



Received: 15-11-2019
Accepted: 25-11-2019

Anales de Edificación
Vol. 5, Nº3, 40-52 (2019)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2019.4367

Análisis de resultados de deformaciones y flechas en dos vigas de hormigón armado monitorizadas con sensores de fibra óptica embebidos Analysis of deformation and deflection results in two reinforced concrete beams monitored with embedded fibre optic sensors

Julián García Díaz ; Nieves Navarro Cano; Edelmiro Rúa Álvarez

Universidad Politécnica de Madrid (España, julian.garcia@ciccp.es; nieves.navarro@upm.es; edelmiro.rua@upm.es)

Resumen— Conocer el comportamiento real de una estructura de hormigón armado es difícil, debido a los múltiples factores que influyen en el mismo. La heterogeneidad del hormigón y la evolución de sus características mecánicas y físicas a lo largo de la vida útil del material, hace que podamos obtener valores aproximados de su comportamiento. El objetivo de este trabajo de investigación es evaluar de una manera más precisa este comportamiento, mediante la inclusión en las estructuras de sensores de fibra óptica. Estos sensores nos proporcionan valores precisos de deformación en tiempo real, durante toda la vida de la estructura. Para obtener estos resultados, se han embebido los sensores en una viga de hormigón armado y se ha analizado realmente lo que le ocurre cuando la solicitamos a diferentes escalones de carga. Los resultados obtenidos los hemos comparado con los teóricos obtenidos del cálculo de resistencia de materiales, llegando a la conclusión de que, en efecto, las estructuras de hormigón armado son elementos complejos, pero que, con este sistema de monitorización, podremos obtener resultados más precisos de su comportamiento.

Palabras Clave— Red de Bragg; Sensores de fibra óptica embebidos; hormigón autocompactante; fibra neutra; fisuración.

Abstract— Knowing the real behavior of a reinforced concrete structure is a difficult task due to the multiple factors that influence it. The heterogeneity of the work and the evolution of its mechanical and physical characteristics throughout the useful life of the material, makes it possible to obtain approximate values of its behaviour. The objective of this research work is to evaluate this behavior in a more precise way, through the inclusion of fiber optic sensor structures. These sensors provide us with precise values of deformation in real time, throughout the life of the structure. I have embedded the sensors in a reinforced concrete beam and I have really analyzed what happens when we request it at different load stages. The obtained results have been compared with the theoretical ones obtained from the calculation of resistance of materials, arriving at the conclusion that, in fact, reinforced concrete structures are complex elements, but that, with this monitoring system, we can obtain more precise results of his behavior.

Index Terms— Fiber Bragg grating, Fiber optic sensors embedded in concrete, Self-consolidating concrete, Neutral axis, Cracking.

I. INTRODUCCIÓN

Este artículo es la primera fase de un trabajo de investigación que forma parte de mi tesis doctoral. Como resultado final, se pretende crear un sistema de monitorización de estructuras de hormigón, embebiendo sensores de fibra óptica en la misma.

En esta primera fase el objetivo es validar el método de medición de deformaciones mediante la inscripción de sensores de fibra óptica en elementos estructurales sencillos. El artículo desarrolla los resultados obtenidos al solicitar con diferentes escalones de carga, dos vigas simplemente apoyadas, monitorizadas con estos sensores, ubicados en la zona de máxima solicitación.

Existen muchos trabajos acerca del estudio de fisuras en vigas de hormigón, como el realizado por Sanchez (Sanchez et al., 2016) en el que analiza las fisuras de una viga de hormigón armado mediante el método de los elementos finitos realizando pruebas en estático y dinámico. Obtiene resultados de la disminución de la rigidez una vez producida la fisura del hormigón, y que la fisura se detiene en la posición de la fibra neutra del elemento estructural, punto donde se pasa de tracción a compresión.

Existen también trabajos relacionados con la monitorización de elementos estructurales para conocer su comportamiento real con sensores de fibra óptica embebidos. La importancia de la elección del tipo de sensor para la obtención de buenos resultados, y la protección que deben tener estos dada su elevada fragilidad, además de la importancia que tiene en el mantenimiento y reparación de las estructuras ha sido estudiado por (Kesavan et al., 2010).

El coste de los sistemas de monitorización de estructuras, frente a los beneficios obtenidos, es realmente asumible, tal y como indica (Leung, 2001) en su trabajo.

Existen en el mercado diferentes dispositivos para medir deformaciones. Para este trabajo se han elegido los sensores de fibra óptica basados en la Red de Bragg (FBG) debido a que poseen mayor durabilidad que las galgas eléctricas convencionales. Además, proporcionan estabilidad de señal a largo plazo y estabilidad del sistema, aun en condiciones muy desfavorables, como puede ser la vibración que se produce en carreteras. La longitud del cable no tiene impacto en la precisión de la medición. Mediante la multiplexación, se pueden colocar diferentes sensores en un mismo cable de fibra óptica, cable mucho más liviano que el convencional de cobre de las galgas extensométricas eléctricas. Los sensores ópticos son inmunes a la interferencia electromagnética y de radiofrecuencia (EMI/RFI), y resistentes a ambientes hostiles en presencia de agua, sal, temperaturas extremas, presión (hasta 400 bar), atmósferas potencialmente explosivas y zonas de alto voltaje. En definitiva, los sensores de fibra óptica basados en la Red de Bragg, ofrecen mayores ventajas económicas, de

rendimiento y de precisión que las galgas eléctricas tradicionales (Barbosa, 2019).

Al embeber sensores en elementos estructurales de hormigón, para localizar fisuras, habría que colocar muchos sensores en la misma, dado que el hormigón es un material muy heterogéneo y es imposible predecir con exactitud dónde se van a producir dichas fisuras (Das and Purnachandra, 2018). En este sentido cabe resaltar el trabajo de (Bremer et al., 2016) que utiliza un sensor óptico tipo SM integrado en una estructura de red textil y la aplica en un bloque de hormigón en masa de 100x15x15 cm para determinar las fisuras del mismo.

Los sensores de fibra óptica basadas en la red de Bragg son capaces de identificar deformaciones internas que no pueden ser detectadas por inspecciones visuales (Fernando et al., 2017). Como podremos comprobar en el trabajo que se presenta a continuación, esto es así, la sensibilidad de la fibra óptica es mucho mayor que la que poseemos a la hora de realizar una inspección visual de una estructura. Respecto a la medida de las deformaciones, Chen y colaboradores (Chen et al., 2019) realizan un estudio de deformaciones biaxiales con sensores de fibra óptica distribuidos. En ese trabajo, indican que la determinación de fisuras analítica tiene un gran margen de error, hecho que hemos constatado en este trabajo. Monitorizan una viga de hormigón de 10x15 cm de sección, y 1,50 m de longitud, y la somete a varios escalones de carga, determinando cómo afecta la aparición de fisuras en la sección. Mide deformaciones en los ejes Z e Y.

Los sensores de fibra óptica se pueden utilizar para realizar todo tipo de medidas de deformación, ya no solo en estructuras de hormigón, también en terrenos que sustenten edificaciones, como el trabajo realizado por You (You et al., 2019) en el que utiliza sensores de fibra óptica basadas en la Red de Bragg para medir tensiones del terreno en tiempo real, o materiales sintéticos como el estudio realizado por Kim (Kim, 2017) en un espécimen de composite CFRP, el estudio para el deslizamiento de laderas (Sun et al., 2014; Zheng et al., 2019) y para la monitorización de salud estructural en el campo de la geotecnia (Cheng et al., 2017).

