

# Dispositivo para sujeción de múltiples transductores de desplazamiento en ensayos de losas de concreto

Julián Carrillo<sup>a</sup>, Felipe Riveros<sup>b</sup>, Luis Llano<sup>c</sup>

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia

<sup>a</sup>wjcarrillo@gmail.com, <sup>b</sup>felriv@gmail.com, <sup>c</sup>llano@gmail.com.

## Resumen

En el artículo se describen y discuten los resultados del diseño, la implementación y la evaluación experimental de un nuevo dispositivo para medición del desplazamiento vertical en múltiples sitios durante ensayos de losas de concreto bajo cargas verticales cuasi-estáticas. El dispositivo propuesto es un brazo para sujetar múltiples transductores que registran los desplazamientos en ocho sitios diferentes de la losa. El dispositivo propuesto se puede utilizar en ensayos de losas cuadradas de 600 mm, 500 mm y 400 mm de lado. Los resultados observados y medidos en el ensayo de absorción de energía de losas de concreto reforzadas con fibras de acero y malla electrosoldada demostraron que el dispositivo permite registrar adecuadamente el desplazamiento vertical en diferentes sitios del espécimen.

## Abstract

The article describes and discusses the results of the design, implementation and experimental evaluation of a new device for measuring the vertical displacement at multiple locations during the test of concrete slabs under quasi-static vertical loads. The proposed device is a rigid arm for clamping multiple transducers that record the displacements at eight different locations of the slab. The proposed device can be used for measuring the relative vertical displacement during the tests of 600 mm, 500 mm and 400 mm square slabs. The results observed and measured during the construction and energy absorption tests of concrete slabs reinforced with steel fibers of welded wire mesh demonstrated that the device allows to record suitably the vertical displacement at different locations of the specimen.

## Palabras clave:

Transductor, losa de concreto, ensayo de absorción de energía, brazo de sujeción múltiple

## Keywords:

Transducer, concrete slab, energy absorption test, rig arm for multiple clamps

## Introducción

Las estructuras civiles están expuestas a distintos tipos de cargas extremas que pueden generar grandes daños materiales y poner en riesgo a sus ocupantes. Por esta razón, la ingeniería estructural se ocupa del diseño y cálculo de las obras de infraestructura, tales como edificaciones y puentes, y su finalidad es lograr estructuras seguras, funcionales y económicas. Para evaluar la seguridad de los elementos y sistemas estructurales, calibrar modelos analíticos, y predecir el comportamiento de las estructuras, se deben realizar ensayos de laboratorio que permitan observar y validar experimentalmente el desempeño de las estructuras [1]. Durante el desarrollo de estos programas experimentales se requieren dispositivos complejos para la generación y medición de fuerzas y desplazamientos, y sistemas versátiles de adquisición de datos. Algunos de los dispositivos son propuestos por las normas que regulan los ensayos. Por ejemplo, un compresómetro-extensómetro se utiliza para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson del concreto en el ensayo a compresión [2], un yugo unidimensional se utiliza para colocar un transductor de desplazamiento a cada lado del espécimen tipo viga durante ensayos a flexión del concreto reforzado con fibras de acero [3], y un dispositivo uniaxial se utiliza para colocar un transductor que mide el

desplazamiento transversal en los ensayos de compresión diametral de muretes de mampostería [4]. Los resultados de una búsqueda de patentes demostró que actualmente se encuentran oficialmente registrados dispositivos para sujeción de transductores, en algunos casos de lectores magnéticos de discos, monitoreo de presión en tuberías de aceite y gas, así como otros dispositivos para usos médicos [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Actualmente existe un gran número de empresas que distribuyen elementos físicos y que desarrollan aplicaciones o software para ensayos en ingeniería estructural, tales como la empresa italiana Controls [11] y la empresa Colombiana Pinzuar [12]. Estas empresas manejan portafolios amplios con alternativas para las instituciones que realizan actividades de docencia, investigación o extensión, relacionadas con ensayos de laboratorio para materiales y estructuras. La mayoría de estas soluciones son de alto costo y están orientadas a una actividad particular.

En el caso de equipos de ensayo, la limitación principal es el número de transductores o sensores del equipo, pues la mayoría de las alternativas ofrece un número de transductores inferior al necesario en ensayos especiales para procesos de investigación o extensión. En este artículo se describen

y discuten los resultados del diseño, la implementación y la evaluación experimental de un dispositivo para medir el desplazamiento en múltiples sitios durante ensayos de especímenes de losas de concreto bajo cargas verticales cuasi-estáticas. La evaluación del dispositivo se realiza a partir del análisis de las observaciones y los resultados medidos durante el ensayo de losas de concreto reforzadas con fibras de acero y malla electrosoldada.

### Diseño e implementación del dispositivo

El diseño mecánico del dispositivo propuesto se desarrolló con el fin de dar solución a las dos principales desventajas presentes en dispositivos empleados comúnmente en los ensayos a flexión de especímenes tipo losa: (i) la lectura del desplazamiento se registra en la parte inferior de la losa lo cual no permite llevar la losa hasta la falla o colapso debido al riesgo de daño del transductor, y (ii) la colocación del transductor o transductores de desplazamiento por medio de una base magnética anclada al marco de carga, lo cual ocasiona que el punto de referencia del desplazamiento se encuentra localizado fuera del espécimen de ensayo [13] y, por tanto, a partir de esta configuración se registra el desplazamiento absoluto; es decir, no sólo se registra el desplazamiento de la losa, sino también algún desplazamiento del marco que sirve de apoyo al actuador que produce la carga. Esta configuración de medición de los desplazamientos podría generar interpretaciones incorrectas de los desplazamientos registrados.

En este estudio se diseñó un brazo de sujeción múltiple que está apoyado directamente a los extremos de la losa y, de esta manera, se permite registrar el desplazamiento relativo de la losa sin incluir el desplazamiento asociado a una posible deformación del marco de carga y evitando la inclinación de los transductores para mantener la verticalidad en relación con el desplazamiento del vástago del equipo de carga. En general, el desplazamiento registrado con este dispositivo es relativo debido a que el punto de referencia o de apoyo del transductor de desplazamiento (extremos de la losa) se mueve simultáneamente con la losa. Adicionalmente, el dis-

positivo se diseñó para que la lectura del desplazamiento se realice por medio de transductores de desplazamiento ubicados en la parte superior de la losa y, de esta manera, evitar el daño de alguno de los transductores en el momento de presentarse la falla o el colapso de la losa durante el ensayo.

El dispositivo propuesto puede utilizarse en ensayos de losas cuadradas de 600 mm, 500 mm y 400 mm de lado. Sin embargo, el diseño del dispositivo puede adaptarse para la medición de desplazamientos durante el ensayo de losas de cualquier tamaño. El dispositivo permite registrar el desplazamiento relativo de la losa en ocho (8) posiciones cuando está configurado para una losa de 600 mm de lado, y en cuatro (4) posiciones en ensayos de losas de 500 mm y 400 mm de lado. En la Figura 1a se muestra el brazo de sujeción múltiple con los transductores acoplados. La descripción de las partes del brazo de sujeción se indica en la Tabla 1. La pieza fue elaborada en aluminio con corte láser y dobleces requeridos para la obtención de la forma diseñada.

En la Figura 1b se muestra el brazo propuesto de sujeción múltiple, acoplado a la losa de ensayo. En la figura se muestra la base para apoyar la losa, la losa de ensayo, el brazo de sujeción múltiple colocado en los dos ejes para permitir la lectura del desplazamiento en ocho (8) puntos de la losa de 600 mm de lado, y el cubo donde se apoya el extremo del actuador que genera la carga vertical sobre la losa. El brazo cuenta con libertad de movimiento en los apoyos para evitar la rigidización de la losa de concreto durante el ensayo. Para reducir el peso del dispositivo y así disminuir las deformaciones por peso propio, el dispositivo propuesto fue elaborado en aluminio y, de esta manera, el peso total del dispositivo con los ocho (8) transductores es de 1900 g aproximadamente. Al inicio del ensayo, el eje de medición de los transductores de desplazamiento se encuentra contraído, y a medida que la losa se deforma a causa de la aplicación de la carga vertical, la deformación genera la extensión y el cambio en la lectura de los transductores.

El dispositivo permite ajustar la compresión inicial del eje del transductor de desplazamiento para asegurar el contacto

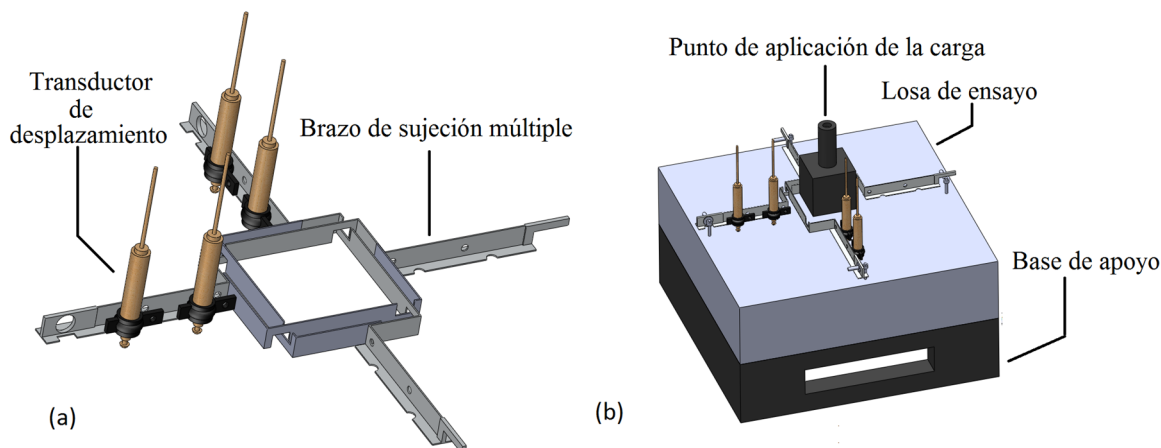
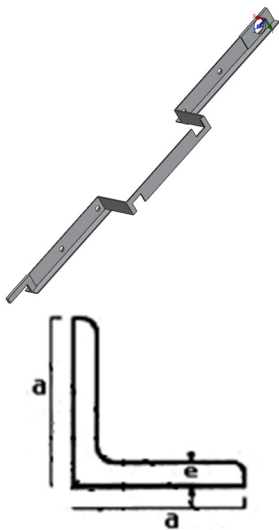
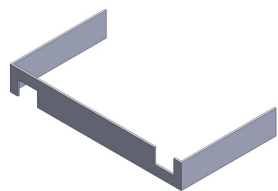


Figura 1. Brazo de sujeción múltiple propuesto: (a) configuración, (b) montaje sobre la losa.

**Tabla 1.** Descripción de las piezas del dispositivo para sujeción de transductores.

Elemento	Dimensiones	Elemento	Dimensiones
	<p>Largo total (extremo a extremo de la pieza): 740 mm</p> <p>Patín: Ancho (a): 20 mm Espesor (e): 2 mm</p> <p>Alma: Altura: 30 mm Espesor: 2 mm</p>		<p>Largo total (extremo a extremo de la pieza): 140 mm</p> <p>Ancho: 30 mm Espesor: 2 mm</p>

con la losa, tal como se especifica en la sección 6.2 de la norma ASTM 1609 [14] y en la sección 4.1 de la norma EN-14488-5 [3]. En estas dos normas se emplea un yugo unidimensional para sujetar un transductor electrónico que se encuentra a los lados de un espécimen tipo viga y permite medir el desplazamiento relativo entre sus extremos y el centro. El dispositivo propuesto para losas se encuentra actualmente en proceso de patente ante la Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia [15], y el costo de materiales y fabricación es de aproximadamente USD \$100.

Aunque las patentes consultadas plantean el uso de dispositivos de sujeción de transductores, éstos están orientados al sector médico o monitoreo de sistemas electrónicos o hidráulicos [5, 6, 7, 8, 9, 10]. Adicionalmente, todos estos dispositivos de sujeción se apoyan sobre bases fijas fuera del cuerpo o elemento sobre el cual se realizan las mediciones. De esta manera, se considera que la novedad del dispositivo propuesto se sustenta en que comercialmente no se ha propuesto una alternativa similar para realizar la medición de desplazamientos en ensayos de absorción de energía de losas de concreto.

### Caso de estudio

Con el fin de obtener mayor economía y mejor rendimiento en la construcción de losas de contrapiso para vivienda donde las cargas de servicio sean iguales o menores que 500 kg/m<sup>2</sup>, Silva [16] llevó a cabo un proyecto de investigación experimental donde se estima la dosificación de fibras de acero necesaria para obtener un desempeño equivalente a la losa de concreto reforzada con malla electrosoldada. El programa experimental incluyó ensayos para medir las curvas carga-deflexión en 13 losas de contrapiso de 600 mm de lado y 100 mm de espesor construidas con concreto reforzado con tres dosificaciones de fibras de acero (5, 9 y 18 kg/m<sup>3</sup>),

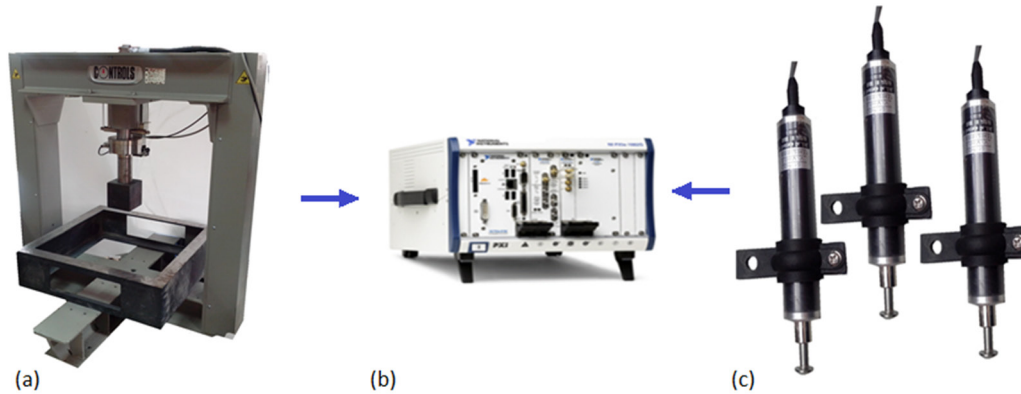
malla electrosoldada o una combinación de fibra de acero y malla electrosoldada. Para los ensayos a flexión se empleó el dispositivo de sujeción de múltiples transductores aquí propuesto. Por motivo de la limitación de espacio, en este artículo se muestran los resultados de uno de los especímenes más representativos, el cual se reforzó con 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero y los resultados se describen y discuten en esta sección.

### Descripción del ensayo

El espécimen tipo losa se debe ubicar en el centro del marco de carga, de tal manera que el lado más rugoso de la superficie de la losa esté localizado en la parte inferior. La máquina de ensayo debe ser controlada por velocidad a una tasa de 1.5 mm/min. Según la norma EN-14488-5 [3], la carga debe aplicarse hasta registrar un desplazamiento vertical de 30 mm en el centro de la losa. Sin embargo, para verificar las ventajas del brazo de sujeción múltiple aquí propuesto, en este estudio la losa se llevó hasta la falla.

### Equipo utilizado

Los Laboratorios de Resistencia de Materiales y Estructuras de la Universidad Militar Nueva Granada cuentan con los siguientes equipos para la realización del ensayo estipulado en la norma EN-14488-5 [3]: bastidor para ensayo de carga vertical con capacidad de carga de 100 kN y controlado por consola MCC8, sistema de adquisición de datos (SAD) NI PXIe-1075 con 24 canales en configuraciones de puente de Weathstone de ¼, ½ o puente completo; transductores de desplazamiento en configuración de puente completo; computador con Software LabView (2013) y puerto PCIe-x4 para la instalación de la tarjeta de conexión del SAD. En la Figura 2 se muestra el conjunto de equipos utilizados en los ensayos.



**Figura 2.** Equipos empleados en el ensayo: (a) marco de flexión de 100 kN, (b) SAD de 24 canales, (c) transductores de desplazamiento de 50 mm.

La consola de comandos de la máquina de ensayos es de marca Controls, con referencia MCC-8. La consola está configurada con cuatro canales para la conexión de transductores de presión y/o carga, y tres canales habilitados para la conexión de transductores de desplazamiento y/o deformación (ver Figura 3b). Esta consola se emplea para configurar la aplicación de carga o desplazamiento sobre el espécimen. Por ejemplo, en este caso se utilizó un control por desplazamiento y la tasa de incremento de desplazamiento fue igual 1.5 mm/min, tal como lo especifica la norma EN-14488-5 [3], y la frecuencia de muestreo fue de 10 Hz.

El marco de carga o bastidor donde se coloca la losa es de marca Controls, con referencia 50-C1201/FR, y tiene una capacidad de carga de 100 kN, la cual es controlada a partir de una celda de carga o a partir de un transductor de desplazamiento. La longitud horizontal máxima del marco de carga es de 720 mm, y permite ser configurado para ensayos de flexión y ensayos de absorción de energía en losas. El marco de carga se observa en la Figura 2a.

Los transductores de desplazamiento empleados en el programa experimental son de marca Tokyo Sokki, referencia CDP-50 (Figura 2c). Los transductores se colocan en contacto con el espécimen y se encargan de registrar el cambio de la posición vertical del espécimen. Es importante indicar que el tipo, sensibilidad y precisión del transductor de desplazamiento empleado debe ser seleccionado por el usuario, en función de las características físicas y mecánicas del espécimen, y de los requisitos particulares de precisión del proyecto de investigación.

El brazo de sujeción múltiple con los transductores se muestra en la Figura 4. El peso liviano del dispositivo (1900 g) no genera carga adicional a la losa. Su configuración geométrica logra rigidez suficiente para soportar el peso de los transductores, lo cual evita pandeos que pueden originar lecturas incorrectas.

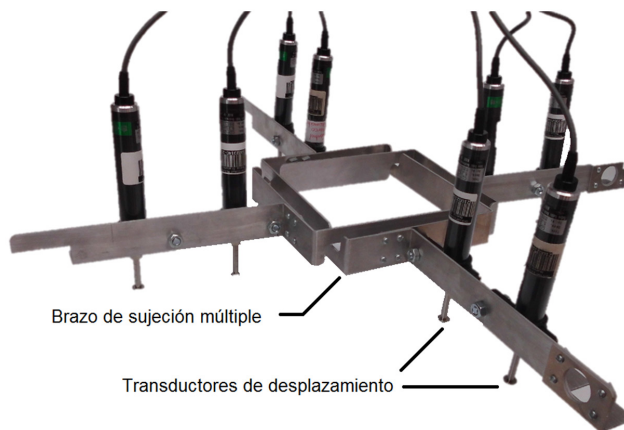
### Resultados y discusión

En esta sección se describen y discuten los resultados registrados y observados durante el ensayo de una de las losas de concreto más representativas, la cual se reforzó con 9 kg/m<sup>3</sup> de fibra de acero. Teniendo en cuenta la simetría de la losa, los desplazamientos se registraron en la mitad de la longitud de la losa en cada dirección y, de esta manera, se ubicaron sólo cuatro (4) transductores (B, C, D y E) en lugar de ocho (8) transductores (máxima capacidad), tal como se muestra en la Figura 5.

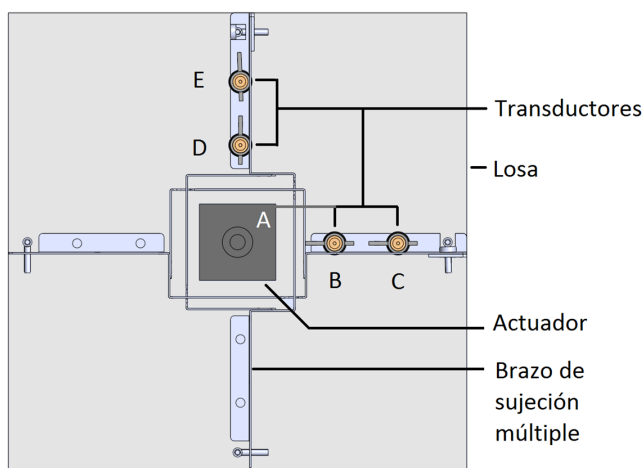
Para no generar ángulos de inclinación de los transductores, lo cual ocasionaría la lectura de una de las componentes del desplazamiento y no el desplazamiento real, se restringieron los movimientos transversales (horizontales) de los transductores por medio de un perfil en aluminio. De esta manera, desde el inicio hasta el final del ensayo se mantiene el transductor de desplazamiento en una posición paralela al sentido de desplazamiento del eje del actuador. En la Figura 6a se muestra la configuración del ensayo antes de iniciar la aplicación de cargas y después del colapso del espécimen.



**Figura 3.** Consola de comando de la máquina de ensayos: (a) parte frontal, (b) parte posterior, (c) SAD.



**Figura 4.** Brazo de sujeción múltiple con los transductores de desplazamiento.



**Figura 5.** Configuración en planta del dispositivo de sujeción múltiple.

Cuando se terminó el ensayo, en la parte inferior de la losa (ver Figura 7) se presentaron grietas de gran espesor. Si el transductor de desplazamiento se hubiera colocado debajo de la losa, tal como se hace en el método tradicional, las mediciones de desplazamiento no serían representativas y el transductor podría haber sido dañado. De esta manera, se demuestra que las mediciones de desplazamiento en losas

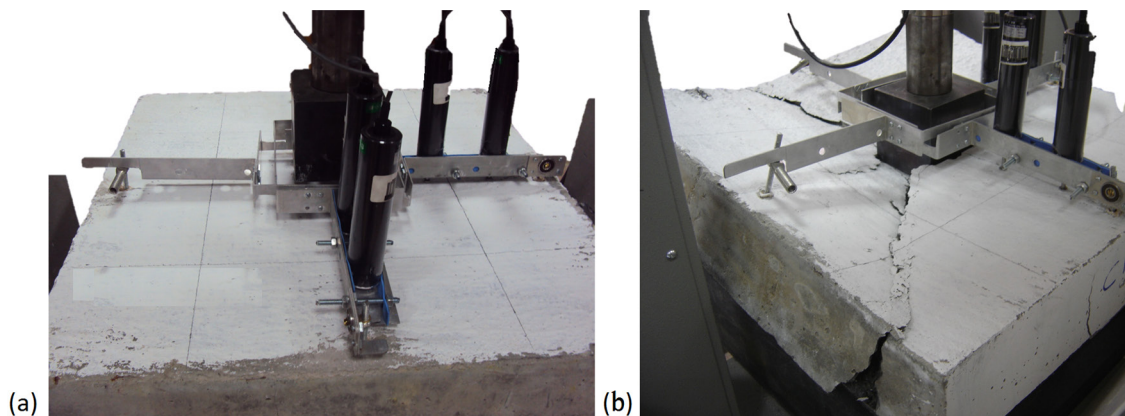
llevadas hasta la falla o colapso deben realizarse desde la parte superior del espécimen, tal como se hace en el dispositivo propuesto.

Al finalizar el ensayo se revisaron los datos registrados y almacenados por el sistema de adquisición de datos. En general, se registraron cinco (5) columnas con los datos de los transductores de desplazamiento (ver Figura 5) y una (1) columna para los datos de la celda de carga. Durante el procesamiento de la información se obtuvo el promedio de los datos registrados por los dos transductores C y E ubicados en 1/6 de la luz de la losa (denominado “1/6 de luz”), y el promedio de los datos registrados por los dos transductores B y D ubicados en 1/3 de la luz de la losa (denominado “1/3 de luz”).



**Figura 7.** Cara inferior de la losa.

Los datos se procesaron y se obtuvieron cuatro (4) columnas de datos: tres de desplazamiento (central, 1/3 de luz, 1/6 de luz) y una columna de la carga. La variación del desplazamiento con el tiempo en las tres posiciones se presenta en la Figura 8. En la figura se observa que la magnitud del desplazamiento aumenta a medida que el transductor se encuentra más cerca al centro del espécimen, y por tanto, se demuestra que el dispositivo permite registrar adecuadamente el desplazamiento vertical (deflexión) en diferentes sitios de la losa. Sin embargo, no es posible establecer una propor-



**Figura 6.** Montaje de dispositivo sobre losa: (a) antes del ensayo (b) final del ensayo.

cionalidad entre las gráficas de los desplazamientos medidos en diferentes posiciones, debido a que éstas curvas dependen exclusivamente de las características físicas y mecánicas del espécimen de ensayo, tales como las propiedades mecánicas del material y las dimensiones de la losa.

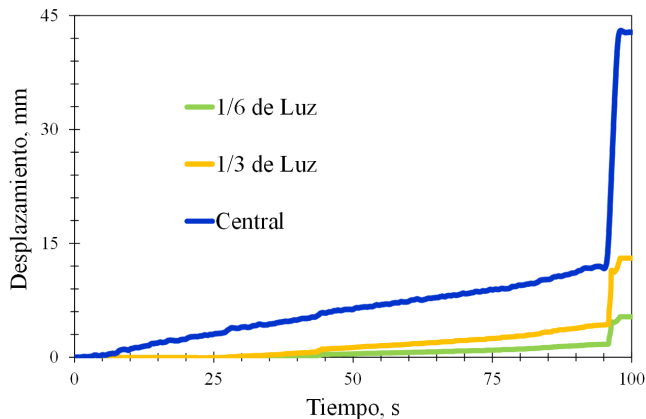


Figura 8. Variación de los desplazamientos de la losa con el tiempo.

Es importante indicar que el uso de uno o varios transductores de desplazamiento es válido dependiendo del tipo de ensayo que se desea realizar. El investigador deberá seleccionar la cantidad de transductores en función de la cantidad de información que requiere medir en el espécimen de ensayo. En algunos casos, será suficiente sólo con instalar un transductor en el centro del espécimen.

En la Figura 9a se muestra la curva carga-deflexión asociada a las lecturas de desplazamiento del transductor central (transductor A en la Figura 5). A partir de esta curva se obtuvo la variación de la energía absorbida asociada a cada desplazamiento de la curva carga-desplazamiento. La energía se calculó como el área bajo la curva y se obtuvo utilizando el método numérico de trapecios. Como se observa en la Figura 9b, la energía absorbida por la losa hasta la falla es igual a 1122 Julios ( $N \times m$ ). La energía absorbida por la losa hasta un desplazamiento de 25 mm, tal como lo especifica la norma EN-14488-5 [3], es igual a 1078 Julios.

A partir de los resultados medidos y observados durante el ensayo de los especímenes, se ha demostrado que las principales ventajas del dispositivo propuesto son: (i) Medición del desplazamiento relativo en cuatro puntos de la losa duran-

te ensayos hasta la falla, (ii) eliminación del riesgo de daño de los transductores aún con la losa totalmente colapsada, (iii) edición del desplazamiento paralelo del vástago de los transductores con el vástago del actuador de carga, (iv) al tener extremos libres, el dispositivo no opone resistencia a la deformación de la losa y evita deformaciones o posibles daños y (v) reducción significativa del peso del dispositivo, lo cual permite facilidad de manipulación al momento de su instalación.

## Conclusiones

En este estudio se ha propuesto un brazo de sujeción múltiple para facilitar y aumentar la confiabilidad de los resultados obtenidos en programas experimentales de materiales y estructuras. Las ventajas de los resultados fueron verificadas a partir de las observaciones y los resultados medidos durante el ensayo a flexión de losas de concreto reforzado con fibras de acero o malla electrosoldada sometidas a cargas verticales cuasi-estáticas. El dispositivo propuesto es versátil ya que permite no sólo la sujeción de cuatro (4) transductores a lo largo de un eje sobre la losa, sino también la colocación de un brazo adicional en el sentido perpendicular y, de esta manera, sujetar y monitorear hasta ocho (8) puntos de la losa durante todo el ensayo. Los resultados medidos durante los ensayos de las losas de concreto reforzado con fibras de acero o malla electrosoldada permitieron comprobar que el brazo propuesto garantiza la confiabilidad de los resultados obtenidos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG, Colombia) para la financiación del proyecto de investigación IMP-ING-1574. Los autores también agradecen al Técnico de Laboratorio Fabián Pinzón por colaborar en el desarrollo de los ensayos en los Laboratorios de Estructuras y de Agregados y Concretos, y a los estudiantes pertenecientes al Semillero del Grupo de Investigación de Estructuras y Sísmica por participar en los ensayos y aportar sus valiosos comentarios.

