

CONSTRUCCIÓN Y COMPORTAMIENTO DE UN PROTOTIPO DE ESTRUCTURA DE MADERA A ESCALA 1/2 SOMETIDO A DIFERENTES PRUEBAS DE CARGA NORMALIZADAS

Patricia Vallelado-Cordobés^{1*}, Roberto D. Martínez¹, José Antonio Balmori¹, Álvaro Iglesias Pordomingo², Álvaro Magdaleno González², Antolín Lorenzana², Lara del Val Puente³, Juan José Villacorta Calvo³, Alberto Izquierdo Fuente³, Luis-Alfonso Basterra¹.

¹ GIR Estructuras y Tecnología de la Madera, Universidad de Valladolid, España. pvallelado@uva.es 0009-0002-9536-9486. robertodiego.martinez@uva.es 0000-0002-0567-1781. joseantonio.balmori@uva.es 0000-0003-4385-5765. alfonso.basterra@uva.es 0000-0002-5273-9726.

² Grupo de Dinámica Estructural, Universidad de Valladolid, España. alvaro.iglesias@uva.es 0000-0002-7093-4568. alvaro.magdaleno@uva.es 0000-0002-5606-1545. ali@ej.uva.es 0000-0003-2562-0532.

³ GIR de Procesado en Array, Universidad de Valladolid, España. lara.val@uva.es 0000-0003-0764-7491. juanjose.villacorta@uva.es 0000-0002-8986-8177. alberto.izquierdo@uva.es 0000-0001-7857-1661.

RESUMEN

Se investiga la evaluación de las estructuras de madera mediante la aplicación de pruebas de carga estática. El trabajo se centra en el estudio de un prototipo a escala 1:2 de una estructura de madera real, sometiéndolo a diversas pruebas de carga según normativas europeas para comparar los métodos de carga monotónica y cíclica. El objetivo principal es establecer las propiedades estáticas del prototipo a partir de deformaciones registradas bajo cargas conocidas. Con ello se pretende calibrar un gemelo digital del prototipo.

Tras la realización de ensayos comparativos entre los dos métodos de pruebas de carga estandarizados por las normativas europeas, se identifica falta de consenso entre ellas y que las especificaciones propias de la madera no son contempladas, lo que requeriría el desarrollo de estándares específicos. Se concluye la necesidad de considerar la naturaleza del material, la deformación diferida, y la afección medioambiental en la selección del tipo de prueba.

Futuras fases de esta investigación pretenden sustituir la utilización de grandes cargas estáticas por excitaciones dinámicas, de mucho más sencilla aplicación, que puedan correlacionarse con aquellas y simplifiquen el proceso.

PALABRAS CLAVE

Comportamiento dinámico, ensayos estáticos, estandarización, fluencia, monitorización de deformaciones, sensorización.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la madera ha experimentado un notable renacimiento como material estructural, impulsado en gran medida por la creciente importancia de la rehabilitación de edificios. Este resurgimiento se justifica no solo por razones socioeconómicas evidentes, sino también por el compromiso creciente con la sostenibilidad. A lo largo de este período, se ha intensificado el proceso de normalización internacional del comportamiento resistente y las propiedades mecánicas de la madera, esencial para su aplicación en la conservación del patrimonio construido.

Sin embargo, enfrentamos desafíos significativos al estimar las propiedades físicas de las estructuras de madera ya existentes. Estas estructuras a menudo presentan condiciones de apoyo y ensamble complicadas, y en numerosos casos se hallan en estados de degradación, como es el caso de muchos monumentos designados como Bienes de Interés Cultural (BIC). Dada su susceptibilidad a variaciones por factores como las uniones mecánicas, las características intrínsecas del material y las condiciones ambientales, la madera puede mostrar diferencias notables en sus propiedades mecánicas y elásticas.

El desarrollo de tecnologías innovadoras en el campo de la Evaluación No Destructiva es fundamental para inspeccionar y caracterizar estructuras de madera, incluso aquellas parcialmente degradadas. Estas herramientas avanzadas proveen datos cruciales para determinar la integridad física de las estructuras, evaluar su capacidad portante residual y, en última instancia, asegurar su seguridad y viabilidad de conservación.

Con el desarrollo de metodologías fuertemente innovadoras orientadas a conocer la salud de las estructuras de madera, tanto de carácter monumental como ordinario, se fortalece la capacidad de tomar decisiones informadas sobre intervenciones en edificaciones antiguas y valiosas. Asimismo, estas actividades de investigación e innovación desempeñan un papel crucial en la protección, conservación, restauración y reparación del extenso patrimonio cultural europeo, impactando positivamente en la seguridad, valorización, economía y sostenibilidad de este.

Este artículo se enmarca dentro de un trabajo de investigación de mayor alcance que persigue la estimación de las propiedades estáticas por medio de técnicas dinámicas de bajo coste. Las pruebas de carga estática son una técnica sencilla y altamente probada, pero con una logística compleja, largos tiempos de ejecución y un cierto riesgo asociado a las grandes cargas a la que se somete a la estructura. Tienen una estandarización internacional no consensuada y pensada especialmente para estructuras de hormigón. Por otra parte, las pruebas dinámicas son consideradas menos intrusivas y potencialmente pueden también ser representativas de las condiciones en servicio. Podrían ofrecer una alternativa viable y eficiente para evaluar la capacidad estructural a través de la correlación de datos derivados de pruebas dinámicas, como el análisis modal, con los parámetros estáticos tradicionales. La ausencia de una normativa específica para tales ensayos resalta la importancia e innovación de esta propuesta metodológica.

El objetivo particular de este trabajo es estudiar el comportamiento ante pruebas de carga de un prototipo concebido como una reproducción a escala 1:2 de una estructura de madera real de dos plantas. La realización de pruebas de carga permitirá registrar las deformaciones que alcanza en puntos de interés (centros de vanos generalmente) ante una carga conocida y controlada y con ello establecer las propiedades estáticas de la estructura. Estos primeros resultados estáticos sentarán las bases para establecer la correlación con la identificación modal de la estructura (fase futura de ensayos). En segundo lugar, con estos resultados se pretende calibrar un modelo analítico buscando obtener un gemelo digital del prototipo construido. Los modelos analíticos permiten reflejar condiciones experimentales reales, obtener una mayor precisión de resultados y estudiar las tensiones internas generadas por la aplicación de las cargas. Por último, dada la falta de consenso entre normativas para la realización de pruebas de carga, se pretende comparar los dos grupos metodológicos que proponen las normas europeas: la prueba de carga monotónica y la prueba de carga cíclica. De esta manera se arrojaría luz sobre los puntos de convergencia y divergencia de estas metodologías y su adaptabilidad a las estructuras de madera.

Tras la introducción el texto se articula en seis apartados. El apartado "2. Estado de la Cuestión" proporciona un fondo histórico y técnico sobre las pruebas de carga, estableciendo la base para nuevas metodologías. La sección "Revisión de la Normativa Europea de Pruebas de Carga Estática" compara las normativas existentes, enfatizando la falta de especificaciones para madera. El apartado "3. Material y Métodos" describe el prototipo a escala y los métodos de ensayo empleados siguiendo diferentes normativas, incluyendo detalles sobre la disposición de la carga y la sensorización de la estructura. En "4. Discusión de Resultados" se analizan los datos obtenidos comparando las dos metodologías de ensayo empleadas. El texto termina con "5. Conclusiones" y "6. Líneas de investigación futuras", destacando la necesidad de un enfoque estandarizado para pruebas de carga en estructuras de madera.

2 ESTADO DE LA CUESTIÓN

Las pruebas de carga surgen de la necesidad de constatar que un sistema portante realmente es seguro. Este es un concepto que ha acompañado a la humanidad desde épocas prehistóricas [1]. De esa necesidad surge lo que actualmente denominamos análisis estructural y, dentro de ello, las pruebas de carga.

Históricamente, los puentes han sido las estructuras más comúnmente sometidas a pruebas de carga. En sus inicios, dada la imprecisión de los métodos analíticos, estas pruebas eran esenciales no solo para demostrar la seguridad estructural, sino también para identificar limitaciones en los métodos de cálculo y posibles defectos en los materiales o en la construcción [1, 2]. En la actualidad, países como España, Suiza e Italia todavía exigen la realización de pruebas de carga antes de la inauguración de un puente [3, 4].