Los resultados obtenidos demuestran que es difícil llegar a resultados concretos referentes a flechas y deformaciones teóricas frente a lo que realmente ocurre en el elemento estructural. El momento de producirse las fisuras modifican los cálculos teóricos, como veremos a continuación.

II. METODOLOGÍA

Geometría

Las vigas en estudio tienen 3 m de longitud, y secciones de 200x300 mm y 300x500 mm. Las armaduras se componen de 4 redondos del 12 y estribos del 8 cada 20 cm. Fig. 1 en la viga de 200x300 mm, y 2 redondos del 25 en la cara inferior y dos

del 12 en la superior, con estribos del 8 cada 20, en la de 300x500 mm.

El esquema de armado de la viga de 200x300 mm es el que se muestra en las figuras 1 y 2.

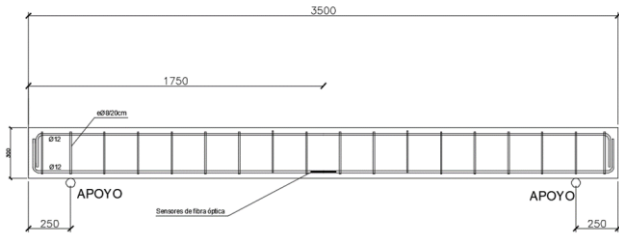


Fig. 1. Geometría de viga en estudio.

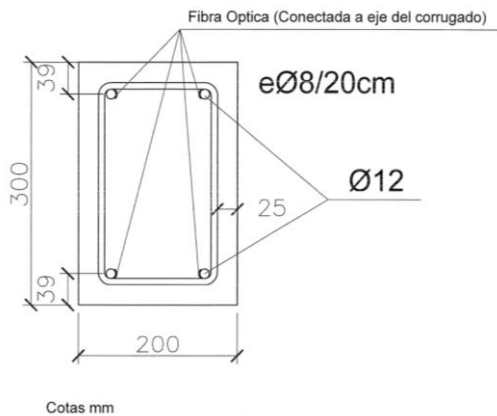


Fig. 2. Sección transversal de viga en estudio.

La viga se trae armada de taller, con la disposición de armaduras planteada (Fig. 3).



Fig. 3. Armado de viga.

Sensores de fibra óptica

Una red de Bragg en fibra es una microestructura que posee una longitud de unos 5 milímetros y que se inscribe en una fibra óptica estándar (Fig. 4).

La medida de la deformación en una red de Bragg en fibra es sencilla de determinar, ya que la distancia entre sus puntos de reflexión es siempre la misma. La longitud de onda que se

refleja coincide con la distancia entre dos puntos de reflexión. El resto de longitudes de onda se transmiten sin reflejarse o amortiguarse.



Fig. 4. Red de Bragg inscrita en fibra óptica.

Así, cuando la fibra se tracciona o se comprime, la red de Bragg puede medir la deformación en ese punto, ya que se produce un cambio en el periodo de la red y, por tanto, en su longitud de onda.

Al deformarse la fibra, cambia la distancia entre los puntos de reflexión, por lo que refleja una longitud de onda distinta.

De este modo, se determinan variaciones en la longitud de onda de Bragg mediante la ecuación 1

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \kappa * \epsilon \tag{1}$$

λ : longitud de onda de base de la red e Bragg (longitud de onda al principio de la medición).

$\Delta\lambda$: variación en la longitud de onda cuando se aplica una deformación a la red.

κ : factor k

ϵ : deformación



Fig. 5. Sensor de fibra óptica soldable.

Los sensores de fibra óptica son muy sensibles a la temperatura. Por efecto de esta, se dilata o se contrae, además de cambiar su índice de refracción. Esto hace que las lecturas del sensor de deformación no sean solo las debidas a la deformación por esfuerzos, sino también por temperatura.

Se va a utilizar una técnica de compensación de temperatura que consiste en instalar un sensor de temperatura cerca del sensor de deformación. Esto permite efectuar una compensación matemática, comparando los datos y restando los efectos de la temperatura.

Colocación de los sensores en la viga

Los sensores de fibra óptica a emplear son soldables. Sus dimensiones son mayores que el propio redondo sobre el que se

va a instalar, por lo que ampliamos la superficie soldando una chapa de acero (Fig. 5).



Fig. 6. Sensor de fibra óptica soldado en chapa de acero.

La Red de Bragg inscrita en el sensor tiene una longitud de 5 mm, ubicada en el centro del mismo. Se observa en la marca hecha con rotulador un pequeño abultamiento en el sensor, que pertenece a la ubicación de la Red de Bragg (Fig. 6).

Para la viga de 300x500, al ser el redondo del 25, tiene superficie suficiente para soldar el sensor en el propio redondo. En la figura 7 se observa el sensor directamente soldado en el redondo.



Fig. 7. Sensor de fibra óptica en redondo del 25.

Se han instalado dos sensores en los redondos inferiores de la viga, y un sensor de temperatura para realizar las compensaciones.

Los terminales de fibra óptica se dejan preparados para su conexión en una caja de registro embebida en la viga (Fig. 8).

Hormigonado de la viga

Para preservar los sensores de la agresividad del hormigonado tradicional, se va a utilizar un hormigón autocompactante. Este tipo de hormigón deberá utilizarse cuando se ejecuten elementos estructurales en obra.

El hormigón autocompactante es un hormigón capaz de fluir por el interior del encofrado, pasando entre las armaduras y consolidándose sin necesidad de ser vibrado, y sin sufrir la segregación de sus componentes.

Esta característica es fundamental a la hora de ejecutar el hormigonado de la pieza. El hormigón rellena todo el encofrado



Fig. 8. Terminales de fibra óptica en caja de registro embebida en la viga.

sin elementos agresivos que dañen a los sensores.

La empresa de control de calidad Euroconsult ha tomado muestras de la amasada que se ha utilizado para el hormigonado del elemento estructural (Fig. 9).

Se han extraído probetas para la determinación de la resistencia a flexotracción del hormigón según la norma UNE-EN 12390-5:2009, la resistencia a compresión según norma UNE-EN 12390-3:2009/AC:2011, y del módulo de elasticidad en compresión según UNE-EN 12390-13:2013.

La edad del hormigón en el momento de ser ensayadas las probetas era de 30 días.



Fig. 9. Toma de muestras.

Ensayo de la viga

Una vez hormigonada la viga, y pasados 30 días desde el mismo, se procede a ensayarla. Para ello, se ha colocado en un pórtico provisto de una célula de carga, un cilindro de carga, y un transductor de desplazamiento que nos dará información de la flecha real de la viga.

Se colocan unos cilindros tanto en los apoyos como en el centro del vano, para que la carga aplicada sea puntual (Fig. 10).



Fig. 10. Cilindro de carga, célula de carga y transductor de desplazamiento.

Los sensores de fibra óptica se unen al interrogador, que es el equipo que mide la deformación de la fibra óptica, y el transductor de desplazamiento y la célula de carga se unen a un traductor de señal para obtener valores de carga y flecha (Fig. 11).

Todo el conjunto se conecta a un ordenador, en el que, un software específico, traduce la información del interrogador y del transductor en medidas de carga, flecha y deformación.

Se han aplicado diferentes escalones de carga, de 10 a 40 KN, obteniendo las lecturas de flecha y deformación del acero en tiempo real.

