

El control de la carga de los puntales: eficiencia y seguridad durante la construcción de estructuras de edificios

Controlling the load of props: efficiency and safety during the construction of building structures

Manuel Buitrago^{*,a}, Pedro A. Calderón^b, Jose M. Adam^c, Juan J. Moragues^d, Juan Sagaseta^e

^{*,a} Dr. ICITECH. Investigador posdoctoral. Universitat Politècnica de València. E-mail: mabuimo1@upv.es

^b Dr. ICITECH. Catedrático de universidad. Universitat Politècnica de València. E-mail: pcaldero@upv.es

^c Dr. ICITECH. Catedrático de universidad. Universitat Politècnica de València. E-mail: joadmar@upv.es

^d Dr. ICITECH. Catedrático de universidad. Universitat Politècnica de València. E-mail: jmorague@upv.es

^e Dr. Department of Civil and Environmental Engineering. Senior Lecturer. University of Surrey. E-mail: j.sagaseta@surrey.ac.uk

RESUMEN

En este artículo se presenta el nuevo dispositivo de control de la carga de los puntales (limitador de carga - LL por sus siglas en inglés), que fue desarrollado en ICITECH a partir de estudios teóricos avanzados, una intensa campaña experimental y la ejecución de una prueba de concepto. El artículo se compone de: 1) una breve recopilación de los trabajos experimentales y de validación llevados a cabo; y 2) el estudio realizado con simulación numérica avanzada para evaluar y cuantificar la posible mitigación del daño y el riesgo de fallo de estructuras de edificios durante su construcción. De los resultados obtenidos se puede afirmar que con el uso de LLs se consiguen mejoras en: seguridad, eficiencia estructural y costes.

ABSTRACT

This conference paper presents the new device for controlling the load of shores/props (Load Limiter – LL) which was developed in ICITECH with the help of advanced theoretical studies, a wide experimental campaign and a proof of concept. The content of the paper is: 1) a brief summary of the experimental works carried out; and 2) the study with advanced numerical models to assess and quantify risk and damage mitigation of building structures during construction with and without the use of LLs. Results confirmed that the use of LLs can improve safety, efficiency and costs of the shoring/propping system acting as a temporary structure during the construction of buildings.

PALABRAS CLAVE: colapsos, eficiencia, fusible estructural, limitador de carga, optimización, seguridad.

KEYWORDS: failures, efficiency, structural fuse, load limiter, optimization, safety.

1. Introducción

El cimbrado de plantas sucesivas es el método más ampliamente utilizado para acometer la construcción de estructuras de edificios [1–3]. Este procedimiento consiste en el cimbrado de una o más plantas consecutivas cimbradas

encargadas de transmitir y repartirse las nuevas cargas de hormigonado o de cualquier operación constructiva como el clareado, recimbrado o descimbrado. Muchos han sido los estudios acometidos para tratar de definir cómo se

transmiten las cargas entre forjados y puntales, así como los métodos simplificados de cálculo desarrollados para predecir de una forma sencilla esta transmisión de cargas [1,3–11].

A pesar de los grandes esfuerzos y avances realizados en esta dirección, y de las mejoras transferidas a la industria e introducidas por las empresas de cimbrado en el sector, queda todavía un margen significativo de mejora en diferentes aspectos, como son:

- La seguridad durante la construcción, ya que son diversos los colapsos y fallos registrados anualmente que tradicionalmente diferentes autores han ido recopilando [12].
- El sobredimensionamiento de puntales que actualmente deben ser escogidos para resistir la carga máxima del sistema de apuntalamiento en la operación constructiva más desfavorable y en la posición de más carga (habitualmente las zonas cercanas al centro de vano). Esta heterogeneidad de cargas presente en una misma planta provoca que gran parte de los puntales empleados estén claramente sobredimensionados, sin aprovechar su capacidad resistente. Es el claro ejemplo de los puntales cercanos a las columnas que reciben una carga muy inferior a los instalados en centros de vano.
- La posibilidad de utilizar todo el stock de puntales disponible, y no solo aquellos puntales cuya carga admisible supere la carga máxima de cálculo en la operación constructiva más desfavorable.

Como solución a todos estos problemas nace el Limitador de Carga en puntales (LL por sus siglas en inglés), el nuevo dispositivo patentado por el Instituto Universitario de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València (UPV) [13,14] para el control de la carga de los puntales durante la construcción. La viabilidad técnico-económica del uso de este nuevo concepto fue previamente estudiada por Buitrago et al [15], demostrando su capacidad de mejora de la

seguridad durante la construcción, el coste del sistema temporal de apuntalamiento y la eficiencia estructural.

