



Geomática aplicada para la obtención de estados deformacionales en la ingeniería estructural

Milena Mesa-Lavista*, Fabiola Yépez-Rincón*, Karlas Carolina Gutiérrez-González*
ORCID: 0000-0002-6966-1590 ORCID: 0000-0001-5025-9967 ORCID: 0000-0002-8417-5945

Yris Laura Mancilla-de la Cruz*, Andrea N. Escobedo*
ORCID: 0000-0001-6463-4959 ORCID: 0000-0002-1172-4077

<https://doi.org/10.29105/cienciauanl27.124-6>

RESUMEN

Los avances en las evaluaciones no destructivas para estructuras civiles han sido significativos en los últimos años. Algunas innovaciones y nuevas técnicas de medición incluyen: fotogrametría y videogrametría, termografía infrarroja, escáner láser 3D, sensores remotos, etc. En este trabajo se exponen tres proyectos de investigación que se llevaron a cabo en el laboratorio de ensaye de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil donde se realizaron mediciones con las técnicas de fotogrametría digital. Primeramente, se empleó el método de seguimiento fotogramétrico de vista única para medir los desplazamientos de 9 especímenes de castillos cortos para mampostería confinada, que fueron fabricados y ensayados a compresión axial. Posteriormente, se evidencia un proyecto donde se ensayaron dos uniones viga-columna con concreto reforzado con fibras y donde fue posible determinar los desplazamientos y las aberturas de las grietas alcanzadas. Por último, se muestra un proyecto donde se ensayó un muro de mampostería confinada con carga cíclica reversible, en este se tomaron una serie de imágenes y videos con distintas posiciones de cámaras para obtener una reconstrucción del ensayo.

Palabras clave: Geomática en estructuras, técnica de fotogrametría, ensayo de elementos estructurales.

ABSTRACT

Advances in non-destructive evaluations for civil structures have been significant in recent years. Some of the advances and new measurement techniques include photogrammetry and videogrammetry, infrared thermography, 3D laser scanning, remote sensors, etc. This work presents three research projects that were carried out in the laboratory of testing materials of the Faculty of Civil Engineering where measurements were made with photogrammetry digital techniques. First, the single view photogrammetric tracking method was used to measure the displacements of 9 specimens of short castles for confined masonry, which were fabricated and tested in axial compression. Subsequently, a project is evident where two beam-column joints with fiber-reinforced concrete were tested and it was possible to determine the displacements and openings of the reached cracks. Finally, a project is shown where a confined masonry wall with reversible cyclic load was tested, in which a series of photos and videos were taken with different camera positions to obtain a reconstruction of the test.

Keywords: Geomatics in structures, photogrammetry technique, structural elements testing.

En ingeniería civil las mediciones no destructivas incluyen una amplia gama de aplicaciones que requieren la determinación de la forma tridimensional de un objeto y los cambios que sufre ante la aplicación de cargas (Anterrieu *et al.*, 2019; Galantucci

y Fatiguso, 2019). Éstas se han empleado habitualmente en obras de interés histórico; sin embargo, en la última década se han venido implementando en la obtención de lecturas de deformaciones y desplazamientos en elementos estructurales.

* Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México.
Contacto: mmesal@uanl.edu.mx, fabiola.yepezn@uanl.edu.mx, karlas603@hotmail.com, yrislaura.md98@gmail.com, andrea.escobedotmz@uanl.edu.mx

Particularmente, la fotogrametría ofrece un gran potencial de soluciones de medición en la ingeniería estructural. En la bibliografía este tipo de ejercicios se reporta en cajas modulares que constan de distintas cámaras digitales con interfaces de computadora, sistemas de iluminación y dispositivos de calibración combinados con operadores de imágenes de precisión a subpixel que permite ubicar las coincidencias de múltiples figuras que se ajustan y autocalibran por medio de interfaces poderosas en laboratorios de ensayo. Estos equipos demuestran el gran potencial del procedimiento en la medición de deformaciones fotogramétricas, a pesar de ser sumamente costosos.

En conjunto, estas metodologías y avances en evaluaciones no destructivas han mejorado significativamente la capacidad de los ingenieros al evaluar la salud y la integridad de las edificaciones civiles sin la necesidad de realizar pruebas que podrían ser costosas o peligrosas. Estas herramientas son fundamentales en el mantenimiento preventivo y la seguridad de las infraestructuras civiles.

