



Implementación TIC en la docencia universitaria: estudio de los esfuerzos en vigas

Implementing ITC in higher education: study of effort on beams

Alfonso Blasco Gutiérrez ¹, Antoine Parant ², Antoine J. Olivier ², Mercedes González Redondo ³, Alfonso García García ^{1*}

¹ Dpto. Tecnología de la Edificación, E.T.S. de Edificación de Madrid, U.P.M. Avda. Juan de Herrera, 6, 28040 Madrid, España.

² Alumnos ERASMUS, E.T.S. de Edificación de Madrid, U.P.M. España.

³ Dpto. Estructuras y Física de Edificación, E.T.S. de Arquitectura, U.P.M. España.

⁴ Autor de correspondencia: alfonso.garciag@upm.es.

Recibido: 21/02/2017 | Aceptado: 08/04/2017 | Fecha de publicación: 30/04/2017
DOI:10.20868/abe.2017.1.3509

TITULARES

- Práctica académica basada en un sistema de medida multifuncional sobre ARDUINO
- Medida de esfuerzos en vigas como parámetro de seguridad en edificación
- Calibrado y utilización de galgas extensiométricas

HIGHLIGHTS

- Teaching practice based on multifunctional measuring system on ARDUINO
- Measurement of beam efforts as building reliability parameter
- Calibration and use of strain gauges

RESUMEN

En el presente artículo se presenta una práctica académica que aporta una visión de la evolución de los esfuerzos resultantes en vigas debido a las cargas concentradas o distribuidas en vigas isostáticamente apoyadas. Debido a la versatilidad del sistema se pueden realizar medidas dinámicas cambiando la disposición geométrica de la carga o su valor observando en tiempo real el cambio en los esfuerzos medidos. Por contraposición a las medidas clásicas de esfuerzos, consistentes en la sucesión de medidas estáticas costosas en tiempo y que suelen conllevar que los alumnos “desconecten” de la práctica, la capacidad de realizar medidas dinámicas permite que los alumnos adquieran una comprensión rápida y más intuitiva de cómo cambian los esfuerzos que afectan a la viga (elemento estructural) en función de la carga. El coste de los materiales y la infraestructura necesarios para esta práctica es lo suficientemente bajo como para que sea posible su implementación en casi cualquier centro formativo.

Palabras clave: *Innovación Educativa; TIC; Sensores; Vigas; Esfuerzos.*

ABSTRACT

This work shows a new teaching practice focused on a better understanding of the efforts on beams, both owing to concentrated or distributed loads in isostatically supported beams. Due to the system versatility, it can obtain dynamic measurements changing the geometric arrangement of the load or its values. The system allows us to obtain, in real time, the measurements of efforts. By contrast to the classical measurements, that consist in the succession of static measures which during for so long and entail the students don't pay attention to the practice. This ability to get dynamic measurements allows that students get an intuitive knowledge and a better understanding of how the efforts affect the beam (structural element) versus the load. The cost of materials needed to carry out this practice and its own infrastructure is very low and because of that, is affordable for the most academic centers.

Keywords: *Educational innovation; ITC; Sensor; Beams; Efforts.*

1. INTRODUCCIÓN

Desde siempre el estudio de los elementos estructurales ha sido una materia fundamental en los estudios asociados con la edificación. Por ello, en los estudios conducentes a la obtención del Grado en Edificación es fundamental conseguir que los alumnos sepan y comprendan la necesidad de calcular con precisión los esfuerzos a los que se ven sometidos dichos elementos dependiendo de la naturaleza y cuantía de las cargas a las que les afectan [1-4].

No obstante, estos esfuerzos, en elementos estructurales reales, son cambiantes en el

tiempo, por lo que el alumno debe asimilar que el cálculo no puede reducirse a una única situación, si no que ha de cubrir todas las situaciones posibles.