Las innovaciones en estructuras, como en prácticamente cualquier campo, causaban una cierta desconfianza a la población, que necesitaba comprobar con sus propios ojos que una estructura era segura y apta para su servicio. Por ello, las pruebas de carga en edificación comenzaron a tener especial relevancia con la aparición del hormigón armado a finales del siglo XIX. Al tratarse de un sistema constructivo nuevo, no se habían aún desarrollados métodos de cálculo específicos, ni contaba con la confianza de proyectistas ni constructores para implementar su uso general. Las pruebas de carga se empleaban como estudio previo de la estructura para el planteamiento de principios teóricos y métodos de cálculo [5]. El desarrollo de las pruebas de carga iba de la mano con el desarrollo de los modelos matemáticos para el cálculo de estructuras [6]. A pesar de estos avances, el análisis matemático del hormigón armado no llegó hasta bien entrado el siglo XX.

La introducción de tecnologías de sensorización marcó un antes y un después en la realización de pruebas de carga. Los sensores permitían la medición precisa de las cargas aplicadas y las deformaciones resultantes. La evolución siguiente fue la conexión de todos estos sistemas a un dispositivo de lectura automático, capaz de traducir y sincronizar las distintas señales de los sensores. Conectándolos a un ordenador se pudo realizar una lectura simultánea del comportamiento de la

estructura para poner en relación las distintas medidas. Esto permitió la generación de gráficos como el de tensión-deformación, en tiempo real, mejorando significativamente la precisión y seguridad de estas evaluaciones.

En los inicios no existían regulaciones de cómo realizar las pruebas de carga o quién debía ser el responsable de diseñarlas y supervisarlas. Algunas de las estructuras sometidas a pruebas de carga terminaban en colapso, lo que suponía cierto peligro a la hora de realizarlas. Mayor peligro tenían aquellas que debido a una ejecución deficiente del ensayo mostraban una seguridad de la estructura o elemento estructural irreal.

Los colapsos producidos evidenciaron la necesidad de estandarizar estos procedimientos. En Estados Unidos, a pesar de que las primeras pruebas de carga datan de 1890, el primer protocolo estandarizado fue publicado en 1920 por el Instituto Americano del Hormigón (ACI) [7], estableciendo un "24-hour load test" que aún se mantiene en las normativas actuales [8, 9]. En 1936 se definieron unos criterios de evaluación de las pruebas de carga a partir de la deflexión de la estructura en función de la luz [10, 11].

A lo largo del siglo XX, la importancia de las pruebas de carga disminuyó con el avance de los métodos computacionales, que ofrecieron nuevas capacidades para predecir el comportamiento estructural con alta precisión [12]. Esto condujo a un cambio en el sector de la construcción, privilegiando el diseño por cálculo debido a razones de eficiencia y costo [13].

En el contexto contemporáneo de rehabilitación, regeneración y renovación de estructuras existentes, las pruebas de carga han cobrado una renovada importancia. Estas pruebas son esenciales en la evaluación de la seguridad estructural de edificaciones antiguas, donde los métodos de análisis matemáticos frecuentemente resultan insuficientes debido a la multiplicidad de factores que pueden afectar la integridad de la estructura [12].

En situaciones donde la documentación original del edificio es inexistente o incompleta, las pruebas de carga proporcionan una herramienta interesante para estimar el comportamiento del sistema estructural [1]. Además, son particularmente valiosas en casos donde existen daños constructivos cuya extensión y efecto no se pueden evaluar adecuadamente solo con análisis teóricos. En situaciones de daño por incidentes como incendios, accidentes, ataques químicos, o cuando la ejecución de la obra ha sido deficiente o no corresponde a los planes originales, las pruebas de carga se vuelven indispensables [14]. Estas no buscan verificar la capacidad resistente de la estructura o alcanzar el límite de carga, sino más bien asegurar que la estructura pueda continuar funcionando de manera segura bajo las condiciones previstas [15]. A pesar de sus inconvenientes, el uso de pruebas de carga puede evitar la necesidad de demoliciones y reconstrucciones más extensas, implicando así un ahorro considerable y permitiendo la continuidad en el uso del inmueble [16].

Las pruebas de carga son igualmente relevantes cuando se altera el uso de una estructura, modificando así la magnitud y distribución de las cargas que se deben evaluar. También en estructuras históricas que no fueron diseñadas conforme a las normativas modernas [16]. Además, son cruciales para calibrar sistemas de medición instalados en estructuras con el fin de monitorizar su comportamiento a lo largo del tiempo [17].

Aunque existen varias técnicas no destructivas y pseudo no destructivas para caracterizar elementos estructurales, estos métodos pueden ser laboriosos y caros si se quieren extender a un número significativo de piezas [16]. Al no incluir a las uniones, si estas no son muy simples, es difícil analizar y predecir el comportamiento global del sistema.

A la hora de realizar pruebas de carga influyen esencialmente dos factores: el método de carga y el sistema de medida. Tradicionalmente, el método más común para aplicar carga es el uso de agua, ya sea en depósitos o mediante la construcción de una piscina temporal en el forjado objeto de ensayo. Aunque el uso de agua permite un control preciso y progresivo de la carga mediante su fácil manejo en el llenado y vaciado, este método conlleva riesgos significativos como el peligro de inundación o colapso estructural durante el proceso [14, 18]. Además, el uso de un volumen elevado de agua puede estar restringido por razones administrativas y de sostenibilidad.

Como alternativas al agua, se utilizan otros elementos de masa tales como sacos de arena y/o cemento, palés de ladrillos o discos metálicos. Estos métodos evitan las limitaciones del agua, pero su colocación y retirada resultan más laboriosas y lentas comparadas con el método líquido. Adicionalmente, el uso de gatos hidráulicos ofrece un control excepcionalmente preciso de la carga y la capacidad de reducirla instantáneamente ante una situación de colapso [18]. Sin embargo, su aplicación es limitada y generalmente se reserva para ensayos de elementos estructurales individuales debido a las restricciones de apoyo y configuración del equipo.

Uno de los desafíos clave en las pruebas de carga es asegurar la correcta instalación del sistema de medición en un soporte independiente que no se vea afectado por las variaciones estructurales durante la prueba [18, 19]. Es crucial medir las deformaciones inducidas y seleccionar apropiadamente los puntos de referencia para obtener resultados fiables.

La evaluación de los resultados de las pruebas de carga normalmente se realiza comparando las deformaciones observadas bajo la carga total de ensayo, una carga moderada y después de la recuperación tras eliminar la carga, con las deformaciones previstas en los análisis estructurales de los modelos de cálculo. Además de las medidas tradicionales

como flexión y deformaciones en apoyos o globales, las tecnologías emergentes como el análisis de emisiones acústicas y la fotogrametría están enriqueciendo el proceso, permitiendo una detección más precisa de fenómenos como la fisuración en el hormigón [1, 2, 20].

Los modelos de cálculo y las pruebas de carga se han integrado como herramientas complementarias en el diseño estructural. Los modelos analíticos suelen emplearse para planificar la prueba de carga, ayudando a anticipar la distribución de cargas y el impacto de su magnitud y ubicación en la estructura. Tras la prueba, estos modelos se ajustan para reflejar las condiciones reales experimentadas, mejorando así la precisión del análisis y proporcionando una comprensión más profunda de las fuerzas internas inducidas por las cargas aplicadas [10].

2.1 REVISIÓN DE LA NORMATIVA EUROPEA DE PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA

Se han estudiado en detalle las normativas europeas de pruebas de carga buscando específicamente pruebas de carga en estructuras de madera [21-29]. De las nueve normativas estudiadas (cinco de aplicación nacional y cuatro de otros países) únicamente dos son específicas para estructuras de madera: UNE-EN 380:1998 “Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Principios generales para los ensayos de carga estática.” y UNE-EN 595:1996 “Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Ensayo para la determinación de la resistencia y rigidez de las cerchas.” [22, 23]. Las restantes están orientadas a su aplicación en hormigón o estructuras en general sin definir el material.

Entre las normas estudiadas se pueden diferenciar los siguientes tipos en función del objetivo que persiguen: pruebas de carga y ensayos de resistencia máximas o pruebas de carga a fallo. En las primeras se trata de comprobar la aptitud al servicio de la estructura, es decir si aguanta las cargas a la que estará sometido durante su uso según la normativa vigente en cada caso. Las segundas tratan de averiguar cuál es la capacidad de carga última que aguanta una estructura o parte de ella, con el peligro añadido de la posibilidad de llegar al colapso de alguno de los elementos. Si comparamos la metodología que se propone también aparecen dos tipos de pruebas de carga: Pruebas de carga de ciclo único o monotónicas y pruebas de carga cíclicas. La única norma que propone prueba de carga cíclica es la norma alemana [26] destacando como ventaja fundamental de este procedimiento su rapidez.

