

Un acercamiento a la correlación de imágenes digitales para mediciones de especímenes de mampostería en laboratorio

J. H. Chávez-Gómez¹, M. Mesa-Lavista^{1*}, J. Álvarez Pérez¹, F. Yépez-Rincón¹,
E. Valencia-Guzmán¹, R. González-Alcorta¹

*Autor de Contacto: mmesal@uanl.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.705>

Recibido: 24/10/2023 | Correcciones recibidas: 09/04/2024 | Aceptado: 27/04/2024 | Publicado: 15/05/2024

RESUMEN

El objetivo del trabajo es emplear la técnica de Correlación de Imágenes Digitales (DIC) para analizar los desplazamientos en muretes de mampostería sometidos a compresión axial, sin usar un programa comercial. Se desarrolló un algoritmo empleando el método numérico de Newton Raphson para este propósito. Los resultados obtenidos fueron comparados con las mediciones del transductor diferencial lineal variable (LVDT), validando la eficacia del algoritmo y comparándolos con estudios previos, con errores aceptables. Este trabajo forma parte de un proyecto en curso en el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, estableciendo las bases para futuras investigaciones sobre la implementación de la técnica para la obtención de patologías y estados deformacionales en estructuras de mampostería. Como principal conclusión se llegó a la determinación que el DIC podrá ser empleado como un método de medición fiable de desplazamientos y deformaciones en ensayos de laboratorio.

Palabras clave: correlación de imágenes digitales; mampostería.

Citar como: Chávez-Gómez, J. H., Mesa-Lavista, M., Álvarez Pérez, J., Yépez-Rincón, F., Valencia-Guzmán, E., González-Alcorta, R. (2024), “Un acercamiento a la correlación de imágenes digitales para mediciones de especímenes de mampostería en laboratorio”, Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 174 – 190, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.705>

¹Departamento de Ingeniería Estructural y Peritajes, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo los autores J.H. Chávez-Gómez, M. Mesa-Lavista, y J. Álvarez Pérez contribuyeron equitativamente con la concepción metodológica del proyecto (33% cada uno). El autor E. Valencia-Guzmán contribuyó con la instrumentación del método DIC (90%) y la autora F. Yépez-Rincón (10%). E. Valencia-Guzmán contribuyó con la programación del método (80%) y J.H. Chávez-Gómez (20%). Los autores J.H. Chávez-Gómez (20%), M. Mesa-Lavista (20%), J. Álvarez Pérez (20%), F. Yépez-Rincón (20%), R. González-Alcorta (20%) contribuyeron de manera equitativa en la escritura y conclusiones generales del trabajo. Todos los autores participaron en el análisis y discusión de los resultados obtenidos.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2024) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2024.

An approach to digital images correlation for measurements of masonry specimens in laboratory

ABSTRACT

The aim of the work is to employ the Digital Image Correlation (DIC) technique to analyze displacements in masonry wall specimens under axial compression, without using commercial software. An algorithm was developed using the Newton Raphson numerical method for this purpose. The results obtained were compared with measurements from the Linear Variable Differential Transformer (LVDT), validating the effectiveness of the algorithm and comparing them with previous studies, with acceptable errors. This work is part of an ongoing project at the Civil Engineering Institute of the Autonomous University of Nuevo León, laying the groundwork for future research on the implementation of the technique for obtaining pathologies and deformation states in masonry structures. As the main conclusion, it was determined that DIC can be used as a reliable method for measuring displacements and deformations in laboratory tests.

Keywords: digital image correlation; masonry.

Uma abordagem à correlação de imagens digitais para medições de espécimes de alvenaria em laboratório

RESUMO

O objetivo do trabalho é empregar a técnica de Correlação de Imagens Digitais para analisar deslocamentos em muros de alvenaria submetidos a compressão axial, sem usar um programa comercial. Um algoritmo foi desenvolvido empregando o método numérico de Newton Raphson para este propósito. Os resultados obtidos foram comparados com as medições do transdutor diferencial linear variável, validando a eficácia do algoritmo e comparando-os com estudos anteriores, com erros aceitáveis. Este trabalho faz parte de um projeto em andamento no Instituto de Engenharia Civil da Universidade Autônoma de Nuevo León, estabelecendo as bases para futuras pesquisas sobre a implementação da técnica para a obtenção de patologias e estados de deformação em estruturas de alvenaria. Como principal conclusão, chegou-se à determinação de que o DIC pode ser utilizado como um método confiável para medir deslocamentos e deformações em ensaios de laboratório.

Palavras-chave: correlação de imagens digitais; alvenaria.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La Correlación de imagen digital (*Digital Image Correlation*, DIC por sus siglas en inglés) es un método de medición óptica, preciso y práctico; capaz de mapear un campo completo de desplazamientos en un objeto de interés que ha sido deformado. Consiste en realizar un procesamiento de imágenes fotográficas tomadas a una superficie previamente preparada con un patrón de puntos aleatorios. Esta superficie sufre deformaciones por estar sometida a un estado de cargas. Con el empleo del procesamiento de imágenes se es capaz de obtener el campo de desplazamientos en una estructura específica. Es una alternativa a los dispositivos tradicionales de medición y puede mapear un campo de desplazamientos completo. Actualmente, se está llevando a cabo un proyecto que tiene como objetivo evaluar la efectividad de la técnica de correlación de imagen digital en muretes de mampostería. Los muretes fueron fabricados en el laboratorio con bloques huecos de concreto, y sometidos a compresión axial. Dentro de este proyecto, además; se emplea el tradicional método de medición de los desplazamientos con el empleo de un transductor eléctrico de desplazamiento (Linear Variable Differential Transformer, LVDT por sus siglas en inglés). Estos dos métodos fueron comparados en el presente proyecto de investigación para validar la técnica del DIC.

El desarrollo de la técnica de DIC ha ocurrido desde su origen en los años 80 y ha estado en constante cambio y evolución con el objetivo de reducir el costo computacional y aumentar su aplicabilidad.