El comportamiento de las vigas ha sido objeto de múltiples y diversos estudios[5-9], desde la teoría de Vlasov [9], aplicable a vigas de pared delgada en materiales isótropos, se han realizado numerosas investigaciones ampliando la teoría de Vlasov a laminados compuestos sin tener en cuenta las deformaciones transversales en sus análisis [10], desarrollando expresiones simples para el análisis a flexión, torsión y alabeo de

vigas en compuestos [6-12], incluyendo las deformaciones tangenciales por flexión y torsión en la cinemática [13].

Las vigas de sección abierta de laminados compuestos se impusieron por su amplia utilización a partir de la década de 1990 debido a sus propiedades específicas: alta relación rigidez / peso y resistencia mecánica / peso, alta resistencia a la degradación ambiental y baja conductividad térmica [14–16].

No obstante, todos estos estudios teóricos, los alumnos pueden adquirir una mejor comprensión del comportamiento de los elementos estructurales a través de la realización de prácticas. El problema radica en que la mayoría de las prácticas requieren la utilización de complicados y caros recursos asociados a un laboratorio de materiales generalista, como el que existente en la Escuela Técnica Superior de Edificación de la U.P.M. Estos dispositivos experimentales son, además, caros de mantener y solo deben ser utilizados por personal cualificado.

La búsqueda de prácticas que permitan a los alumnos una mejor comprensión del comportamiento de los elementos estructurales, y que se puedan realizar con medios de coste bajo o moderado, está plenamente justificada.

En el presente trabajo se presenta una práctica docente enfocada a la medida de esfuerzos en vigas. Debido a la versatilidad del sistema desarrollado se pueden realizar medidas dinámicas cambiando la disposición geométrica de la carga y/o su valor observando en tiempo real el cambio en los esfuerzos medidos sobre el elemento bajo estudio. Por contraposición a las medidas clásicas de esfuerzos, consistentes en las medidas cuasi-estáticas para lo que es necesario emplear mucho tiempo y realizadas por personal especializado (no por los propios

alumnos) que suelen conllevar que estos pierdan interés en la práctica. La capacidad de realizar medidas dinámicas permite que los alumnos adquieran una comprensión rápida y más intuitiva de cómo cambian los esfuerzos que afectan a la viga en función de la carga.

El coste del material necesario para la realización de la práctica y la infraestructura necesaria para la misma es moderado y por lo tanto accesible a la mayor parte de los centros formativos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Teoría

Para una viga esbelta en posición horizontal de longitud L y de sección rectangular de sección $a \times b$, empotrada por un extremo y sometida a una fuerza vertical F en el extremo libre se puede determinar la forma de la barra y las coordenadas los giros y desplazamientos verticales para cada punto, para pequeñas flexiones de la barra (Fig. 1a).

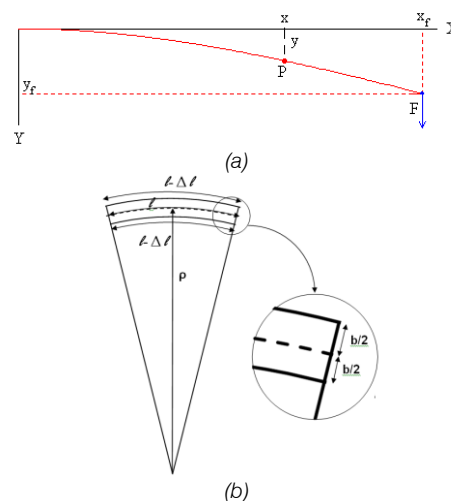


Fig. 1: (a) Diagrama de una viga esbelta sometida a un esfuerzo puntual, F , en su extremo. (b) Diagrama de la curvatura de una viga esbelta.

Suponiendo que la barra tiene una longitud mucho mayor que las dimensiones de su sección

transversal, que la deformación debida a su propio peso es despreciable y que la sección de la barra no cambia cuando se dobla (cuando el espesor de la barra es pequeño comparado con el radio de curvatura, la sección transversal cambia muy poco).