A pesar de la aplicación actual de las pruebas de carga enfocadas sobre todo a la evaluación de la seguridad de utilización de un edificio ya existente, las diversas normativas europeas de evaluación de estructuras existentes y concretamente de estructuras de madera, no mencionan los métodos de pruebas de carga como parte del procedimiento. En general estas normas hacen una serie de recomendaciones acerca de cómo realizar inspecciones en los edificios que permitan conocer el estado de los elementos y las características de los materiales que los componen. Posteriormente estos datos sirven para realizar un cálculo matemático. Algunas de estas normas y códigos son: [30-35]. Loebjinski et al. [36] resumen y comparan todas estas normas ya que cada país tiene sus propios criterios. En el documento de Luechinger et al. [37], se enumeran las normas, guías y códigos existentes de los países miembros de la UE y se establecen las líneas a seguir para la elaboración de una guía común. Existe un interés a nivel europeo de generar un criterio común para la evaluación de edificios existentes.

En España, la norma UNE 7457:1986 “Realización de ensayos estáticos de puesta en carga sobre estructuras en piso de edificación”, veterana pero aún vigente, define el ensayo de carga como el proceso de investigación sobre una estructura ya construida, o parte de ella, mediante la reproducción de un estado de carga determinado, con el fin de obtener datos experimentales sobre su seguridad y/o comportamiento estructural [21]. Se realiza aplicando fuerzas constantes y crecientes que se incrementan de forma escalonada, midiéndose los desplazamientos que se producen en la sección central, donde normalmente se da la mayor flecha.

3 MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 MODELO A ESCALA 1/2

Se ha construido un prototipo concebido como una reproducción a escala 1:2 de una estructura de madera real de dos plantas, de dimensiones 5,42 x 3,28 m en planta y 3,20 m de altura (Figura 1). La estructura se compone de seis pilares, 10 vigas de madera laminada (MLE), y cuatro paneles de madera contralaminada (CLT) formando los dos forjados.

La madera laminada empleada en los pilares y vigas es *Picea Abies* de procedencia austriaca, posee una densidad de 440-460 kg/m³ y está clasificada como GL24h, según norma UNE EN 14080:2022 [38]. Las vigas laminadas tienen unas dimensiones en sección de 140x200 mm y están formadas por 5 capas encoladas. En cuanto a los pilares, poseen unas dimensiones de 140 x140 mm, su conexión con el suelo se hace mediante herrajes metálicos en forma de tulipa atornillados al suelo, que es una solera de hormigón armado. Los encuentros entre las vigas perimetrales se realizan mediante unión carpintera en caja y espiga reforzada con tirafondos (Figura 1). La viga central de ambas plantas se une mediante herrajes metálicos de tipo estribo. Esta unión es distinta a las demás por cuestiones de montaje.

Los paneles CLT se componen de tablas de *Pinus radiata* o *Pinus pinaster* nacional, concretamente gallego, con una densidad media mínima de 500 kg/m³ y clasificadas como C16 según norma UNE EN 338 [39]. Se trata de paneles CLT

de 80mm de canto con tres capas 30+20+30. La unión longitudinal entre paneles CLT es de tipo carpintera con rebaje (Figura 2). Esta unión no se cose con tirafondos. El CLT apoya en las vigas y se cose a ellas muy puntualmente con tirafondos.

La estructura está arriostrada mediante cuatro cruces de san Andrés realizadas con cables de acero de diámetro 12 mm y ancladas a los pilares.

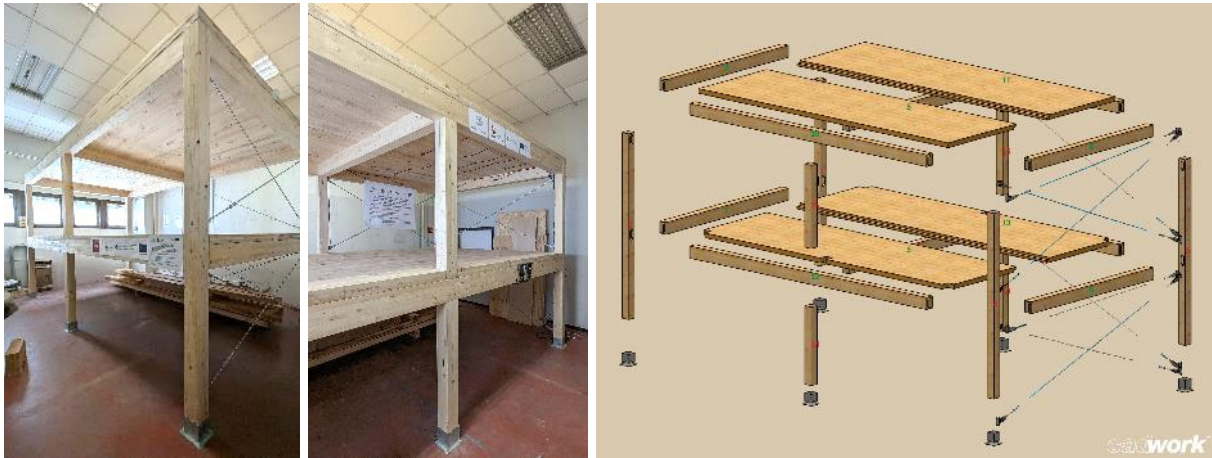


Figura 1. Modelo a escala 1/2. A la derecha fotografías de la estructura. A la izquierda despiece de la estructura en el modelo para la fabricación de componentes con las uniones detalladas.

3.2 MODELO DIGITAL

Se ha desarrollado un modelo de cálculo analítico mediante el programa de análisis de estructuras 3D DLUBAL, adecuado para el análisis estructural y dinámico de estructuras de barras y planos y el dimensionamiento de estructuras basándose en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Este modelo pretende convertirse en un gemelo digital de la estructura construida. Para ello será calibrado a partir de los resultados de deformaciones obtenidos en las pruebas de carga y con el comportamiento modal obtenido de las pruebas dinámicas.

3.3 DISPOSICIÓN DE LA CARGA

Para someter la estructura a la carga necesaria se emplean piscinas de agua de dimensiones en planta de 3,70 x 1,60 m. Estas piscinas se colocan centradas en los forjados. Se dispone una piscina en cada forjado ya que, aunque la prueba de carga sólo se realiza en uno de ellos, esta disposición permite el reaprovechamiento del agua. La Figura 2 muestra el esquema del sistema de carga y descarga de la estructura.

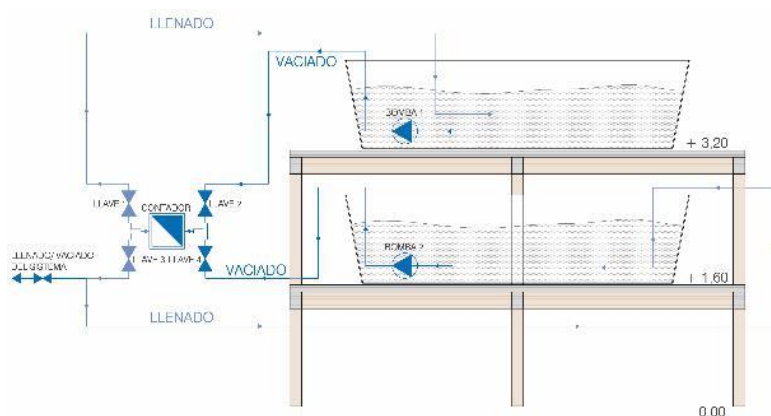


Figura 2. Esquema del sistema hidráulico para la carga y descarga de los forjados.

Para cargar el forjado inferior se activa la bomba 1 y se abren las llaves de paso 2 y 3, permitiendo el trasvase de agua de la piscina superior a la inferior. El volumen de agua trasvasado y por tanto, la carga aplicada se mide con precisión con el contador. El proceso de descarga del forjado inferior se realiza activando la bomba 2 y abriendo las llaves 4 y 1.

Con este sistema también se elimina la posible influencia del aplastamiento o de los asientos en los pilares cuando la estructura está cargada y descargada. Los pilares siempre están sometidos a la misma carga lo que permite medir únicamente las deformaciones del forjado (paneles CLT + vigas) en la prueba de carga sin afecciones externas de otros elementos.

3.4 SENSORIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Se emplean los siguientes tipos de sensores:

- 3 LVDT WA/100MM-T HBM instruments.
- 2 LVDT WI/10MM-T HBM instruments.
- 2 potenciómetros de hilo 250 mm.

Se han dispuesto los sensores en los puntos de máxima deformación esperada. Los sensores del mismo tipo se colocan de manera simétrica en la estructura a modo de verificación por comparabilidad de los datos. De esta manera, se colocan dos LVDT 100 en el centro de los dos vanos del CLT y el LVDT 100 restante en el centro del vano de la viga central. Los dos potenciómetros de hilo 250 se disponen en las dos vigas extremas en el centro del vano. Por último, los LVDT 10 se instalan en el centro del vano de dos de las vigas laterales enfrentados de manera diagonal. En la Figura 3 se detalla esta disposición. Los sensores se fijan mediante trípodes, a los que se añaden unos adaptadores específicos para cada tipo de sensor impresos en plástico ABS mediante impresora 3D. Todos los sensores están conectados al ordenador mediante el sistema de adquisición de datos Quantum.