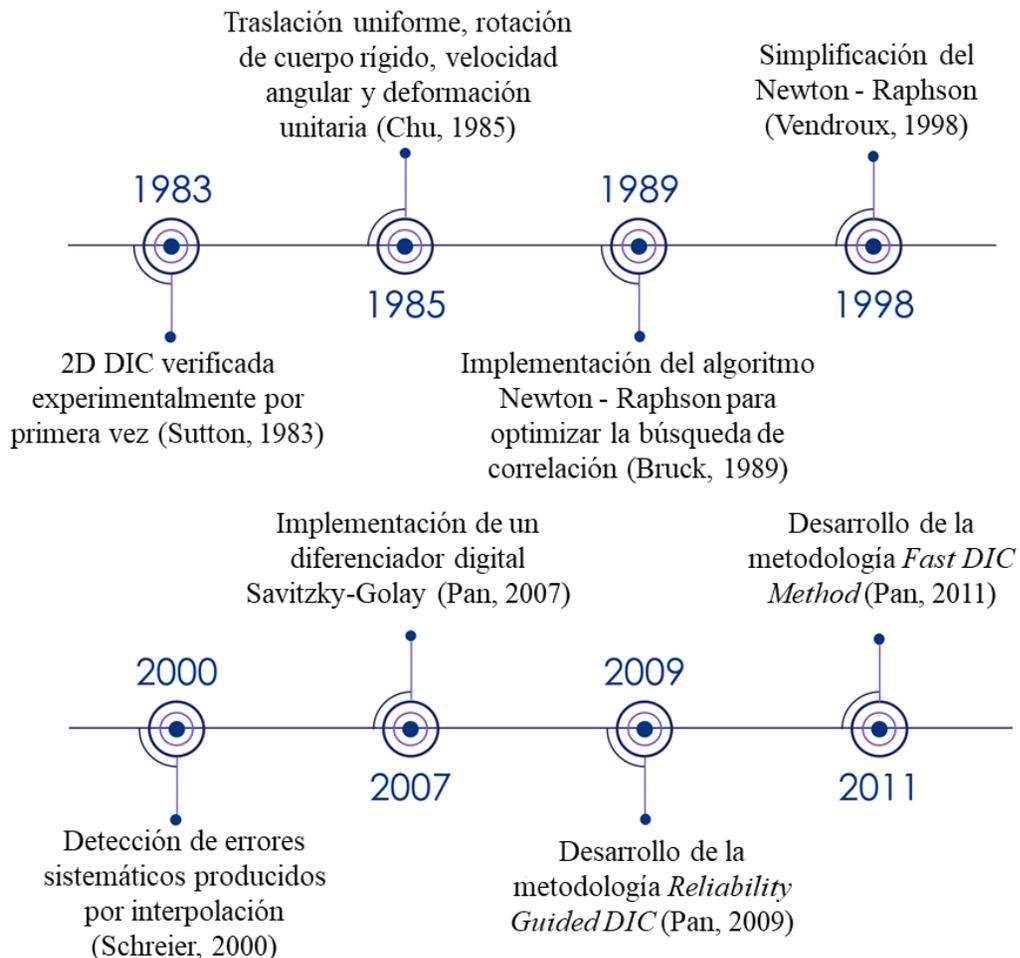


Figura 1. Línea del tiempo de la evolución del método del DIC

En la Figura 1 se presenta en una línea del tiempo, la evolución de su implementación. Sin embargo, a partir del año 2010 (Destrebecq et al., 2011), comenzó su implementación en algunos problemas de la ingeniería civil tales como: vigas de concreto reforzado, muros de mampostería (Mojsilović and Salmanpour, 2016), entre otros (Bruck et al., 1989; Chu et al., 1985; Pan, 2009; Pan and Li, 2011; Schreier et al., 2009; Schreier et al., 2000; Vendroux and Knauss, 1998).

1.1 Técnicas del DIC

DIC tiene diferentes ramas que dependen del objetivo de la experimentación, a su vez, cada una de ellas se puede ejecutar con diferentes metodologías que han surgido de la evolución de la técnica. Las variantes ya establecidas de DIC son 2D-DIC, 3D-DIC y DVC que cumplen la tarea de obtener deformaciones 2D, deformaciones 3D y deformaciones volumétricas respectivamente (Hubert et al., 2010). Las metodologías incluyen factores como los algoritmos de correlación, formas de preparación de la superficie, métodos de interpolación y calibración.

Se le conoce a 2D-DIC como la variante de correlación de imagen digital que sólo necesita una cámara (Bermudo Gamboa et al., 2019). Este es un método de medición óptico sin contacto que utiliza los principios de la mecánica del medio continuo para extraer el campo de los desplazamientos de un objeto sujeto a una carga (Sutton et al., 2008). Una de las principales ventajas de esta variante, es que reduce considerablemente el tiempo de implementación porque no siempre necesita una calibración previa a la captura de imágenes; teniendo una reducción en el costo computacional y brinda como resultados precisiones comparables a las variantes de 3D-DIC en problemas de esfuerzos (y/o) deformaciones planos (Bermudo Gamboa et al., 2019). Sin embargo, presenta como desventajas la incapacidad de no detectar los movimientos fuera del plano y que la cámara debe estar perpendicular a la superficie del objeto (Sutton et al., 2008). En ese sentido cada movimiento fuera de plano, tanto por rotación o translación, lo interpretará como un desplazamiento, esto se puede comprobar de forma teórica con las ecuaciones del modelo de cámara *pinhole* (Sutton et al., 2008).

Stereo DIC o 3D DIC es un método ya establecido usado para la reconstrucción de la forma de los objetos y para el análisis tridimensional del tensor de deformaciones (Zhenxing Hu et al., 2010). Para la aplicación de este se emplean 2 cámaras para obtener el campo de desplazamientos tridimensional de un objeto físico. Posteriormente se utiliza la técnica *Stereovision binocular* para reconstruir una escena 3D desde dos puntos de vista distintos mediante una triangulación (Orteu, 2009). Esto es posible debido a las suposiciones de que se conoce la posición relativa y orientación de las cámaras y que las proyecciones de cada cámara, estén sincronizados para que correspondan a un mismo punto físico P del objeto de estudio (Orteu, 2009). Esta variante 3D no tiene las limitantes que el 2D DIC ya que puede usarse para hacer mediciones en objetos de múltiples geometrías y con movimientos fuera de plano. La principal desventaja radica en la aplicación de la técnica, tanto para la calibración como para el algoritmo de correlación (Bermudo Gamboa et al., 2019).

La Correlación volumétrica digital (DVC) es una extensión del 2D-DIC (Jiroušek et al., 2011). DVC toma los conceptos de patrón de puntos, registro de imagen y la correlación de subconjuntos y los expande al volumen de un objeto de interés (Quintana et al., 2016). El registro de imagen no se hace con cámaras, más bien se utilizan técnicas como *computed tomography*, *confocal imaging microscope* y *magnetic resonance imaging* que son principalmente usados en la ingeniería de la Biomecánica (Hubert et al., 2010). Estos métodos preceden al DIC y eran típicamente usados para obtener información de las dimensiones y la densidad del material, sin embargo, con el surgimiento de DVC esta información tiene un mayor potencial (Quintana et al., 2016). En vez de utilizar pintura como patrón de puntos como en el 2D-DIC, el registro de imagen está basado en las características del espécimen (Quintana et al., 2016). La técnica está basada en realizar un escaneo inicial con los métodos de registro de imagen mencionados para obtener el volumen de referencia

sin deformación. Posteriormente, una fuerza externa se aplica y se hacen escaneos secuenciales y de forma consecutiva que representen el proceso de deformación del objeto (Hubert et al., 2010). Finalmente, con subconjuntos cúbicos de voxels se hace una correlación para encontrar los desplazamientos u , v y w en las imágenes deformadas (Quintana et al., 2016). La ventaja de este método es que se obtiene un campo completo de desplazamientos de los volúmenes, no sólo de la superficie del objeto como en las variantes 2D-DIC y 3D-DIC (Jiroušek et al., 2011). La desventaja es que se requiere equipos especializados y las aplicaciones son más limitadas a microestructuras de la Biomecánica y en problemas específicos de la Mecánica de los medios continuos (Buljac et al., 2018).

Debido a las limitaciones que se presentan en el equipamiento necesario para la aplicación del DIC, se decidió implementar la variante 2D-DIC en la presente investigación. Elaborando un algoritmo que permita obtener el campo de desplazamientos en el procesamiento de las imágenes.

1.2 Aplicaciones del DIC en ingeniería civil

DIC ha sido aplicada en diferentes áreas de la Ingeniería y la Biomecánica. Referente a la Ingeniería Civil se ha empleado principalmente a problemas estructurales de vigas (Sutton et al., 1983), mampostería (Allaoui et al., 2018; Mojsilović and Salmanpour, 2016; Zahra et al., 2021; Zahra et al., 2023) y puentes (Dhanasekar et al., 2019; Malesa et al., 2010), entre otras problemáticas de la ingeniería civil. En estas estructuras la información relevante son las deformaciones y la medición de propagación y geometría de las grietas. Esta última de gran importancia en el análisis de las patologías en las estructuras.

En la investigación de (Malesa et al., 2010) se emplearon 2 cámaras para la adquisición de imágenes en diferentes puntos de un puente de tamaño real en Polonia. La metodología seguida fue utilizar un sensor global y local para capturar imágenes del puente mientras un tren de 120 Toneladas pasaba y se regresaba repetidamente en 4 velocidades distintas. Se realizaron más de 30 experimentos capturando de 20 a 80 imágenes por ensayo. Los resultados de la experimentación se compararon con un modelo de elemento finito del puente y los resultados del DIC concordaron satisfactoriamente.

La técnica del DIC también se aplicó satisfactoriamente en vigas de concreto reforzado. En la investigación de (Fayyad and Lees, 2014) se realizaron 2 series de 7 vigas de concreto reforzado, cada una se ensayó a flexión a 3 puntos. Emplearon una cámara tipo DSLR con una resolución de 5472 x 3648 pixeles. Ellos utilizaron el software Geo PIV que utiliza un criterio de correlación cruzada normalizada. Extrajeron la información en cada espécimen de la propagación de la abertura de las grietas. Esto fue comparado con un C-Clip gauge y se encontró que el método DIC es efectivo para visualizar y cuantificar las propiedades de fractura en el concreto reforzado y para monitorear las grietas en las vigas de concreto reforzado.

En la investigación de (Mojsilović and Salmanpour, 2016) se ensayaron 10 muros de mampostería a los cuales se les aplicó el método 2D DIC. Para capturar las imágenes se probó con dos cámaras diferentes, la Nikon D3 con 12.1MP y Nikon D800E con 36.3MP. Por cada espécimen ensayado se tomaron aproximadamente 500 imágenes. El procesamiento de imágenes fue realizado con el software VIC 2D y el criterio de correlación fue el de diferencias cuadradas normalizada. Se encontró una buena relación entre los desplazamientos medidos por DIC y por LVDTs tanto en direcciones horizontales, diagonales y verticales.

El método de 2D DIC fue aplicado por (Allaoui et al., 2018) para medir el comportamiento a compresión de un prisma de dos hileras de ladrillo. Los autores emplearon el software de correlación 7D y una cámara comercial con un dispositivo de carga acoplada (CCD). En esta investigación, referente al DIC, se delimitó y optimizó el tamaño de las cuadrículas en la junta de mortero para lograr el correcto procesamiento de las imágenes.

Los investigadores (Howlader et al., 2021) realizaron ensayos en 8 paredes perforadas de

mampostería sin refuerzo. Los ensayos se llevaron a cabo a escala real bajo carga cíclica en el plano y carga vertical de pre compresión constante. Para medir la deformación de las paredes durante las pruebas y capturar el agrietamiento completo, utilizaron el método 2D DIC en paralelo con instrumentación tradicional de LVDTs. Las imágenes fueron analizadas utilizando el software VIC-2D para validar exitosamente los resultados DIC contra las mediciones registradas por los LVDTs.

Por su parte, (Zahra et al., 2021) aplicaron igualmente el método 2D DIC para la determinación de las deformaciones en ensayos a compresión de prismas de mampostería de bloques huecos de concreto. Los autores utilizaron una cámara monocromática a una velocidad de 10 cuadros por segundo. Posteriormente, compararon los resultados obtenidos con la técnica DIC con micro-modelos de elementos finitos.

Más recientemente, (Zahra et al., 2023) han aplicado la técnica del DIC para obtener las deformaciones por tensión producidas en un panel de mampostería ensayado a flexión fuera del plano. Se empleó una cámara monocromática, que permitió realizar el análisis de deformación/tenacidad. En esta investigación también emplearon el método 2D DIC en un análisis lateral del panel.

De acuerdo con la literatura consultada, se puede concluir que la técnica del DIC se ha aplicado satisfactoriamente en diferentes problemas estructurales en el campo de la ingeniería civil. Debido a la fortaleza que ha demostrado tener la técnica para la medición del campo de las deformaciones y la detección de inicio y propagación de las grietas, se decidió comenzar a aplicar la técnica en los proyectos de investigación en curso. En ese sentido se planteó como objetivo de esta investigación evaluar la efectividad del método 2D DIC en muretes de mampostería fabricados en nuestro laboratorio (FIC-UANL) bajo carga de compresión axial según la normativa europea (Eurocode-6, 2005).

2. METODOLOGÍA

El proyecto se llevó a cabo desarrollando la siguiente metodología:

- 1) *Preparación de los especímenes en el laboratorio.* Como parte del proyecto en el que se desarrolló esta investigación, se establecieron 3 etapas fundamentales: (i) caracterización de los materiales (bloques y mortero) según las normas (NMX-C-036-ONNCCE-2013, 2013; NMX-C-061-ONNCCE-2015, 2015), (ii) construcción de los especímenes, y (iii) ensayo de los especímenes a compresión según la normativa europea (Eurocode-6, 2005). Se elaboraron 7 muretes de 5 hileras de bloques y medios bloques del N°6 de dimensiones modulares de 400x150x200mm (Longitud x ancho x altura). Los bloques fueron adquiridos en una empresa local. La resistencia promedio de los bloques fue de 6.61 MPa en área bruta y las dimensiones de los muretes fueron de 104 cm de altura y 61 cm de espesor. Los muretes se ensayaron a compresión axial como parte de otro proyecto de investigación en curso que persigue otros objetivos específicos.
- 2) *Preparación del marco de carga.* Se preparó el marco de carga como se observa en la Figura 2. Se colocó un LVDT para la medición de los desplazamientos, y su posterior comparación con los resultados obtenidos al emplear la técnica del DIC.
- 3) *Preparación de la técnica del DIC.* La preparación de la técnica consistió en agregar una capa de pintura blanca en el centro del espécimen, y rociar con aerosol negro la capa de pintura blanca. Esto generó un patrón de puntos que posteriormente fueron analizados con la toma de fotografías para obtener la imagen deformada a medida que avanzaba el ensayo (ver Figura 3). La Figura 3A, muestra 4 muretes que se prepararon con las características de la cámara F5 con ISO 500 y una velocidad de obturación de 1/13 s. En la Figura 3B, se presentan los otros 3 muretes con las características de la cámara F5 con ISO 250 y una velocidad de obturación

de 1/25 s. Adicionalmente, se utilizaron puntos de control en cada prueba para el cálculo posterior de los errores debido a posibles movimientos del sistema de captura de fotos o del marco de carga. Los puntos de control se muestran en la Figura 3C.

- 4) *Captura de imágenes.* Para la captura de imágenes se empleó una Cámara NIKON D5600 lentes 18mm a 58 mm de 24 MPX con control remoto y un trípode marca Manfrotto. Además, se emplearon dos fuentes de luz marca GTC luz fría 3900 lm con paraguas fotográfico, como se aprecia en la Figura 4. La captura de imágenes se realizó mientras se ensayaban los muretes a compresión axial.
- 5) *Algoritmo DIC.* Para la aplicación de la técnica del DIC, se elaboró un algoritmo en el lenguaje de programación Python. En la referencia (Valencia-Guzmán, 2021) se puede consultar el script del algoritmo. Para el desarrollo de este, se utilizaron diferentes métodos y recomendaciones de investigaciones precedentes (Su et al., 2019). Para el algoritmo, se siguió el diagrama de flujo que se presenta en la Figura 5 y la metodología que se explica a continuación (Figura 6).

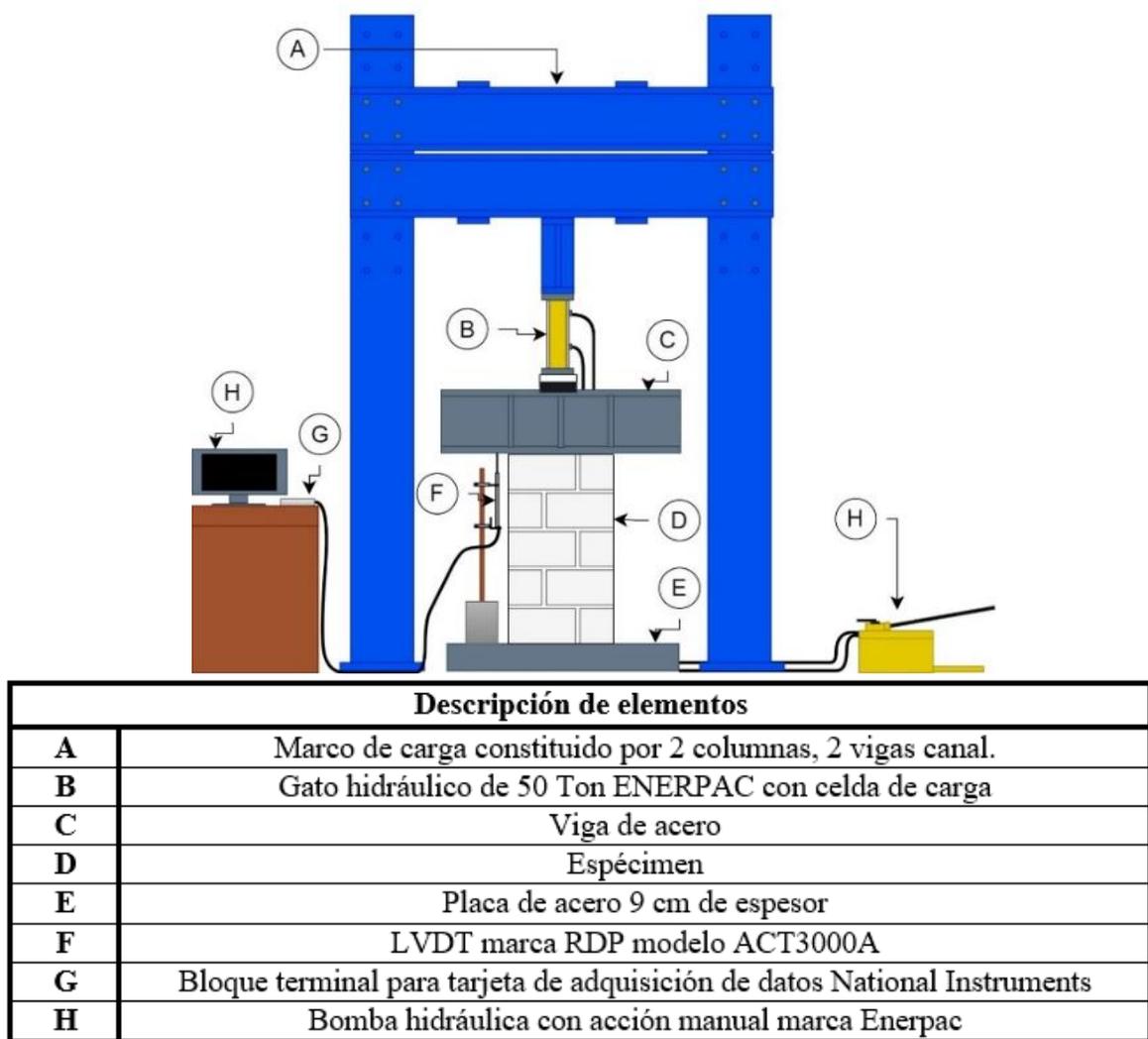


Figura 2. Esquema del marco de carga para el ensayo del espécimen

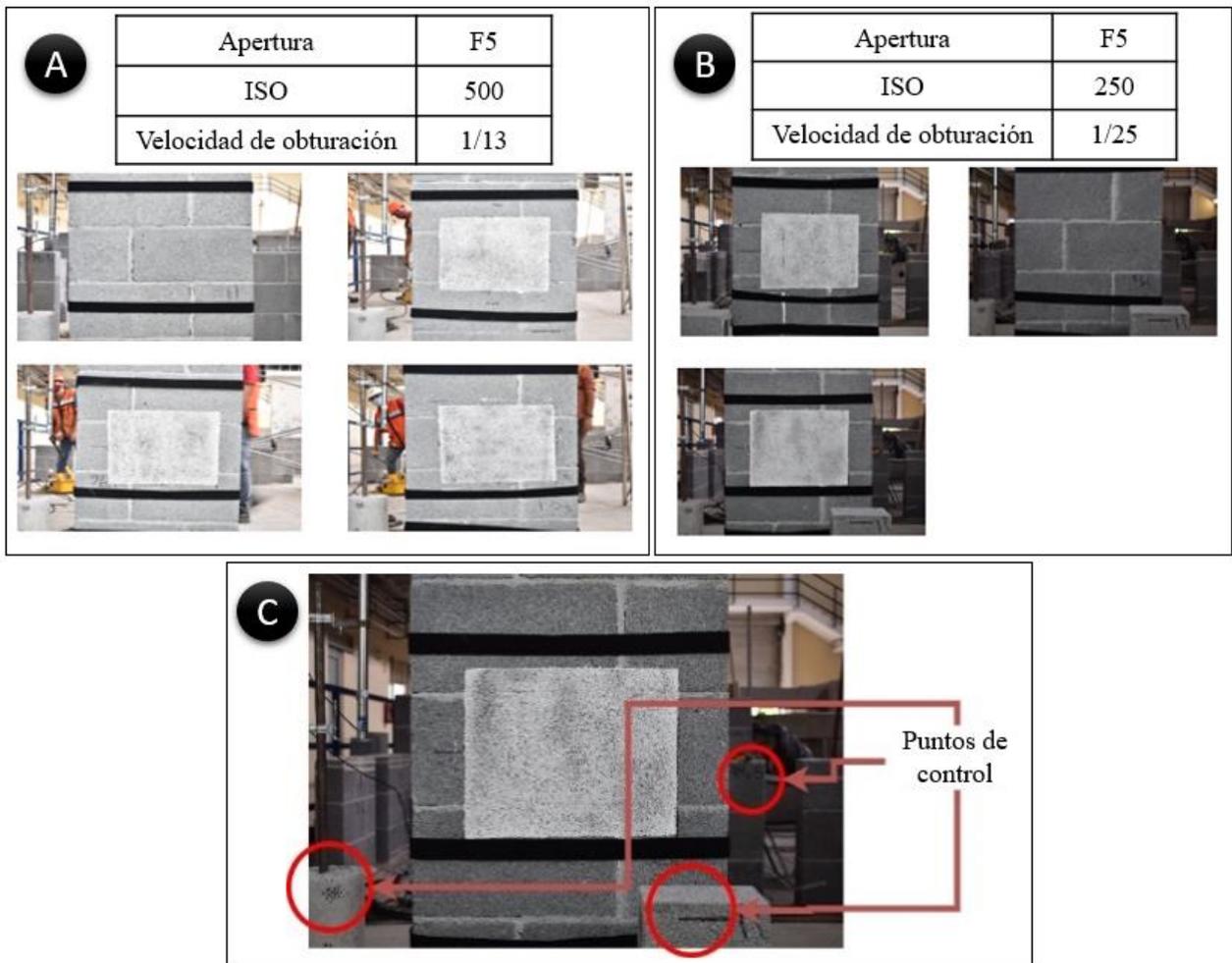


Figura 3. Preparación de la técnica del DIC. A) Muretes para prueba con cámara ISO 500, velocidad de obturación 1/13 s y apertura F5, B) muretes para prueba con cámara ISO 250, velocidad de obturación 1/25 s y apertura F5, C) puntos de control empleados para la experimentación



Figura 4. Ensayo en el laboratorio e implementación de la técnica para la captura de imágenes.

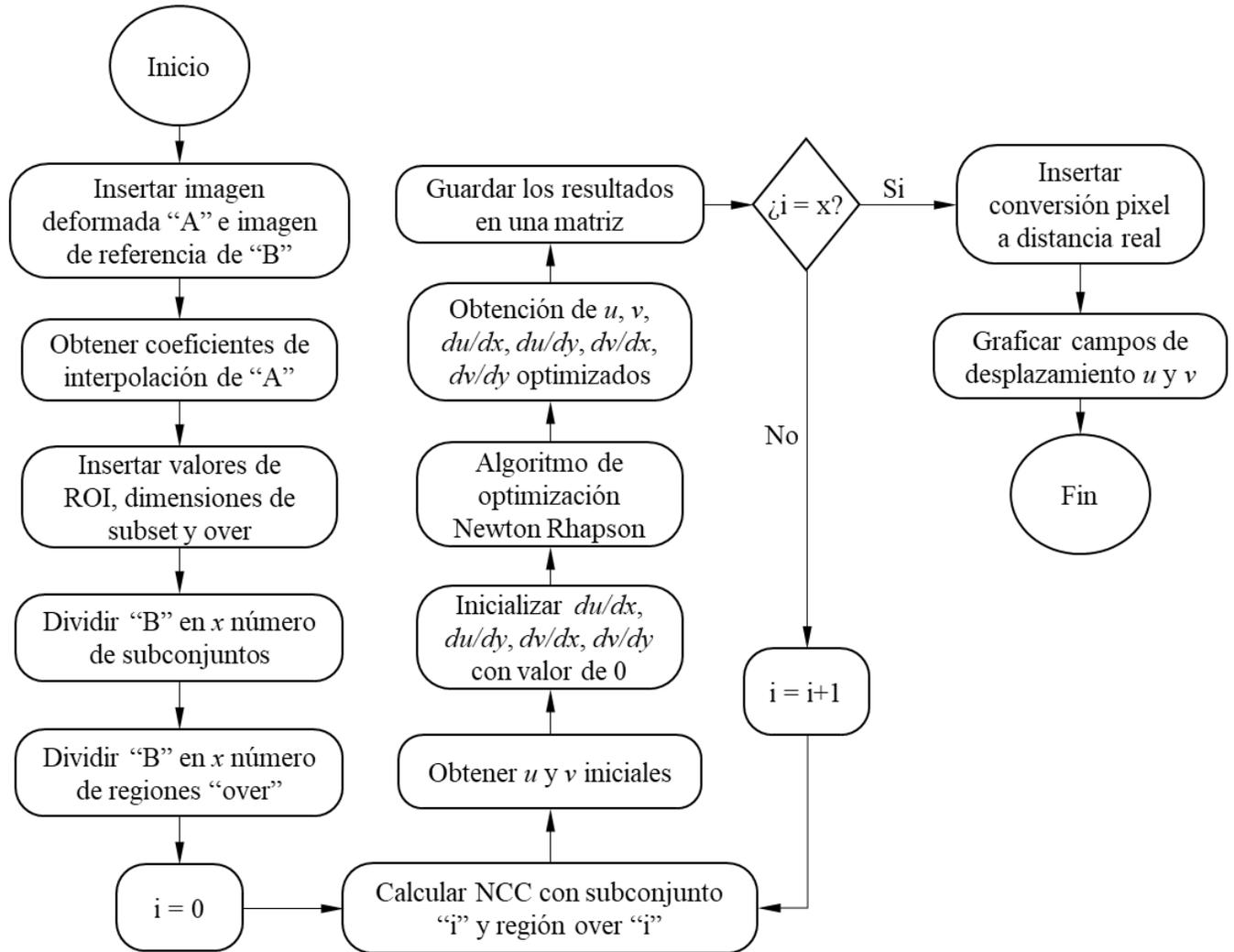


Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo elaborado para la aplicación de la técnica del DIC (Valencia-Guzmán, 2021)

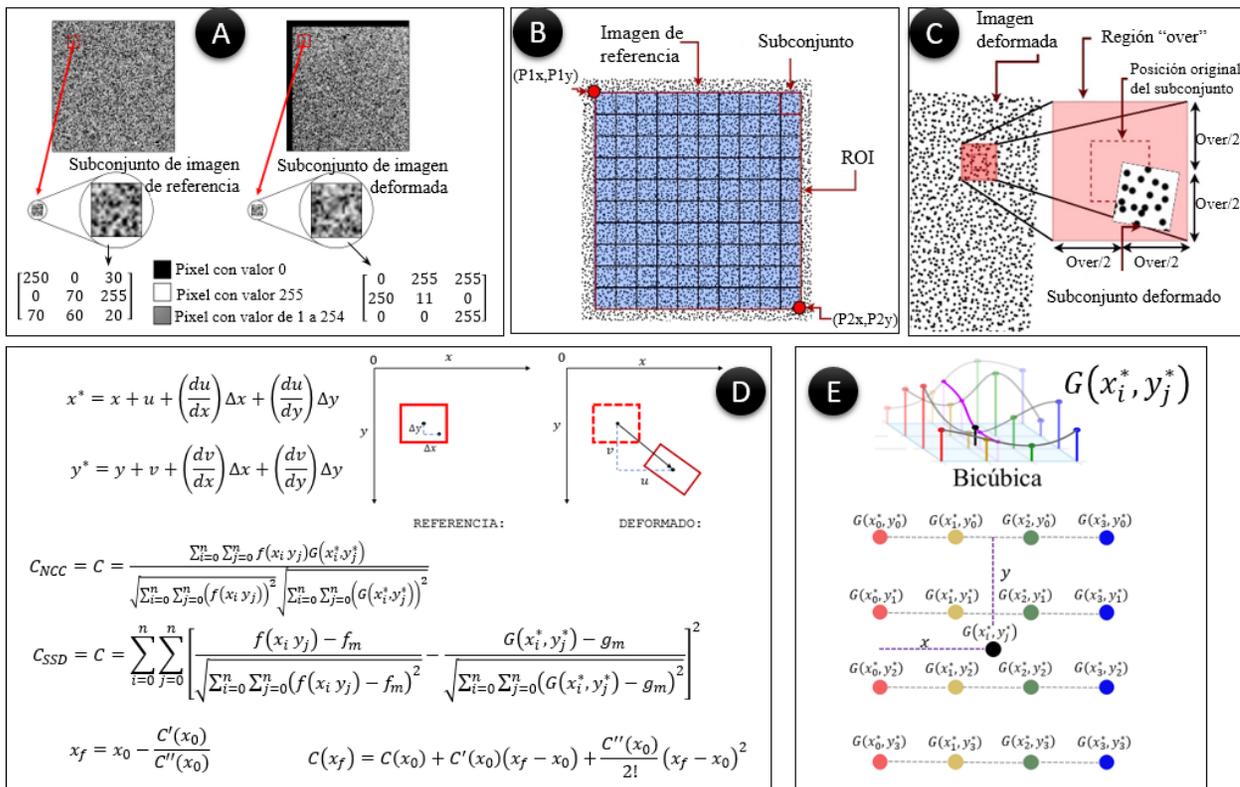


Figura 6. Metodología seguida para la implementación del algoritmo (Valencia-Guzmán, 2021)

En la Figura 6, se presenta la metodología para la implementación del algoritmo empleado para la aplicación de la técnica del DIC en el presente trabajo. Primeramente, se obtuvo un subconjunto del patrón de puntos en la imagen de referencia y el mismo subconjunto en la imagen deformada posterior al ensayo (Figura 6A). Los subconjuntos fueron clasificados en píxeles en la siguiente escala de grises: 0 (negro) a 255 (blanco). Posteriormente, se subdividieron los subconjuntos de manera optimizada, seleccionando la región de referencia conocida como “región de interés” (*Region Of Interest*, ROI por sus siglas en inglés) (Figura 6B). Una vez definidos los subconjuntos dentro del ROI, se determina la posición de la búsqueda dentro de la imagen deformada. Esto se realiza definiendo una distancia arbitraria “over”, que depende de las deformaciones máximas esperadas (Figura 6C). En la Figura 6D, se presentan las ecuaciones que se emplearon para la determinación de las coordenadas de los puntos deformados (x^*, y^*) a partir de los desplazamientos horizontales (u) y verticales (v). Para ello se emplearon las funciones de interpolación en estado no deformado $f(x_i, y_j)$ y deformado $G(x_i^*, y_j^*)$. Para el cálculo de los coeficientes de correlación se aplicó el criterio de Correlación Cruzada Normalizada (C_{NCC}) y de Diferencias al Cuadrado de Suma Cero (C_{SSD}) (Pan et al., 2010). La búsqueda de los valores extremos de correlación es mediante el método de Newton Raphson (Steven and Raymond, 2015). Para obtener las funciones de interpolación ‘ f ’, ‘ G ’ y ‘ C ’, se empleó el criterio de interpolación bicúbica (Figura 6E), ya que la demanda computacional es relativamente baja en comparación con otros métodos de interpolación (Schreier et al., 2000).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El algoritmo propuesto fue verificado mediante una imagen sintética en el software libre *Speckle Generator*. El error máximo relativo en términos del campo de desplazamientos (u , v , α) en la verificación del algoritmo fue de 0.053% para el desplazamiento horizontal, u , en un determinado subconjunto en condiciones idóneas, es decir, no existieron distorsiones, y no existieron movimientos no deseados (ver Tabla 1).

Tabla 1. Errores en traslaciones y rotación

Variables	Valor Esperado	Valor obtenido	Error relativo
u	32.897 px	32.9144 px	0.053%
v	-36.5146 px	-36.497 px	0.048%
α	0.0523599 rad	0.0521625 rad	0.378%

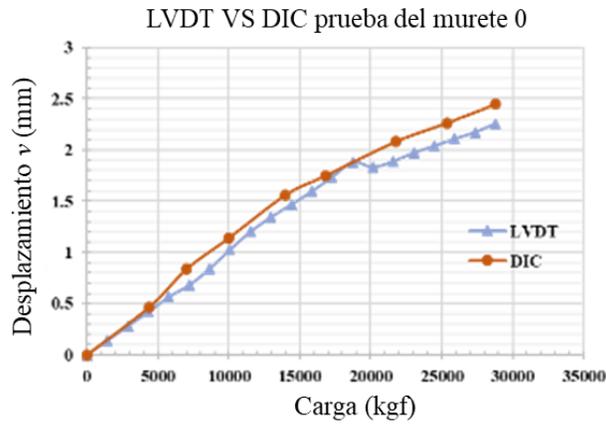
Posteriormente a la comprobación del algoritmo, se obtuvieron los gráficos de carga vs desplazamiento de cada prueba realizada en intervalos de carga previamente seleccionados (ver Figura 7 y Figura 8). Debido a que los LVDT solo registran el desplazamiento lineal vertical en un segmento de recta (l_0) y la técnica del DIC tiene entre 1000 a 4000 puntos dependiendo de la superficie de referencia del murete, se optó por obtener un promedio de los desplazamientos verticales sobre la línea (l_D) al centro de la superficie de referencia (ver Figura 9), para efectuar la comparación entre los resultados del DIC y el LVDT.

De las pruebas realizadas a los 7 muretes, en el espécimen 4, no fue posible capturar la información del LVDT. En la Figura 7 y la Figura 8 se muestran los resultados de los muretes ensayados, denominados como prueba 0, 1, 2, 3, 5 y 6. También, se muestran los errores relativos calculados entre los desplazamientos obtenidos por las mediciones del LVDT y los obtenidos con la técnica del DIC.

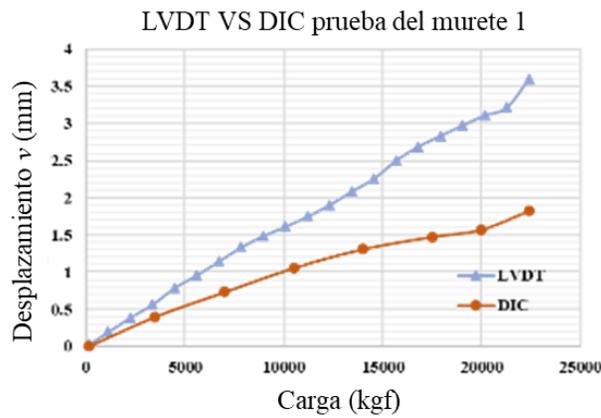
Se obtuvo una diferencia absoluta máxima de 1.77 mm en la prueba del murete 1 (Figura 7) y un error relativo promedio máximo de 54.37% en la prueba del murete 3 (Figura 8). Estos errores son sustanciales y pueden ser atribuidos a las siguientes razones:

- (1) Movimientos no deseados de la placa y el trípode.
- (2) En la prueba del murete 3, se evidenció la aparición y propagación de una grieta, lo que arrojó valores irregulares y subconjuntos irreconocibles.
- (3) Distorsión del lente.

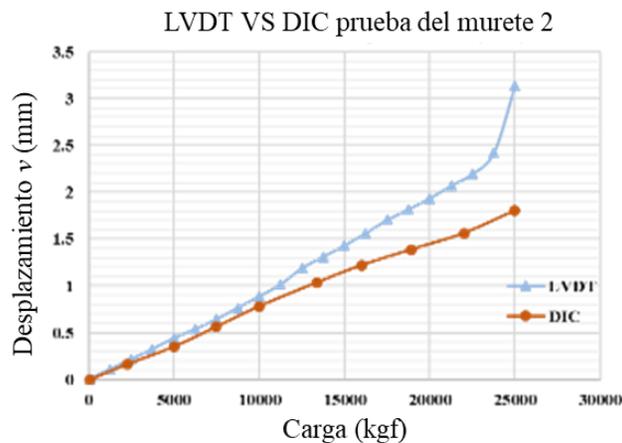
Mediante los puntos de control que se muestran en la Figura 3, se verificó que no hubo movimientos significativos del trípode. En los muretes de las pruebas 0, 2, 5 y 6, se observaron errores promedio más bajos que fueron del 10.99%, 21.65%, 5.47% y 20.22% respectivamente. Sin embargo, es importante destacar que estos errores todavía superan la precisión deseada, especialmente en las pruebas que superan los niveles de cargas de 15000 kgf (15 toneladas), donde se registran las mayores diferencias.