La aplicación de la geomática y las técnicas no destructivas en la ingeniería estructural es una línea de investigación que se está desarrollando en el Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil en la UANL. El objetivo de este trabajo es calibrar el método no destructivo al aplicarlo como procedimiento en distintos proyectos civiles, y se ha llevado a cabo en tres ejercicios: (1) ensayo de castillos cortos a compresión uniaxial; (2) registro de deterioros superficiales en una unión viga-columna de concreto reforzado con fibras de acero adicionada y (3) comportamiento de muros de mampostería ante cargas cíclicas reversibles. En estos proyectos participaron los doctores del IIC José Álvarez Pérez, Jorge Humberto Chávez Gómez, Adrián Leonardo Ferriño Fierro y Fabián R. Ruvalcaba Ayala.

METODOLOGÍA

Ensayo de castillos cortos a compresión uniaxial

Para los ensayos en laboratorio de este proyecto se contó con nueve castillos cortos que fueron mallados con una cuadrícula de 5x5 cm. Cada espécimen se etiquetó con un número consecutivo de control del 1 al 9. Se realizaron dos procesos en la construcción de información en 3D: 1. Fotorreconstrucción de cada castillo utilizando una sobreposición mayor a 80% a tres alturas. 2. Seguimiento del desplazamiento en el registro fotográfico (figura 1). Durante el seguimiento de los desplazamientos se empleó la referenciación espacial al determinar el registro exacto del mallado y puntos de control establecidos. A partir de éstos se obtuvieron los desplazamientos que se compararon hasta la carga de rotura con las mediciones de los LVDT y *strain-gauges*. Los especímenes se ensayaron utilizando una prensa electrohidráulica Tinius Olsen. Estas pruebas se realizaron con control de velocidad de desplazamiento (0,005 mm/s) (Álvarez-Pérez *et al.*, 2023; Mesa-Lavista *et al.*, 2022).

Registro de deterioros superficiales en una unión viga-columna de concreto reforzado con fibras de acero adicionada

En este proyecto se ensayaron dos uniones viga-columna de concreto reforzado: con y sin fibras de acero adicionadas. En los ensayos se aplicó una carga cíclica reversible en un periodo específico (García *et al.*, 2019). En este caso, se siguió el procedimiento que se describe a continuación: a) se roció pintura para motear la zona de interés en el espécimen, b) se colocó iluminación y una cámara en la zona de interés y c) se programó una serie sincronizada de tomas fotográficas en *time lapse* de 2 seg y una serie en video secuencial con el objetivo de valorar los desplazamientos de la viga. Con esta técnica se logró medir las aberturas de las grietas (figura 2).