En estas condiciones es aplicable la ecuación de Euler-Bernoulli [17-19] que relaciona el momento flector M de la fuerza aplicada y el radio de curvatura “ρ” de la barra deformada.

$$M(x) = \frac{EI}{\rho(x)} \Rightarrow \rho(x) = \frac{EI}{M(x)} = \frac{EI}{F(L-x)} \quad (1)$$

Dónde:

F es la fuerza puntual aplicada.

x es la posición horizontal.

L es la longitud de la barra.

E es el módulo de Young.

$I = ab^3/12$ es el momento de inercia respecto al eje transversal a la sección de la barra perpendicular a la fibra neutra.

Asumiendo que el ángulo en el punto de empotramiento es 0°, se puede obtener que el ángulo y el desplazamiento vertical en función de x:

$$\theta(x) = \frac{Fx(2L-x)}{2EI}; u(x) = \frac{Fx^2(3L-x)}{6EI} \quad (2)$$

Suponiendo que, debido a la delgadez de la barra, la fibra neutra coincide con el centro de la sección transversal de la misma, véase Fig. 1b, podemos decir:

$$l = \rho(x)\alpha \Rightarrow \begin{cases} l + \Delta l = \left(\rho(x) + \frac{b}{2}\right)\alpha \\ l - \Delta l = \left(\rho(x) - \frac{b}{2}\right)\alpha \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Por tanto: } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{b}{2}\alpha \quad (4)$$

Por otro lado, el circuito de acondicionamiento del sensor es especialmente crítico para este tipo

de sensores. Se han estudiado diferentes circuitos de acondicionamiento y las respuestas de los mismos, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 1.

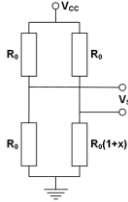
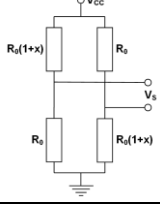
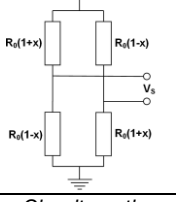
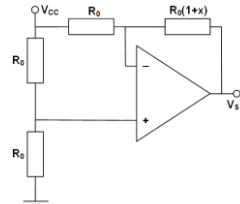
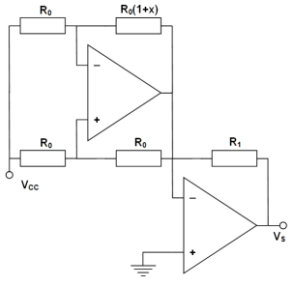
Circuito	Respuesta
<p><i>Cuarto de puente</i></p> 	$\frac{V_0}{V_{CC}} = \frac{x}{2(2+x)}$
<p><i>Medio de puente</i></p> 	$\frac{V_0}{V_{CC}} = \frac{x}{2+x}$
<p><i>Puente completo</i></p> 	$\frac{V_0}{V_{CC}} = x$
<p><i>Circuito activo</i></p> 	$\frac{V_0}{V_{CC}} = -\frac{x}{2}$
<p><i>Circuito amplificador</i></p> 	$\frac{V_0}{V_{CC}} = \frac{R_1}{R_0} x$

Tabla 1: Circuitos acondicionadores para galgas extensiométricas y respuesta de cada circuito. GF es el factor de galga y ε la deformación. $x = \Delta R/R_0 = GF \times \varepsilon$

2.2 Materiales

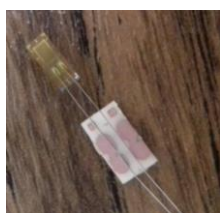
Tal y como se muestra en la Fig. 2, el dispositivo experimental consiste en la configuración de una placa ARDUINO UNO, basada en microcontrolador, para la medida continua y grabación en una tarjeta SD de las deformaciones procedentes de los sensores.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2: Componentes del dispositivo experimental. (a) Placa ARDUINO UNO; (b) Módulo de grabación de tarjetas SD; (c) Galga extensiométrica RS Pro de 6x2,5 mm.

