

COMPORTAMIENTO A FLUENCIA DE VIGAS DÚO Y VIGAS DÚO REFORZADAS (GFRP) DE *POPULUS X EUROAMERICANA I-214*, ANTE BAJOS NIVELES DE CARGA

CREEP BEHAVIOR OF *POPULUS X EUROAMERICANA I-214* DUO GLUELAM AND GFRP-REINFORCED DUO GLUELAM, UNDER LOW LOAD LEVELS

J. A. Balmori ⁽¹⁾, L. Morillas ⁽¹⁾, L. Acuña, ⁽¹⁾ (P), L. A. Basterra ⁽¹⁾

(1) Grupo de Investigación Reconocido en Estructuras y Tecnología de la Madera. Universidad de Valladolid (España)
Dirección de contacto: balmori@arq.uva.es; (P) Presentador

Código de identificación: T6-38

Resumen

El objetivo de este trabajo es la puesta a punto y el empleo de una metodología para el estudio del comportamiento a fluencia de vigas dúo de madera de *Populus x euroamericana I-214* y vigas dúo de la misma madera, reforzadas internamente con una lámina de GFRP. Para ello, se realizaron ensayos no destructivos a flexión de 2 vigas dúo reforzadas con GFRP y 2 vigas dúo testigo (sin refuerzo) de 2,5 m de longitud, bajo la aplicación a largo plazo de una carga constante de 10 kN, según las normas UNE-EN 380 y UNE-EN 408. Las vigas se instrumentaron simultáneamente con extensómetros LVDT y bandas extensométricas, monitorizando la deformación durante toda la duración del ensayo. Los ensayos se realizaron en laboratorio bajo condiciones ambientales controladas y monitorizadas, con temperatura (20°C) y humedad (65%HR) relativamente constantes, que se corresponden con un valor próximo al 12% de humedad en la madera y son asimilables a Clase de servicio 1 (EC-5). Se midieron los comportamientos bajo estas condiciones de las vigas dúos reforzadas y testigos, y se comparan y discuten los efectos que supone la incorporación de refuerzos GFRP frente a los fenómenos de fluencia.

Palabras clave: ensayos de fluencia; *Populus x euroamericana I-214*; viga dúo; viga dúo reforzada con GFRP

Abstract

The objective of this work is the development of a methodology for study the creep behavior of duo timber beams of Populus x euroamericana I-214, and duo timber beams of the same wood, internally reinforced with a GFRP sheet. Non-destructive tests were performed by bending 2 GFRP reinforced duo timber beams and 2 duo unreinforced timber beams. Beams were 2.5 m long and carried a long-term constant load of 10 kN, following UNE-EN 380 and UNE-EN 408 standards. Instrumentation of the experiment consists in LVDT extensometers and strain gages, monitoring deflection and strain during the test period. Tests were conducted in a laboratory under controlled environmental conditions, with temperature (20°C) and humidity (65% RH) relatively constant, corresponding to wood moisture content next to 12%. This ambient condition is comparable to service class 1 (EC-5). We obtain structural behavior under these conditions, and compare and discuss the effects of incorporating GFRP reinforcements on creep phenomena.

Keywords: creep testing; *Populus x euroamericana I-214*; duo glulam; GFRP-reinforced duo glulam

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los materiales utilizados en estructuras presentan un comportamiento elástico, al menos en una fase inicial, deformándose ante la aplicación de una carga y recuperando su estado inicial tras la retirada de la misma. La madera, sin embargo, se comporta de modo visco-elástico, debido a que sólo cumple este comportamiento elástico puro para duraciones de carga instantáneas o cortas, adquiriendo deformaciones no recuperables al someterla a cargas de larga duración, pese a que su intensidad se mantenga constante e invariable. Este comportamiento, denominado fluencia o deformación reológica, es muy conocido (Timber engineering)[1] y ha sido ampliamente investigado (Morlier 1994)[2]. Especialmente influyente en el estudio de este fenómeno han sido las investigaciones desarrolladas por Wood (1951)[3], y la modelización de este comportamiento quedó representado en el diagrama conocido como “curva de Madison”. En él se describe la relación resistencia-duración de la carga, a partir de probetas libres de defectos y de pequeñas dimensiones. En la década de los años ‘70, Madsen (1973)[4] introdujo una nueva metodología de ensayo, basada en la sustitución de probetas libre de defectos por piezas de tamaño y calidad comercial, obteniendo modelizaciones más precisas y reales. Los resultados han sido tenidos en consideración en las normativas de madera más modernas, como el Eurocódigo-5 [5] o el CTE-SE-M [6], aplicando coeficientes de corrección (K_{mod} , k_{def}) sobre la resistencia característica de la madera, en función de la duración de la carga y de la clase de servicio.

No obstante, el comportamiento de la madera en colaboración con refuerzos de materiales polímeros (FRP) está escasamente investigado. A partir de la década los ‘90 del s. XX, los ensayos de fluencia se centraron sobre los nuevos materiales industrializados de madera (tableros, vigas laminadas, microlaminadas, refuerzos FRP, etc.) con el fin de conocer con precisión su comportamiento a largo plazo. En este sentido, es interesante el estudio de Ranta-Maunus et al. (1991) [7] realizado sobre diversas tipologías de maderas estructurales ensayadas a fluencia, tanto por los resultados obtenidos como, sobre todo, por su metodología de ensayo contrastada y fiable. En esta misma época, Plevris y Triantafillou (1995) [8] ensayaron piezas de madera reforzadas inferiormente con láminas de FRP de varios tipos; y concluyeron que el comportamiento de las piezas estructurales de madera reforzadas era, básicamente, semejante al de la madera sin reforzar. La mejora aportada por el refuerzo FRP se presentaba bajo condiciones ambientales de humedad y temperatura variables, reduciendo la fluencia de las piezas reforzadas en comparación con piezas sin reforzar. Siguiendo esta línea, Tingley et al. (1996) [9] realizaron una monitorización de un puente de reciente construcción con madera reforzada con FRP. Las conclusiones de este ensayo fueron la no apreciación de fenómenos de fluencia significativos sobre las piezas reforzadas, y una mayor correlación entre las flechas calculadas en el proyecto y las sufridas durante su monitorización. Davids et al. (2000) [10] llevaron a cabo un ensayo a largo plazo en laboratorio con 12 vigas madera laminada de pino Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), de 7 m, y con tres tipos de refuerzos FRP. El resultado obtenido muestra que el refuerzo FRP, si bien no impide la fluencia de la viga de madera reforzada, sí que redujo su efecto de forma significativa. Dentro de esta línea de investigación, André (2006) [11] planteó, en su tesis doctoral, la comparación de la mejora de las características resistentes de piezas estructurales de madera reforzadas con FRP. Finalmente, Yahyaei-Moayyed et al. (2011) [12] investigaron en profundidad el comportamiento de fluencia de las piezas de madera estructural reforzadas con FRP. Los resultados obtenidos mostraron que, si bien los refuerzos de FRP utilizados no eliminan los procesos de fluencia sufridos por la madera, sí fueron capaces de reducir significativamente su entidad. Sin embargo, lo realmente interesante de este artículo, además de sus conclusiones, es la metodología empleada en los ensayos.

El objetivo de este trabajo es realizar poner a punto y emplear una metodología de ensayo específica para conocer la deformación a largo plazo de vigas de madera *Populus x euroamericana* I-214, reforzadas con GFRP, y su recuperación posterior ante el cese de la carga, comparándola con el comportamiento de las vigas semejantes, sin reforzar.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se han utilizado piezas de madera sana, con calidad visual equivalente a ME-1 (UNE 56544:2011 [13]), de la especie *Populus x euroamericana I-214*. La fabricación de las vigas dúo se realizó en un taller carpintero, utilizando para su encolado resina epoxi Sikadur-30. Se fabricó un lote de 10 vigas dúo de chopo sin refuerzo (testigos), y un segundo lote de otras 10 vigas dúo reforzadas con bandas rígidas de fibra de vidrio UNI-2400 gr/m², con sección aproximada de 80x140 mm (Figura 1:) y 2,5 m de longitud.

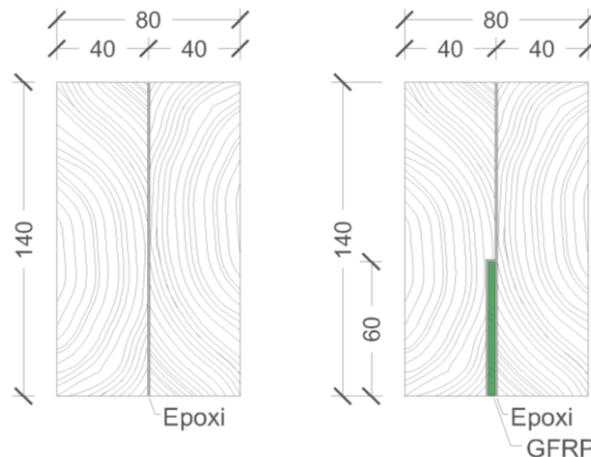


Figura 1: Sección de vigas dúo testigo (izq.) y vigas dúo reforzadas (dcha.)

De cada lote, se emplearon 5 vigas en ensayos previos de ajuste y control de la monitorización, realizados en una máquina universal de ensayos, y, de las restantes, se seleccionaron 2 vigas de cada lote para el estudio de la fluencia, reservando el resto.

Los ensayos fueron realizados en laboratorio, bajo condiciones ambientales controladas y monitorizadas, con temperatura ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) y humedad ($65 \pm 5\%$ HR), relativamente constantes, que se corresponden con un valor próximo al 12% de humedad de equilibrio en la madera (Kollman 1957) [14] y son asimilables a Clase de uso 1 (CTE-SE-M 2006)¹. La monitorización de las condiciones ambientales del laboratorio se realizó con un termohigrómetro marca TESTO, modelo 635, compuesto por tres sondas de temperatura y humedad inalámbricas y un sistema de adquisición central con memoria propia. Para mantener la humedad ambiental se utilizó un vaporizador comercial.

Antes de los ensayos, se mantuvieron las vigas bajo tales condiciones ambientales controladas, hasta alcanzar el equilibrio higroscópico. Finalmente, al inicio de los ensayos se determinaron las dimensiones exactas de las piezas, y su temperatura y humedad (Tabla 1:); esta última por el método de la resistencia eléctrica (UNE-EN 13183-2:2002 [15]), utilizando un xilohigrómetro de resistencia, marca PROTIMETER mod. Surveymaster BLD5360, con una resolución de medida del 0,1%.

Tabla 1: Dimensiones, temperatura y contenido de humedad de las piezas ensayadas

Especie	Viga	Dimensiones (mm)	Humedad (%)	Temperatura (°C)
<i>Populus x euroamericana I- 214</i>	1 (test.)	2500x141x85	10,4	20,4
	2 (test.)	2500x142x85	10,7	20,4
	3 (ref.)	2500x142x81	10,8	20,4
	4 (ref.)	2500x140x83	10,4	20,4

¹ Las Clases de uso del CTE español se corresponden con las Clases de servicio del EC-5.

2.1 Metodología de ensayo

El ensayo se basa en la colocación de las vigas, dos a modo de testigo, sin reforzar, junto a otras dos vigas dúo reforzadas, sobre dos bancadas de acero previamente fabricadas y niveladas mediante los extremos roscados de las patas (Figura 2:).

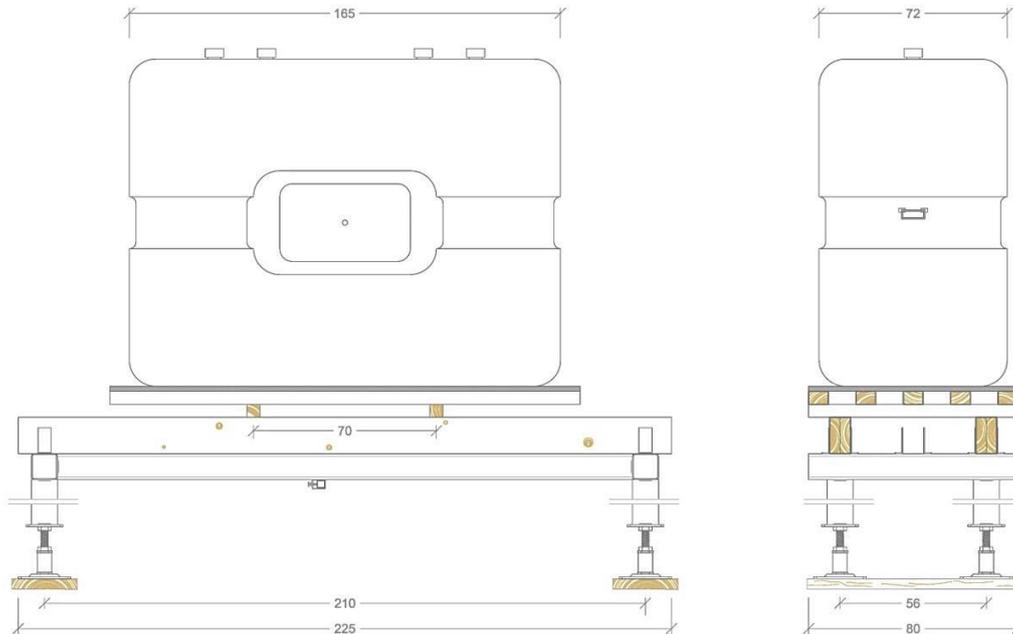


Figura 2: Dimensiones de la bancada autonivelante para realización del ensayo de fluencia

La carga se aplica mediante la colocación y llenado de sendos depósitos, de pared simple de polietileno (PE), con una capacidad útil de 1000 litros y dimensiones aproximadas de 1650x720x1260 mm, con bocas de llenado superiores y dispositivo de vaciado inferior, con llave de cierre. El apoyo de los depósitos sobre las vigas se realiza con una plataforma resistente intermedia, que permite aplicar la carga en las vigas sobre dos puntos, siguiendo las distancias de apoyo $h/3$ propuestas por la norma UNE-EN 408:2011 [16] (Figura 3:).

La carga de 10 kN aplicada representa, aproximadamente, el 50% de la fuerza de rotura de las vigas sin refuerzo, de acuerdo a los datos obtenidos en los ensayos previos de rotura (UNE 408:2011 [16]) realizados con anterioridad. Según dichos ensayos, la fuerza de rotura (media) fue de unos 20,5 kN.



Figura 3: Configuración del ensayo de fluencia

La puesta en carga de las vigas se realizó en varias fases o escalones de carga, con el fin de registrar el comportamiento progresivo de la estructura, permitir su estabilización, y comprobar el correcto reparto de cargas y deformación sobre cada una de las piezas. De acuerdo con las directrices marcadas por la UNE-EN 380:1998 [17] para ensayos a largo plazo (procedimiento 3), se elaboró un procedimiento de carga, en magnitud y tiempo que se muestra en la Tabla 2: y la Figura 4:.

Tabla 2: Procedimiento de aplicación de carga para el ensayo de fluencia

Etapas	Procedimiento de carga	Duración
0	Puesta a cero, $F=0$	-
0-1	Aplicar G_2 (4 kN)	45 min
1-2	Mantener G_2 (4 kN)	15 min
Carga	2-3 Aplicar $G_2 + 0,5 Q$ (6 kN)	20 min
	3-4 Suprimir $0,5Q$ (4 kN)	20 min
	4-5 Aplicar $G_2 + Q$ (8 kN)	45 min
	5-6 Mantener $G_2 + Q$ (8 kN)	2h 30 min
	6-7 Aumentar hasta F_{max} (10 kN)	20 min
Ensayo	7-10 Mantener F_{max} (10 kN)	3-6 meses
Descarga	10-11 Descargar	120 min
Recuperación	11-12 Recuperación $F=0$	24 h

Donde,

$G_1 =$ peso propio (0,3 kN); $G_2 =$ carga permanente (4 kN); $Q =$ cargas variables (4 kN);
 $F_{m\acute{a}x, est} =$ fuerza máxima estimada (10 kN)

Para conocer con precisión el volumen de agua introducido en el depósito en cada fase de carga se utilizó un contador volumétrico de pistón rotativo Zenner, modelo RNK-L-RP-N, con una precisión de medida de 0,02 litros. La velocidad del caudal de agua durante el llenado de los depósitos fue de, aproximadamente, 0,24 l/seg.

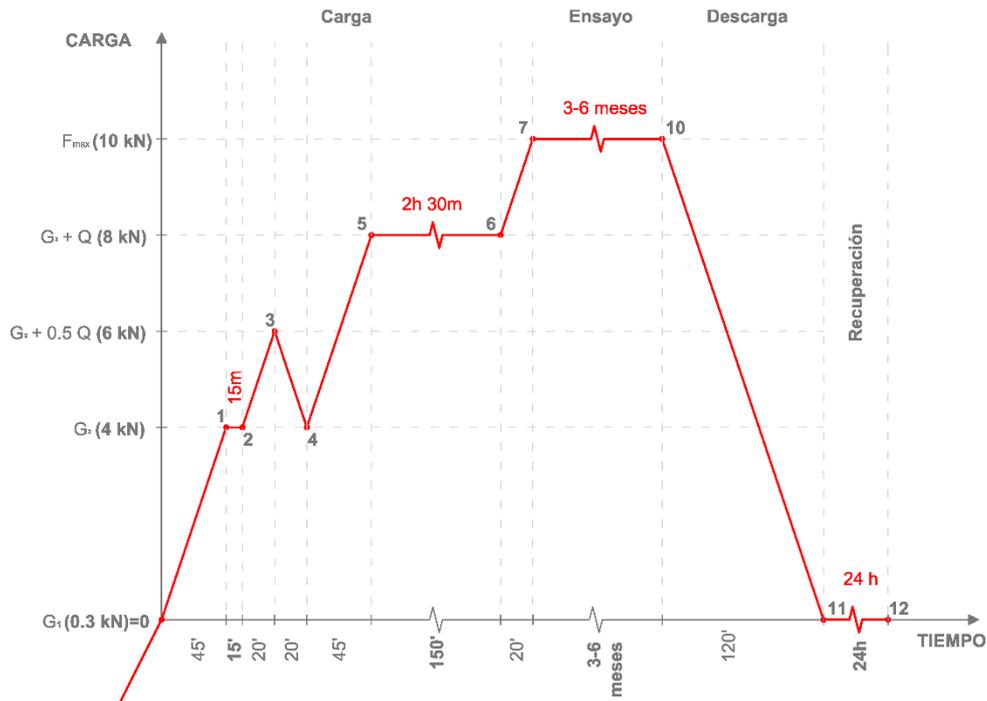


Figura 4: Ciclo de carga/descarga del ensayo de fluencia

Las deformaciones de las vigas fueron monitorizadas continuamente durante todo el plazo del ensayo (6 meses) y, una vez descargadas por completo, se continuó con la monitorización del durante 24 h, en una última fase de recuperación, con el fin de conocer la deformación permanente adquirida por las vigas, tras la descarga.

2.2 Equipo instrumental

Para la monitorización de las deformaciones se empleó un sistema de adquisición de datos HBM, mod. QuantumX-MX840B, y extensómetros inductivos (LVDT) HBM, modelo LVDT WA_100, de gran precisión (0,01mm). El modelo utilizado tiene un rango de medida de hasta 100 mm, presentando una gran estabilidad (<0,1%) frente a los cambios de temperatura y humedad (Figura 5:).

Adicionalmente al equipo anterior, se utilizó otro sistema de adquisición de datos en paralelo, marca HBM, mod. CanHead CB1010, equipado con bandas extensométricas HBM, modelo LY41-10/120, de acero ferrítico con longitud de rejilla 10 mm y resistencia 120Ω, mediante cable de compensación. Estas bandas se colocaron en la cara inferior (BE_T) del centro del vano ($L/2$), realizándose la adhesión con adhesivo bicomponente metil-metracrilato, marca HBM X-60. Por tratarse de ensayos a largo plazo, se recubrió la superficie de las bandas extensométricas con una laca de poliuretano (HBM PU 140), para su protección del polvo y la humedad. Las bandas se conectaron a cuarto de puente de Wheatstone, con compensación (DMS1 + K)[18] de temperatura y humedad, mediante una banda adicional adherida en un testigo de madera del mismo lote que la ensayada, pero sin cargar. Bajo esta configuración, se elimina cualquier distorsión en la medida provocada por las condiciones ambientales (fluctuaciones de temperatura, humedad, etc.), obteniéndose medidas precisas y fiables a largo plazo.

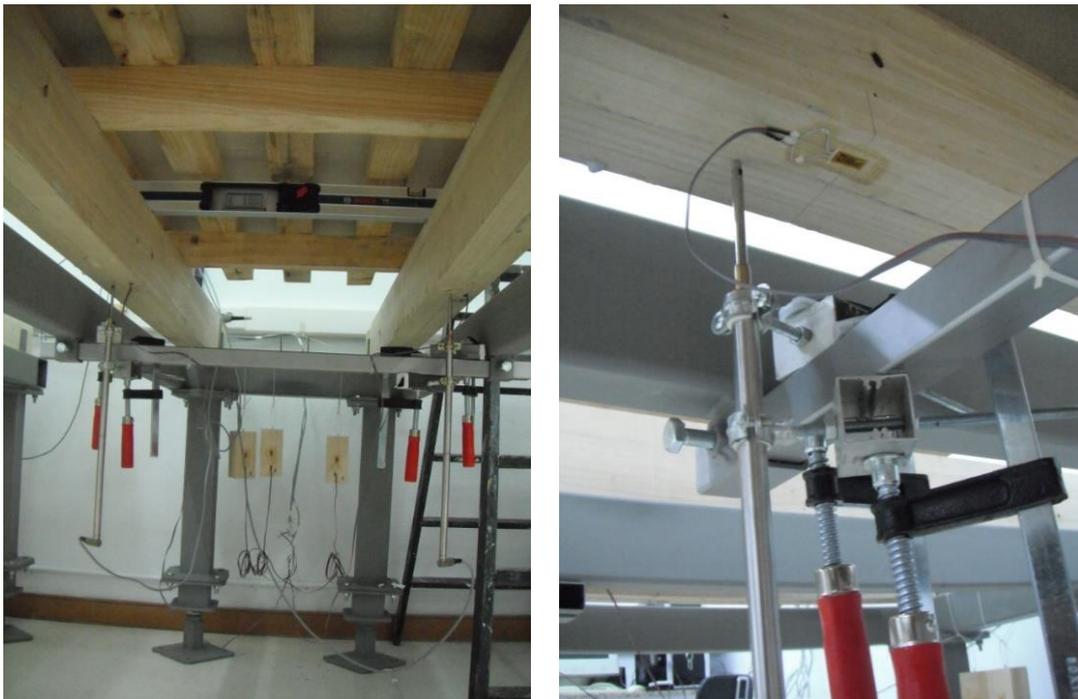


Figura 5: Detalle de la monitorización realizada sobre las vigas durante la realización del ensayo

Los datos recogidos por ambos sistemas de adquisición de datos (Quantum + Canhead) se gestionaron conjunta y sincrónicamente con el programa HBM Catman, permitiendo una monitorización completa, en tiempo real, durante toda la duración plazo del ensayo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de la monitorización ambiental

Los datos registrados de forma continua durante la completa duración del ensayo (6 meses) por las 3 sondas higrotérmicas (Testo Radio C) arrojaron valores medios del 61,2% de humedad relativa y de 21,9°C de temperatura (Tabla 3:). Estos valores se mantienen dentro de las condiciones ambientales de laboratorio propuestas por la UNE-EN 408 (temperatura $20 \pm 2^\circ\text{C}$) y humedad ($65 \pm 5\% \text{HR}$) para alcanzar un equilibrio higroscópico de la madera del 12%.

Tabla 3: Estadística descriptiva de los datos de temperatura y humedad ambiental registrados

	Sonda 1		Sonda 2		Sonda 3	
	HR (%)	T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)	T (°C)
Valor mínimo	38,5	19,6	37,0	19,4	35,8	19,7
Valor máximo	79,9	24,9	79,2	25,2	74,1	25,7
Valor medio	62,2	21,9	61,9	21,9	59,6	21,9
Desviación estándar	6,3	1,4	7,0	1,4	6,2	1,3

Partiendo de los datos registrados y de las tablas de humedad de equilibrio higrotérmico (HEH) desarrolladas por Kollman (1957), se obtuvo punto a punto la humedad en la madera, con el resultado que se muestra en la Figura 6: El valor medio (HEH) se sitúa en torno al 10,8%.

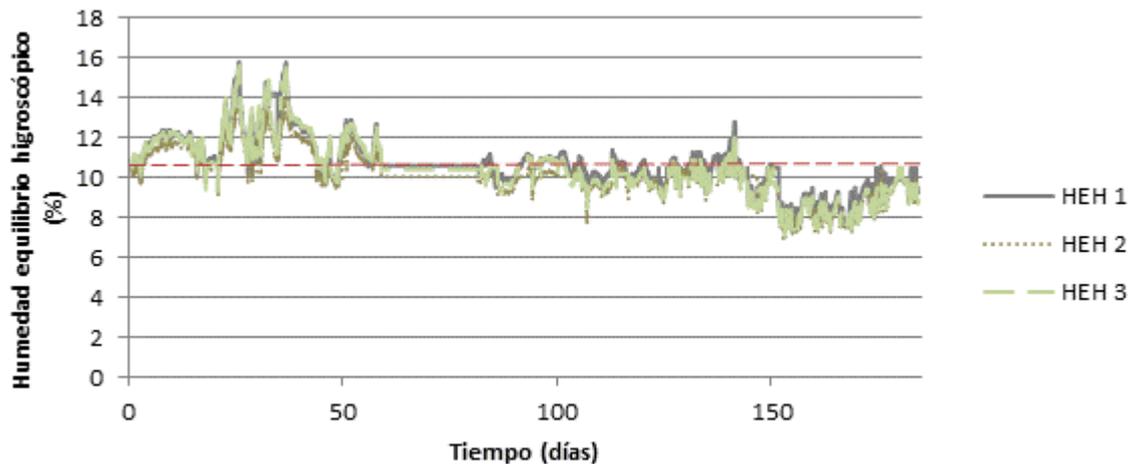


Figura 6: Gráfico de humedad de equilibrio higroscópico (HEH).

3.2 Resultados de la deformación por fluencia (LVDTs)

Los datos de deformación recogidos por los LVDT se muestran en la Tabla 4:, con un intervalo mensual (4 semanas).

Puede apreciarse el aumento de deformación registrado con el paso del tiempo (fluencia) sin incremento de carga. Los porcentajes de variación en las deformaciones registradas se sitúan en el 30,5% de incremento de la flecha para las piezas sin refuerzo; y en el 28,6% para las piezas reforzadas.

Tabla 4: Valores medios de flecha y variación registrados por los LVDTs, en periodo mensual

	LVDT 1 (testigo)		LVDT 3 (testigo)		LVDT 4 (refor.)		LVDT 6 (refor.)	
	Flecha (mm)	Δ (%)	Flecha (mm)	Δ (%)	Flecha (mm)	Δ (%)	Flecha (mm)	Δ (%)
LLENADO	4,838	-	4,709	-	5,600	-	5,227	-
Semana 4	5,781	16,3	5,590	15,8	6,781	17,4	6,145	14,9
Semana 8	6,242	22,5	6,024	21,8	7,351	23,8	6,507	19,7
Semana 12	6,510	25,7	6,359	26	7,630	26,6	6,709	22,1
Semana 16	6,569	26,4	6,429	26,7	7,691	27,2	6,869	23,9
Semana 20	6,580	26,5	6,446	26,9	7,707	27,3	6,919	24,5
Semana 24	6,929	30,2	6,959	32,3	8,006	30,1	7,149	26,9
Semana 26	6,885	29,7	6,867	31,4	7,987	29,9	7,189	27,3
VACIADO	1,945	-	2,359	-	2,788	-	1,699	-
RECUPERA 12h	1,884	-3,24	2,313	-1,99	2,722	-2,42	1,642	-3,5
RECUPERA 24h	1,886	-3,13	2,297	-2,7	2,695	-3,45	1,615	-5,2

La deformación máxima alcanzada es de 6,885 mm de flecha en las vigas testigo, y de 7,987 mm en las vigas reforzadas. Tras retirar la carga (vaciado del depósito) se mide una deformación diferida o residual de 2,359 mm (49,9% flecha inicial) en las vigas testigo y de 2,788 mm (50,2% flecha inicial) en las vigas reforzadas. Estas flechas diferidas, resultado de los efectos de fluencia de la madera, se mantienen del lado de la seguridad en comparación con el coeficiente propuesto por el CTE ($K_{def}=0,6$).

La representación gráfica de los datos de deformación (Figura 7:) muestran una curva asintótica en la cual la fluencia de la madera se mantiene aún activa en el momento de concluir el ensayo. Las pendientes de la curva de las piezas sin refuerzo y las piezas reforzadas con GFRP 2400 gr/m² son sensiblemente paralelas y de crecimiento continuado, representando un comportamiento reológico semejante. Tras la retirada de la carga, y completado el tiempo de recuperación, el gráfico muestra la

presencia de una deformación residual adquirida. Esta deformación se sitúa en valores medios de 2,09 mm en las piezas sin refuerzo y de 2,15 mm en las piezas reforzadas.

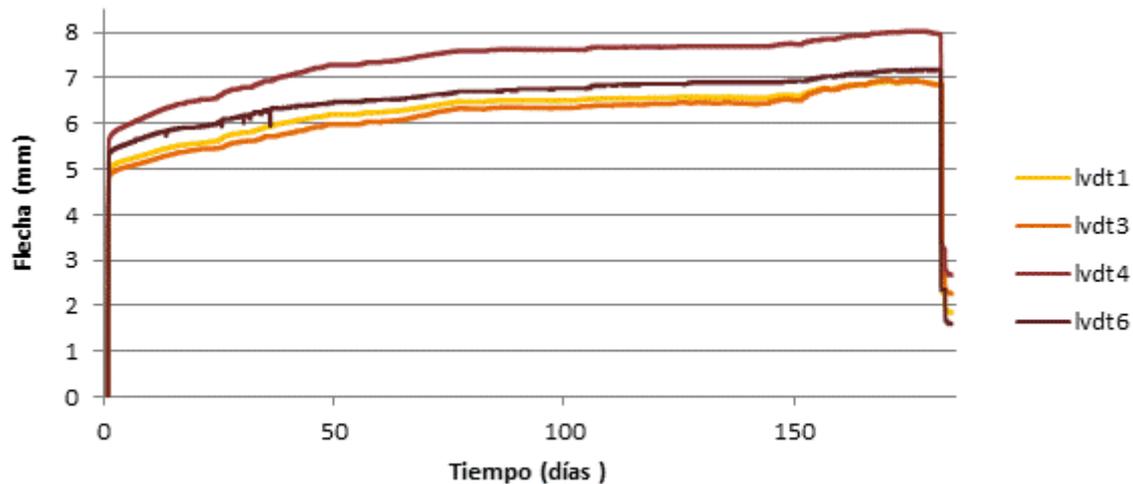


Figura 7: Gráfica flecha-tiempo de los LVDTs

Los valores de deformación obtenidos por las bandas extensométricas (μm) durante la duración del ensayo se muestran en la Tabla 5:, con un periodo mensual (4 semanas).

Tabla 5: Datos de deformación registrados por las bandas extensométricas

	Banda 1 (testigo)		Banda 3 (testigo)		Banda 4 (refor.)		Banda 6 (refor.)	
	(μm)	$\Delta(\%)$						
LLENADO	452,0	-	532,3	-	509,4	-	599,8	-
Semana 4	570,4	20,7	665,4	19,9	686,0	25,7	735,8	18,5
Semana 8	581,8	22,3	649,7	18,1	664,5	23,3	505,9	-18,5
Semana 12	618,9	26,9	647,1	17,7	665,2	23,4	487,6	-22,9
Semana 16	598,8	24,5	629,6	15,4	640,7	20,5	447,8	-33,9
Semana 20	577,9	21,8	606,6	12,2	615,9	17,3	406,0	-47,7
Semana 24	675,3	33,1	652,8	18,4	631,7	19,4	492,2	-21,8
Semana 26	594,7	24,0	620,5	14,2	608,6	16,3	455,1	-31,8
VACIADO	91,9	-	66,7	-	40,7	-	-191,8	-
RECUPERA 12h	94,8	3,0	57,0	-17,1	39,9	-2,1	-197,8	3,0
RECUPERA 24h	84,4	-8,9	61,1	-9,1	33,6	-21,0	-195,4	1,8

La representación gráfica de los datos obtenidos (Figura 8:) muestran comportamientos similares frente a la fluencia entre las diferentes vigas. Además, el trazado irregular de la curva testifica la gran precisión de las bandas extensométricas (μm), junto con la influencia en la medida de factores ambientales, pese a utilizarse banda de compensación.

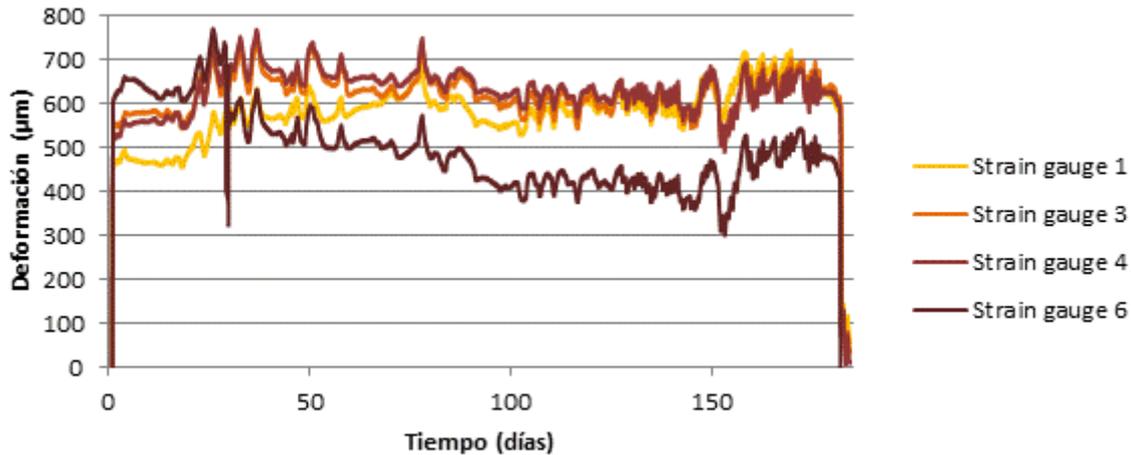


Figura 8: Gráfico deformación-tiempo de las bandas extensométricas

3.3 Comparación con la flecha de cálculo

Previamente a la realización de los ensayos se calculó la flecha estimada para cada pareja de vigas, según el procedimiento del CTE. En los cálculos se consideraron los módulos de elasticidad longitudinal $E_{\text{testigo}}=7800$ MPa y $E_{\text{reforzada}}=9800$ MPa, obtenidos en los ensayos preliminares en laboratorio. Con el fin de considerar el efecto del cortante en la deformación, se toman valores aproximados para los módulos de elasticidad transversal $G= E/16$ [19].

La flecha instantánea para una viga a flexión bajo 2 cargas puntuales situadas a una distancia, igual a $L/3$ del apoyo (UNE-EN 408), considerando el efecto del cortante en la deformación, puede obtenerse mediante la ecuación (1):

$$F_{\text{inst}} = \frac{P \cdot (L/3)}{24E \cdot I} [3L - 4(L/3)^2] \cdot [1 + 0,939 \cdot E/G \cdot (h/L)^2] \quad (1)$$

La deformación final de la pieza se calcula para una combinación casi permanente de las cargas, considerando la fluencia de la parte permanente de las cargas (2).

$$F_{\text{final}} = F_{\text{inst perm}} (1 + k_{\text{def}}) + \Psi_2 \cdot F_{\text{inst variable}} (1 + k_{\text{def}}) \quad (2)$$

De modo que, para el estado de cargas ensayado (10 kN), se obtiene una flecha instantánea $f_{\text{inst}}=4,92$ mm. Considerando la totalidad de la carga aplicada como carga permanente y la clase de servicio 1 en la que se desarrolla el ensayo, para la cual el CTE-DB-SE-M propone un valor de $k_{\text{def}}=0,6$, se obtiene una flecha final $f_{\text{final}}=7,88$ mm. Produciéndose por el efecto de fluencia de la madera una flecha diferida $f_{\text{dif}}=2,95$ mm. En la Tabla 6: se comparan los resultados de deformación obtenidos en el ensayo con los previstos por cálculo.