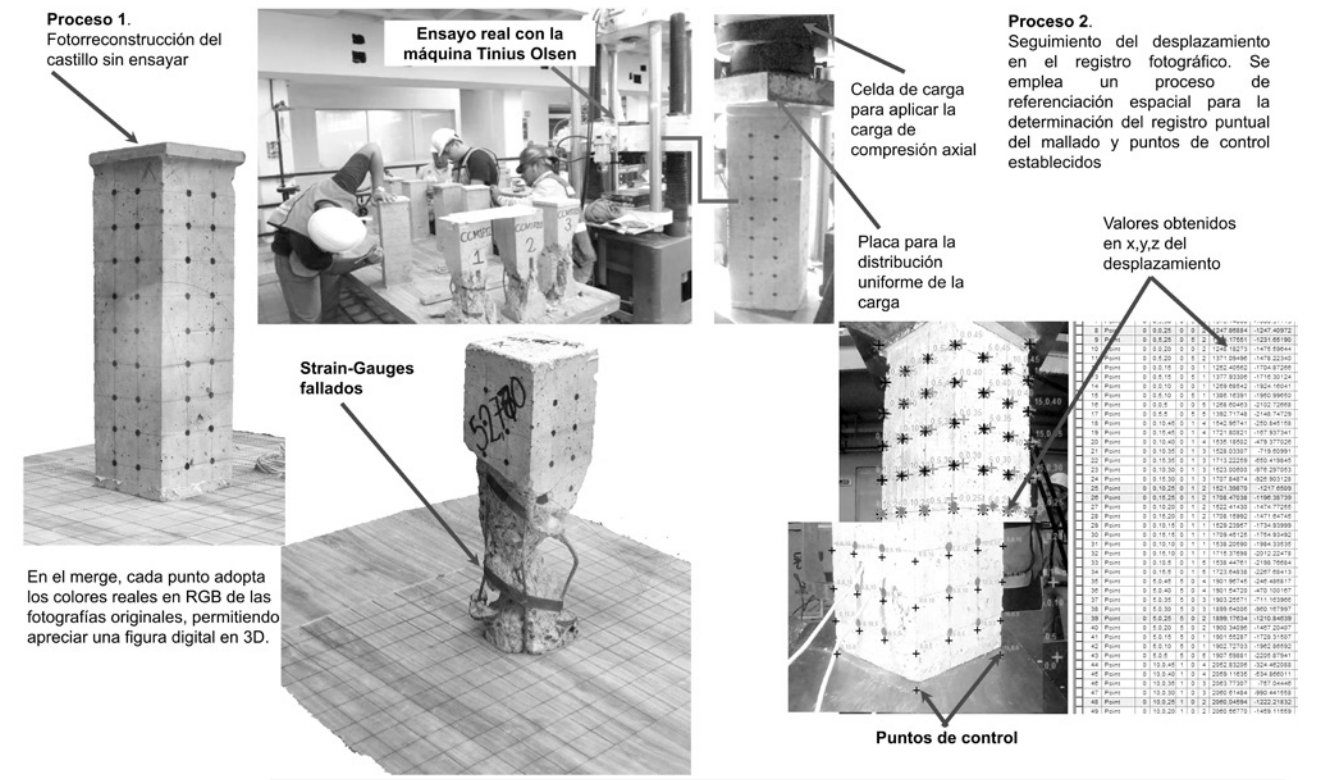


Figura 1. Geomática aplicada en el proyecto de castillos cortos a compresión uniaxial.

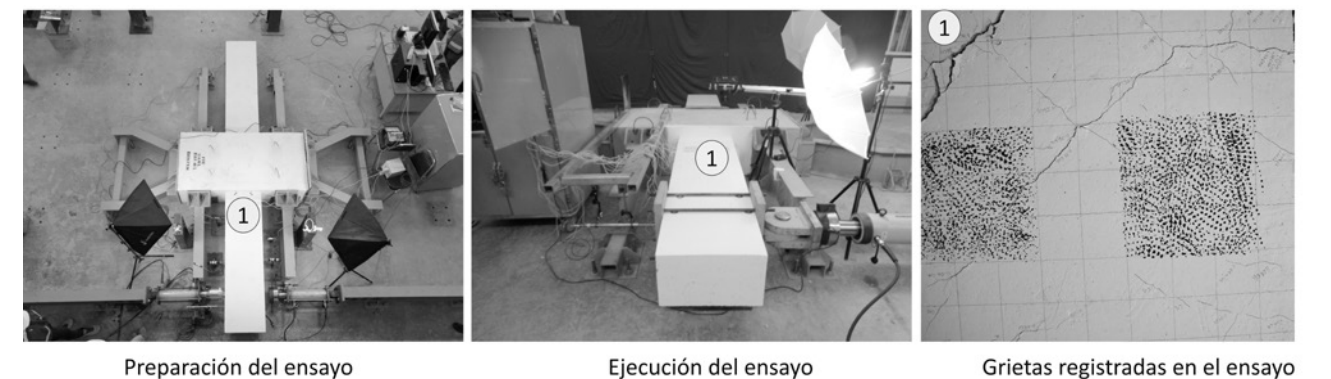


Figura 2. Registro de deterioro superficial en una unión viga-columna de concreto reforzado con fibras de acero adicionada.