La placa ARDUINO UNO dispone de 6 entradas/salidas analógicas, lo que permite la conexión simultánea de hasta 6 sensores. Permite la gestión de múltiples dispositivos periféricos, entre otros dispositivos de grabación de datos en tarjetas SD. Además permite la programación sencilla del sistema, configurando el número de sensores, el intervalo de medida, la fecha y hora de las medidas y cuantos parámetros se estime conveniente para el desarrollo de la práctica.

Se ha utilizado un módulo de grabación de datos en tarjetas SD de hasta dos GB de datos, compatible con placas ARDUINO UNO y que se alimenta directamente de ésta.

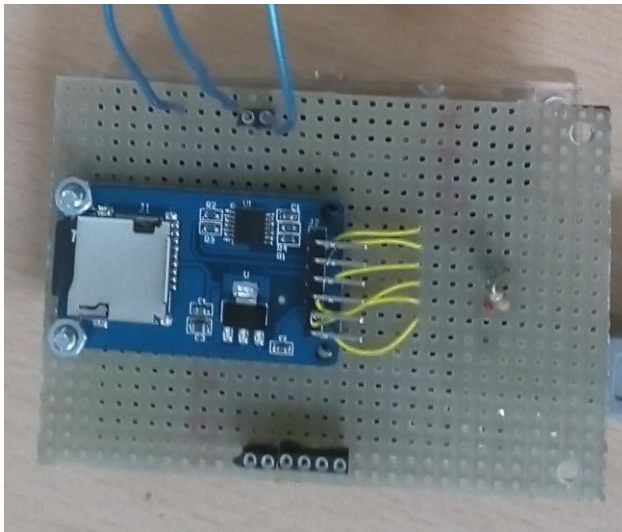
Los sensores utilizados son los galgas extensiométricas RS Pro de 6x2,5 mm, son sensores analógicos con una resistencia de galga de 120 Ω , y un factor de galga nominal de 2. Su tiempo de respuesta es inferior a 2 μ s, por lo que permite medidas dinámicas y su temperatura operativa va de -30°C a 180°C. Con estos sensores se pueden obtener, dependiendo de los sensores conectados, hasta una medida cada 50 milisegundos de los esfuerzos en cada punto de medida.

El circuito de acondicionamiento del sensor es especialmente crítico para este tipo de sensor, por lo que se ha optado por su implementación sobre una placa de inserción estándar para poder variar la configuración del mismo sin afectar al resto de los dispositivos que constituyen la práctica.

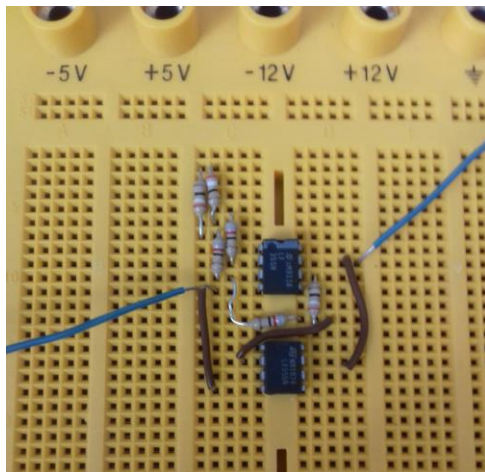
Esto también permitiría a los alumnos probar diferentes configuraciones de disposición de galga extensiométricas, en cuarto de puente, medio puente, puente completo y algunas configuraciones con sistemas de amplificación activos. En este último caso, los circuitos de acondicionamiento requieren alimentación externa, ya que los amplificadores operacionales necesitan alimentación simétrica. Los circuitos correspondientes a las diferentes configuraciones y su respuesta se muestran en la Tabla 1.

Se ha construido una segunda placa para la configuración de los elementos periféricos (placa de grabación de datos en la tarjeta SD) y se ha utilizado una placa de inserción estándar para la configuración y conexión de los sensores. La segunda placa (como se muestra en la Fig. 3) se ha construido utilizando la técnica de

WireWrapping, consistente en el cableado pin a pin de los elementos electrónicos constitutivos del circuito. Se ha elegido esta configuración por su versatilidad a la hora de configurar los sensores y su facilidad de uso, que permite que los alumnos intervengan en su construcción de forma segura sin necesidad de realizar soldaduras.