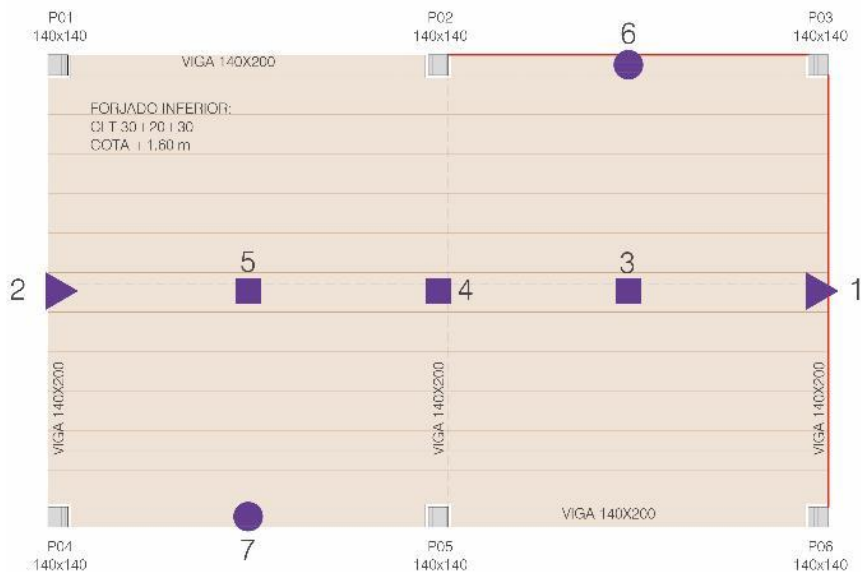


Figura 3. Disposición de los sensores en el forjado inferior. En rojo se marcan las zonas con arriostramiento. \triangle Potenciómetros de hilo 250 mm, \square Sensores LVDT WA/100MM y \circ Sensores LVDT WI/10MM.

3.5 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Se realizan los ensayos siguiendo dos normas diferentes: la norma española UNE-EN 380:1998 [22] y la alemana DAfStb Belastungsversuche [26]. Cada tipo es realizado por duplicado, cargando únicamente el forjado inferior. Entre un ensayo y el siguiente se deja un tiempo de reposo del forjado sin carga de al menos tres días, durante los cuales todo el volumen de agua está contenido en el forjado superior.

3.5.1 Prueba de carga según norma UNE-EN 380:1998

Considerando los objetivos de este trabajo, se opta por realizar la prueba de carga de deformación a largo plazo. Siguiendo la norma, se mide la deformación en los puntos máximos esperados (centros de vanos) y se registra en continuo los valores de fuerza y desplazamiento. Se registra con una frecuencia de 15 segundos durante las etapas de carga/descarga y de 120 segundos en las etapas de carga constante continuada. Se establece un valor de carga objetivo de $3,5 \text{ KN/m}^2$ y un valor de precarga de $0,5 \text{ KN/m}^2$.

Siguiendo las pautas de tiempo de la norma UNE 7457:1986 [21], la fase de observación bajo carga máxima (en este caso fase 7-8) debe mantenerse al menos 16 horas. La fase de descarga 8-9 debe hacerse en escalones análogos a la de carga. Por último, la fase de observación tras la descarga (9-10) debe ser análoga también a la de máxima carga, por tanto 16 horas. En la Figura 4 se detalla el procedimiento seguido. Esta prueba de carga se realiza a lo largo de cuatro días consecutivos.

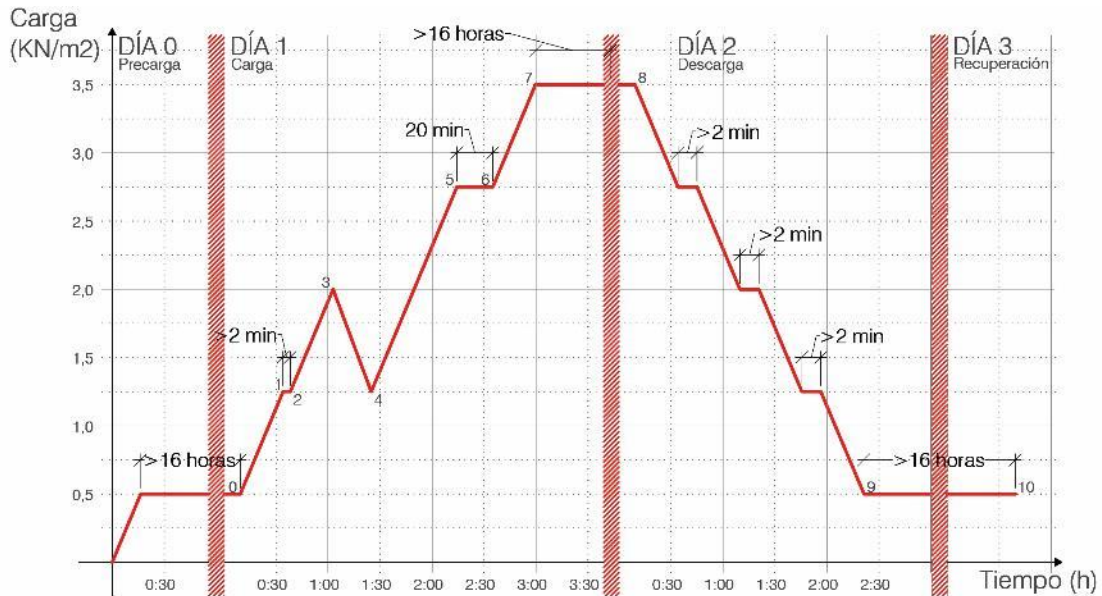


Figura 4. Gráfico carga-tiempo para la realización de la prueba de carga según la norma UNE-EN 380:1998.

3.5.2 Prueba de carga según norma DAfStb Belastungsversuche

La prueba de carga alemana diferencia entre carga objetivo de cálculo ($F_{obj,k}$) y carga objetivo de diseño ($F_{obj,d}$), que es la carga sin coeficientes de seguridad. Por ello, se establecen los siguientes valores:

- $F_{obj,k} = 3,5 \text{ kN/m}^2$
- $F_{obj,d} = 4,5 \text{ kN/m}^2$
- $F_{precarga} = 0,35 \text{ kN/m}^2$

Esta prueba de carga es cíclica, con etapas de carga y descarga muy seguidas, en las que el tiempo de carga constante es mínimo, aproximadamente de 6 minutos, como se observa en la Figura 5. La realización de la prueba de carga ocupa un total de 17,5 horas y se realiza en un único día.

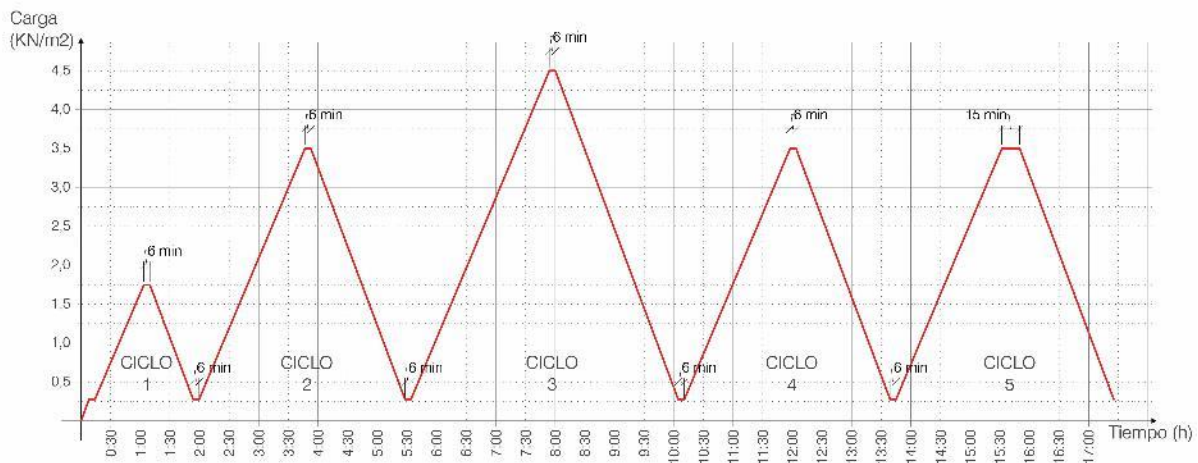


Figura 5. Gráfico carga-tiempo para la realización de la prueba de carga según la norma DAfStb Belastungsversuche.