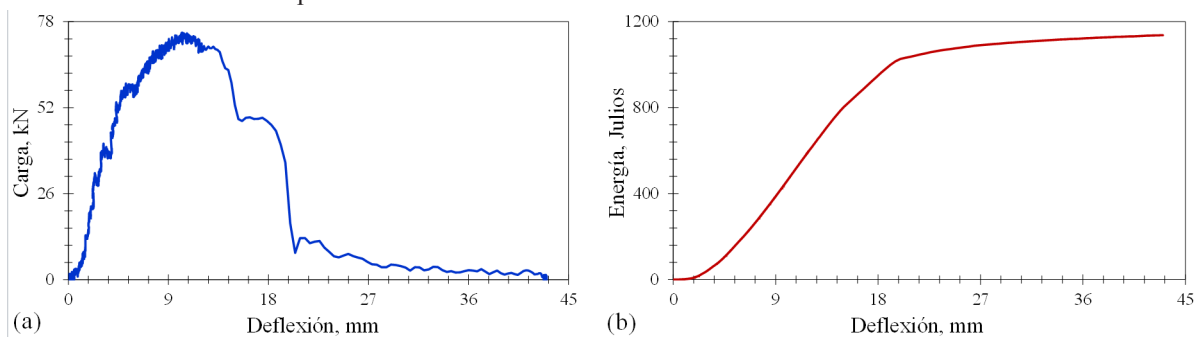


Figura 9. Respuesta del espécimen: (a) Curva carga-deflexión en el centro de la losa, (b) curva energía-deflexión en el centro de la losa.

## Referencia

- [1] M. E. Ruiz Sandoval, B. Blachowski y B. F. Spencer, “Uso de sensores inalámbricos en la obtención de parámetros modales”, in XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, SMIE, 2012, no. 217, pp. 1–10.
- [2] American Society for Testing Materials, “ASTM C469 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”. p. 5, 2002.
- [3] European committee for standardization, “EN 14488-5 Testing sprayed concrete - Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens”, p. 8, 2006.
- [4] European committee for standardization, “E 519 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages”, p. 5, 2007.
- [5] E. V JOHNSON y J. A. MACPHERSON, “Ceramic support arm for movably positioning transducers”, CA 1319428, 1993.
- [6] A. Joseph, S. Tengali, R. Madhan, R. Prabhudesai, V. Kumar, M. Dias y S. Prabhudesai, “Adjustable tripod mechanism to support devices or transducers for scientific measurement”, US 20060086871 A1, 27-Apr-2006.
- [7] D. Wergin y A. Wergin, “Transducer mounting device”, US 4875651 A, 24-Oct-1989.
- [8] W. H. Roney, “Precisionally adjustable transducer mounting device”, US 5161764 A, 1992.
- [9] M. Blomberg, “Transducer mounting bracket”, US5016225 A, 14-May-1991.
- [10] W. H. Knepper, “Transducer support device”, 03-Jan-1995.
- [11] Controls-group, “Testing equipment for the construction industry - CONTROLS”. [Online]. Available: <http://www.controls-group.com/eng/>. [Accessed: 19-Jan-2015].
- [12] Pinzuar LTDA, “Pinzuar LTDA”. [Online]. Available: <http://www.pinzuar.com.co/pinzuar/index.php>. [Accessed: 19-Jan-2015].
- [13] F. Micelli, M. Leone, G. Centonze y M. A. Aiello, “Go Green: Using Waste and Recycling Materials”, in Infrastructure Corrosion and Durability - a sustainability study, 1st ed., Y. Lu, Ed. Monteroni di Lecce: OMICS Group eBooks, 2014, p. 53.
- [14] American Society for Testing Materials, “ASTM C1609 Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)”. p. 8, 2010.
- [15] J. Carrillo, F. Riveros, y L. LLano. “Dispositivo para sujeción de múltiples transductores de desplazamiento en ensayos de losas”, En Proceso de Patente, Superintendencia de Industria y Comercio, Colombia, 2015 .
- [16] D. Silva, “Utilización de concreto reforzado con fibras de acero en losas de contrapiso para VIS”, Universidad Militar Nueva Granada, 2015.