

ANÁLISIS DE UNA JUNTA EXPERIMENTAL DE COLUMNA Y VIGAS DE CONCRETO ARMADO-COLUMNA DE ACERO PARA PÓRTICOS UTILIZANDO CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES

ANALYSIS OF AN EXPERIMENTAL COMPOSITED JOINT OF RC COLUMN AND BEAMS-STEEL COLUMN FOR FRAMES USING CORRELATION OF DIGITAL IMAGES

Nelson López¹, Ronald Ugel², Reyes Indira Herrera³

Recibido 11/10/2017; Aprobado: 11/12/2017

RESUMEN

En este artículo se presenta el estudio del comportamiento de una junta viga-columna experimental a escala real, formada por tres elementos de concreto reforzado, 1 columna y 2 vigas, unidos a una columna de acero estructural en el nivel superior. La probeta en cuestión se sometió a la acción de cargas cíclicas en un solo sentido, mediante un ensayo pseudo-estático por 5000 s, con la finalidad de observar qué elemento de la probeta fallaba y cuál era el modo de falla. La investigación se basó en el uso de imágenes digitales tomadas a la probeta durante el ensayo, y en los ciclos de carga y descarga, siendo analizada cada foto con la sub-rutina CORRELI-Q4, de manera de poder visualizar los lugares donde se produce el agrietamiento en el concreto. El uso de la aplicación permitió revelar como se va produciendo el agrietamiento en el concreto armado a lo largo del ensayo, la columna de concreto armado fue la que resultó más afectada por el agrietamiento, con grietas justo debajo de las vigas de concreto armado.

Palabras clave: Junta viga-columna, pseudo-estático, CORRELI-Q4

¹Nelson López. Ingeniero Civil. Magister Scientiarum en Mecánica Aplicada a la Construcción, Especialista en Recursos Hidráulicos, Docente investigador en la Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. Correo: nlopez@ups.edu.ec

²Ronald Ugel. Doctor en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Docente investigador Decanato de Ingeniería Civil, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Correo: rugel@ucla.edu.ve

³Reyes Indira Herrera. Doctora en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Docente investigadora Decanato de Ingeniería Civil, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Correo: hreyes@ucla.edu.ve.

ABSTRACT

This research presents the behavior of a real scale experimental column-beam joint formed by three reinforced concrete elements, 1 column and 2 beams, attached to a structural steel column in the upper level is studied. The specimen in question was subjected to the action of cyclic loads in a single direction, in a pseudostatic test for 5000 s, in order to observe which element of the specimen failed and which the failure mode was. The investigation was based on the use of digital images taken throughout the test, during the loading and unloading cycles, each photo being analyzed with the CORRELI-Q4 subroutine, in order to visualize the places where cracking occurs in the concrete. The use of the application allowed to reveal how cracking in the reinforced concrete occurred during the test, and that the column of reinforced concrete was the one that was most affected by cracking, with cracks just below the concrete beams.

Keywords: *Column-beam joint, pseudo-static, CORRELI-Q4*

1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de investigación se presenta el estudio de una probeta en escala real en una junta de una columna de concreto armado con una columna de acero estructural. El estudio se basa en el comportamiento de dicha junta bajo cargas cíclicas, incursionando en el rango elástico e inelástico. Fue diseñada con los métodos y normativas sismorresistentes vigentes en Venezuela para el rango elástico, y su comportamiento en el rango inelástico fue satisfactorio desde el punto de vista de elementos estructurales, como las vigas de concreto y la columna de acero las cuales no presentaron fallas evidentes ante las cargas aplicadas, pero si presentaron fuertes agrietamientos en la columna de concreto, centímetros por debajo de la viga, alcanzando el eje neutro de la sección de la columna.

En este caso, la historia de desplazamientos se aplicó a una probeta construida en escala real, compuesta por una columna y dos vigas de concreto armado, y una columna de acero estructural unida a la columna de concreto, mediante una placa base de acero estructural. Esta probeta fue construida y ensayada por Ugel [1], revelando que la causa de la falla de la misma fue el agrietamiento producido debajo de las vigas en la columna de concreto armado. La aparición del agrietamiento en los elementos de concreto armado, pudo ser evidenciada en el ensayo a partir de los 3900 s aproximadamente, y para verificar hasta qué punto la probeta permaneció en el rango elástico se utilizó la subrutina CORRELI-Q4 [2], el cual permite analizar las fotografías tomadas a la probeta durante el ensayo, mediante el desplazamiento de los píxeles de una fotografía con respecto a otra. El desplazamiento de cada punto en las fotografías se mide en píxeles, siendo posible transformar estos desplazamientos en unidades de longitud, obteniendo su campo de desplazamientos con el procedimiento indicado por Ortiz [3].

2. DESARROLLO

El diseño de juntas entre una estructura de acero y una de concreto generalmente se orienta al de vigas de acero-columnas de concreto, o vigas de acero-muros de concreto, o columnas de acero (superestructura) con fundación de concreto (infraestructura). Para cualquiera de estos casos, éstas juntas poseen una configuración similar, como se muestra en la Figura 1.

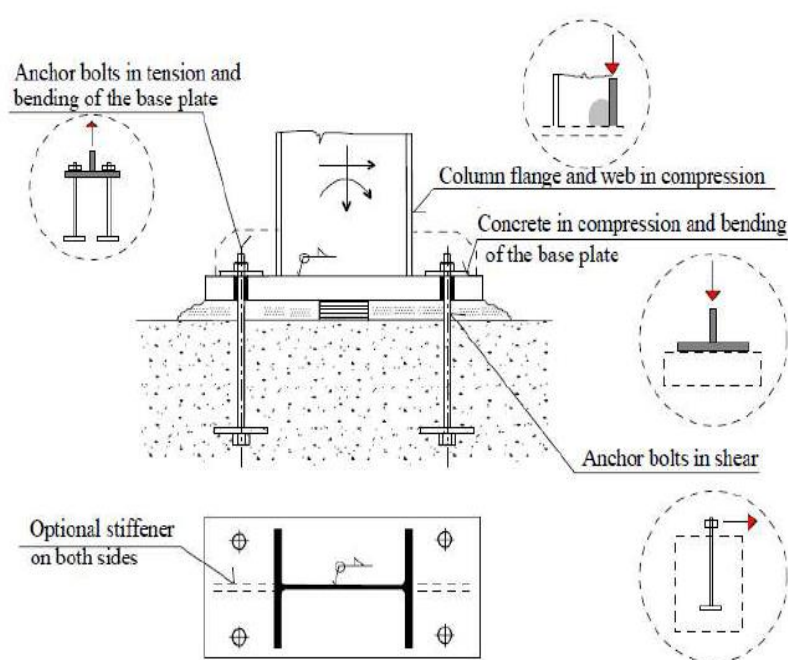


Figura 1. Configuración de una conexión entre concreto y acero. Fuente [4]

2.1. Ensayo cíclico

Este ensayo consiste en aplicar una carga que simule acciones dinámicas sobre la probeta, definiendo para ello, sentido, valor y frecuencia de aplicación de la carga.

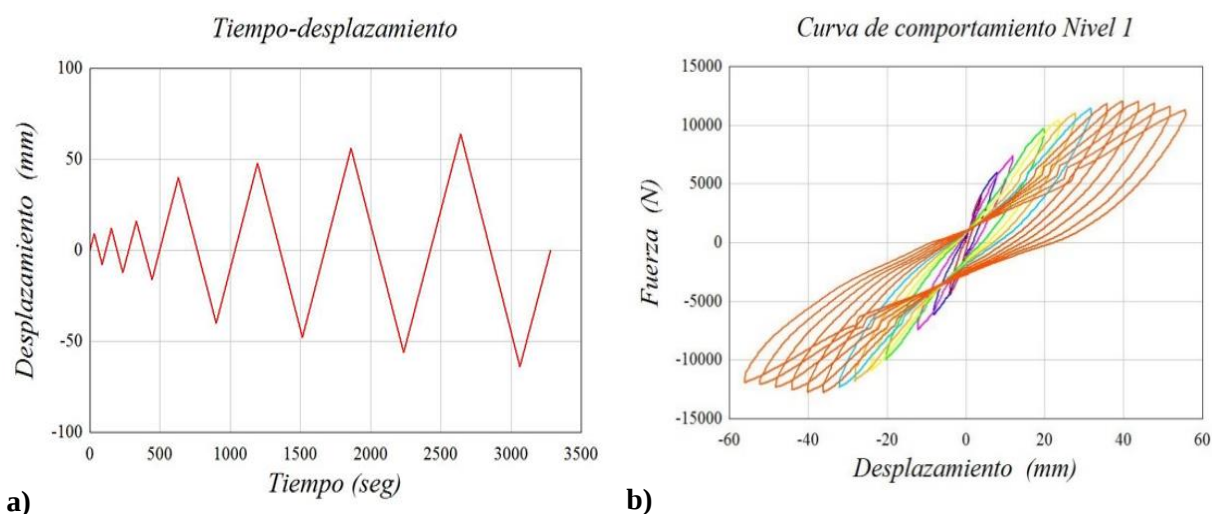


Figura 2. a) Ejemplo de ensayo cíclico, b) Comportamiento histerético. Fuente [1]

En la Figura 2 se observa el gráfico resultante de la aplicación incremental de un desplazamiento a través del tiempo, traducido en carga aplicada lateralmente a un pórtico mixto de acero-concreto [1], generando un comportamiento histerético en el pórtico.

2.2. Correlación de imágenes digitales CID

Una imagen digital es representada como una función discreta $F(x,y)$ donde x e y representan coordenadas, y el valor $F(x,y)$ es proporcional a la reflectividad de la luz, que se reconoce visualmente por el nivel de color o gris de la misma en el punto considerado. Al proceso de obtención de imágenes digitales se le denomina digitalización, y consiste en la descomposición de la imagen real en una matriz de puntos de un determinado tamaño, donde cada uno tiene un valor proporcional a su nivel de color, como se muestra en la Figura 3. Por tanto puede decirse que una imagen digital se puede asimilar a una matriz de n filas y m columnas. A cada celda de la matriz se le denomina píxel y representa una superficie que es función de su tamaño (Δx , Δy). A cada píxel le corresponde uno o más valores digitales denominado número digital o valor digital N_d .

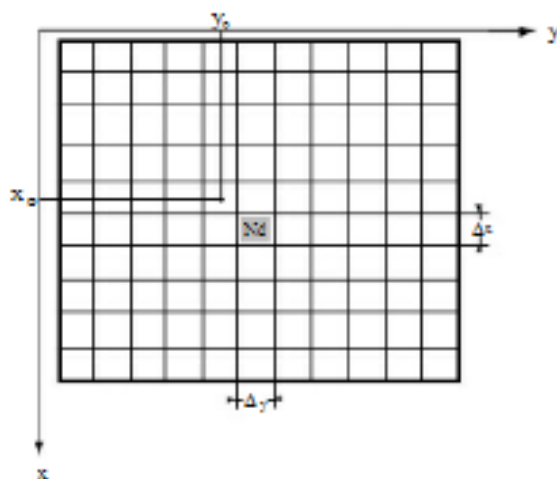


Figura 3. Definición de una imagen digital. Fuente [3]

2.3. Correlación de imágenes digitales CID

Consiste en una técnica no invasiva de procesamiento espacial de una secuencia de fotografías o imágenes en las cuales se detecta el comportamiento de los píxeles que conforman la misma, con la finalidad de poder determinar el campo de desplazamientos y deformaciones de una probeta de ensayo. Para realizar este tipo de análisis, se utilizó la subrutina CORRELI-Q4 [2], en lenguaje de programación MATLAB; para el uso de este algoritmo, son necesarias por lo menos dos imágenes, una para ser usada como patrón, y la segunda o más como imágenes deformadas y poder verificar los desplazamientos de los puntos de interés.

En cada una de estas imágenes se establece o demarca una *región de interés* o *Region Of*

Interest (ROI), considerada como una subimagen en la imagen patrón o imagen de referencia, la cual debe contener los puntos en estudio. Uno de los objetivos de la técnica de correlación de imágenes digitales es comparar la región de interés de la imagen patrón con las demás imágenes, y verificar los desplazamientos de una región con respecto a la imagen patrón. Como referencia a esta metodología, se usó los trabajos previos de [3] y [5].

Es posible la determinación del campo de desplazamientos de una probeta de ensayo utilizando el factor de conversión de píxeles a cm como se establece en la ecuación 1. Estos factores vienen dados por el cociente entre el tamaño de la ROI real y el tamaño de la fotografía en píxeles. Este algoritmo, considera dos imágenes: la primera se le denomina imagen de referencia, y la segunda se denomina imagen deformada como se muestra en la Figura 4. El campo de desplazamientos en el plano es evaluado mediante la correlación cruzada de una región de interés (ROI), seleccionada en la superficie de la imagen deformada con respecto a la imagen de referencia.

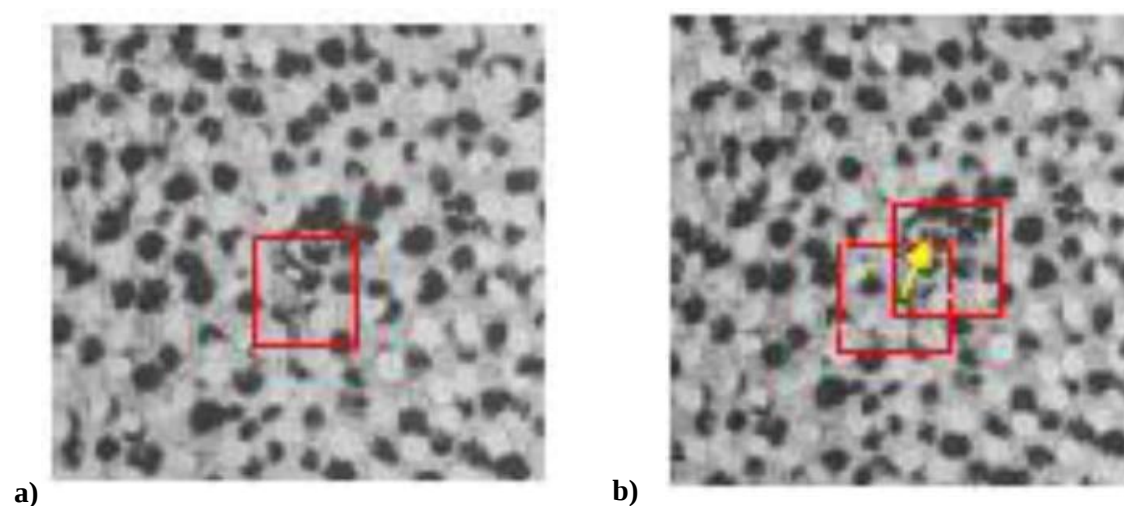


Figura 4. a) Imagen de referencia o patrón, b) imagen deformada. Fuente [3]

$$\text{Factor} = \frac{\text{Longitud real (longitud)}}{\text{Longitud en fotografía (pixel)}} \quad (1)$$

Una vez determinado el factor, se debe leer el valor de pixel en la escala de colores de la fotografía, y multiplicar el valor leído por el factor, obteniendo el valor de desplazamiento. La Correlación de Imágenes Digitales (CID) es una técnica experimental para la medida de los desplazamientos y deformaciones. Al no requerir el contacto con las muestras, la técnica es fácilmente aplicable en numerosos ensayos, como los realizados a pequeñas escalas, a altas temperaturas o en impacto.

3. METODOLOGÍA

La investigación es de tipo analítica, debido a que solo se analizaron las simulaciones de los ensayos experimentales realizados en [1]. La probeta ensayada se muestra en la Figura 5.

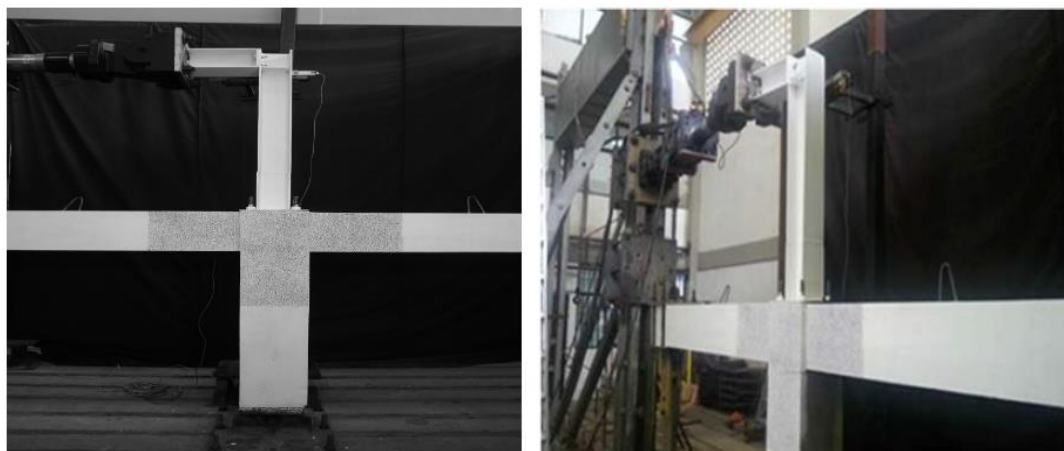


Figura 5. Probeta ensayada. Fuente [1]

La probeta fue moteada con tinta en la zona de estudio, como lo es las vigas de concreto armado y la columna de concreto armado. Las características de los materiales se muestran en la Tabla 1, y las características mecánicas de la probeta, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Geometría de la probeta. Fuente [1]

	Concreto armado		Acero estructural	
	Viga	Columnas	Viga	Columnas
Sección transversal	25x30 cm ²	30x30 cm ²	HEA 160	HEA 160
Longitud	2,00 m	1,30 m	2,00 m	1,30 m

Tabla 2. Características mecánicas de la probeta. Fuente [4]

Materiales	Resistencia a la compresión (kgf/cm ²)	Resistencia a la tracción (kgf/cm ²)	Módulo de elasticidad (kgf/cm ²)
Concreto armado	300	30	262.000
Acero de Refuerzo		4.200	2.100.000
Perfiles de acero		2.530	2.100.000
Pernos		4.750	2.100.000
Placa base		3.515	2.100.000
Tuercas		2.370	2.100.000

La probeta fue sometida a la historia de desplazamientos mostrada en la Figura 6, así como su comportamiento histerético.

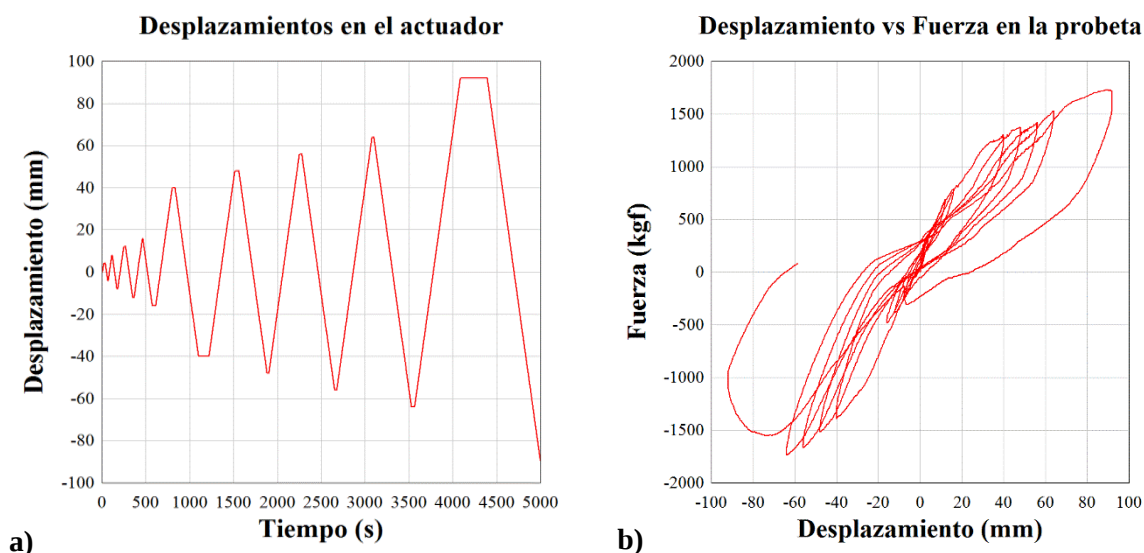


Figura 6. a) Historia de desplazamientos, b) Histéresis de la probeta. Fuente [1]

El agrietamiento se hizo visible en la probeta desde el instante de tiempo $t = 4066$ s, $t = 4375$ s y $t = 5001$ s, generando la mayor falla para $t = 5001$ s, como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Agrietamiento debajo de las vigas de concreto. Fuente [1]

4. RESULTADOS

Según los datos experimentales, las fallas por agrietamiento se produjeron para 3 desplazamientos en la junta, como lo muestra la Tabla 3, y es para estos valores que resulta conveniente el estudio del comportamiento de los elementos de la junta.

Tabla 3. Longitudes de grietas para los desplazamientos que produjeron fallas. Fuente [4]

Desplazamiento (cm)	Longitud de grieta (cm)	Espesor de grieta (cm)
3,84	16,46	0,16
4,13	16,86	0,47
-4,75	21,35	0,63

Se empleó la técnica de correlación de imágenes digitales para calcular dichos desplazamientos, sin requerir realizar un modelo matemático y verificar que la técnica es

capaz de reflejar resultados confiables.

Para cada fotografía, se utilizó una ROI en los elementos horizontales y otra en los verticales, debido a que una sola ROI que abarcara ambos elementos presentaba no convergencia de resultados. Es necesario destacar que se analizaron 69 fotografías con esta metodología, y para efectos de este trabajo de investigación, sólo se tomaron en cuenta aquellas tomadas en los picos de desplazamiento, y en desplazamiento igual a cero. Utilizando la subrutina CORRELI-Q4 [2], se utilizaron los parámetros en la Figura 8.

The screenshot shows a software interface for image correlation. The window is titled 'Figure 1' and has a standard menu bar. The main content area is titled 'Correlation parameters'. It contains five input fields with the following labels and values: 'ZOI size (pixels)' with '16', 'ZOI shift (pixels)' with '16', 'Number of scales' with '4', 'Max. number of iterations' with '10', and 'Number of images to analyze' with '65'. Below these fields are two checkboxes: 'Image update Y/N' and 'Independent calculation Y/N', each preceded by a radio button. At the bottom of the window is a 'Validation' button.

Figura 8. Parámetros utilizados para las ROI. Fuente [4]

Para realizar el análisis, se comparó la fotografía del instante $t=0$ s, con las fotografías en los puntos más significativos, como se observa en las siguientes fotografías seguidas de sus respectivos desplazamientos:

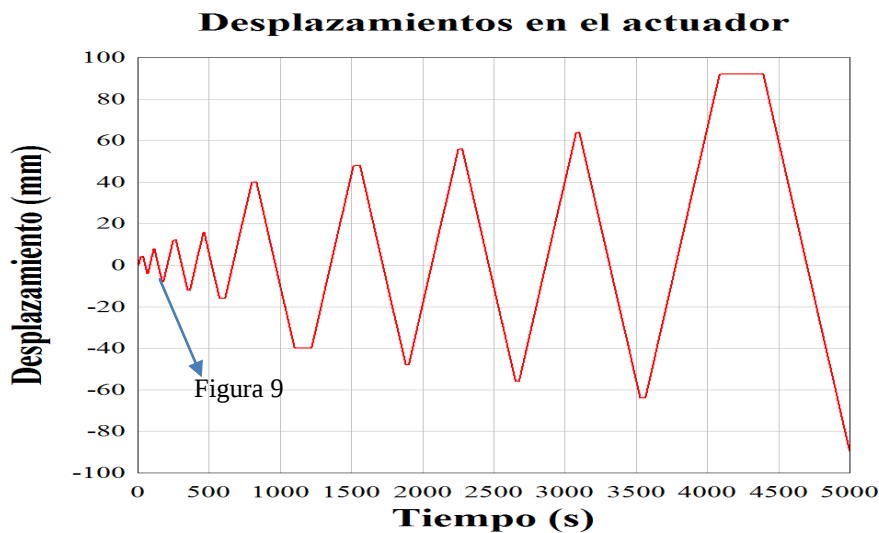
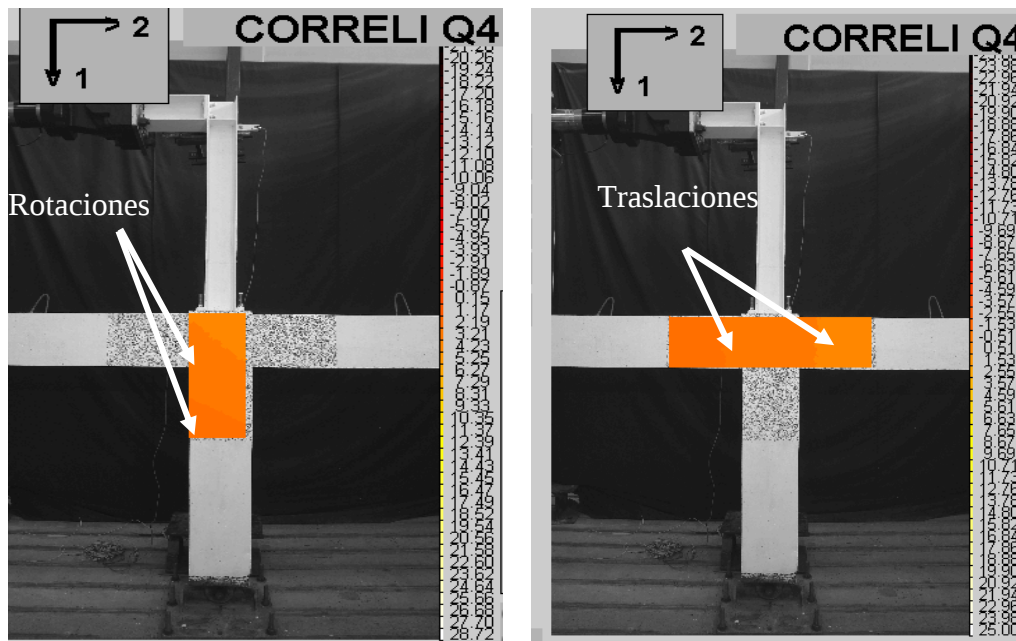


Figura 9. Desplazamientos para $t = 398$ s. Fuente [4]

Desplazamientos para $t = 398$ s. Para este instante, se observa según la escala de colores, que las vigas se trasladan, ya que las fronteras entre escalas de color son rectas verticales, y la columna de concreto, a nivel de la junta, presenta rotación ya que las fronteras entre escala de color se presentan inclinadas (ver Figura 9)

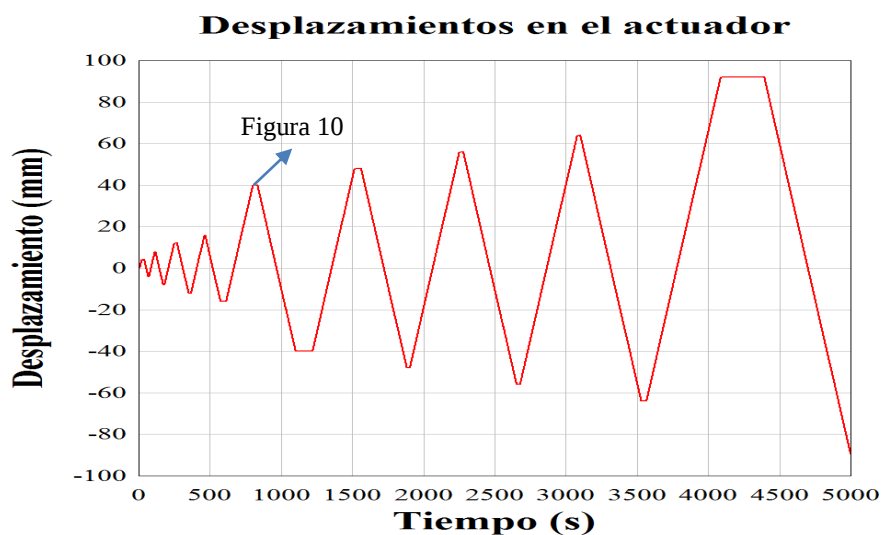
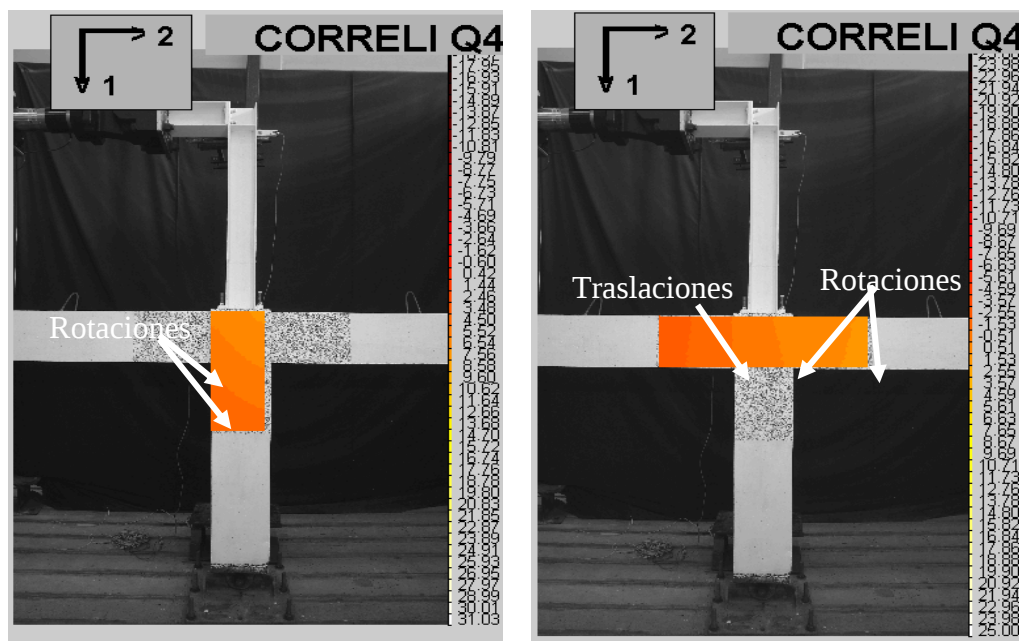


Figura 10. Desplazamientos para $t = 823$ s. Fuente [4]

Desplazamientos para $t = 823$ s. Aquí se observa que la viga izquierda presenta traslación, la columna a nivel de junta presenta rotación a la izquierda la viga derecha presentan rotación a la derecha, mientras que la viga izquierda solo se traslada (ver Figura 10)

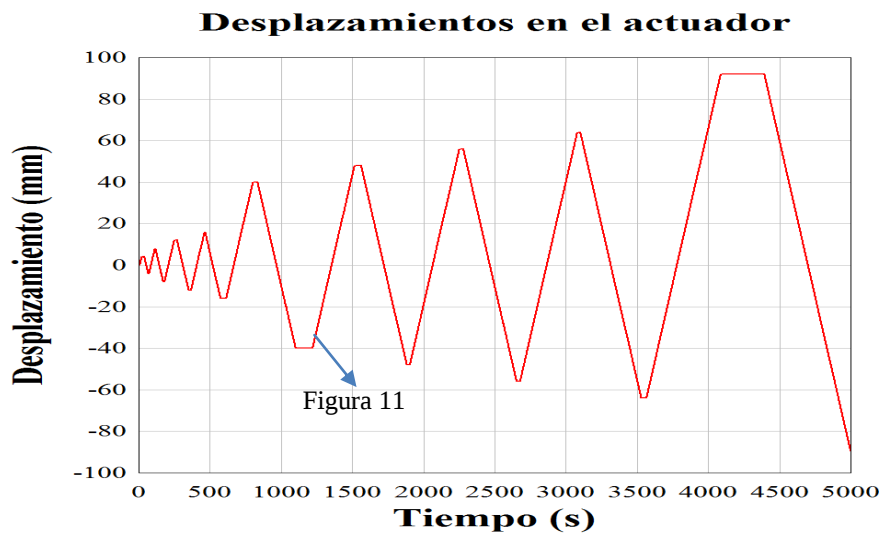
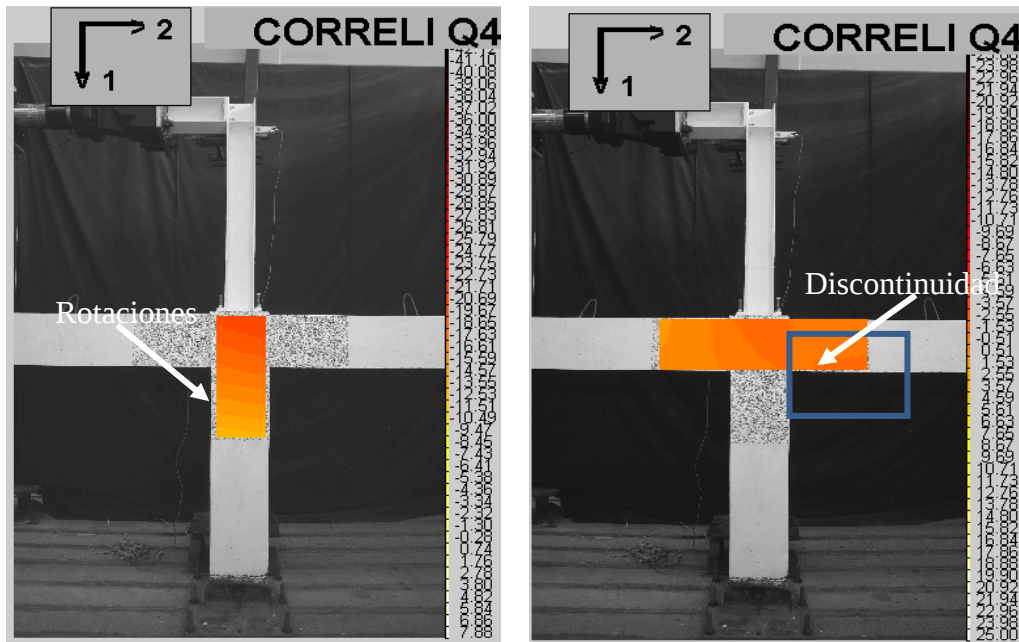


Figura 11. Desplazamientos para $t = 1208$ s. Fuente [4]

Desplazamientos para $t = 1208$ s. Para este instante, se detecta una discontinuidad en la escala de colores de la viga derecha, lo que indica que en esa zona existe agrietamiento y no puede existir continuidad en los desplazamientos por efecto de la grieta. Este agrietamiento no fue posible observarlo a simple vista, pero si con el uso de la correlación de imágenes digitales. La columna y la viga izquierda presentan rotación (ver Figura 11)

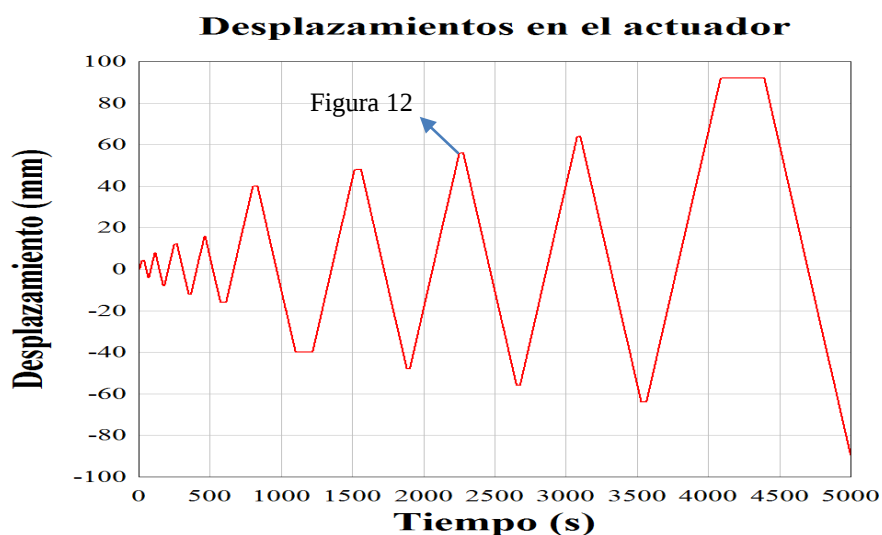
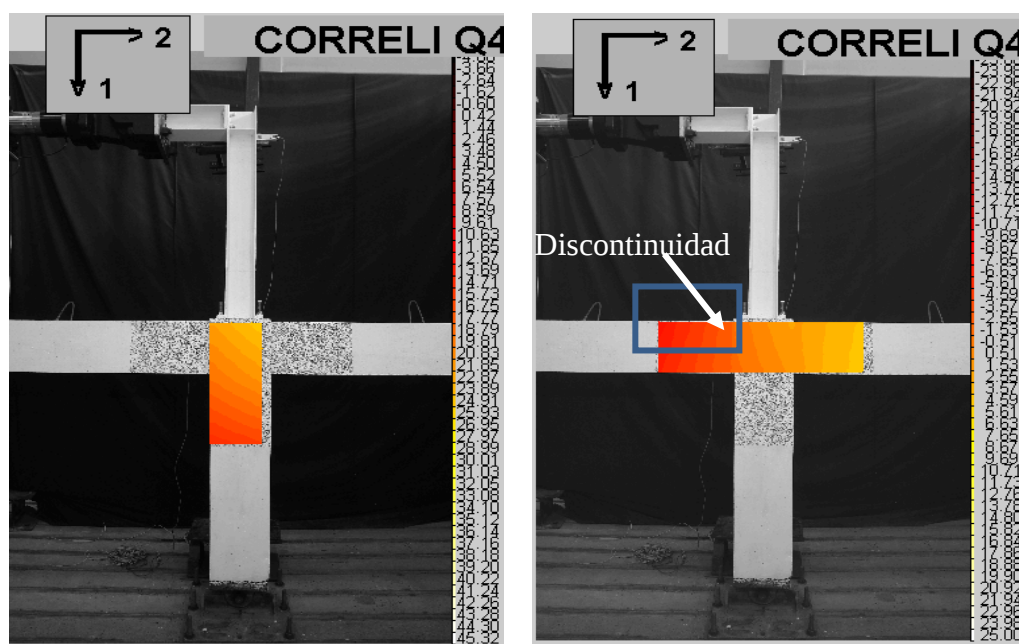


Figura 12. Desplazamientos para $t = 2238$ s. Fuente [4]

Desplazamientos para $t = 2238$ s. Se observan discontinuidades en los desplazamientos de la viga izquierda, indicando que la misma presenta agrietamiento. La columna no presenta discontinuidades, solo rotaciones (ver Figura 12)

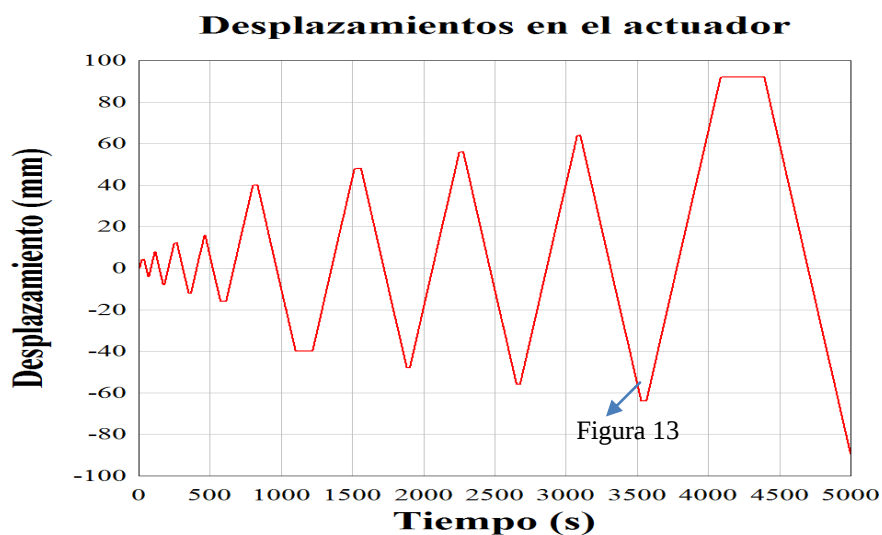
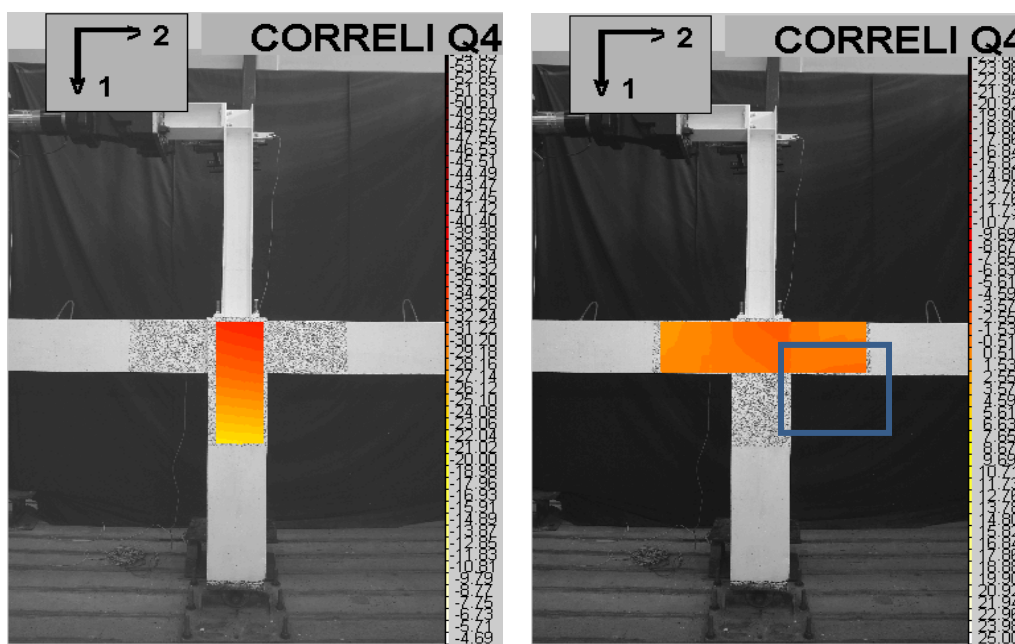


Figura 13. Desplazamientos para $t = 3513$ s. Fuente [4]

Desplazamientos para $t = 3513$ s. Se presentan discontinuidades en los desplazamientos de la viga derecha indicando que la misma presenta agrietamiento. La columna no presenta discontinuidades, solo rotaciones (ver Figura 13)

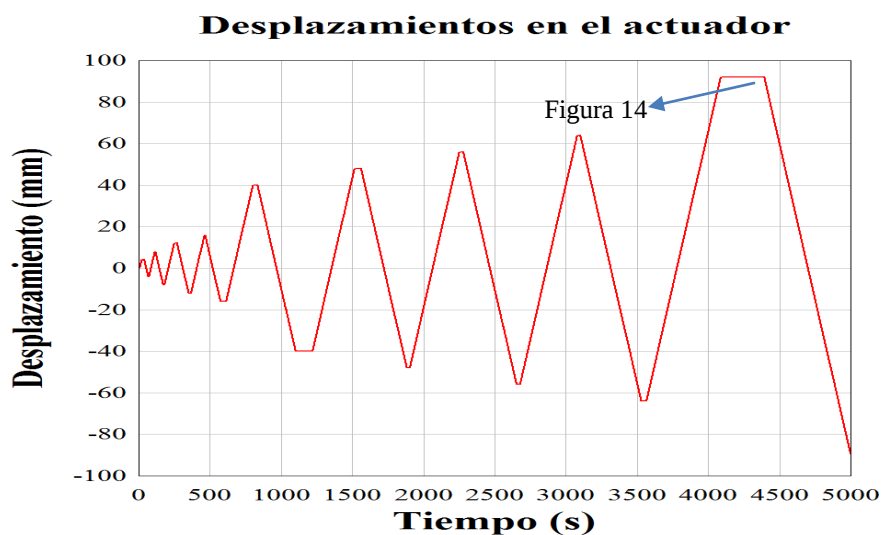
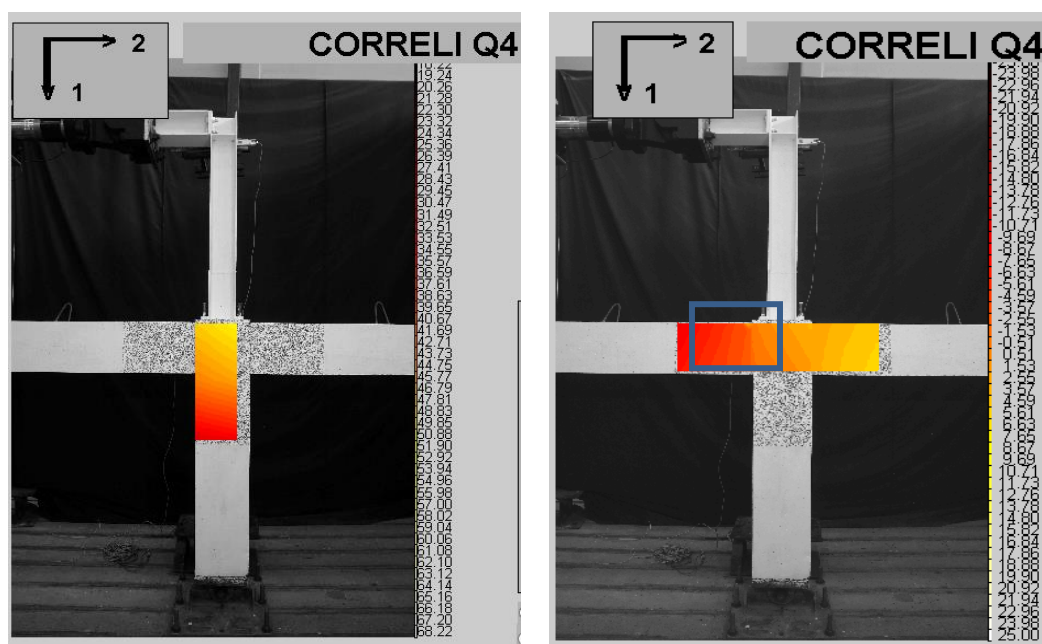


Figura 14. Desplazamientos para $t = 4066$ s. Fuente [4]

Desplazamientos para $t = 4066$ s. Se detectan discontinuidades en los desplazamientos de la viga izquierda, indicando que la misma presenta agrietamiento. La columna no presenta discontinuidades, solo rotaciones (ver Figura 14)

Desplazamientos para $t = 4375$ s y $t=5001$ s. Se observan discontinuidades en los desplazamientos de la viga izquierda, indicando que la misma presenta agrietamiento. La columna muestra discontinuidades justo en donde se forma la grieta. Se evidencia que el agrietamiento se produce cuando los desplazamientos en la junta poseen el mismo sentido del desplazamiento del actuador, indicando que se generan esfuerzos de tracción que sobrepasan el módulo de rotura del concreto, agrietando a la columna de concreto por debajo de las vigas (ver Figura 15 y Figura 16).

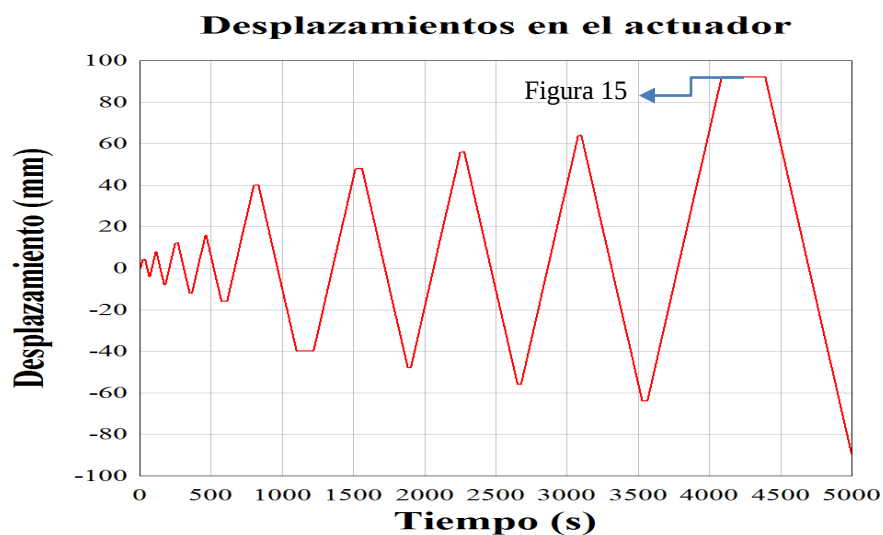
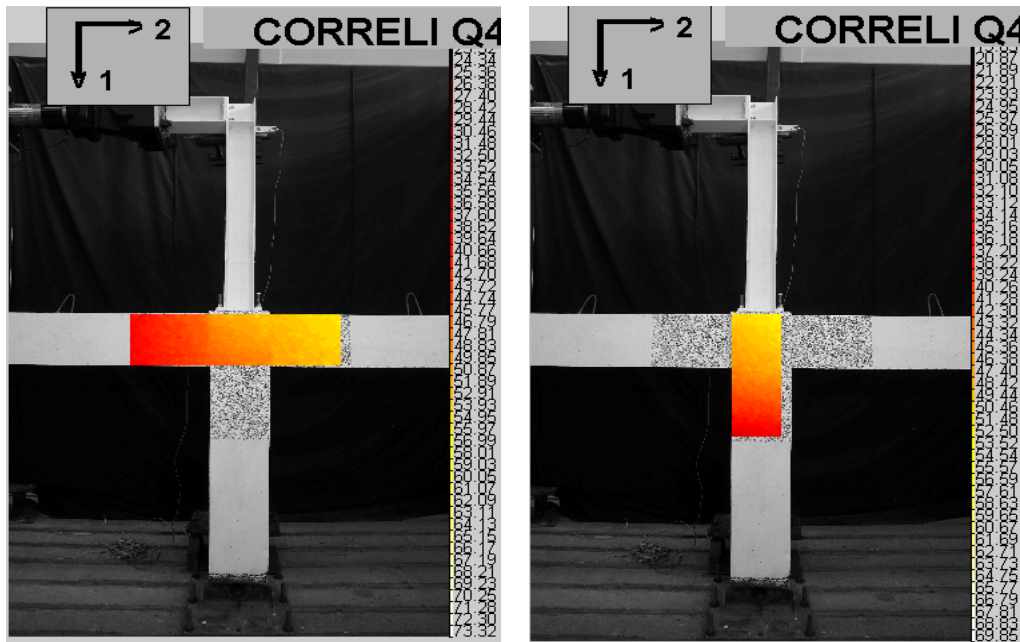


Figura 15. Desplazamientos para $t = 4375$ s. Fuente [4]

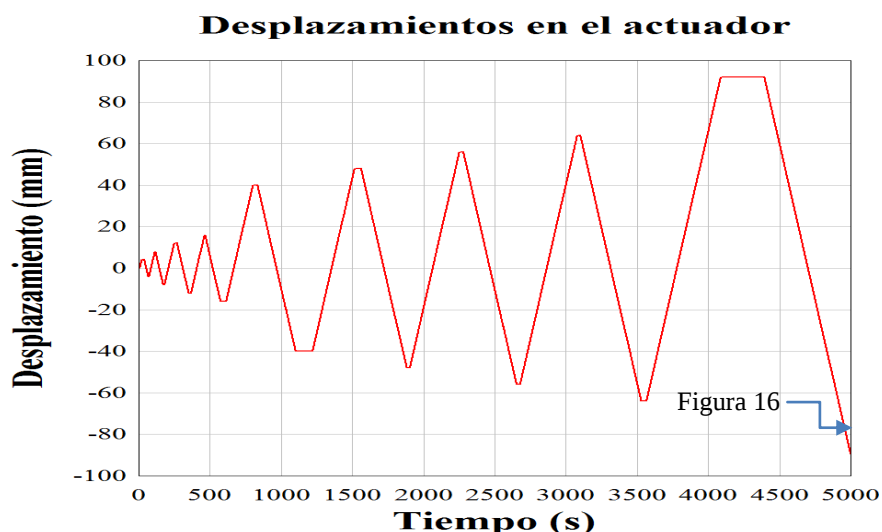
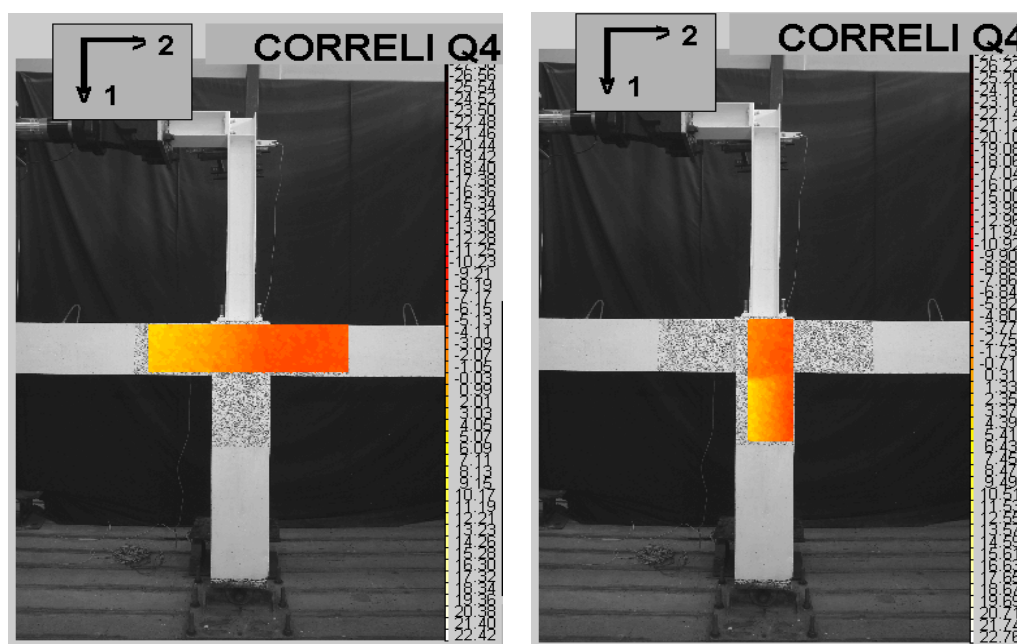


Figura 16. Desplazamientos para $t=5001$ s. Fuente [4]

Los valores de desplazamiento observados en las escalas de colores, se leen en píxeles y no en cm, por lo que es necesario encontrar la relación de desplazamientos. Utilizando esta subrutina [2], fue posible determinar los desplazamientos en la junta para los instantes de tiempo $t=4066$ s, $t=4375$ s y $t=5001$ s (tiempos para los cuales los agrietamientos de mayor longitud fueron claramente evidenciados y documentados en fotografías), con la ayuda del procedimiento descrito por Ortiz [3]. Para ello fue necesario determinar el factor de conversión entre 1 píxel y 1 cm. Se determinó el factor en la ROI en elementos horizontales (vigas), basándose en la medición de píxeles mostrada en la Figura 17. La zona moteada en las fotografías mide 100 cm a escala real para la ROI mostrada, y fue el patrón de cálculo del factor.

$$\text{Factor} = \frac{100 \text{ cm}}{1261 \text{ pixel}} = 0.079 \text{ cm/pixel}$$

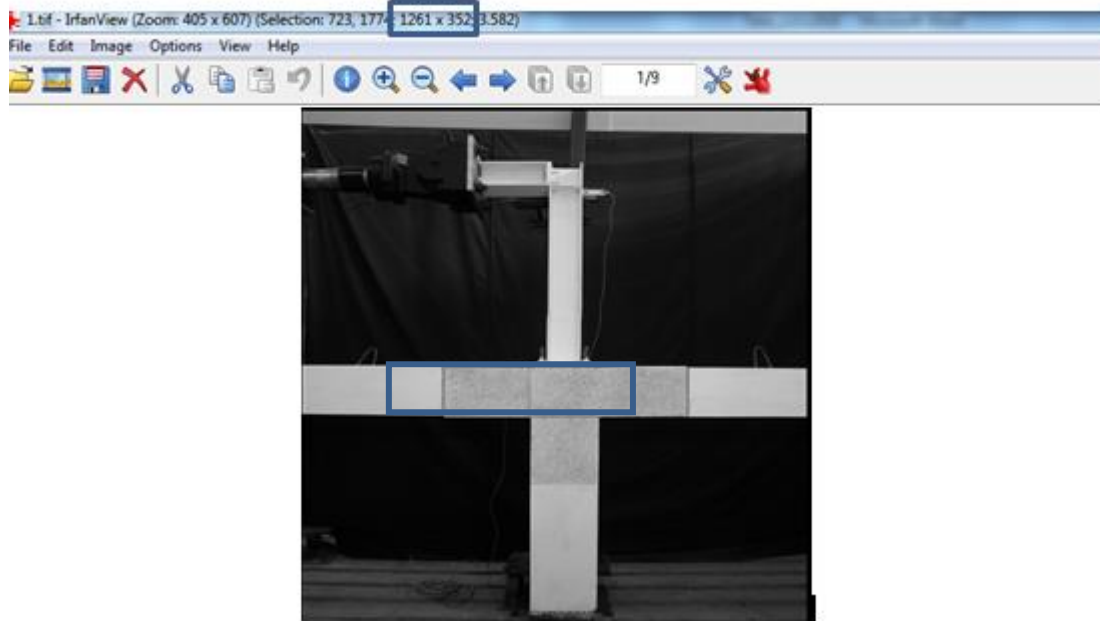


Figura 17. Dimensiones en pixeles de la ROI. Fuente [4]

Realizando la lectura de las escalas de colores en la Figura 14, Figura 15 y Figura 16, se obtienen los valores de desplazamiento para las ROI horizontales (ver Tabla 4). Los desplazamientos fueron medidos en la zona de contacto viga-columna.

Tabla 4. Desplazamientos obtenidos con la subrutina CORRELI_Q4. Fuente [4]

Figura	Desplazamiento en CORRELI_Q4	Factor	Desplazamiento (cm)
14	48,14	0,079	3,80
15	52,32	0,079	4,13
16	60,14	0,079	4,75

Estos resultados se asemejan a los valores medidos en el ensayo, presentándose leves diferencias en las mediciones, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparación de desplazamientos entre el experimento y CORRELI-Q4. Fuente [4]

Desplazamiento medido en la probeta (cm)	Desplazamiento calculado con CORRELI_Q4	Error (cm)
3,84	3,8031	0,03694
4,13	4,1333	-0,00328
4,75	4,7511	-0,00106

5. CONCLUSIONES

La técnica de correlación de imágenes digitales es confiable para la determinación de desplazamientos en probetas de ensayo, basándose en las fotografías tomadas para cada instante de tiempo. Es posible entonces, calcular desplazamientos en probetas de ensayos para análisis sencillos sin necesidad de utilizar modelaciones matemáticas complejas.

La subrutina CORRELI-Q4 permite visualizar agrietamientos en elementos de concreto armado que no pueden ser visualizados a simple vista, identificándose mediante la no continuidad de las escalas de colores para puntos aledaños.

Fue posible determinar, de manera analítica que la falla en la junta se produjo en la columna de concreto, por debajo de las vigas, donde se observaron discontinuidades grandes en la escala de colores, mas no es posible, de manera directa, obtener los valores de fuerzas que generaron estos agrietamientos. No fue posible determinar el momento exacto en que el esfuerzo de rotura del concreto armado, debido a que el registro fotográfico se realizó solo en puntos máximos de desplazamiento. Para tener un registro más exacto, la toma de fotografías debe realizarse en espacios de tiempo reducidos.

6. REFERENCIAS

- [1] R. Ugel, Vulnerabilidad sísmica en edificaciones porticadas compuestas de acero y hormigon armado, Catalunya, España, 2015.
- [2] F. Hild, CORRELI-Q4, Paris, 2007.
- [3] M. Ortiz, Calibración y aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales (CORRELI-Q4) para la obtención del campo de desplazamientos de estructuras de ingeniería civil, Barquisimeto, Venezuela, 2013.
- [4] N. López, Análisis de una junta columna de concreto-columna de acero en pórticos, en el rango elástico e inelástico, Barquisimeto, Venezuela, 2017.
- [5] R. I. Herrera, Determinación experimental de curvas de comportamiento de paneles aligerados del sistema constructivo prefabricado modular cerchalosa, Barquisimeto, Venezuela, 2008.