracterizar deformaciones en una amplia gama de escalas, abre nuevas posibilidades para la investigación en ingeniería de materiales y mecánica de sólidos. Además de su aplicación en ensayos de flexión de vigas de hormigón, la CDI podría ser utilizada en una variedad de escenarios de prueba, incluidos materiales compuestos, ensayos de fatiga y análisis de estructuras bajo cargas dinámicas.

Agradecimientos: Los autores agradecen la colaboración de la Ing. Jirina Tirner en la confección del patrón de manchas efectuado sobre la superficie de las estructuras ensayadas y del Ing. Julio Molina en el procesamiento de los datos de medición del indicador de dial.

Bibliografía:

- ¹ Restivo, M.T., Gomes de Almeida, F., Chouzal, M.F. (2012). Strain Measurement (Measurement of Physical and Chemical Quantities). Primera Edición
- ² Ranson W. F., Sutton M. A., Peters W. H., "Digital Image Correlation of White Light Speckle Including The Effects Of Image Distortion," Proc. SPIE 0556, Intl Conf on Speckle, (25 November 1985); <https://doi.org/10.1117/12.949536>
- ³ Blaber J., Adair B., Antoniou, A. (2015). Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. Experimental Mechanics <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>
- ⁴ Sutton MA, Wolters WJ, Peters WH, Ranson WF, McNeill SR, (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method, Image and Vision Computing, Volume 1, Issue 3, Pages 133-139, ISSN 0262-8856, [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(83\)90064-1](https://doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1)

Organiza:

⁵ Jackson Christopher M., McGuire Jeffrey A., Losada Martin E., De Vita Raffaella, Dillard David A., (2023). Digital image correlation: Advancing mechanical property characterization of adhesive joints, Editor(s): David A. Dillard, In Woodhead Publishing in Materials, Advances in Structural Adhesive Bonding (Second Edition), Woodhead Publishing, Pages 1035-1075, ISBN 9780323912143, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91214-3.00014-4>

⁶ Blaber J. (2018). Ncorr v1.2. Open source 2D-DIC Software.
<https://www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms>

⁷ Wight, J. K., Richart, F. E., MacGregor, J. G. (2012). Reinforced Concrete: Mechanics and Design. Reino Unido: Pearson Prentice Hall.

Organiza: