

Diseño, construcción y validación de un sistema de medición del campo de deformación tridimensional de bajo costo para elementos estructurales

Design, Construction, and Validation of a Low-Cost Three-Dimensional Deformation Field Measurement System for Structural Elements

DOI: <https://doi.org/10.51378/iuca.v3i3.10355>

Erick Burgos

PhD en Filosofía con especialidad en Ingeniería Estructural
Departamento de Mecánica Estructural
Universidad Centroamericana José Simeón Cañas
El Salvador
eburgos@uca.edu.sv
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9292-7388>

José Adolfo Ramos Huezo

Maestro en Gestión de Desastres por Sismos
Departamento de Mecánica Estructural
Universidad Centroamericana José Simeón Cañas
El Salvador
jramos@uca.edu.sv
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4775-2238>

Alexandra María Urbina

Maestría en Ingeniería Civil con especialidad en Construcción
Departamento de Mecánica Estructural
Universidad Centroamericana José Simeón Cañas
El Salvador
murbina@uca.edu.sv
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9111-906X>

Mauricio Arturo Pohl Alfaro

Doctor en Ciencias con especialidad en Ingeniería Biomédica
Departamento de Electrónica e Informática
Universidad Centroamericana José Simeón Cañas
El Salvador
mapohl@uca.edu.sv
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2776-8777>

Palabras clave:

desplazamientos estructurales, correlación de imágenes digitales, fotogrametría, validación experimental, cargas cíclicas, concreto reforzado.

Keywords: structural displacements, digital image correlation, photogrammetry, experimental validation, cyclic loads, reinforced concrete.

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (157-164)
e-ISSN: 2789-4061

Erick Burgos, José Adolfo
Ramos Huezo, Alexandra
María Urbina, Mauricio
Arturo Pohl Alfaro

Diseño, construcción
y validación de
un sistema de
medición del campo
de deformación
tridimensional de bajo
costo para elementos
estructurales

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (157-164)
e-ISSN: 2789-4061

Introducción

Debido a su ubicación geográfica, la infraestructura de El Salvador enfrenta una demanda sísmica de moderada a intensa cada 15 años aproximadamente (Salazar *et al.*, 2018). La situación de vulnerabilidad de la infraestructura social del país, combinada con un grado de exposición elevado y una amenaza sísmica significativa, constituye un desafío crítico para el país. Según la “Guía para la formulación de un marco de recuperación post-desastre” del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), los terremotos han sido el fenómeno natural que ha causado la mayor proporción de pérdidas económicas y humanas en los últimos 60 años. En particular, los sismos del 10 de octubre de 1986, 13 de enero y febrero de 2001, así como los enjambres sísmicos de 2017 y 2019, fueron responsables del 49% de los daños totales, el 51% de los afectados totales y el 52% de las muertes registradas entre 1960 y 2020 (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2022). Es por ello, que estudiar el comportamiento de los sismos y sus efectos en la infraestructura es fundamental para fortalecer la residencia de la sociedad salvadoreña y mitigar su impacto.

La vulnerabilidad sísmica de cualquier tipo de infraestructura puede reducirse mediante la comprensión del comportamiento de los sistemas estructurales ante eventos sísmicos. En la UCA, este proceso se lleva a cabo mediante ensayos en elementos a escala natural o reducida en el Laboratorio de Estructura Grandes (LEG). Parte del equipo utilizado incluye instrumentos capaces de medir digitalmente las deformaciones en puntos específicos de los elementos estructurales. Esta información puede y debe complementarse con equipos capaces de medir las deformaciones de superficie completas, lo que permite analizar cómo se deforma la superficie y los esfuerzos que se generan durante dicho proceso. Esto permitirá, entre otras cosas, validar modelos matemáticos que se usan para diseñar la infraestructura del país.

Entre las metodologías utilizadas para medir las deformaciones de superficies se encuentran la fotogrametría (Derenyi, 1996; Schenk, 2005) y la correlación de imágenes digitales o DIC (Sutton *et al.*, 2009). Ambas técnicas permiten rastrear objetos a medida se deforman mediante la captura de imágenes, las cuales son procesadas utilizando algoritmos avanzados de visión por computadora. El equipo y programas que se requiere para su procesamiento tiene un costo elevado, por lo que en el presente resumen, se exponen los resultados de mediciones de desplazamientos de elementos estructurales en las que se utilizaron fotografías capturadas con cámaras digitales DSLR de bajo costo. La validez de los resultados se verificó comparándolos con los obtenidos con transductores de desplazamiento lineal (TDL). A través de un programa experimental se buscó responder la siguiente interrogante: ¿Pueden la fotogrametría y la correlación de imágenes digitales con tecnología de bajo costo ser tan válidas como el método convencional para medir desplazamientos en elementos estructurales?

Metodología

El proyecto empleó una metodología experimental de carácter exploratorio, cuyo objetivo fue evaluar la viabilidad de implementar la Fotogrametría y la Correlación Digital de Imágenes en la medición de deformaciones de elementos estructurales en el LEG. Para reducir significativamente los costos del sistema de medición, se utilizaron cámaras convencionales, DSLR con sensor CMOS APS-C.

En el marco de este estudio, se construyeron y ensayaron tres elementos estructurales de concreto reforzado: una pared, diseñada para medir grandes de-

formaciones horizontales cíclicas; un elemento de borde, utilizado para evaluar grandes deformaciones verticales cíclicas; y una viga, empleada para registrar deformaciones verticales monotónicas. Los elementos estructurales se deformaron aplicando las cargas en puntos clave, empleando pistones hidráulicos de 1470 kN (ver Figura 2). A medida se aplicaron las cargas en los especímenes, se registraron de forma simultánea desplazamientos con transductores de desplazamiento lineal instalados de forma tal que permitieran medir el desplazamiento lateral de la pared y las deformaciones verticales del elemento de borde y de la viga. La figura 1 muestra la posición de estos instrumentos, así como el área que se utilizó para colocar los marcadores necesarios para tomar las mediciones para las metodologías DIC y Fotogrametría.

La validez de los métodos de teledetección se determinó mediante el cálculo del cociente entre la diferencia de los desplazamientos obtenidos por el método tradicional (transductores de desplazamiento) y los calculados con el método de teledetección, dividido entre los desplazamientos medidos por los transductores. Además, se realizó un análisis de regresión lineal entre los datos obtenidos con los transductores y los calculados por los métodos de teledetección, determinándose el coeficiente de determinación. La significancia de los coeficientes de regresión se evaluó mediante un análisis ANOVA.

Resultados

La Figura 3 resume los resultados obtenidos, mostrando curvas de carga contra deformación y análisis de regresión con ecuaciones, coeficientes de determinación y puntos obtenidos. Las curvas grafican la deformación medida (línea azul) y la calculada por teledetección (línea roja) en el eje x, y la carga aplicada en el eje y. La figura se organiza de tal manera que las columnas los resultados de la pared, el elemento de borde y la viga, mientras que las filas muestran resultados para la Correlación de Imágenes Digitales (primeras dos filas) y fotogrametría (tercera y cuarta fila). De los resultados mostrados se puede observar lo siguiente:

1. Independientemente del método empleado (Correlación de Imágenes Digitales o Fotogrametría), se identificó un desfase constante entre los desplazamientos calculados mediante teledetección y los medidos con transductores. Por este motivo, fue necesario corregir los datos obtenidos por teledetección para eliminar dicho desfase, y los porcentajes de diferencia se calcularon utilizando los datos ajustados. Actualmente, no es posible determinar la causa de este desfase; sin embargo, en futuros proyectos será fundamental verificar o calibrar los transductores de desplazamiento utilizados en el LEG para descartar que sean la fuente del problema.
2. Independientemente del método de teledetección empleado, las diferencias entre los desplazamientos medidos y calculados varían según la magnitud de la deformación impuesta en los especímenes. A medida que la deformación aplicada es menor, las diferencias entre los datos obtenidos con los transductores y los calculados con los métodos de teledetección aumentan. Esto se debe a que la fórmula utilizada para calcular dichas diferencias es un cociente, y cuando el denominador es extremadamente pequeño, como ocurre al inicio de los ensayos con deformaciones reducidas, el resultado se incrementa significativamente.
3. Entre los dos métodos de teledetección evaluados, la fotogrametría mostró porcentajes de diferencia menores en todas las condiciones de

Erick Burgos, José Adolfo Ramos Huevo, Alexandra María Urbina, Mauricio Arturo Pohl Alfaro

Diseño, construcción y validación de un sistema de medición del campo de deformación tridimensional de bajo costo para elementos estructurales

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (157-164)
e-ISSN: 2789-4061

Erick Burgos, José Adolfo
Ramos Huezo, Alexandra
María Urbina, Mauricio
Arturo Pohl Alfaro

Diseño, construcción
y validación de
un sistema de
medición del campo
de deformación
tridimensional de bajo
costo para elementos
estructurales

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (157-164)
e-ISSN: 2789-4061

carga estudiadas: cargas cíclicas horizontales, cargas cíclicas verticales y cargas monotónicas verticales. En particular, se obtuvieron diferencias inferiores al 5% cuando las deformaciones impuestas fueron menores a 8 mm para la pared, 5 mm para el elemento de borde y 3.5 mm para la viga. Para el método de correlación de imágenes, diferencias menores al 5% se obtuvieron cuando las deformaciones aplicadas fueron de 15 mm para la pared y 8 mm para el elemento de borde.

4. Para la viga, mejores resultados se obtuvieron empleando fotogrametría. No fue posible obtener resultados satisfactorios por el método de correlación de imágenes, ya que los resultados obtenidos tienden a subestimar los desplazamientos, independientemente de la deformación impuesta al espécimen. Este resultado no es consistente con los obtenidos en los otros elementos ensayados, por lo que los resultados no son concluyentes. Más análisis es necesario para comprender dicha diferencia.
5. Para la pared, se realizaron cuatro análisis con diferentes configuraciones de cámaras en el método de fotogrametría: (1) tres cámaras (central y dos superiores), (2) cuatro cámaras (central, dos superiores e inferior izquierda), (3) cuatro cámaras (central, dos superiores e inferior derecha) y (4) cinco cámaras (central, dos superiores y dos inferiores). Los mejores resultados se obtuvieron con la configuración 1, mientras que los peores correspondieron a la configuración 2, debido a que la pared salió del campo de visión de la cámara inferior izquierda, lo que incrementó los errores en las configuraciones que utilizaron dicha cámara (2 y 4). Esto sugiere que es posible obtener buenos resultados con solo tres cámaras, siempre que no se obstruya su campo de visión durante los ensayos y la calidad de las fotografías sea adecuada. Cumpliendo estas condiciones, puede incrementarse el número de cámaras para mejorar aún más los resultados. Según el personal técnico de la compañía que desarrolló el software de fotogrametría empleado en esta investigación, un mayor número de cámaras permite procesar más información y obtener resultados más precisos. Por esta razón, para el elemento de borde y la viga, donde no hubo obstrucciones en la visión de las cámaras, los análisis se realizaron utilizando las cinco cámaras.

Conclusiones

1. Es posible emplear cámaras fotográficas convencionales, como la Canon EOS Rebel T8i con lentes Canon EF-S 18-55mm f/4-5.6 IS STM, para la determinación de los desplazamientos de puntos ubicados en elementos estructurales mediante técnicas de teledetección como la correlación de imágenes digitales (DIC) y la fotogrametría. Sin embargo, los resultados más precisos se obtuvieron utilizando el método de fotogrametría, ya que los errores relativos entre los desplazamientos medidos por las metodologías de teledetección y los medidos con transductores de desplazamiento fueron menores.
2. La validez de los resultados dependerá de los niveles de deformación aplicados a los especímenes. Bajo cargas horizontales cíclicas, es posible obtener diferencias menores del 5% entre los desplazamientos medidos por las metodologías mencionadas y los medidos con transductores de desplazamiento, siempre que deformaciones horizontales impuestas sean superiores a aproximadamente 8 mm. En el caso de cargas cíclicas verticales, con deformaciones mayores a 5 mm, las diferencias también se mantienen menores al 5%. Por último, para cargas

verticales monotónicas, la deformación deberá ser superior a 3.5 mm para obtener resultados confiables.

3. Para elementos estructurales sometidos a carga vertical en compresión, cuando las deformaciones son menores a 1 mm, ninguno de los métodos investigados resulta adecuado para medir desplazamientos.
4. El número mínimo de cámaras que deben emplearse en fotogrametría para obtener resultados confiables es de tres, las cuales deben de estar distribuidas de tal forma que capturen imágenes del espécimen desde diferentes ángulos, incluyendo una vista frontal. Es fundamental que la visión de las cámaras no se obstruya durante los ensayos, a medida que los especímenes experimentan deformación.
5. Es imprescindible disponer de datos de deformación obtenidos con transductores de desplazamiento en varios puntos del espécimen, para evaluar si los resultados obtenidos mediante la correlación de imágenes digitales y la fotogrametría presentan un desfase constante.
6. La metodología de correlación digital de imágenes (DIC) demostró ser una herramienta efectiva para monitorear la progresión del daño en elementos estructurales durante ensayos experimentales. A través de los mapas de deformaciones unitarias calculadas, fue posible identificar de manera precisa la formación, ubicación, distribución y evolución de las grietas a lo largo de diferentes ciclos de carga, tanto grietas de flexión como grietas a cortante. En general, el método DIC puede ser utilizado como una herramienta confiable para evaluar la respuesta de estructuras sometidas a ensayos cíclicos, proporcionando información detallada sobre el comportamiento del agrietamiento en diferentes condiciones de carga. Esto refuerza su utilidad como complemento para el análisis experimental de elementos estructurales, aunque quedan aspectos por investigar para comprender ciertos fenómenos observados durante las pruebas.

Erick Burgos, José Adolfo Ramos Huezo, Alexandra María Urbina, Mauricio Arturo Pohl Alfaro

Diseño, construcción y validación de un sistema de medición del campo de deformación tridimensional de bajo costo para elementos estructurales

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (157-164)
e-ISSN: 2789-4061

Referencias

- Derenyi, E. E. (1996). *Photogrammetry: The concepts*. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2022). *Guía para la formulación de un marco de recuperación post-desastre. Para fortalecer la planificación de la recuperación*. PNUD.
- Salazar, W., Torres, R., Mixco, L., Rivera, V., Burgos, E., Rivas, J. y Brown, L. (2018, 1 de marzo). Strong-Motion Networks, Digital Signal Processing, and Database for El Salvador Earthquakes: 1966-2017. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 483-494. <https://doi.org/10.1785/0220170262>
- Schenk, T. (2005). *Introduction to photogrammetry*. The Ohio State University.
- Sutton, M. A., Orteu, J. J. y Schreier, H. (2009). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer.

Figura 1

Configuración e instrumentación de los ensayos

Erick Burgos, José Adolfo
Ramos Huezo, Alexandra
María Urbina, Mauricio
Arturo Pohl Alfaro

Diseño, construcción
y validación de
un sistema de
medición del campo
de deformación
tridimensional de bajo
costo para elementos
estructurales