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
0	0	0	0	0.00
4400	1	0.46884	0.42461	10.42
7017	2	0.83672	0.66432	25.95
10000	3	1.14050	1.01596	12.26
14000	4	1.55988	1.43100	9.01
16800	5	1.74735	1.68510	3.69
21800	6	2.08113	1.89955	9.56
25400	7	2.26296	2.08188	8.70
28800	8	2.44464	2.25545	8.39
Error promedio				10.99

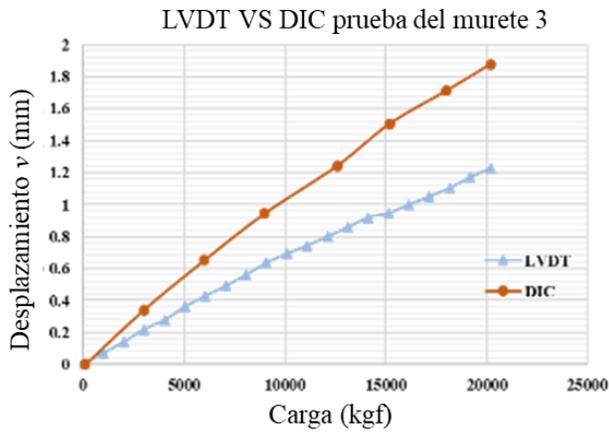


Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
140	0	0	0	0.00
3500	1	0.39987	0.59235	-32.49
7000	2	0.73110	1.19257	-38.70
10500	3	1.05501	1.66167	-36.51
14000	4	1.30750	2.16988	-39.74
17500	5	1.47337	2.77619	-46.93
20000	6	1.57064	3.08693	-49.12
22400	7	1.82140	3.59156	-49.29
Error promedio				-41.83

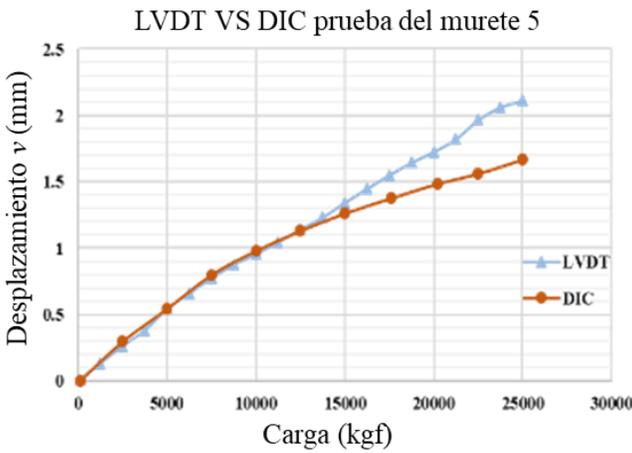


Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
2300	1	0.16446	0.19899	-17.35
5000	2	0.34966	0.44025	-20.58
7500	3	0.56413	0.64394	-12.39
10000	4	0.78138	0.88666	-11.87
13400	5	1.03805	1.27676	-18.70
16000	6	1.22117	1.53646	-20.52
18900	7	1.38908	1.83196	-24.18
22000	8	1.56459	2.14444	-27.04
25000	9	1.80847	3.13240	-42.27
Error promedio				-21.65

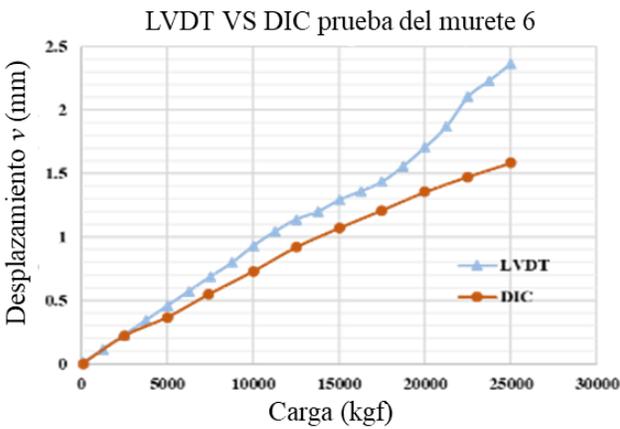
Figura 7. Resultados de la comparación entre el LVDT y el DIC para los muretes 0, 1 y 2.



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
3000	1	0.33960	0.21630	57.00
6000	2	0.65058	0.42292	53.83
9000	3	0.94384	0.62682	50.58
12600	4	1.24236	0.82598	50.41
15200	5	1.50514	0.94703	58.93
18000	6	1.71005	1.09216	56.58
20200	7	1.87693	1.22462	53.27
Error promedio				54.37



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
2500	1	0.29695	0.26187	13.40
5000	2	0.54353	0.54129	0.41
7500	3	0.79931	0.77204	3.53
10000	4	0.98015	0.95489	2.64
12500	5	1.13096	1.14003	-0.79
15000	6	1.26176	1.34216	-5.99
17600	7	1.37609	1.55677	-11.61
20200	8	1.48394	1.73981	-14.71
22500	9	1.56148	1.96488	-20.53
25000	10	1.66718	2.11064	-21.01
Error promedio				-5.47



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
2500	1	0.21805	0.22858	-4.61
5000	2	0.36459	0.45716	-20.25
7400	3	0.54477	0.67659	-19.48
10000	4	0.72692	0.92808	-21.68
12500	5	0.91711	1.13738	-19.37
15000	6	1.06770	1.28948	-17.20
17500	7	1.20852	1.43366	-15.70
20000	8	1.35222	1.70581	-20.73
22500	9	1.47283	2.10386	-29.99
25000	10	1.58116	2.36550	-33.16
Error promedio				-20.22

Figura 8. Resultados de la comparación entre el LVDT y el DIC para los muretes 3, 5 y 6.

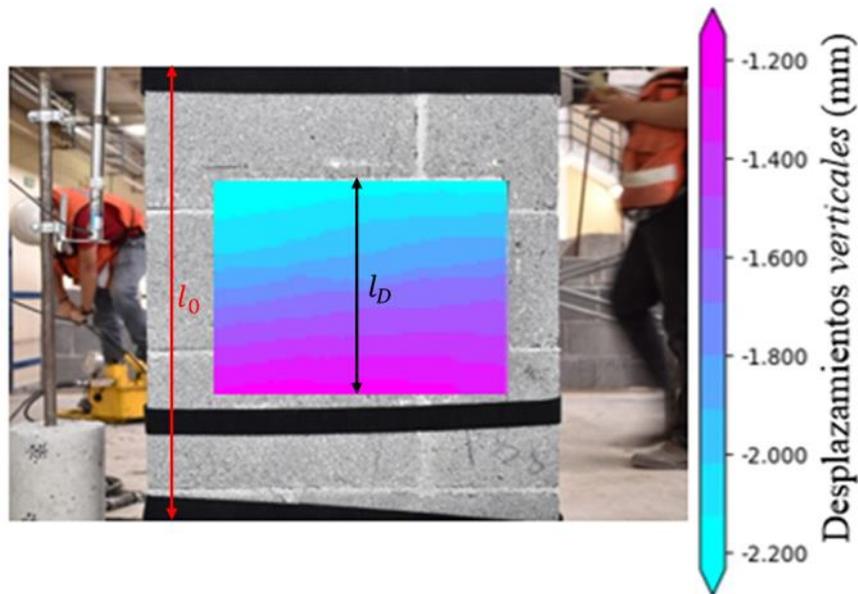


Figura 9. Resultados de los desplazamientos verticales obtenidos mediante el algoritmo empleado en el DIC para la prueba del murete 5 con una carga máxima de 25000 kgf.

En la Figura 9, se aprecian los resultados referentes a los desplazamientos verticales para el murete de la prueba 5 en la foto tomada instantes antes de la falla, con una carga máxima de 25000 kgf. Estos desplazamientos se obtuvieron en todo el dominio medido con la aplicación de la técnica DIC.

En la investigación de (Zahra et al., 2021), se realizaron ensayos experimentales de prismas a compresión con bloques huecos de concreto de características similares al de la presente investigación. Con el empleo de la técnica del método 2D-DIC, presentaron sus resultados en términos de las deformaciones. En la Tabla 2 se presenta una comparativa en términos de los desplazamientos promedio máximos verticales a compresión axial. Se puede observar que los errores relativos estuvieron en el orden de 21%, tomando como patrón los presentados en la investigación de (Zahra et al., 2021). Estas diferencias se atribuyen a las variaciones que existen entre las dos investigaciones como por ejemplo la forma de los especímenes (prisma vs muretes). Sin embargo, los resultados obtenidos son alentadores y motivan a continuar implementando la técnica en las líneas de investigación experimental.