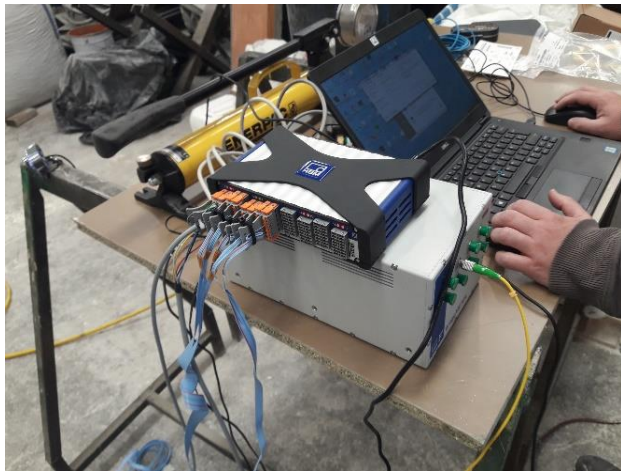


Fig. 11. Interrogador y traductor de señal.

III. RESULTADOS Y DISCURSIÓN

Los resultados obtenidos en el laboratorio, son los siguientes: Resistencia a flexotracción del hormigón 5.4 MPa, resistencia a compresión del hormigón, 54.6 MPa y módulo de elasticidad del hormigón 33.400 MPa.

Estos datos son tomados como base para los cálculos teóricos, con los que obtendremos los valores de deformación del acero objeto de este trabajo (EHE, 2010; Meseguer et al., 2009).

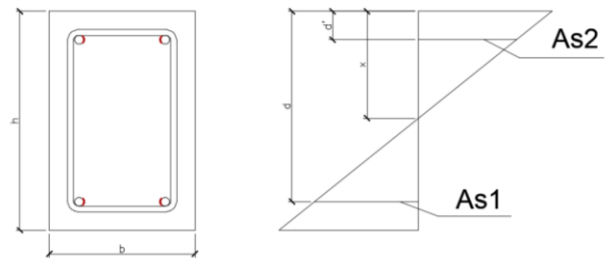


Fig. 12. Esquema de la sección, zona de tracción y compresión.

El comportamiento real de la viga de hormigón tiene dos fases. Una primera en la que el hormigón no ha fisurado, y una segunda en la que el hormigón ha fisurado.

El instante teórico en el que la pieza fisura, nos lo va a dar el momento de fisuración.

Es determinante en este estudio, la posición de la Fibra Neutra de la sección en cada instante, ya que determinará la tensión del acero en las barras traccionadas.

La estructura se va a calcular en servicio, y sin mayorar cargas, ya que estamos estudiando la realidad de lo que le ocurre a un elemento estructural.

Para la viga de 300x500 mm, el desarrollo teórico es similar. Con estas premisas, comenzamos la fase teórica. Para ello el esquema de la sección se puede ver en la figura 12.

Los datos generales de la viga se muestran en la tabla 1, y las áreas de armadura en tracción y compresión, y el factor n para la sección homogeneizada vienen dados en la tabla 2.

A. Características mecánicas de la sección

Sección bruta

Posición de la fibra neutra:

$$x_{bruta} = \frac{h}{2} \tag{2}$$

Momento de inercia de la sección bruta:

$$I_{bruta} = \frac{1}{12} * b * h^3 \tag{3}$$

Sección homogeneizada

Posición de la fibra neutra:

$$x_{homo} = \frac{A_b * x_b + A_{s1h} * d' + A_{s2h} * d}{A_{homo}} \tag{4}$$

Momento de inercia de la sección homogeneizada:

$$I_{homo} = I_b + A_b * (x_h - x_b)^2 + A_{s2h} * (x_h - d)^2 + A_{s1h} * (x_h - d')^2 \tag{5}$$

TABLA I
 DATOS GENERALES DE LA VIGA

L (m)	b (m)	h (m)	c (mm)	HORMIGÓN		ACERO	
				E _{cm} (Mpa)	f _{ctm} (Mpa)	f _{yk} (Mpa)	E _s (Mpa)
3	0,2	0,3	30	33400	5,4	500	210000

TABLA II
 ÁREAS DE ARMADURA EN TRACCIÓN Y COMPRESIÓN, Y FACTOR N PARA LA SECCIÓN HOMOGENEIZADA

d (cm)	d' (cm)	A _{s1} (cm ²)	A _{s2} (cm ²)	n
26,4	3,6	2,262	2,262	6,29

TABLA III
 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA SECCIÓN

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA SECCIÓN						
Sección bruta		Sección homogeneizada		Sección fisurada		
X _b (cm)	I _b (cm ⁴)	X _h (cm)	I _h (cm ⁴)	X _f (cm)	I _f (cm ⁴)	M _f (mkN)
15	45000	15	48110,56	5,26	7365,12	17,26

Sección fisurada

La posición de la fibra neutra en la sección fisurada vendrá dada por la ecuación 6:

$$x_{fis} = n * \rho_2 * \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) * \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 * \left(1 + \frac{\rho_1 * d'}{\rho_2 * d}\right)}{n * \rho_1 * \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^2}}\right] \quad (6)$$

Momento de inercia de la sección fisurada:

$$I_{fis} = n * A_{s2} * (d - x_{fis}) * \left(d - \frac{x_{fis}}{3}\right) + n * A_{s1} * (x_{fis} - d') * \left(\frac{x_{fis}}{3} - d'\right) \quad (7)$$

Momento de fisuración:

$$M_{fis} = \frac{I_{homo}}{(h - x_{homo})} * f_{ctm} \quad (8)$$

El valor de la flecha instantánea, lo obtendremos mediante el transductor de desplazamiento que se va a utilizar en los ensayos. Este, variará según esté la sección fisurada o no. Estos valores vienen dados por las siguientes expresiones.

Flecha instantánea para una carga puntual antes de fisurar la sección:

$$f = \frac{P * L^3}{48 * E * I_h} \quad (9)$$

Flecha instantánea para una sección fisurada:

En este caso, la inercia equivalente viene dada por la siguiente expresión:

$$I_e = \left(\frac{M_f}{M_a}\right)^3 * I_b + \left[1 - \left(\frac{M_f}{M_a}\right)^3\right] * I_f \leq I_b \quad (10)$$

donde M_f es el momento nominal de fisuración de la sección, que viene dado por la expresión

$$M_f = f_{ctm} * W_b \quad (11)$$

donde W_b es el módulo resistente de la sección bruta, que debe ser calculado antes de fisurar, según el libro del profesor Calavera, con la expresión para secciones rectangulares:

$$W_b = \frac{b * h^2}{6} \quad (12)$$

donde M_a es el momento flector máximo aplicado, para la combinación característica, a la sección hasta el momento en que se evalúe la flecha.

B. Estudio de flechas. Influencia de la fisuración real.

Utilizando la nomenclatura del profesor Calavera (2008), se distinguen dos estados, el Estado I, previo a la fisuración, y el Estado II, de pieza fisurada.

Para la viga de 200x300 mm, la fisuración comienza mucho antes de lo que marca, según los cálculos teóricos, el momento de fisuración (Fig. 13).

Con los datos teóricos obtenidos, la flecha de la viga, para los diferentes escalones de carga sigue el siguiente gráfico (Fig. 14).

Si analizamos las fisuras de la sección, y cuándo se producen, observamos que estas se han producido mucho antes del momento de fisuración obtenido por cálculo. Si evaluamos las flechas instantáneas con los datos de cuándo se han producido

realmente, los cálculos teóricos se adaptan mucho mejor a los obtenidos en la realidad.

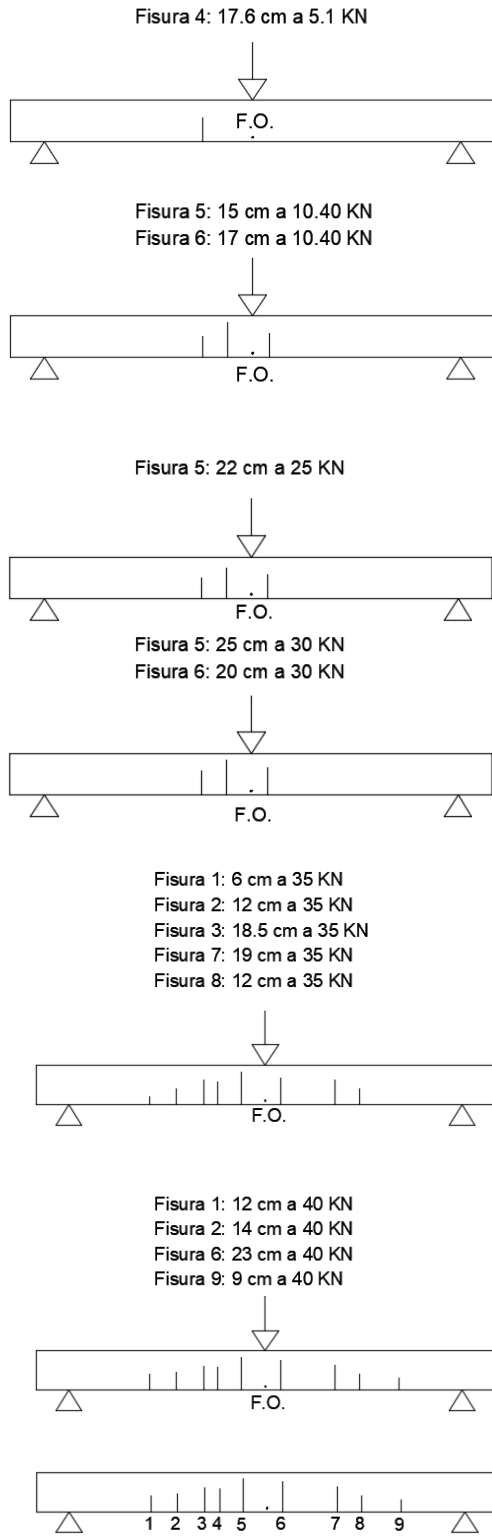


Fig. 13. Evolución de las fisuras en la viga.

En la figura 13 se observa que las fisuras más próximas al centro del vano se producen con una carga de 10,4 KN, y un

momento de 7,80 mKN, que dista mucho del valor teórico obtenido.

Aplicando la fórmula de Branson para la obtención de la inercia equivalente de la sección, y tomando la fisuración de la pieza en el momento de producirse, se observa cómo las curvas teóricas y reales se aproximan de una manera más realista a cómo se comporta la viga al aplicarle las diferentes cargas (Fig. 15).

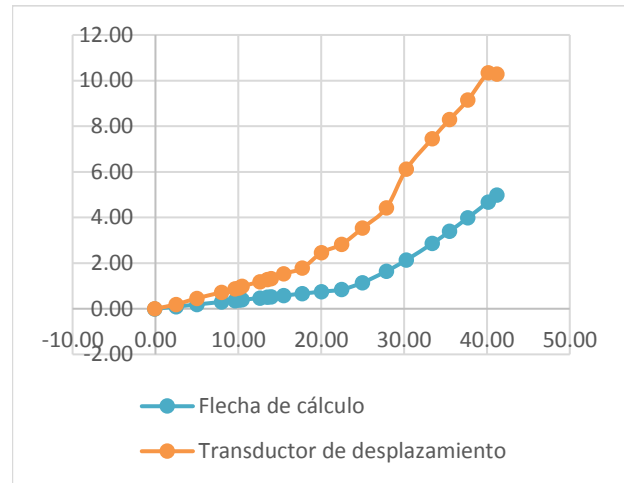


Fig. 14. Gráfico de flechas teóricas versus flechas reales.

En el instante previo a la fisuración del hormigón, deducimos, a la vista de los resultados, que para una viga simplemente apoyada, de sección rectangular, la flecha real y la de cálculo son muy diferentes.

A la vista de estos datos, existe una relación entre la inercia bruta y la equivalente, que aproximan más estas flechas. Esta relación es un factor que multiplica la flecha de cálculo, y que tiene la expresión

$$w = 2 - \frac{I_b - I_e}{I_e} > 1 \tag{13}$$

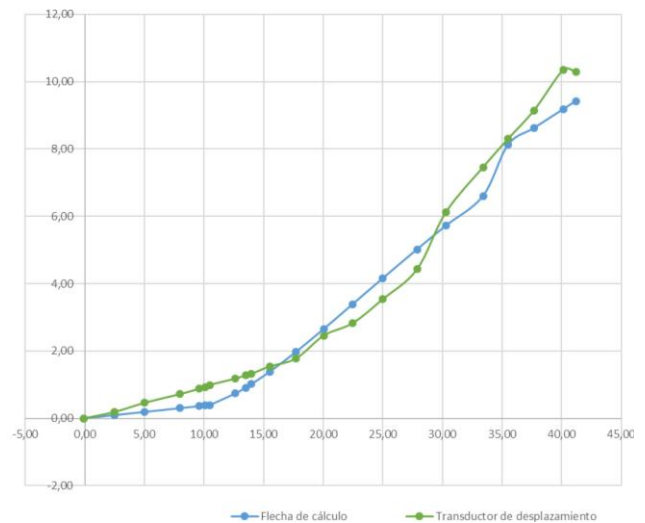


Fig. 15. Flecha obtenida con momento de fisuración real.

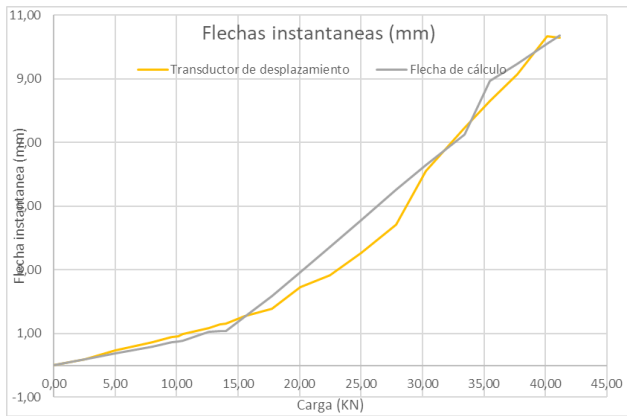


Fig. 16. Flecha con momento de fisuración real y aplicando el factor w.

Y si $w < 1$:

$$w = 1 + \left(0.1 * \frac{A_{s2}}{A_{s1}} \right) \text{ si } w < 1 \quad (14)$$

Aplicando este factor, las flechas se aproximan más a la realidad (Fig. 16). Dado que la expresión mencionada anteriormente del factor “w” viene de observar cómo se comporta la viga respecto a las cargas aplicadas, veamos los resultados obtenidos en la viga de 300x500 mm, para corroborar esta expresión.

Los datos generales de la viga se muestran en la tabla 4, las áreas de armadura en tracción y compresión, y factor n para la sección homogeneizada en la tabla 5 y las características mecánicas de la sección en la tabla 6.

Aunque el momento de fisuración obtenido por cálculo es de 123,52 mK N, el momento de fisuración real observado es de 44 mkN.

La flecha instantánea para el momento de fisuración obtenido por cálculo es, para los diferentes escalones de carga, la que se

puede ver en la figura 17 y la flecha instantánea con el momento de fisuración de 44 mkN y aplicando el factor “w” se puede ver en la figura 18.

C. Deformaciones

Al igual que con las flechas, se ha realizado el estudio de las deformaciones con los mismos elementos estructurales.

En la viga de 300x500 mm, además, se ha embebido un sensor que mide deformaciones en el hormigón, y que he llamado sensor embebido. Su ubicación coincide con la posición de la barra 2.

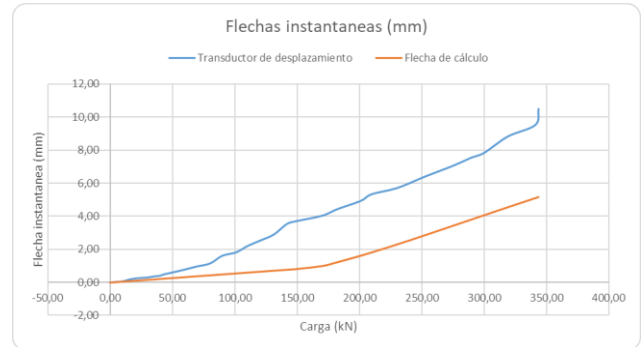


Fig. 17. Gráfico de flechas teóricas versus flechas reales.

En el análisis de las vigas en estudio, vamos a distinguir tres etapas. La Etapa I, en la que las vigas no han fisurado, la Etapa IIa, en la que las vigas han comenzado a fisurar, pero no alcanzan la profundidad de fibra neutra final, y la Etapa IIb, en la que la fibra neutra ha llegado a su profundidad límite.

El esquema de deformaciones y tensiones de las secciones queda definido en la figura 19. No se toma en cuenta la colaboración de la armadura comprimida.

TABLA IV
 DATOS GENERALES DE LA VIGA

L (m)	b (m)	h (m)	c (mm)	HORMIGÓN		ACERO	
				Ecm (Mpa)	fctm (Mpa)	fyk (Mpa)	Es (Mpa)
3	0,3	0,5	30	33053,04	8,9	500	210000

TABLA V
 ÁREAS DE ARMADURA EN TRACCIÓN Y COMPRESIÓN, Y FACTOR N
 PARA LA SECCIÓN HOMOGENEIZADA

d (cm)	d' (cm)	As1 (cm2)	As2 (cm2)	n
45,75	4,25	9,8175	2,262	6,35

TABLA VI
 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA SECCIÓN

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA SECCIÓN						
Sección bruta		Sección homogeneizada		Sección fisurada		Mf (mkN)
Xb (cm)	Ib (cm ⁴)	Xh (cm)	Ih (cm ⁴)	Xf (cm)	If (cm ⁴)	
25	312500	25,51	339893,77	11,61	89127,84	123,52

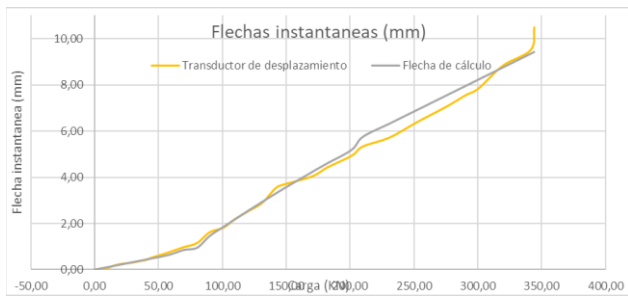


Fig. 18. Flecha con momento de fisuración real y aplicando el factor w.

Etapa I. Vigas no fisuradas

En esta etapa, los cálculos se realizan con la fibra neutra en el centro de gravedad de la sección. La resultante del hormigón en compresión es

$$U_{c2} = \frac{\sigma_2 x b}{2} \tag{15}$$

y la resultante del hormigón y del acero en tracción son respectivamente

$$U_{c1} = \frac{\sigma_1 (h - x) b}{2} \tag{16}$$

$$U_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} \tag{17}$$

Los datos geométricos de la viga de 200x300 mm, la posición de la fibra neutra (X) y el armado de tracción son los indicados en la Tabla 7, y para la viga de 300x500 mm son los que se muestran en la tabla 8.

Haciendo sumatorio de fuerzas horizontales obtenemos:

$$U_{c2} = U_{c1} + U_{s1} \tag{18}$$

con lo cual tenemos

$$\frac{\sigma_2 x b}{2} = \frac{\sigma_1 (h - x) b}{2} + A_{s1} \sigma_{s1} \tag{19}$$

La tensión del hormigón es:

$$\sigma_2 = \frac{Mx}{I} \tag{20}$$

y la del acero

$$\sigma_1 = \frac{M(h - x)}{I} \tag{21}$$

Sustituyendo en la ecuación (19) obtenemos la tensión del acero traccionado:

$$\frac{-Mh^2 b + M2hxb}{2IA_{s1}} = \sigma_{s1} \tag{22}$$

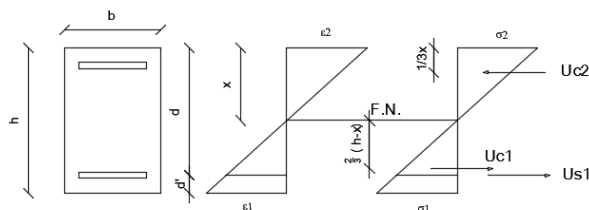


Fig. 19. Esquema de deformaciones y tensiones.

TABLA VII
DATOS DE LA VIGA DE 200x300 mm

L (m)	b (m)	h (m)	X (m)	As1 (cm2)	As2 (cm2)
3	0,2	0,3	0,15	2,262	2,262

TABLA VIII
DATOS DE LA VIGA DE 300x500 mm

L (m)	b (m)	h (m)	X (m)	As1 (cm2)	As2 (cm2)
3	0,3	0,5	0,25	9,8175	2,262

La deformación de cada barra de acero viene dada entonces por la expresión:

$$\epsilon = \frac{\sigma_s}{E} \tag{23}$$

Los valores para la viga de 200x300 mm se pueden ver en la figura 20 y para la viga de 300x500 mm en la figura 21.

Se observa en ambos casos que la fibra neutra se desplaza aún con la pieza sin fisurar. Esta deducción viene provocada porque el acero, aun con la viga sin fisurar, se deforma. Por los datos obtenidos, la fibra neutra se desplaza alejándose de la zona comprimida.

Etapa IIa. La viga comienza a fisurar.

En el centro del vano la viga no se ha fisurado. Como se observa en la siguiente figura, las fisuras han aparecido a ambos lados del eje de la pieza, con una carga de 10,4 KN, muy por debajo de lo indicado en el cálculo teórico. Estas fisuras marcan

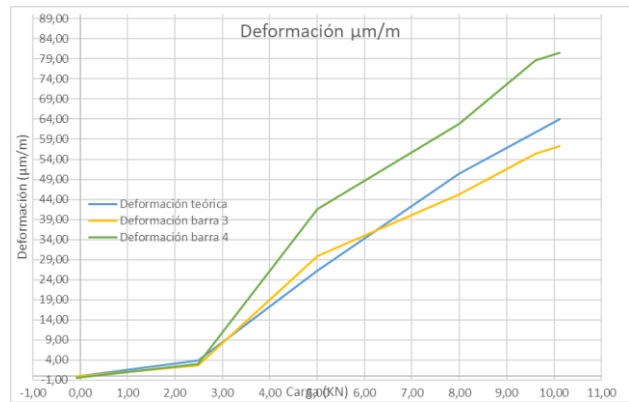


Fig. 20. Deformaciones del acero etapa I viga de 200x300 mm.

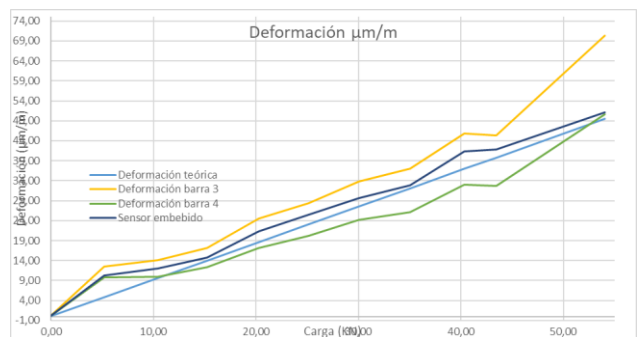


Fig. 21. Deformación del acero etapa I viga de 300x500 mm.

la posición de la fibra neutra, y, además, al existir hormigón sin fisurar entre ellas, éste contribuirá, en una proporción k a la deformación del paquete de tracciones (Figs. 22, 23 y 24).

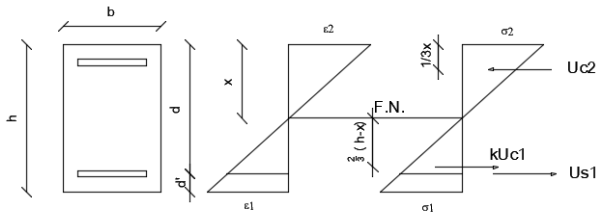


Fig. 22. Esquema de deformaciones y tensiones etapa IIa.

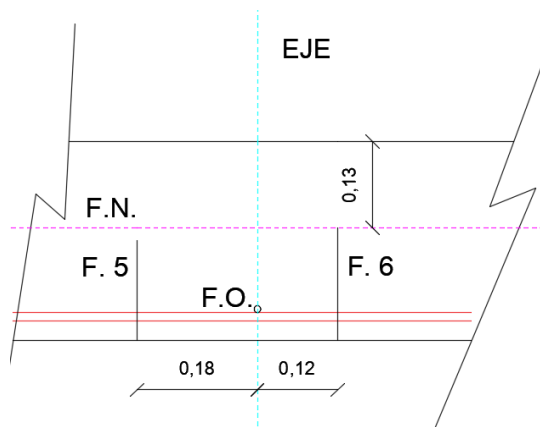


Fig. 23. Posición de fisuras y fibra neutra en viga de 200x300 mm.

La inercia de la pieza va disminuyendo según se incrementa la carga, según la fórmula de Branson, obteniendo la inercia equivalente:

$$I_e = \left(\frac{M_f}{M_a}\right)^3 * I_b + \left[1 - \left(\frac{M_f}{M_a}\right)^3\right] * I_f \leq I_b \quad (24)$$

Con la inercia equivalente obtenida, aplicamos la fórmula que determina la tensión del acero en tracción, según el libro de Hormigón Armado, de Jiménez Montoya:

$$\sigma_s = n \frac{M(d - x_f)}{I_f} \quad (25)$$

En nuestro caso, como no se ha llegado a alcanzar la x_{fis} , utilizaremos la profundidad real de la fibra neutra, y su inercia equivalente asociada.

Igual que en el caso anterior, obtenemos la tensión de cada barra, y, a partir de esta, su deformación:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_s}{E} \quad (26)$$

Además, y citando de nuevo al profesor Calavera (Calavera, 2008), “Entre labios de fisura, el acero desarrolla él solo todo el esfuerzo de tracción, pero, entre fisuras, se produce el anclaje de la armadura en el hormigón y se transfiere a esta parte de la fuerza de tracción del acero. Si la tracción del hormigón iguala a su resistencia a tracción, se forma una nueva fisura”.

El valor EI es mínimo en las fisuras, pero entre fisuras se produce un incremento de este valor, de lo que se deduce que, siendo constante el valor de E , la variación en los cálculos la proporciona el momento de inercia de la sección.

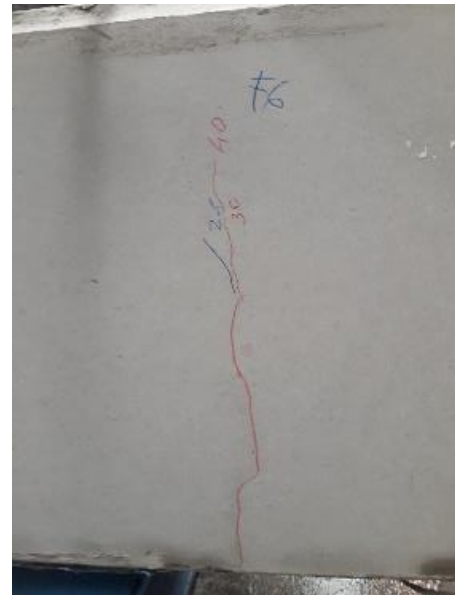


Fig. 24. Imagen de fisura 6.

Tanto en la viga de 200x300 como en la de 300x500 mm, estamos en la situación indicada por el Profesor Calavera, ya que el punto que estamos analizando se encuentra entre fisuras.

Se establece un valor “ k ” que va a determinar la contribución del hormigón en la resistencia de la viga a estudiar, y que, variará en función de la proximidad de las fisuras a la X_{fis} , momento en el que k se hará 0.

El valor de k varía en función de la inercia equivalente de la viga. A medida que la inercia equivalente se aproxima a la inercia fisurada, el valor de k disminuye, hasta desaparecer. En el momento en el que la contribución del hormigón desaparece, $k=0$, la fibra neutra se encontrará en su x_{lim} , y tan solo trabajará el acero en tracción. Tras haber analizado los resultados obtenidos en la práctica, podemos deducir que se cumple la siguiente expresión para obtener el valor de k y así obtener un valor numérico de la contribución del hormigón entre fisuras

$$k = \frac{I_e * 0.5}{I_b} \leq 0.5 \quad (27)$$

Además, se observa que cuando la relación entre la inercia equivalente y la fisurada es inferior al 10%, la contribución del hormigón desciende bruscamente, cuantificándolo en un 35% de pérdida. Así pues

$$\frac{I_e}{I_f} < 0.1 \rightarrow k = 0.35 * \left(\frac{I_e * 0.5}{I_b}\right) \quad (28)$$

Con este parámetro k , la expresión de la tensión del hormigón en la zona traccionada será

$$\sigma_{ct} = k * \frac{M * (h - x)}{I_e} \tag{29}$$

Los resultados obtenidos para la viga de 200x300 mm son los mostrados en la figura 25, y para la viga de 300x500 mm los de la figura 26.

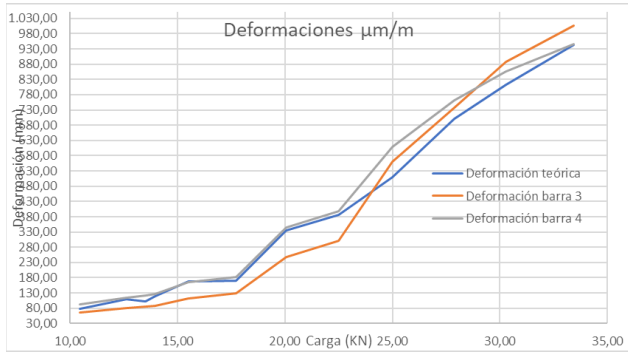


Fig. 25. Deformaciones del acero en la etapa IIa (viga 200x300 mm).

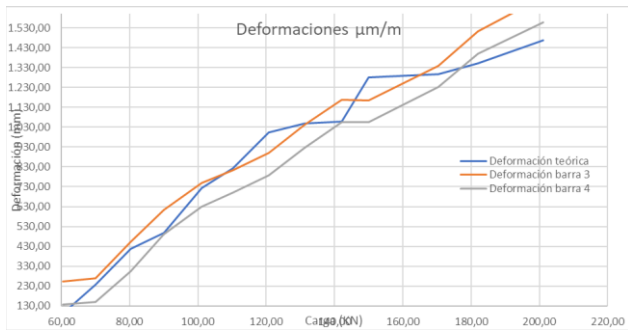


Fig. 26. Deformaciones del acero etapa IIa (viga de 300x500 mm).

Etapa IIb. La viga alcanza su X_{fis}

Cuando la viga alcanza su momento de fisuración, y la Fibra Neutra se ha desplazado a su posición final, el esquema tensional y de deformación es el mostrado en la figura 27. En este caso, el hormigón no colabora en tracción, tan solo lo hace comprimido.

En esta fase, según el libro de Jiménez Montoya, de Hormigón Armado, la expresión de la tensión del hormigón para la viga fisurada tiene la forma

$$\sigma_{sup} = \frac{M * x_f}{I_f} \tag{30}$$

Y la expresión para la tensión del acero traccionado será

$$\sigma_s = n * \frac{M * (d - x_f)}{I_f} \tag{31}$$

Una vez obtenido el valor de la tensión del acero, su deformación viene dada por la expresión

$$\varepsilon = \frac{\sigma_s}{E} \tag{32}$$

Los valores de la deformación del acero son los que se muestran a en la figura 28.

Se observa que, a partir de la carga de 37,7 kN, el acero plastifica, ya que ha alcanzado su límite elástico.

Una vez alcanzado el límite elástico, o bien el acero alcanza su rotura, o es el hormigón comprimido el que lo alcanza.

Para los valores de cargas que se han aplicado, no se produce rotura ni del acero ni del hormigón. La rotura del hormigón se produce cuando se alcanza una deformación de 0,0035 en la fibra extrema, y la del acero cuando este alcanza el 1%.

Ninguno de estos dos valores se alcanza, luego no se producirá rotura ni del hormigón, ni del acero Tabla 7.

Es evidente, que la deformación por cálculo dista mucho de la deformación real de las barras.

Vamos a analizar la viga de 300x500mm, para observar los resultados obtenidos (Fig. 29).

Se observa que, para cargas cercanas al límite elástico del acero, la deformación está en rango. Pero una vez que se supera el límite elástico, la deformación teórica supera a la real.

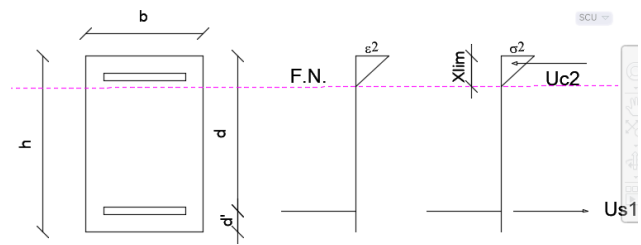


Fig. 27. Esquema de deformaciones y tensiones etapa IIb.

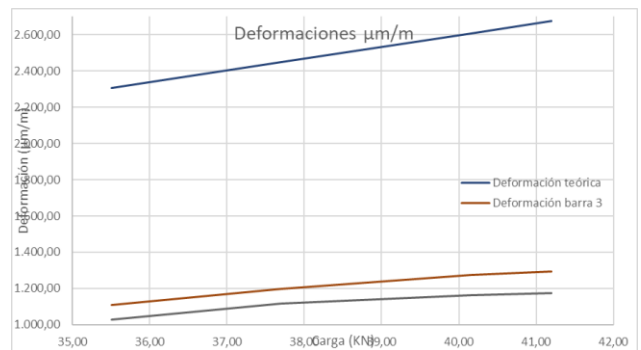


Fig. 28. Deformación del acero etapa IIb viga de 200x300 mm.

IV. CONCLUSIONES

Se han ensayado dos vigas de sección rectangular a las que se han embebido sensores de fibra óptica para analizar la deformación real del acero al someterlas a diferentes escalones de carga. Además, se han evaluado las flechas instantáneas mediante la implementación de un transductor de desplazamiento.

Respecto a las flechas instantáneas, se ha observado que los resultados obtenidos mediante las fórmulas de resistencia de materiales tradicionales, distan mucho de la realidad obtenida en ambas vigas.

TABLA IX
 VALORES DE DEFORMACIÓN A ROTURA DE ACERO Y HORMIGÓN EN VIGA DE 200X300 mm

CARGA KN	MOMENTO Mkn	TENSIÓN DE SERVICIO Mpa	INERCIA FISURADA cm ⁴	DEFORMACIÓN TEÓRICA μm/m	DEFORMACIÓN BARRA 3 μm/m	DEFORMACIÓN BARRA 4 μm/m	Posición FN	DEFORMACIÓN HORMIGÓN	DEFORMACIÓN ACERO
35,51	26,63	484,27	7.365,12	2.306,03	1.110,22	1.029,10	51,00	0,00055	0,00231
37,70	28,28	514,13	7.365,12	2.448,25	1.198,59	1.117,98	51,00	0,00059	0,00245
40,15	30,11	547,54	7.365,12	2.607,35	1.272,85	1.163,29	51,00	0,00062	0,00261
41,20	30,90	561,86	7.365,12	2.675,54	1.294,05	1.175,22	51,00	0,00064	0,00268

La flecha de cálculo de la viga es muy inferior a la real obtenida. Con los datos obtenidos, se ha deducido una expresión que aproxima mucho más las flechas a la realidad. Es el factor w, cuya expresión es

$$w = 2 - \frac{I_b - I_e}{I_e} > 1 \tag{33}$$

Y si w < 1

$$w = 1 + \left(0.1 * \frac{A_{s2}}{A_{s1}} \right) \text{ si } w < 1 \tag{34}$$

Este factor w aumenta el valor de la flecha de cálculo obtenida por el método tradicional, y acerca mucho más el valor de la flecha a la realidad.

Otro tema observado en ambos casos es la aparición de las primeras fisuras. Estas aparecen mucho antes de lo que dice el cálculo. La aparición de las primeras fisuras es un tema fundamental para poder entender el comportamiento real de las estructuras. Mediante los sensores de fibra óptica, se ha observado cómo se produce un cambio brusco en la deformación del acero. Es evidente que este cambio brusco se traduce en una mayor deformación de este, como consecuencia de la fisuración del hormigón.

Así pues, a la vista de los resultados obtenidos, podemos conocer mediante los sensores de fibra óptica embebidos, el momento preciso en que la viga fisura, y he desarrollado una expresión que acerca los valores de flechas instantáneas reales a los de cálculo.