Considerando los objetivos y circunstancias de la prueba, se propone un modelo de carga siguiendo los ciclos, pero alargando los tiempos de carga constante (Figura 6) por dos motivos: en primer lugar, para facilitar la realización de este ensayo, al dilatar esos tiempos de carga permite distribuirlo en cinco jornadas laborales consecutivas siendo la jornada más larga de ocho horas y media. En segundo, para adaptar la metodología al material específico de la estructura. A la madera le afecta considerablemente el fenómeno de fluencia, por lo que se considera conveniente estudiar su deformación diferida tanto en los periodos de carga como en los de recuperación tras la descarga.

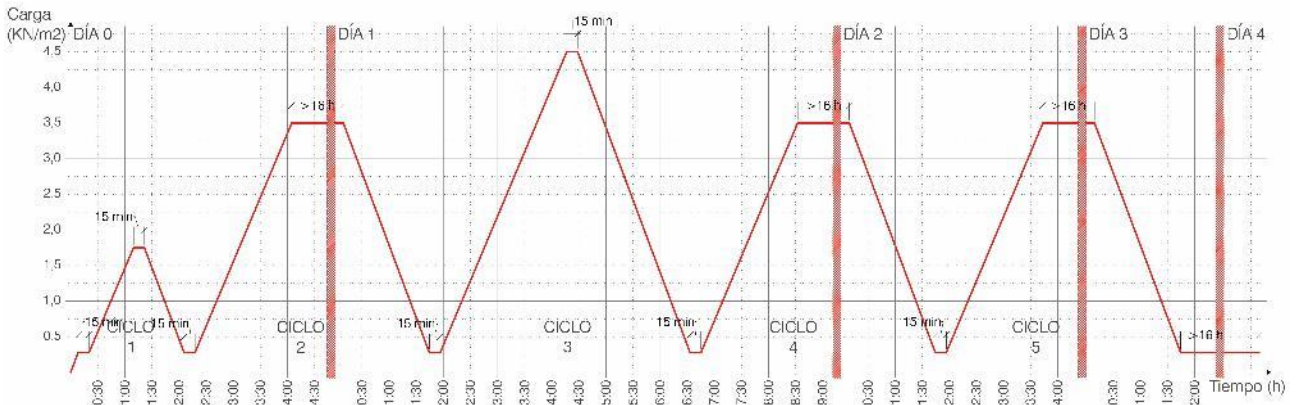


Figura 6. 7 Gráfico carga-tiempo para la realización de la prueba de carga según la norma DAfStb Belastungsversuche.

4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 PRUEBA DE CARGA SEGÚN NORMA UNE-EN 380:1998

En la Figura 7 se representan las gráficas tiempo/deformación obtenidas de las dos pruebas de carga realizadas siguiendo la norma española UNE-EN 380:1998 [22].

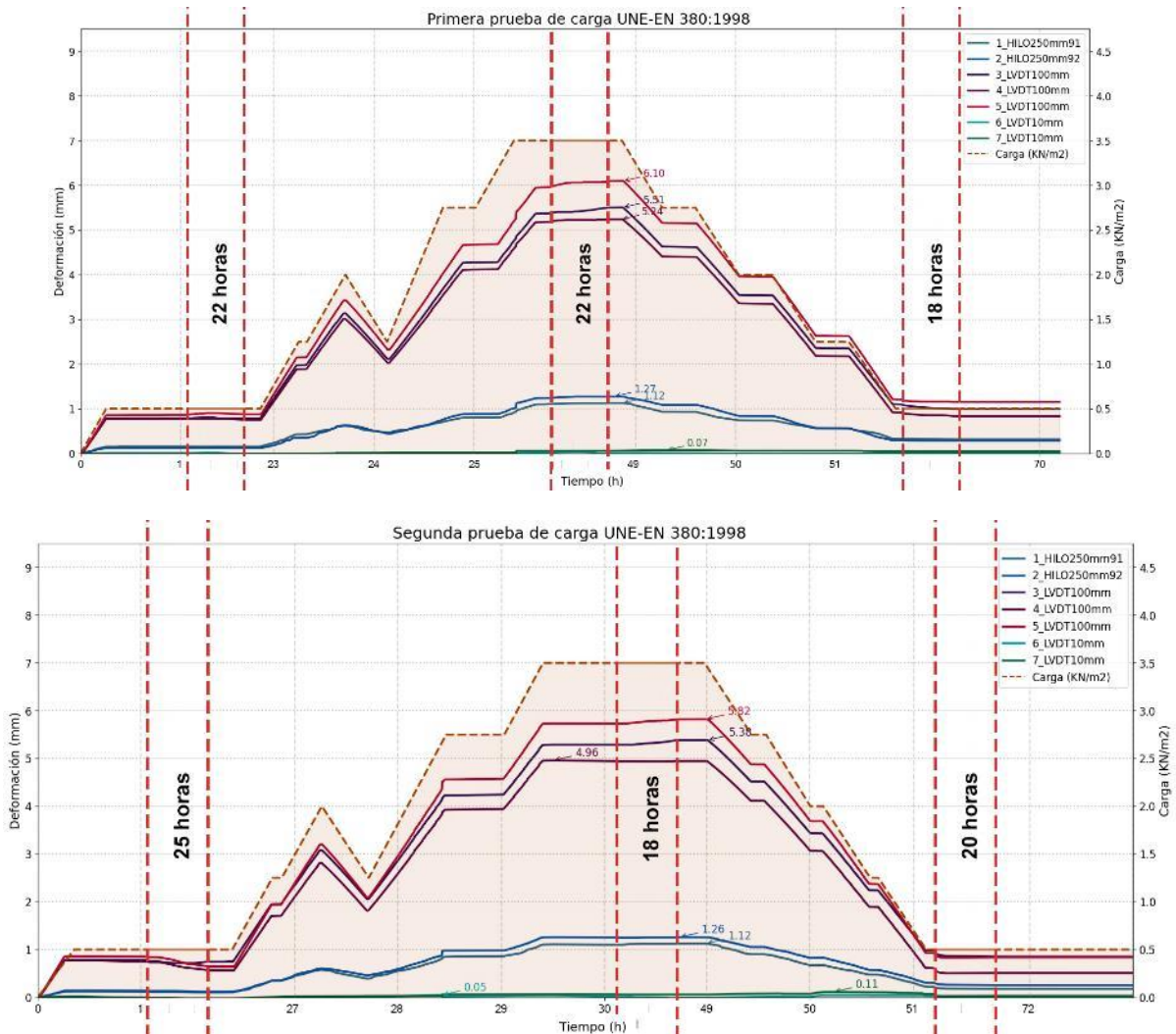


Figura 7. Gráficas tiempo/deformación de la estructura durante la realización de las pruebas de carga según norma UNE-EN 380:1998 [22]. Arriba ensayo 1.1 abajo ensayo 1.2

Se procede a centrar el estudio en las deformaciones obtenidas en los puntos 3, 4 y 5 por considerarse las de mayor relevancia. La etapa de precarga durante la primera prueba muestra una deformación prácticamente constante a lo largo del tiempo de carga mantenida. Sin embargo, en la segunda prueba existe una disminución de la deformación a lo largo del tiempo a pesar de que la carga se mantiene constante (Tabla 1).

Tabla 1. Variación de las deformaciones durante la etapa de carga constante en la precarga

Ensayo	mm	1_HILO250	2_HILO250	3_LVDT100	4_LVDT100	5_LVDT100	6_LVDT10	7_LVDT10
1.1	Def. inicial	0,15	0,12	0,78	0,77	0,86	0,01	0,01
	Def. final	0,15	0,12	0,78	0,75	0,87	0,02	0,01
	%	0%	0%	0%	2,6%	101,2%	200%	0%
1.2	Def. inicial	0,11	0,13	0,75	0,73	0,84	0,02	0,02
	Def. final	0,10	0,12	0,74	0,56	0,64	0,04	0,02
	%	9,1%	7,7%	1,3%	23,3%	23,8%	200%	0%

El pico de carga de las etapas 2-4 afecta a las deformaciones como se muestra en la Tabla 2. A pesar de estar sometidos a la misma carga exactamente, se obtiene un incremento de deformación de hasta el 134% en el centro del vano en la primera prueba de carga y de 108,8% en la segunda prueba de carga.

Tabla 2. Variación de las deformaciones ante la misma carga aplicada antes y después del pico de carga de las etapas 2-4.

Ensayo	mm	1_HILO250	2_HILO250	3_LVDT100	4_LVDT100	5_LVDT100	6_LVDT10	7_LVDT10
1.1	Def. previa	0,43	0,35	1,98	1,89	2,15	0,01	0,01
	Def. posterior	0,52	0,55	2,62	2,52	2,88	0,01	0,01
	%	120,9%	157,1%	132,3%	133,3%	134%	0%	0%
1.2	Def. previa	0,35	0,35	1,95	1,71	1,94	0,01	0,01
	Def. posterior	0,39	0,46	2,08	1,85	2,11	0,01	0,03
	%	111,4%	131,4%	106,7%	108,2%	108,8%	0%	300%

Durante la etapa de carga máxima mantenida se puede observar claramente el fenómeno de fluencia. En ambas pruebas se produce un incremento de deformación ante una carga constante aplicada. Esto también se puede observar en la etapa de recuperación, en la que aparece una deformación diferida negativa.

Tabla 3. Variación de las deformaciones durante las etapas de carga máxima constante y recuperación.

Ensayo	mm	1_HILO250	2_HILO250	3_LVDT100	4_LVDT100	5_LVDT100	6_LVDT10	7_LVDT10
1.1	Def. inicial	0,93	1,01	4,80	4,63	5,24	0,03	0,02
	Carga Def. final	1,12	1,27	5,51	5,24	6,10	0,01	0,06
	%	120,4%	125,7%	114,8%	113,2%	116,4%	66,7%	300%
Recup.	Def. inicial	0,33	0,29	1,10	0,91	1,20	0,01	0,04
	Def. final	0,31	0,28	0,99	0,83	1,15	0,01	0,04
	%	6,1%	3,5%	10%	8,8%	4,2%	0%	0%
1.2	Def. inicial	1,10	1,25	5,29	4,94	5,73	0,01	0,06
	Carga Def. final	1,12	1,26	5,38	4,95	5,82	0,01	0,06
	%	101,8%	100,8%	101,7%	100,2%	101,6%	0%	0%
Recup.	Def. inicial	0,22	0,31	0,98	0,61	0,93	0,03	0,07
	Def. final	0,17	0,24	0,83	0,51	0,85	0,01	0,04
	%	22,7%	22,6%	15,3%	16,4%	8,6%	66,7%	42,9%

Las deformaciones máximas en ambas pruebas se obtienen en el centro del vano del CLT (sensor 5_LVDT100mm) al finalizar la etapa de carga constante. El valor no simétrico con respecto al sensor 3 se debe a que, al estar colocado en el centro, se encuentra afectado por la unión entre los paneles CLT. La unión entre placas no está cosida, si no que están simplemente apoyadas la una sobre la otra. La articulación longitudinal generada provoca variación de las deformaciones a su alrededor. En el caso de la primera prueba de carga la variación de deformación máxima entre estos dos sensores es de un 9,7% y en la segunda prueba de carga de un 8,6%.

4.2 PRUEBA DE CARGA SEGÚN NORMA DAFSTB BELASTUNGSVERSUCHE

En la Figura 9 se dibuja las gráfica tiempo/deformación obtenida de las pruebas de carga realizada siguiendo la norma DAfStb Belastungsversuche [26].

Esta norma no es específica para estructuras de madera, como sí lo es la norma española. La norma alemana no especifica para qué tipo de estructuras es aplicable. Otra diferencia clara es que esta norma plantea una prueba de carga cíclica: la estructura se somete a la carga de diseño en distintos ciclos consecutivos, con un solo escalón de carga y otro único escalón de descarga. La norma no concreta los periodos de carga constante ni los de recuperación tras la descarga, lo cual es importante para los objetivos perseguidos. Por ello, se realizó inicialmente un ensayo siguiendo las directrices de la norma obteniéndose la gráfica tiempo/deformación de la Figura 8.

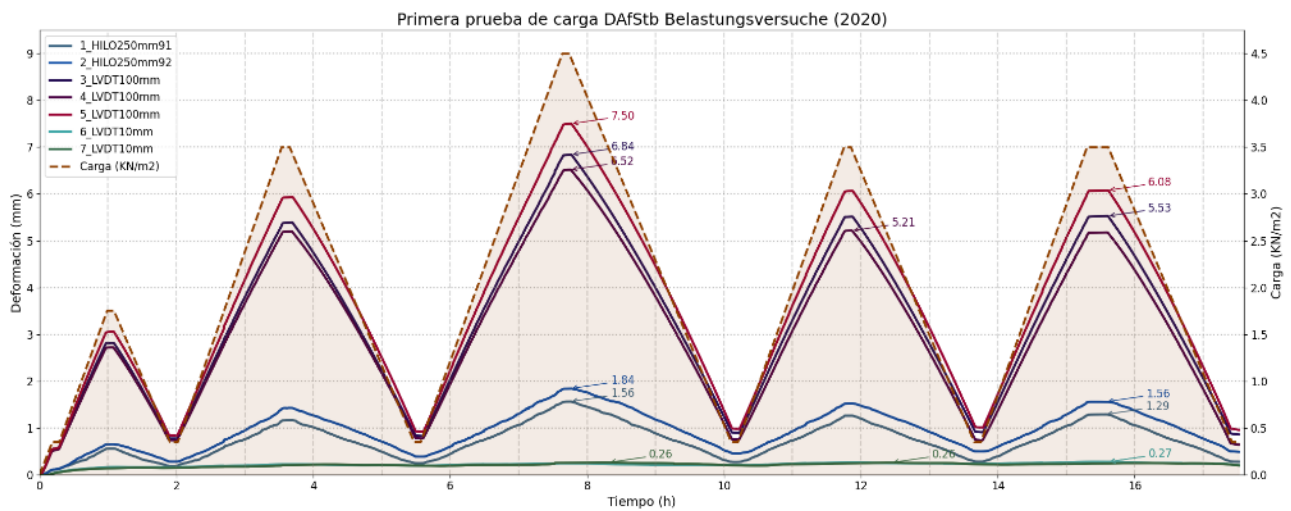


Figura 8. Ensayo 2.1. Gráfica tiempo/deformación de la estructura durante la realización de la prueba de carga siguiendo la norma alemana DAfStb Belastungsversuche [26].

El ensayo duró un total de 17,5 horas seguidas, durante una única jornada. Dado que las condiciones habituales en obra no suelen incluir sistemas automáticos para la carga y la descarga, esta metodología es poco viable en la práctica, debido a su duración. Por ello, no estando definidos los tiempos en la norma, se plantea una metodología compatible en la que los ciclos en los que se llega a la carga objetivo de cálculo se alargan, permitiendo dividir la prueba de carga en cuatro jornadas y estudiar la deformación diferida y la recuperación de la estructura tras la carga, en una quinta jornada. Así, el segundo ensayo con la norma alemana, también por duplicado, se realiza siguiendo esta metodología adaptada. En la Figura 9 se muestra su gráfica tiempo/deformación.

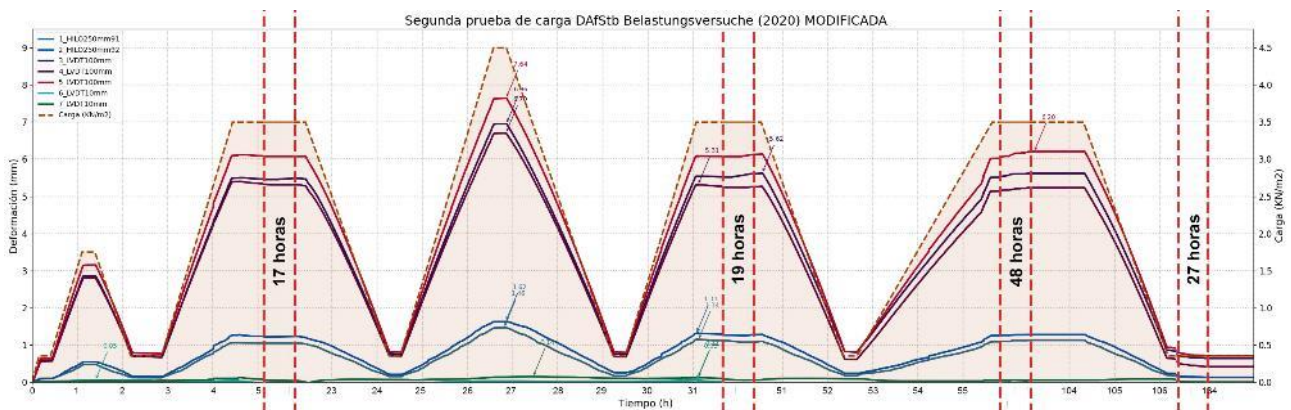


Figura 9. Ensayo 2.2. Gráfica tiempo/deformación de la estructura durante la realización de la prueba de carga adaptando el procedimiento de la norma alemana DAfStb Belastungsversuche [26].

De nuevo centramos el estudio en los resultados de los sensores 3, 4 y 5 y se observa que las máximas deformaciones siempre se obtienen en el punto 5. Se pueden comparar los máximos obtenidos en cada uno de los ciclos de carga de las dos pruebas de carga en la Tabla 4. La modificación del procedimiento no varía de manera notable los resultados de deformaciones máximas. La mayor variación es un incremento al 103,3% de la deformación en los sensores 4 y 5 durante el ciclo 1.

Tabla 4. Variación de las deformaciones comparando las dos pruebas de carga durante las etapas de carga constante de cada ciclo.

Sensor n°	Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3			Ciclo 4			Ciclo 5		
	3	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4	5
E 2.1 (mm)	2,82	2,72	3,05	5,38	5,19	5,93	6,84	6,51	7,50	5,51	5,21	6,06	5,53	5,18	6,08
E 2.2 (mm)	2,86	2,81	3,15	5,48	5,31	6,07	6,96	6,70	7,64	5,61	5,26	6,13	5,62	5,23	6,20
%	101,4	103,3	103,3	101,9	102,3	102,4	101,8	102,9	101,9	101,8	101,0	101,1	101,6	101,0	102,0
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Esta metodología cíclica de realización de pruebas de carga permite observar el fenómeno de histéresis o fatiga: si se comparan entre sí los tres ciclos con la misma carga (en este caso los ciclos 2, 4 y 5), en las dos pruebas el ciclo 2 tiene menos deformación que el ciclo 5. En la Tabla 5 se muestra el incremento de deformación con respecto a la deformación obtenida en el ciclo anterior.

Tabla 5. Variación de las deformaciones comparando las dos pruebas de carga durante las etapas de carga constante de cada ciclo.

		Ciclo 2		Ciclo 4		Ciclo 5	
		Def máx (mm)	Def máx (mm)	Incremento %	Def máx (mm)	Incremento %	
Ensayo 2.1	1_HILO250	1,16	1,26	8,6%	1,28	1,6%	
	2_HILO250	1,42	1,52	7%	1,56	2,6%	
	3_LVDT100	5,38	5,51	2,4%	5,53	0,4%	
	4_LVDT100	5,19	5,21	0,4%	5,18	-0,6%	
	5_LVDT100	5,93	6,06	2,2%	6,08	0,3%	
	6_LVDT10	0,22	0,26	18,2%	0,27	3,8%	
	7_LVDT10	0,20	0,24	20%	0,24	0%	
Ensayo 2.2 (adaptado)	1_HILO250	1,04	1,08	3,8%	1,13	4,6%	
	2_HILO250	1,23	1,27	3,3%	1,27	0%	
	3_LVDT100	5,48	5,61	2,3%	5,62	0,1%	
	4_LVDT100	5,31	5,26	-0,9%	5,23	-0,6%	
	5_LVDT100	6,07	6,13	1%	6,20	1,4%	
	6_LVDT10	0,07	0,07	0%	0,07	0%	
	7_LVDT10	0,03	0,05	66,7%	0,04	-20%	

Por otro lado, cabe destacar la no linealidad de la deformación en los ciclos de descarga. En las Figuras 9 y 10 se observa cómo la deformación traza una línea ligeramente curva durante las etapas de descarga, mientras que en las etapas de carga la deformación va aumentando de una forma aproximadamente lineal.

Para finalizar, comparando la metodología siguiendo estrictamente las pautas de la norma alemana y la adaptada a la jornada laboral, se puede concluir que sí que interesa estudiar la deformación diferida en estructuras de madera. Merece la pena prestar atención a esta deformación en las etapas de carga máxima, pero sobre todo en la etapa de recuperación de la estructura. En esta etapa la deformación desciende de manera considerable con respecto a la deformación instantánea tras la última etapa de descarga (Tabla 6).

Tabla 6. Variación de las deformaciones durante la etapa de recuperación al finalizar el ensayo 2.2

mm	1_HILO250	2_HILO250	3_LVDT100	4_LVDT100	5_LVDT100	6_LVDT10	7_LVDT10
Def. inicial	0,18	0,23	0,85	0,64	0,93	0,03	0,08
Def. final	0,12	0,12	0,61	0,41	0,71	0,01	0,02
%	35,9%	46%	28,8%	24,1%	23,7%	66,7%	75%

4.3 COMPARACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE LAS NORMAS UNE-EN 380:1998 Y DAFSTB BELASTUNGSVERSUCHE

La diferencia principal entre la metodología de estas dos pruebas de carga es que la española consta de una única etapa de carga y descarga mientras que la alemana es cíclica.

La norma alemana (2020) es más reciente y actualiza una anterior de ciclo único, como la española. Esto invita a pensar que el procedimiento quizá sea más adecuado. Sin embargo, la norma alemana no está enfocada específicamente a ningún material, como si lo está la española específica de estructuras de madera. Como se ha demostrado, monitorizar las etapas de carga constante, tanto con carga máxima como en recuperación de la estructura tras la prueba de carga, tienen relevancia.

Los escalones durante las etapas de carga y descarga propuestos por la norma española no afectan a la hora de estudiar la deformación alcanzada con carga máxima. Estos escalones pueden tener sentido por temas de seguridad del proceso en aquellos casos en los que se desconozca completamente o se desconfíe del estado de la estructura. De esta manera se puede ir evaluando el comportamiento de la estructura en directo, sin correr excesivo riesgo y detener la prueba de carga en caso de duda. Se propone que estos escalones sean de carácter recomendable pero no obligatorios.

El pico de carga que propone la norma española sí que muestra el comportamiento diferido de las estructuras de madera. Sin embargo, parece más efectiva la repetición del ciclo de carga y descarga como propone la norma alemana, especialmente alargando los estadios, como ha sido propuesto en este caso. Con el procedimiento alemán se muestra de una manera más clara y sencilla de estudiar.

Comparando específicamente el procedimiento se pueden estudiar dos aspectos: el tiempo y el consumo de agua. Es cierto que la norma alemana es claramente más breve que la española. Sin embargo, necesita de automatización de los sistemas de carga y descarga y de grandes caudales para su realización a lo largo de una única jornada. Es decir, la brevedad en el tiempo supone un aumento de la complicación operativa para su realización. En cuanto al consumo de agua, en el caso particular de los ensayos realizados, se ha diseñado un sistema de reutilización del agua, ya que se trata de un ámbito de

laboratorio. No obstante, estas normas están destinadas a la realización de pruebas de carga en edificación, donde no siempre va a ser posible disponer de un depósito donde acumular el agua para su reutilización. Por tanto, en una situación real, en la que también se opte por cargar la estructura con agua, la norma alemana consumiría 3,5 veces más agua que la norma española. Teniendo en cuenta que la construcción es uno de los sectores más contaminantes, conviene hacer una reflexión sobre la sostenibilidad de los procedimientos.

5 CONCLUSIONES

No existe consenso entre las normativas europeas respecto a la realización de pruebas de carga en estructuras de edificación; se observa una tendencia no especificada hacia el hormigón armado y una falta de adaptación para estructuras de madera.

Las metodologías estandarizadas se clasifican en dos tipos principales: ensayos cíclicos y ensayos de ciclo único, también conocidos como monotónicos.

Al comparar ambos tipos, se observa que la principal ventaja de los ensayos cíclicos, su rápida ejecución, se convierte en inconveniente a menos que se automaticen la carga y descarga. Aunque estos ensayos se completan en una sola jornada, su duración puede ser excesiva. El ensayo monotónico, que se extiende por cuatro días, se adapta mejor a los horarios de trabajo habituales.

Los ensayos cíclicos permiten observar la histéresis de la estructura, pero no capturan la deformación y recuperación diferidas, relevantes en el caso de la madera, y que sí se controlan en el ensayo de ciclo único. En madera, las etapas de carga y descarga deberían tener una duración mínima de 16 horas.

La aplicación escalonada de la carga no altera el resultado final del ensayo, aunque los escalones pueden aumentar la seguridad durante la ejecución de la prueba. Por tanto, se recomienda su implementación, aunque no sea obligatoria.

Los escalones intermedios en las etapas de carga y descarga no afectan a la deformación máxima obtenida bajo la carga objetivo. Eliminar estos escalones, siguiendo el modelo de la prueba cíclica, podría acelerar el proceso en los ensayos monotónicos.

La elección del tipo de prueba de carga a realizar (monotónica o cíclica) depende críticamente de los medios disponibles, y afectan al tiempo de realización.

Si se utilizan cargas con agua, el compromiso medioambiental exige la implementación de un sistema de reaprovechamiento.