(a)



(b)

Fig. 3: Placas electrónicas adicionales utilizadas. (a) Placa desarrollada y construida para la configuración de los elementos periféricos.(b) Placa de inserción estándar.

La segunda placa se interconecta con la placa ARDUINO mediante conectores electrónicos que permiten la transferencia de las alimentaciones y señales electrónicas necesarias, asegurándose firmemente el conjunto de ambas mediante tornillos. La placa de inserción estándar se cablea e interconecta de forma externa con el conjunto anterior. Esto permite tanto la fácil conexión de alimentación externa como cambiar con facilidad los circuitos necesarios para el acondicionamiento de la señal procedente de los sensores, su ajuste e incluso probar varios circuitos de acondicionamiento para comprobar la respuesta de los mismos. La disposición del dispositivo completo, con las tres placas interconectadas, se muestra en la Fig. 4.

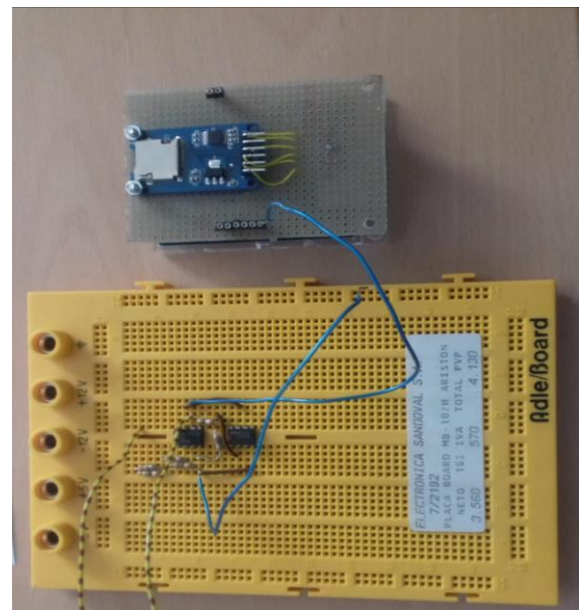


Fig. 4: Disposición del dispositivo completo una vez

La presentación, en tiempo real, de datos se realiza a través de ordenador, mediante el uso de la utilidad de monitor que ofrece la aplicación para la programación de la placa ARDUINO UNO. Éstos son grabados, para posteriores análisis en la tarjeta SD y se pueden extraer, copiar y analizar mediante los programas que se consideren adecuados por cada profesor.

2.3 Método de ensayo

Se han realizado medidas, con este dispositivo experimental, en el laboratorio de física de la Escuela Técnica Superior de Edificación. Se han dispuesto la configuración de acondicionamiento amplificadora correspondiente a un circuito amplificador activo (descrito en la Tabla 1). Y se han realizado las medidas sobre una barra de acero F-114 (módulo de Young 210.000 MPa – según fabricante) de sección rectangular de 10 x 3 mm y una longitud de 25 cm. Esta barra se ha sujetado horizontalmente sobre un banco de trabajo, mediante dos sargentos, y se ha aplicado una carga puntual en su extremo libre añadiendo pesos a un platillo fijo sobre dicho extremo.

Se ha pegado una galga, a una distancia de 10 cm del empotramiento, sobre la cara superior de la barra para medir la tensión producida al combarse esta por efecto de la carga.

Las medidas se han realizado de forma continua, por el sistema experimental descrito, cada segundo mientras se iban añadiendo pesos de cien gramos, cada minuto aproximadamente, al platillo colgado del extremo de la barra. Se realizan promedios de los datos anteriores para cada peso aplicado, utilizando el programa excell y mediante el uso de las funciones adecuadas, obteniendo la respuesta media, tanto del voltaje como la deformación. De esta forma, logramos reducir el error aleatorio en la respuesta debido al ruido electrónico que se pueda introducir en el sistema, y que al tratarse de un sensor analógico puede ser significativo en la respuesta del sistema.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las medidas realizadas de forma continua mientras se iban añadiendo pesos dan los

resultados que se muestran en la Fig. 5. Como se puede ver se registra una respuesta escalonada en el sistema. A partir de esta respuesta se obtiene la deformación que es directamente proporcional a la respuesta en voltaje.

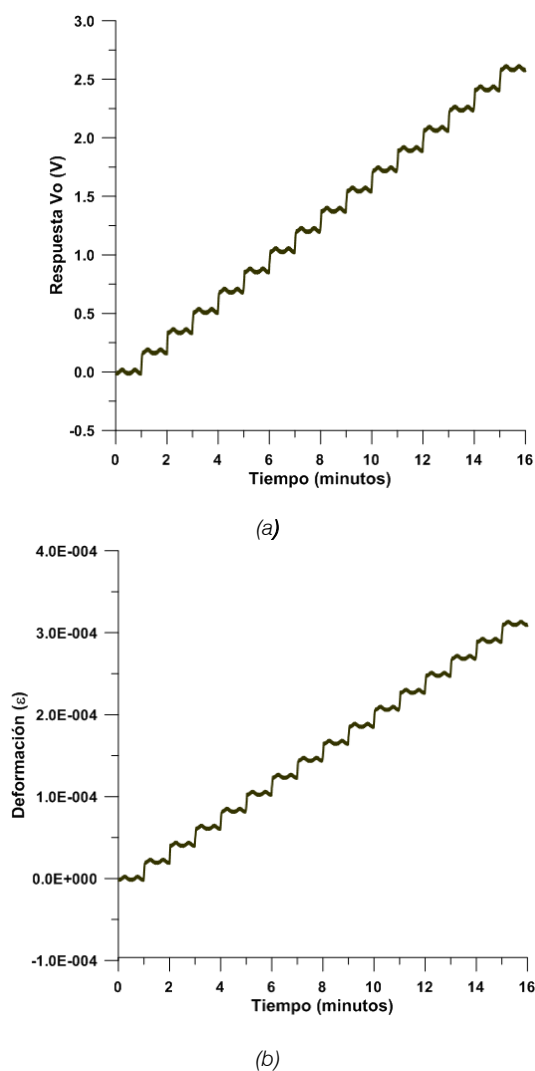
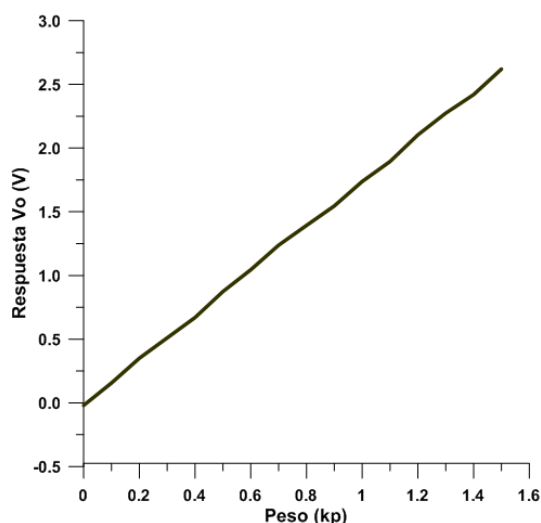


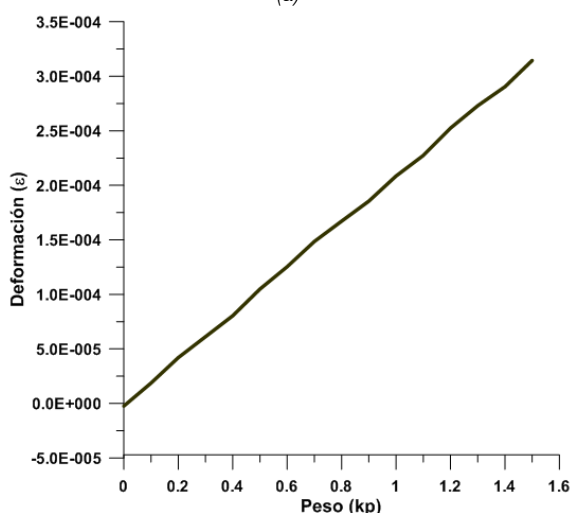
Fig. 5: Evolución temporal de la respuesta del sistema (a) voltaje de respuesta registrado (b) deformación obtenida a partir del voltaje anterior.

Los promedios de los datos anteriores para cada peso aplicado muestran la respuesta media, tanto el voltaje como la deformación. Los datos obtenidos se muestran en la Fig. 6. Donde se

puede observar que la respuesta es lineal con el peso aplicado.



(a)



(b)

Fig. 6: Respuesta del sistema promediada por pesos (a) voltaje de respuesta registrado (b) deformación obtenida a partir del voltaje anterior.

A partir de las gráficas mostradas se observa que las medidas realizadas responden a las deformaciones esperables para este tipo de experimento.

Además, dada la versatilidad del sistema, se podría, utilizando más líneas de entrada analógicas (y más galgas extensiométricas), obtener el comportamiento de diferentes vigas

frente a los mismos esfuerzos o el de una misma viga frente a esfuerzos más complejos. Para ello bastaría disponer de sistemas de aplicación de esfuerzos adecuados y de diferentes tipos de vigas para someterlas a los test diseñados por el profesor.

4. CONCLUSIONES

Se ha diseñado una práctica que permite a los alumnos observar la evolución de los esfuerzos en vigas en función los esfuerzos aplicados sobre la misma.

El dispositivo desarrollado es de pequeño tamaño y autosuficiente (la alimentación eléctrica se puede hacer mediante pilas o baterías) por lo que se puede decidir su ubicación y configurar el dispositivo “in situ” en pocos minutos.

Al ser un dispositivo basado en una placa estandarizada (ARDUINO UNO) permite, por un lado, cambiar fácilmente el dispositivo de medida en función de la disponibilidad en el mercado del mismo y/o de los posibles cambios en las normativas.

Sin embargo, el método de medida no agiliza los tiempos de medida, aunque si permite que estas sean realizadas directamente por los alumnos.

Al disponer de una nube de puntos para cada esfuerzo permite minimizar, mediante métodos estadísticos, los errores asociados al ruido electrónico en la medida.

El dispositivo de acondicionamiento electrónico de las señales electrónicas procedentes de las galgas es relativamente complejo, por lo que puede intimidar a los alumnos a la hora de configurarlo. Puede solucionarse realizando este montaje por personal cualificado en forma de módulos y que los alumnos tengan acceso a

estos módulos con acceso limitado a parámetros de configuración previamente seleccionados por el profesor.

La motivación de los alumnos crece respecto a las prácticas, ya que al permitirse su intervención directa en las mismas (y no ser meros observadores) se involucran en el desarrollo de las mismas. Se llega a observar que, incluso, algunos proponen medidas complementarias e incluso diferentes con objeto de obtener otros parámetros. Todo ello conlleva una mejora apreciable de los resultados de aprendizaje de los alumnos.

El coste de los elementos constitutivos de esta práctica es lo suficientemente bajo como para que sea posible su implementación en casi cualquier centro formativo. De hecho el coste total del conjunto está por debajo de los 50€, por lo que incluso los alumnos podrían adquirirlos en tiendas de electrónica.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el departamento de Tecnología de la Edificación de la UPM.

6. REFERENCIAS

- [1] Gu, H., Song, G., Dhonde, H., Mo, Y.L., Yan, S. (2006). Concrete early-age strength monitoring using embedded piezoelectric transducers. *Smart Mater. Struct.* Vol.15, pp. 1837-1845.
- [2] ASTM C 1074, Standard Practice for Estimating Strength by the Maturity Method, ASTM international, www.astm.org.
- [3] Rasmussen, R.O., Cable, J.K., Turner, D.J. (2003). Strength Measurements Using Maturity for Portland Cement Concrete Pavement Construction at Airfields. IPRF Research Report. Programs

Management Office 1010 Massachusetts Avenue, N.W. Suite 200. Washington, DC 20001.