En este artículo se presenta, en el apartado 2, una descripción del limitador de carga y cómo controla la carga de los puntales. El apartado 3 muestra la amplia validación experimental llevada a cabo con diferentes ensayos en laboratorio y con la realización de una prueba de concepto. El apartado 4 recoge los estudios avanzados de simulación numérica realizados, así como las ventajas y mejoras introducidas por los LLs. Finalmente, las conclusiones obtenidas se presentan en el apartado 5.

2. El limitador de carga y cómo controla la carga de los puntales

El concepto de limitador de carga en puntales (LL por sus siglas en inglés) nace con el objetivo de evitar fallos durante la construcción de estructuras de edificios y reducir el riesgo de colapso de este tipo de estructuras. Además, otro objetivo consiste en reducir los costes del sistema de apuntalamiento con ayuda de la mejora de la eficiencia estructural del sistema de apuntalamiento durante la fase de construcción. La Figura 1 muestra un esquema de la estructura temporal de apuntalamiento más utilizada (compuesta por puntales, sopandas y tableros de encofrado), junto con el detalle de un puntal con el LL instalado. Este tipo de puntal está formado por dos tubos telescópicos, una rosca para el ajuste fino de la altura del puntal y una campana o arandela para la transmisión suave de la carga entre el pasador y la rosca. Los LLs están formados por una pareja de elementos conectados entre sí que se instalan entre el pasador y la campana del puntal, de forma que interrumpen y consecuentemente pueden controlar la transmisión de la carga del puntal.

Los LLs fueron diseñados para que inicien un comportamiento plástico a una carga determinada: la carga límite definida. Con este comportamiento plástico se permite el descenso

(δ) controlado del puntal que ha superado la carga límite, permaneciendo operativo y evitando, de forma simultánea, la sobrecarga y posible rotura de dicho puntal. La carga en exceso que hubiera recibido dicho puntal sin el uso del LL se redistribuye hacia los puntales vecinos, que a su vez llevan instalados LLs. Por motivos de seguridad, el máximo desplazamiento plástico del LL (igual a la altura de la ranura del LL; véase Figura 1 y Figura 2) viene limitado a un valor máximo, tras el que el puntal seguiría absorbiendo carga hasta su rotura. El inicio del comportamiento plástico, que permite limitar y controlar la carga del puntal, se produce con la formación de tres rótulas plásticas en la parte superior del LL. La Figura 2 muestra el comportamiento del LL antes y después de alcanzar la carga límite. En esta figura se puede observar el comportamiento real de los LLs y, a través de un modelo estructural simplificado de la parte superior del LL, cuál es su comportamiento estructural antes y después de alcanzar la carga límite. El comportamiento es elástico y lineal para cargas inferiores a la carga límite, mientras que para cargas superiores se inicia un comportamiento plástico con la formación de tres rótulas plásticas. Todo ello, extrapolado al caso de puntales con limitadores de carga instalados, se traduce en un comportamiento fuerza-desplazamiento como el presentado en la Figura 3, donde S_{adm} representa el valor de la carga límite de diseño del LL y S_u representa la carga última del puntal.

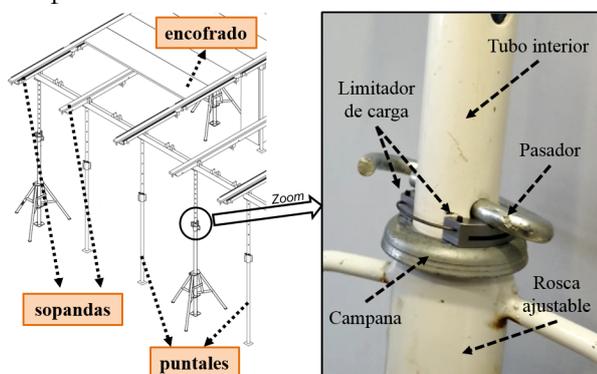


Figura 1. Esquema del sistema de apuntalamiento y detalle de un puntal con limitador de carga.