6 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

1. **Ampliación del campo de estudio de la normativa de pruebas de carga en estructuras de edificación a un ámbito internacional.** Comparación de metodologías y propuesta de una norma específica y actualizada para estructuras de madera.
2. **Calibración del modelo analítico a partir de los resultados estáticos** obtenidos de los ensayos. Estudio del comportamiento de las uniones.
3. **Realización de ensayos dinámicos con el objetivo de correlacionar los resultados estáticos con los modales.** Las técnicas de análisis y diagnóstico de la salud estructural (SHM) basadas en la respuesta dinámica y el análisis modal ambiental u operacional se han usado con éxito para identificar daño en edificaciones y obras civiles. Los parámetros modales son función de las propiedades físicas y mecánicas del material (masa, amortiguamiento y rigidez). Los cambios en dichas propiedades se traducen en cambios en las propiedades modales. Sin embargo, la heterogeneidad y variabilidad de las propiedades mecánicas de la madera pueden enmascarar las variaciones modales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con la ayuda del programa de apoyo a proyectos de investigación de la Junta de Castilla y León, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (VA228P20) y del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, bajo el programa nacional Formación de Profesorado Universitario (FPU21/01984).

REFERENCIAS

- [1] S. Marx, G. Bolle, y G. Schacht, «Loading Tests of Existing Concrete Structures-Historical Development and Present Practise», 2011. Accedido: 13 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/265597845_Loading_Tests_of_Existing_Concrete_Structures_-_Historical_Development_and_Present_Practise

- [2] E. O. L. Lantsoght, C. van der Veen, A. de Boer, y D. A. Hordijk, «State-of-the-art on load testing of concrete bridges», *Eng Struct*, vol. 150, pp. 231-241, nov. 2017, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.07.050.
- [3] B. Fred Moses, J. Paul Lebet, y R. Bez, «Applications of Field Testing to Bridge Evaluation», *Journal of Structural Engineering*, vol. 120, n.º 6, pp. 1745-1762, jun. 1994, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:6(1745).
- [4] D. Veneziano, D. Galeota, y M. M. Giammatteo, «Analysis of bridge proof-load data I: Model and statistical procedures», *Structural Safety*, vol. 2, n.º 2, pp. 91-104, ene. 1984, doi: 10.1016/0167-4730(84)90013-4.
- [5] G. Bolle, G. Schacht, y S. Marx, «Geschichtliche Entwicklung und aktuelle Praxis der Probelastung — Teil 1: Geschichtliche Entwicklung im 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts», *Bautechnik*, vol. 87, n.º 11, pp. 700-707, nov. 2010, doi: 10.1002/BATE.201010047.
- [6] W. Brent Hall y M. Tsai, «Load testing, structural reliability and test evaluation», *Structural Safety*, vol. 6, n.º 2-4, pp. 285-302, nov. 1989, doi: 10.1016/0167-4730(89)90028-3.
- [7] A. De Luca, H. J. Zadeh, y A. Nanni, «In-Situ Load Testing of a One-Way Reinforced Concrete Slab», *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2013.
- [8] ACI 318, «ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete». American Concrete Institute. Committee 318, 2019.
- [9] ACI 437.2, «ACI 437.2-13 Code requirements for load testing of existing concrete structures». American Concrete Institute. Committee 437, 2014.
- [10] N. Galati y T. Alkhrdaji, «In-situ evaluation of structures using load testing», en *Forensic Engineering, Proceedings of the Congress*, 2009, pp. 657-667. doi: 10.1061/41082(362)67.
- [11] N. Galati, A. Nanni, J. Gustavo Tumialan, y P. H. Ziehl, «In-Situ Evaluation of Two Concrete Slab Systems. I: Load Determination and Loading Procedure», *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 22, n.º 4, pp. 207-216, ago. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:4(207).
- [12] G. Schacht, G. Bolle, y S. Marx, «Belastungsversuche – Internationaler Stand des Wissens», *Bautechnik*, vol. 93, n.º 2, pp. 85-97, feb. 2016, doi: 10.1002/BATE.201500097.
- [13] W. Brent Hall y M. Tsai, «Load testing, structural reliability and test evaluation», *Structural Safety*, vol. 6, n.º 2-4, pp. 285-302, nov. 1989, doi: 10.1016/0167-4730(89)90028-3.
- [14] D. S. Jones y C. W. Oliver, «The practical aspects of load testing», *The structural engineer*, vol. 56A, pp. 353-356, dic. 1978.
- [15] G. Tumialan, N. Galati, y A. Nanni, «In-Situ Load Testing of Concrete Structures. Part 1: Rationale, Objectives and Execution», *Structural Testing*, pp. 10-12, abril de 2014. [En línea]. Disponible en: www.Engineering-International.com
- [16] E. Reschel y J. Vielhaber, «Loading test involving historic structures, opportunity or risk?», en *First International Congress on Construction History*, Madrid, 2003.
- [17] The Institution of Structural Engineers, *Appraisal of existing structures*, 3.ª ed. Institution of Structural Engineers (Great Britain), 2010.
- [18] J. B. Menzies, «Load testing of concrete building structures», *The structural engineer*, vol. 56A, pp. 347-353, dic. 1978.
- [19] A. De Luca, N. Galati, A. Nanni, y T. Alkhrdaji, «In-Situ Load Testing: A Theoretical Procedure to Design a Diagnostic Cyclic Load Test on a Reinforced Concrete Two-Way Slab Floor System», *Key Eng Mater*, vol. 347, pp. 165-172, sep. 2007, doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.347.165.
- [20] P. Olaszek, G. Świt, y J. R. Casas, «Proof load testing supported by acoustic emission. An example of application», en *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization - Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, 2010, pp. 484-491.
- [21] UNE 7-457:1986, «UNE 7-457-86 Realización de ensayos estáticos de puesta en carga sobre estructuras de piso en edificación». Instituto Español de Normalización IRANOR, 1986.
- [22] UNE-EN 380:1998, «UNE-EN 380 Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Principios generales para los ensayos de carga estática». Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 1998.
- [23] UNE-EN 595:1996, «UNE-EN 595 Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Ensayo para la determinación de la resistencia y rigidez de las cerchas.» Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 1996.
- [24] UNE-EN 1990:2019, «UNE-EN 1990 Eurocódigos. Bases para el cálculo de estructuras». Asociación Española de Normalización AENOR, 2019.
- [25] «Código estructural». 2021.
- [26] «DAfStb Belastungsversuche». DAfStb, 2020.
- [27] «Norme tecniche per le costruzioni». 2018.
- [28] ISO 13822, «ISO 13822 Bases for design of structures - Assessment of existing structures». ISO, 2010.
- [29] BS 8110-2, «BS 8110-2 Structural use of concrete - Part 2: Code of practice for special circumstances». British Standards Institution, 1985.
- [30] ONR 24009, «ONR 24009 Evaluation of load capacity of existing building constructions». Austrian technische Norm ONR, 2013.
- [31] SIA 269-5, «SIA 269-5:2011 Erhaltung von Tragwerken - Holzbau». Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos SIA, 2011.
- [32] UNI 11119, «UNI 11119:2004 Cultural heritage - Wooden artefacts - Load-bearing structures - On site inspections for the diagnosis of timber members». Ente Nazionale Italiano di Unificazione UNI, 2004.

- [33] UNI 11138, «UNI 11138:2004 Cultural heritage - Wooden artefacts - Building load bearing structures - Criteria for the preliminary evaluation, the design and the execution of works». Ente Nazionale Italiano di Unificazione UNI, 2004.
- [34] VDI 6200, «VDI 6200:2010 – VDI-Richtlinie – Standsicherheit von Bauwerken – Regelmäßige Überprüfung». Verein Deutscher Ingenieure e.V, Düsseldorf, 2010.
- [35] ARGEBAU, «Hinweise und Beispiele zum Vorgehen beim Nachweis der Standsicherheit beim Bauen im Bestand». Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (ARGEBAU), 2008.
- [36] M. Loebjinski, G. Linke, W. Rug, y H. Pasternak, «Evaluation of existing timber structures - current standards for the assessment and evaluation in Germany and Europe», 2019.
- [37] P. Luechinger *et al.*, *New European technical rules for the assessment and retrofitting of existing structures*. [Publications Office], 2015.
- [38] UNE-EN 14080:2022, «Timber structures. Glued laminated timber and glued solid timber. Requirements.» Asociación Española de Normalización AENOR, 2022. [En línea]. Disponible en: www.une.org
- [39] UNE-EN 338:2016, «Structural timber. Strength classes». Asociación Española de Normalización AENOR, 2016. [En línea]. Disponible en: www.une.org