Tabla 2. Comparación de los resultados obtenidos con investigaciones precedentes

Referencia	Deformaciones verticales máximas en compresión	Desplazamientos promedios máximos verticales en compresión
(Zahra et al., 2021)	0.007 mm/mm	2.8 mm
Presente investigación, desplazamientos verticales instantes antes de la falla	-	2.2 mm
Error relativo		21%

4. CONCLUSIONES

- El algoritmo propuesto fue verificado de manera eficaz mediante el empleo de una imagen sintética en el software libre *Speckle Generator*. El error relativo máximo obtenido en el campo de desplazamientos fue de 0.053% para el desplazamiento horizontal.
- Al comparar los desplazamientos verticales entre la técnica del DIC y el LVDT, se encontró que presentan grandes errores relativos, siendo el promedio máximo de 54.37% en la prueba del murete 3. Esto es debido a factores como: distorsión del lente, movimientos no deseados y aparición de grietas o discontinuidades del medio.
- Se identificaron los factores que se necesitan calibrar para alcanzar la precisión deseada con la metodología implementada.
- Con esta investigación se inicia el proceso de implementación de la técnica de DIC y podrá servir como base para futuras investigaciones y trabajos experimentales.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Estructural y Peritajes del Instituto de Ingeniería civil de la FIC, UANL y al programa PAICYT: 595-IT-2022, 496-IT-2022 y 598-IT-2022.

6. REFERENCIAS

- Allaoui, S., Rekik, A., Gasser, A., Blond, E., Andreev, K. (2018). *Digital Image Correlation measurements of mortarless joint closure in refractory masonries*. Construction and Building Materials, 162, 334-344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.055>
- Bermudo Gamboa, C., Martín-Béjar, S., Trujillo Vilches, F. J., Castillo López, G., Sevilla Hurtado, L. (2019). 2D–3D Digital Image Correlation Comparative Analysis for Indentation Process. *Materials*, 12(24).
- Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A., Peters, W. H. (1989). *Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction*. Experimental Mechanics, 29(3), 261-267. <https://doi.org/10.1007/BF02321405>
- Buljac, A., Jailin, C., Mendoza, A., Negggers, J., Taillandier-Thomas, T., Bouterf, A., Smaniotto, B., Hild, F., Roux, S. (2018). *Digital Volume Correlation: Review of Progress and Challenges*. Experimental Mechanics, 58(5), 661-708. <https://doi.org/10.1007/s11340-018-0390-7>
- Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A. (1985). *Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics*. Experimental Mechanics, 25(3), 232-244. <https://doi.org/10.1007/BF02325092>
- Destrebecq, J. F., Toussaint, E., Ferrier, E. (2011). *Analysis of Cracks and Deformations in a Full Scale Reinforced Concrete Beam Using a Digital Image Correlation Technique*. Experimental Mechanics, 51(6), 879-890. <https://doi.org/10.1007/s11340-010-9384-9>
- Dhanasekar, M., Prasad, P., Dorji, J., Zahra, T. (2019). *Serviceability Assessment of Masonry Arch Bridges Using Digital Image Correlation*. Journal of Bridge Engineering, 24(2), 04018120. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001341](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001341)
- Eurocode-6. (2005). *Design of masonry structures. In Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*.
- Fayyad, T. M., Lees, J. M. (2014). *Application of Digital Image Correlation to Reinforced Concrete Fracture*. Procedia Materials Science, 3, 1585-1590. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.256>

- Howlader, M. K., Masia, M. J., Griffith, M. C. (2021). *Digital image correlation for the analysis of in-plane tested unreinforced masonry walls*. Structures, 29, 427-445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.051>
- Hubert, S., Jean-José, O., Sutton, M. A. (2010). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>
- Jiroušek, O., Jandajsek, I., Vavřík, D. (2011). *Evaluation of strain field in microstructures using micro-CT and digital volume correlation*. Journal of Instrumentation, 6(01), C01039. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/01/C01039>
- Malesa, M., Szczepanek, D., Kujawińska, M., Świercz, A., Kołakowski, P. (2010). *Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique*. EPJ Web of Conferences, 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/epjconf/20100631014>
- Mojsilović, N., Salmanpour, A. H. (2016). *Masonry walls subjected to in-plane cyclic loading: application of digital image correlation for deformation field measurement*. International Journal of Masonry Research and Innovation, 1(2), 165-187. <https://doi.org/10.1504/IJMRI.2016.077473>
- NMX-C-036-ONNCCE-2013. (2013). *Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines*. In (pp. 10).
- NMX-C-061-ONNCCE-2015. (2015). *Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*. In (pp. 12).
- Orteu, J.-J. (2009). *3-D computer vision in experimental mechanics*. Optics and Lasers in Engineering, 47(3), 282-291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.11.009>
- Pan, B. (2009). *Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement*. Applied Optics, 48(8), 1535-1542. <https://doi.org/10.1364/AO.48.001535>
- Pan, B., Li, K. (2011). *A fast digital image correlation method for deformation measurement*. Optics and Lasers in Engineering, 49(7), 841-847. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.02.023>
- Pan, B., Xie, H., Wang, Z. (2010). *Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching*. Applied Optics, 49(28), 5501-5509. <https://doi.org/10.1364/AO.49.005501>
- Quintana, K. T., Reu, P., Jimenez, E., Kramer, S. (2016). *Digital Volume Correlation for Materials Characterization* 19th World Conference on Non-Destructive Testing,
- Schreier, H., Orteu, J.-J., Sutton, M. A. (2009). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications* (1 ed.). Springer New York, NY. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>
- Schreier, H. W., Braasch, J. R., Sutton, M. A. (2000). *Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation*. Optical Engineering, 39, 2915-2921.
- Steven, C. C., Raymond, P. C. (2015). *Métodos numéricos para ingenieros*.
- Su, Y., Zhang, Q., Fang, Z., Wang, Y., Liu, Y., Wu, S. (2019). *Elimination of systematic error in digital image correlation caused by intensity interpolation by introducing position randomness to subset points*. Optics and Lasers in Engineering, 114, 60-75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.10.012>
- Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., McNeill, S. R. (1983). *Determination of displacements using an improved digital correlation method*. Image and Vision Computing, 1(3), 133-139. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0262-8856\(83\)90064-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1)
- Sutton, M. A., Yan, J. H., Tiwari, V., Schreier, H. W., Orteu, J. J. (2008). *The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements*. Optics and Lasers in Engineering, 46(10), 746-757. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.05.005>
- Valencia-Guzmán, E. (2021). *Aplicación de correlación de imagen digital en muretes fabricados en laboratorio* Universidad Autónoma de Nuevo León].

- Vendroux, G., Knauss, W. G. (1998). *Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation*. *Experimental Mechanics*, 38(2), 86-92. <https://doi.org/10.1007/BF02321649>
- Zahra, T., Thamboo, J., Asad, M. (2021). *Compressive strength and deformation characteristics of concrete block masonry made with different mortars, blocks and mortar beddings types*. *Journal of Building Engineering*, 38, 102213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102213>
- Zahra, T., Thamboo, J., Dorji, J., Asad, M., Kasinski, W., Nardone, A. (2023). *Out-of-plane flexural behaviour of reinforced mortarless concrete block masonry: An experimental study*. *Construction and Building Materials*, 384, 131448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131448>
- Zhenxing Hu, Huimin Xie, Jian Lu, Tao Hua, Jianguo Zhu. (2010). *Study of the performance of different subpixel image correlation methods in 3D digital image correlation*. *Applied Optics*, 49(21), 4044-4051. <https://doi.org/10.1364/AO.49.004044>