Tabla 6: Comparación de flechas obtenidas en el ensayo y por cálculo

	Sin refuerzo		Con refuerzo GFRP	
	Cálculo	Ensayo	Cálculo	Ensayo
Flecha instantánea (mm)	4,925	4,773	4,251	5,413
Flecha final (mm)	7,881	6,876	6,801	7,588
Flecha diferida (mm)	2,955	2,091	2,550	2,155

7. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados de los ensayos realizados, la primera de las conclusiones obtenidas es que el refuerzo GFRP 2400 gr/m² empleado no produce una mejora sensible sobre los fenómenos de fluencia; al menos con los bajos ratios de refuerzo utilizados, en comparación con el área total de la sección (1,06%). A la finalización de los ensayos se alcanzaron incrementos en la flecha, debido a fenómenos de fluencia, del 30,5% para las vigas sin refuerzo y del 28,6% para las vigas reforzadas.

Los porcentajes de recuperación media en la flecha residual, tras el vaciado de las cargas, fueron del 2,9% en las vigas testigo y de 4,3% en las vigas reforzadas. Se puede afirmar que el refuerzo GFRP utilizado produce cierta mejora en la recuperación parcial de la deformación tras la descarga de las piezas.

Por último, comparando la deformación de cálculo y la deformación de ensayo, se obtienen deformaciones diferidas del 49,9% y del 50,2% de la flecha instantánea en las vigas testigo y reforzadas respectivamente; mientras que la norma (CTE) propone una deformación diferida del 60% de la flecha instantánea. Por ello, puede afirmarse que los coeficientes normativos que introducen los fenómenos de fluencia en el cálculo de deformaciones son razonablemente precisos, del lado de la seguridad.

Desde el punto de vista metodológico, se ha puesto a punto una metodología replicable para el análisis del comportamiento a fluencia. Se concluye que la gran precisión de las bandas extensométricas (μm) son sensible a la influencia en la medida de factores ambientales, pese a haberse utilizado bandas de compensación, lo que obliga a extremar la precisión en la instalación, protección y ajuste de este tipo de equipos para su utilización en mediciones a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España; subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental No Orientada, 2013-2015 (BIA 2012-31233). Los autores también quieren agradecer la colaboración de la empresa SIKA.

REFERENCIAS

- [1] Thelandersson, S., Larsen H.J., 'Timber Engineering'. Wiley. London, (2003). pp 133-167.
- [2] Morlier, P., 'Creep in timber Structures'. RILEM, London. (1994).
- [3] Wood, L.W., Relation of strength of wood to duration of load. 'U.S. Forest products laboratory' Report N°1916. (1951).
- [4] Madsen, B., Duration of load test for dry lumber in bending. 'Forest products Journal' 23(2), (1973) 21-28.
- [5] UNE-EN 1995:2006. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera.
- [6] CTE-SE-M. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad estructural Madera (2006).
- [7] Ranta-Maunus, Alpo, Collection of creep data of timber. 'Proceedings of the International Council for Building Research Studies and Documentation'. Working Commission W 18A - Timber Structures CIB-W18A/24-9-2. Oxford, United Kingdom (1991) 5 p.
- [8] Plevris, N., Triantafillou, T. C., Creep behavior of FRP-reinforced wood members. 'Journal of Structural Engineering', 121(2), (1995) 174-186.
- [9] Tingley, D. A., Gilham, P. C., Kent, S. M., Long term load performance of FRP reinforced glulam bridge girders. 'In National conference on wood transportation structures' (1996).
- [10] Davids, W. G., Dagher, H. J., Breton, J. M., Modeling creep deformations of FRP-reinforced glulam beams. 'Wood and fiber science', 32(4), (2000) 426-441.
- [11] André, A., Fibers for strengthening of timber structures. PhD Thesis. Luleå tekniska universitet/Civil and Environmental Engineering/Structural Engineering. (2006).
- [12] Yahyaee-Moayyed, M.; Taheri, F., Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams. 'Composite Structures', 93, (2011) 616-628.

- [13] UNE 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.
- [14] Kollman, F., 'Tecnología de la madera y sus aplicaciones (tomo 1)'. 2ª Edición. IFIE, Madrid, (1959).
- [15] UNE-EN 13183-2:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.
- [16] UNE-EN 408:2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- [17] UNE-EN 380:1998. Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Principios generales para los ensayos de carga estática.
- [18] Hoffmann, K., 'An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges' HBM, Darmstadt (2012).
- [19] Argüelles, R., Arriaga, F., 'Estructuras de madera. Bases de cálculo'. AITIM, Madrid (2013).