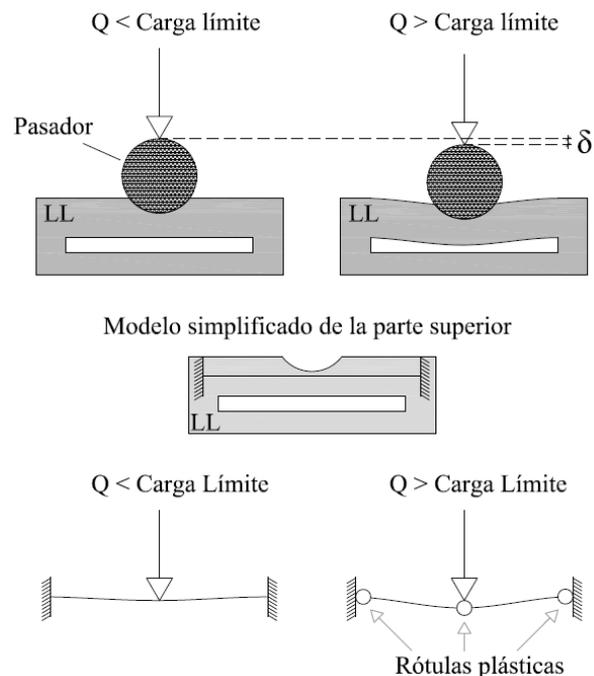


Figura 2. Comportamiento conceptual de los LLs antes y después de alcanzar la carga límite.

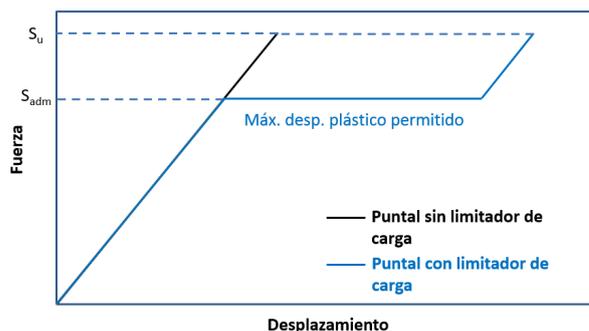


Figura 3. Comportamiento conceptual de puntales sin (negro) y con (azul) LLs.

A modo de ejemplo, la Figura 4 muestra los resultados obtenidos en laboratorio y una situación al finalizar un ensayo donde el LL ha alcanzado el máximo desplazamiento plástico permitido.

De esta forma, con el uso de LLs en puntales se consigue evitar la rotura repentina de puntales al introducir una clara componente dúctil que evita la descarga instantánea de los mismos y los posibles efectos negativos asociados, como pueden ser el fallo estructural completo o la aparición de defectos en la estructura durante la fase de construcción (flechas excesivas y fisuras que acarrearán, además, un fallo en el comportamiento a largo plazo de la estructura y su durabilidad).

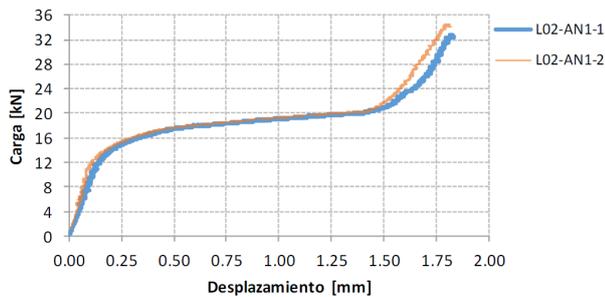


Figura 4. Resultados del ensayo de laboratorio y detalle del limitador de carga tras la finalización de uno de los ensayos.

3. Ensayos en laboratorio y prueba de concepto

Los LLs tuvieron una amplia campaña de validación experimental en condiciones de laboratorio. Tras su diseño [14], se iniciaron diferentes ensayos con el objetivo de comprobar y caracterizar el comportamiento individual de los LLs y el comportamiento de los mismos una vez instalados en puntales (véase Figura 5). Los resultados obtenidos fueron muy positivos [14], obteniendo un comportamiento similar al teóricamente definido (véanse Figura 3 y Figura 4).

Tras la validación experimental llevada a cabo en condiciones de laboratorio, se inició entonces una prueba de concepto que consistió en la construcción de una estructura en los laboratorios del ICITECH. En esta prueba se comprobó el correcto comportamiento de los LLs en condiciones reales de ejecución y considerando la componente tridimensional que tiene la ejecución real de una estructura de edificio. En este ensayo se permitió, consecuentemente, una redistribución de cargas

en el sistema de apuntalamiento al alcanzar la carga límite de los limitadores de carga (o carga admisible de los puntales), repartiendo así la concentración de cargas del sistema de apuntalamiento en los puntales situados en los puntos de mayor deformabilidad del forjado, entre todos los puntales y el forjado.