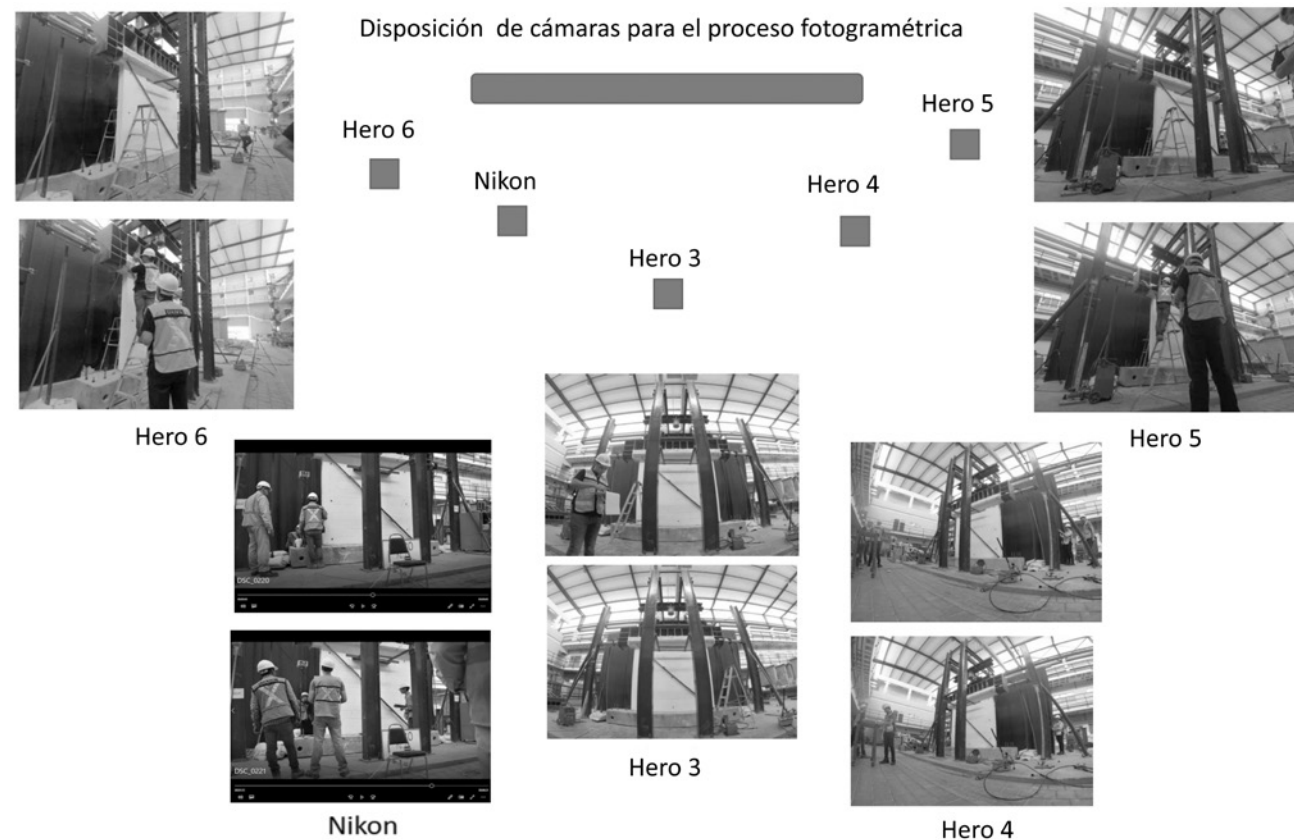


Figura 3. Control fotogramétrico del comportamiento de un muro de mampostería ensayado a carga cíclica reversible.

Comportamiento de muros de mampostería antecargas cíclicas reversibles

Los muros de mampostería confinada son ampliamente utilizados en la construcción de vivienda, proveen la capacidad de resistir cargas gravitacionales y laterales inducidas por sismos o huracanes. Actualmente existe la necesidad de proporcionar una evaluación completa de estas estructuras frente a la solicitud de esfuerzos de flexión y de cizallamiento. En este proyecto se ensayó un muro de mampostería sometido a carga cíclica reversible. Para ello se emplearon dos gatos hidráulicos con sus respectivas celdas de carga de 150 ton cada uno, aplicando previamente una precompresión al muro. En una primera etapa se realizaron prue-

bas con escáneres por medio de un proceso fotogramétrico con cinco modelos de cámaras GoPro, con la disposición que se presenta en la figura 3. La programación de las fotografías se realizó a cada 0.5 seg.

Metodologías destructivas

En los tres proyectos se empleó, además, un procedimiento destructivo. En éste se utilizó el sistema de medición tradicional con LVDTs y *strain-gauges* en la determinación de los desplazamientos y deformaciones, respectivamente. Los castillos se ensayaron a compresión axial; las uniones y los muros a carga cíclica reversible, en los tres casos hasta la rotura. Las mediciones realizadas con las técnicas tradicionales sirvieron de guía para la calibración de los métodos no destructivos.