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (157-164)
e-ISSN: 2789-4061

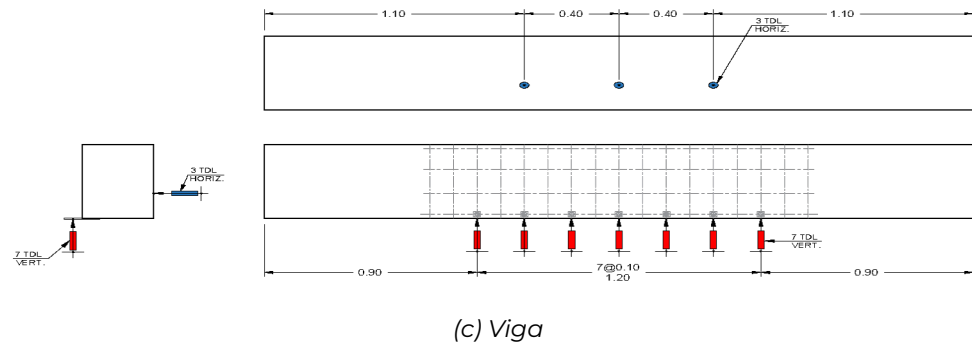
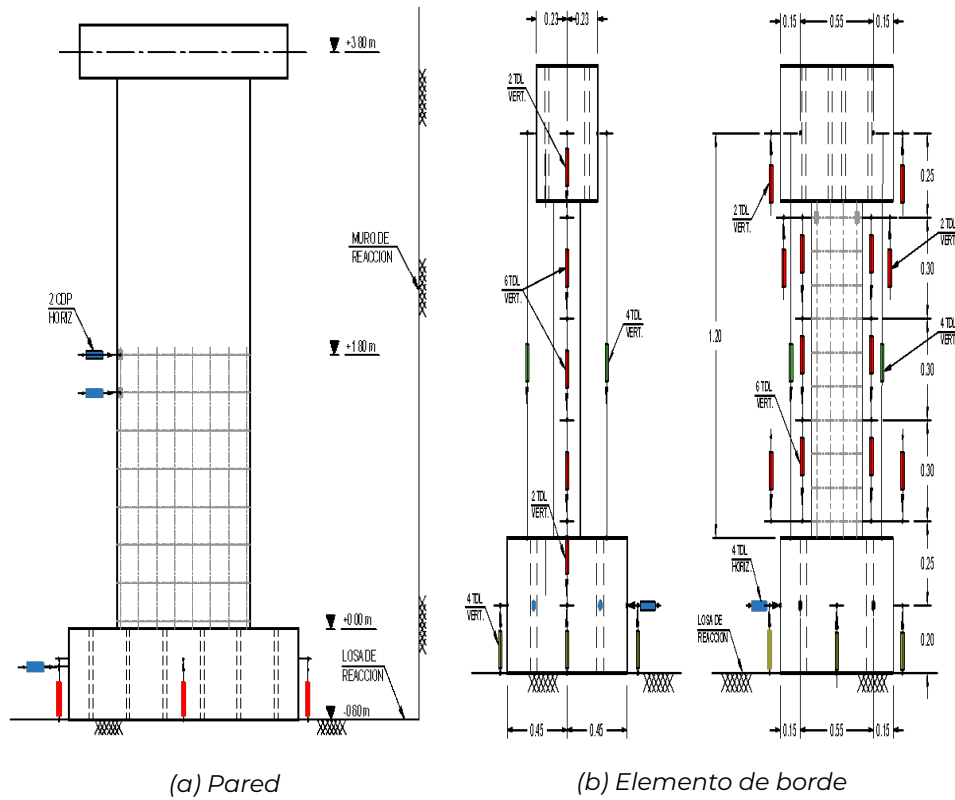
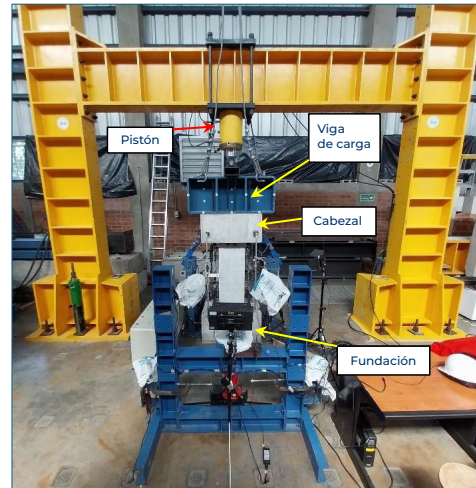


Figura 2

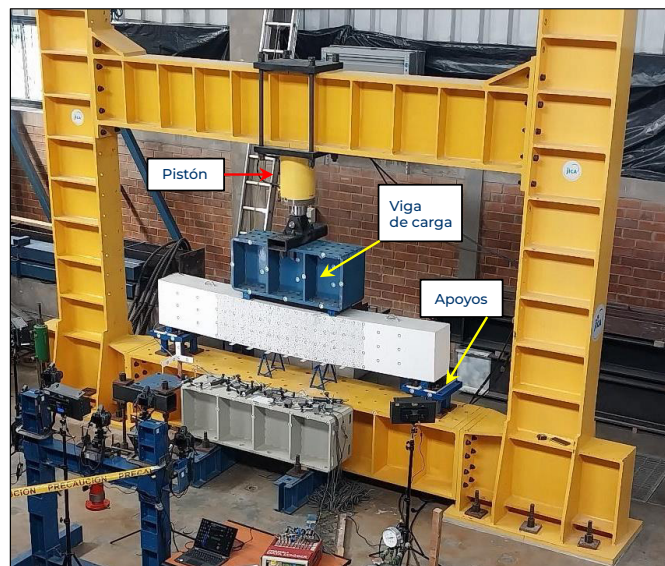
Configuración de los ensayos



(a) Pared



(b) Elemento de borde



(c) Viga

Erick Burgos, José Adolfo
Ramos Huezo, Alexandra
María Urbina, Mauricio
Arturo Pohl Alfaro

Diseño, construcción
y validación de
un sistema de
medición del campo
de deformación
tridimensional de bajo
costo para elementos
estructurales

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (157-164)
e-ISSN: 2789-4061

Erick Burgos, José Adolfo
Ramos Huezo, Alexandra
María Urbina, Mauricio
Arturo Pohl Alfaro

Diseño, construcción
y validación de
un sistema de
medición del campo
de deformación
tridimensional de bajo
costo para elementos
estructurales

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (157-164)
e-ISSN: 2789-4061

Figura 3

Resultados obtenidos. DIC: Correlación de imágenes digitales, FOT: fotogrametría