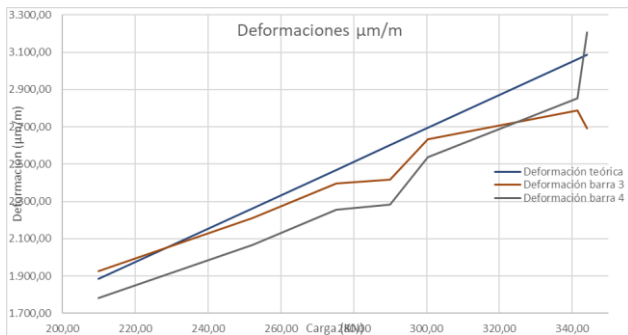


Fig. 29. Deformación del acero etapa IIb viga de 300x500 mm.

Respecto al estudio de las deformaciones, existen dos etapas. La primera, en la que la viga no ha fisurado, y la segunda, en la que la viga ha fisurado. Dentro del estado de fisuración, existen

dos subetapas, la primera, en la que la viga comienza a fisurar, hasta que alcanza la inercia fisurada, y en la que el hormigón colabora en tracción entre fisuras, afectado por un coeficiente k, y la segunda, en la que la viga ha alcanzado la profundidad de la fibra neutra final.

La inercia equivalente formulada por Branson es determinante en los estudios tanto de flecha instantánea como de deformación del acero en la etapa IIa. De hecho, la pérdida de inercia de la sección hasta alcanzar la inercia fisurada se aproxima mucho a la inercia equivalente formulada por Branson.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el principal problema observado es conocer el momento en el que la sección fisura, ya que, aun cuando se tienen valores de laboratorio en los que se define la resistencia del hormigón a flexotracción, la pieza ha fisurado antes de alcanzar esta resistencia.

Los sensores de fibra óptica embebidos nos dan información precisa del momento en que se comienza a fisurar la viga.

Con la viga en sus instantes iniciales, antes de fisurar, las fórmulas de equilibrio de fuerzas entre tracciones y compresiones dan buenos resultados entre teoría y realidad.

Cuando la viga comienza a fisurar, es cuando debemos tener en cuenta, porque es determinante, la contribución del hormigón entre fisuras.

Esta contribución ya ha sido expuesta por el Profesor Calavera, y en vista de los resultados prácticos obtenidos, hemos llegado a obtener una expresión que nos diga cuánto contribuye el hormigón en tracción.

El valor de k varía en función de la inercia equivalente de la viga. A medida que la inercia equivalente se aproxima a la inercia fisurada, el valor de k disminuye, hasta desaparecer. En el momento en el que la contribución del hormigón desaparece, k=0, la fibra neutra se encontrará en su x_{lim}, y tan solo trabajará el acero en tracción. Así, el valor de k puede expresarse de la siguiente forma

$$k = \frac{I_e * 0.5}{I_b} \leq 0.5 \tag{35}$$

Además, he observado que cuando la relación entre la inercia equivalente y la fisurada es inferior al 10%, la contribución del hormigón desciende bruscamente, cuantificándolo en un 35% de pérdida:

$$\frac{I_e}{I_f} < 0.1 \rightarrow k = 0.35 * \left(\frac{I_e * 0.5}{I_b} \right) \tag{36}$$

Según la sección va perdiendo inercia, el factor k penaliza la contribución del hormigón entre fisuras, hasta alcanzar la inercia fisurada, momento en el que el factor k se hace cero, y deja de existir contribución del hormigón.

Mediante estas expresiones, podemos decir que la realidad y el cálculo teórico se aproximan.

Una vez que las fisuras han alcanzado su límite, he observado que en la viga de 200x300 mm, el valor teórico de deformación es muy superior al valor real obtenido con los sensores de fibra óptica.

Puede haber sucedido que, dado que los sensores se soldaron a unas chapas, y que estas se soldaron a los redondos del 12, haya podido distorsionarse el resultado. Por eso, en la viga de 300x500 mm, se soldaron los sensores a las propias barras del 25, y cierto es que los resultados son más satisfactorios.

También cabe reseñar que, en este punto, el acero ha superado su límite elástico, por lo que su comportamiento ya no es lineal, y puede haber influido en los resultados obtenidos.

Aunque estas vigas ensayadas se han llevado al límite, también debemos entender que salvo un fallo grave en la estructura, no se llegará a alcanzar estos niveles de deformación.

REFERENCIAS

- Barbosa, C. (2019) «Optical Fiber Sensors vs. Conventional Electrical Strain Gauges for Infrastructure Monitoring Applications.» HBM FiberSensing, [En línea]. Available: https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/local/usa/white_paper_optical_infrastructure_monitoring.pdf.
- Bremer, K., Wollweber, M., Weigand, F., Rahlves, M., Kuhne, M., Helbig, R. y Roth, B. (2016) «Fibre optic sensors for the structural health monitoring of building structures» de 3rd International Conference on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering.
- Calavera, J. (2008). Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón. Tomo II, Madrid: Intemac.
- Chen, Z., Zheng, D., Shen, J., Qiu, J. y Liu, Y. (2019) «Research on distributed optical-fiber monitoring of biaxial-bending structural deformations» Measurement, pp. 462-471.
- Cheng, H., Yi, Z., Guo, L., Meng, Z. y Zi, L. (2017) «Recent progress of using Brillouin distributed fiber optic sensors for geotechnical health monitoring.» Sensors and Actuators A: Physical, pp. 131-145.
- Das, S. y Purnachandra, S. (2018). «A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures» Measurement, pp. 68-90.
- EHE (2010). M. d. F. G. d. España, EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural, Madrid: Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento.
- Fernando, C., Bernier, A., Banerjee, S., Kahandawa, G y Eppaarchchi, J. (2017) «An investigation of the use of embedded FBG sensors to measure temperature and strain inside a concrete beam during the curing period and strain measurements under operational loading.» de 6th Asia Pacific Workshop on Structural Health Monitoring.
- Kesavan, K., Ravisankar, K., Parivallal, S., Sreeshylam, P. y Sridhar, S. (2010). «Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete» Measurement, pp. 157-163.
- Kim, S.W. (2017). «Characteristics of strain transfer and the reflected spectrum of a metal-coated fiber Bragg grating sensor.» *Optics and Lasers in Engineering*, pp. 83-93.
- Leung, C. (2001). «Fiber optic sensors in concrete: the future?» NDT&E international, pp. 85-94.
- Meseguer, Á. G., Morán, F., y Arroyo, J. C. (2009). Jiménez Montoya Hormigón Armado, Barcelona: Gustavo Gili, S.L.
- Sanchez, I., Ait-Salem, O., Huerta, M. C. y Pozhoilova, N. (2016). «Cracking Study of a Reinforced Concrete Beam» de XV Portuguese Conference on Fracture, Paço de Arcos, Portugal.
- Sun, Y.J., Zhang, D., Shi, B., Tong, H.J., Wei, G.Q. y Wang, X. (2014). «Distributed acquisition, characterization and process analysis of multi-field information in slopes» Engineering Geology, pp. 49-62.
- You, R., Ren, L. y Song, G. (2019) «A novel fiber Bragg grating (FBG) soil strain sensor.» Measurement, pp. 85-91.
- Zheng, Y., Zhu, Z.W., Li, W.J., Gu, D.M. y Xiao, W. (2019) «Experimental research on a novel optic fiber sensor based on OTDR for landslide monitoring» Measurement, pp. 1-9.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.