RESULTADOS

Como resultado del proyecto 1 se validó la técnica fotogramétrica no destructiva al compararla con los desplazamientos medidos a través de los LVDT. Además, se logró determinar con precisión el momento exacto en que comenzaron a aparecer grietas en los especímenes, permitiendo medir su comportamiento después de la falla. Esto es especialmente relevante porque después de que el espécimen se estropea, los procesos de medición tradicionales con *strain-gauges* ya no son efectivos, pues el objeto se daña y no puede seguir realizando mediciones.

Por otra parte, en el proyecto de las uniones viga-columna se logró observar el inicio y la propagación de las grietas, registrando el desarrollo completo del deterioro superficial. Estos detalles no pueden apreciarse con precisión mediante las formas convencionales. Este mismo fenómeno se observó en el proyecto de los muros, ya que se logró un resultado similar al determinar el inicio y desarrollo de las grietas. En este proyecto, en particular, el uso de la técnica no destructiva es aún más relevante, ya que se validó su aplicación en el monitoreo continuo de estructuras reales y la identificación de defectos en áreas de difícil acceso, donde se requiere una medición rápida y sencilla.

CONCLUSIONES

En cada una de estas investigaciones se generaron más de 8,000 imágenes, las cuales están siendo procesadas; los resultados serán fundamentales en la interpretación del comportamiento de los elementos estructurales analizados. Queda demostrado que el uso de técnicas no destructivas, como la fotogra-

metría en este caso, contribuye significativamente a la conservación del patrimonio, ya que permite evaluar el estado de las edificaciones y objetos sin causar daño físico.

Los resultados obtenidos hasta el momento respaldan la utilización de esta técnica en futuras mediciones en el ámbito de la investigación, ya que es capaz de medir desplazamientos y prever comportamientos sin depender exclusivamente de medidores tradicionales que tienen limitaciones, en diagnósticos precisos y en el monitoreo continuo de estructuras existentes.

REFERENCIAS

- Álvarez-Pérez, J., Mesa Lavista, M., Chávez-Gómez, J. H., *et al.* (2023). Strapping Spiral Ties for Short Tie-Columns in Confined Masonry Walls Using a Micro-Numerical Model, *Ingeniería e Investigación*, 43(2), e97253, <https://doi.org/10.15446/ing.investig.97253>
- Anterrieu, O., Giroux, B., Gloaguen, E., *et al.* (2019). Non-destructive data assimilation as a tool to diagnose corrosion rate in reinforced concrete structures, *Journal of Building Engineering*, 23, 193-206, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2019.01.033>
- Galantucci, R.A., y Fatiguso, F. (2019). Advanced damage detection techniques in historical buildings using digital photogrammetry and 3D surface analysis. *Journal of Cultural Heritage*, 36, 51-62, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.09.014>
- García, J.E., Chávez, J.H., Terán, B.T., *et al.* (2019). *Metodología para el estudio experimental del comportamiento histerético de una unión viga-columna de concreto reforzado con fibras de acero adicional*, XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Nuevo León, México.

Mesa-Lavista, M., Álvarez-Pérez, J., Chávez-Gómez, J. H., *et al.* (2022). Axial compressive behavior of short tie-columns with strapping spiral ties. *Revista de la Construcción*, 21(3), 657-668, <https://doi.org/10.7764/rdlc.21.3.657>

Maas, H.G., y Hampel, U. (2006). Photogrammetric techniques in civil engineering material testing and structure monitoring. *Photogrammetric Engineering y Remote Sensing*, 1, 39-45, <https://doi.org/10.14358/PERS.72.1.39>

Oats, R.C., Escobar-Wolf, R., y Oommen, T. (2019). Evaluation of photogrammetry and inclusion of control points: Significance for infrastructure monitoring. *Data*, 4(1), 42.

Rönnholm, P., Nuikka, M., Suominen, A., *et al.* (2009). Comparison of measurement techniques and static theory applied to concrete beam deformation. *The Photogrammetric Record*, 24(128), 351-371.

Recibido: 05/12/2022.
Aceptado: 25/10/2023.

Descarga aquí nuestra versión digital.