[4] Nair, C.G.K., Prasad, J. (2011) *Non-Destructive Test and Evaluation of Materials*. Published by Tata McGraw-Hill Education Pvt. Ltd. ISBN 10: 0070707030 / ISBN 13: 9780070707030

[5] Vargas, P.E., Oñate, E., Oller, S. (2014). Formulación de elementos finitos para vigas de sección abierta formadas por laminados compuestos incluyendo las deformaciones tangenciales por cortante y torsión. *Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing.* 30(4). 238–246. <http://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.07.007>

[6] Romero, J.L., López, E.M., Ortega M.A., Río, O. (2016). Análisis de pilares con deformación por cortante mediante elementos finitos y acciones repartidas equivalentes. *Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing.* 2016. <http://doi.org/10.1016/j.rimni.2016.06.002>

[7] Marí, A., Cladera, A., Bairán, J., Oller, E., Ribas, C. (2014). A unified shear-flexural strength model for slender reinforced concrete beams under concentrated and distributed loads. *Hormigón y Acero* Volume 65, Issue 274, October–December 2014, Pages 247–265.

[8] Christoforo, A.L., Zangiácomo, A.L., Lahr, F.A.R. (2013). Alternative methodology to determine the modulus of elasticity in timber beams of *Pinus caribaea* wood specie. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*. Volume 25, Issue 1, January–June 2013, Pages 9-13. DOI: 10.1016/j.ctmat.2013.12.015

[9] Monleón, S., Lázaro, C., Casanova J., Domingo, A. (2015). Pseudoesfuerzos y evaluación de tensiones en modelos hiperviga. *Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing.* 31(2). pp. 71–80. <http://doi.org/10.1016/j.rimni.2014.01.001>

[10] Vlasov, V. Z. (1961). *Thin-walled Elastic Beams*. Israel Program for Scientific Translations.

[11] Bauld, N.R., Tzeng, L.S. (1984). A Vlasov theory for fiber-reinforced beams with thin-walled open cross sections, *Int. J. Solids Struct.* 20 (3) pp. 277–297.

[12] Bank, L.C., Bednarczyk, P.J. (1988) A beam theory for thin-walled composite beams, *Compos. Sci. Technol.* 32 (4), pp. 265–277.

[13] Barbero, E.J., Lopez-Anido, R., Davalos, J.F. (1993) On the Mechanics of Thin-Walled Laminated Composite Beams, *J. Compos. Mater.* 27 (8), pp. 806–829.

[14] Wu, X.X., Sun, C.T. (1992) Simplified theory for composite thin-walled beams, *AIAA Journal* 30, pp. 2945–2951.

[15] Pulido, M.D.G., Sobrino, J.A. (2002) Hacia la aplicación de los materiales compuestos en el diseño de pasarelas, en: S. Oller (Ed.), *Análisis y cálculo de estructuras de materiales compuestos*, Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), pp. 547–576.

[16] Oller S. (2003). Simulación numérica del comportamiento mecánico de los materiales compuestos. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).

[17] Feynman, Leighton, Sands. *The Feynman Lectures on Physics V-II*. Edt. Fondo Educativo Interamericano, págs. 38.15-17.

[18] Beléndez T., Neipp C., Beléndez A. (2002). Flexión de una barra delgada empotrada en un extremo: Aproximación para pequeñas pendientes. *Revista Brasileira de Ensino de Física.* 24 (4), págs, 399- 407.

[19] Beléndez T., Neipp C., Beléndez A. (2002). Large and small defections of a cantilever beam. *European Journal of Physics.* Vol. 23, nº3. Pp. 371-379. DOI: 10.1088/0143-0807/23/3/317.