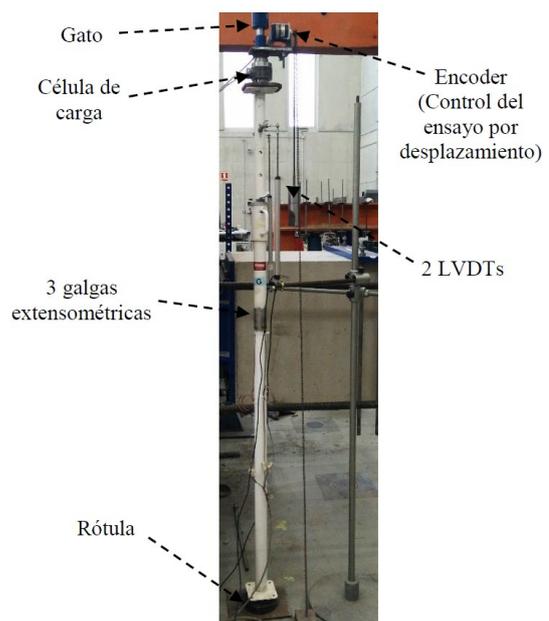
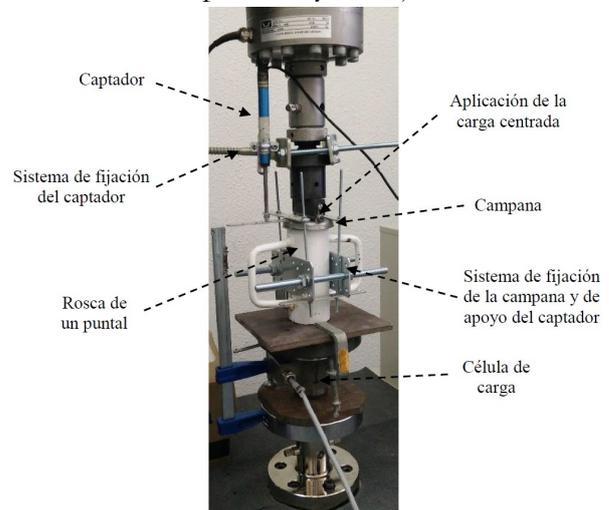


Figura 5. Ensayos realizados en laboratorio en LLs de forma individual (superior) e instalados en puntales (inferior).

La prueba consistió en la ejecución de una losa de 20cm de canto, sobre cuatro pilares con luces de 5m entre ejes, y un sistema de apuntalamiento con separación entre sopandas y entre puntales de 1m (véase Figura 6). El proceso constructivo adoptado consistió en un proceso con clareado al 50%, a los 3 días del

hormigonado, y la disposición de una sobrecarga sobre la losa con arena y piscinas a los 7 días del hormigonado de la losa (véase Figura 6), equivalente al hormigonado de una segunda planta y a la sobrecarga de construcción. Los puntales que permanecieron operativos tras el clareado tenían instalados LLs, cuya carga límite era de 16kN (igual a la carga admisible del puntal) cuando teóricamente se preveía que la carga máxima del sistema de apuntalamiento fuera de 23kN. Por lo tanto, se preveía la activación de los limitadores de carga, sin requerir de puntales con una mayor carga admisible o de un mayor número de unidades, y manteniendo la seguridad durante la fase de construcción evitando la descarga repentina de puntales debido a la rotura frágil de los mismos.

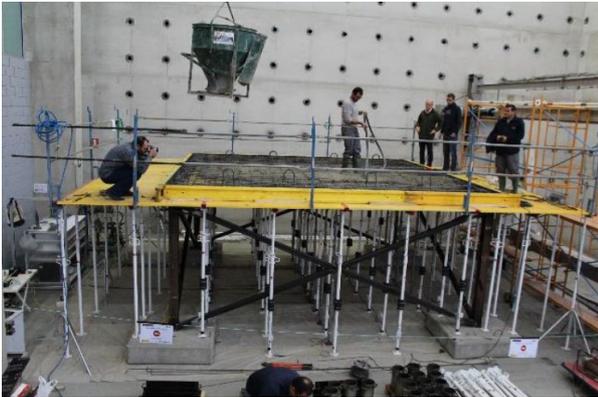


Figura 6. Hormigonado de la losa (superior) y disposición de la sobrecarga tras el clareado durante la prueba de concepto (inferior).

Se empleó un sistema de monitorización ambicioso, con el empleo de 3 galgas extensométricas por puntal (117 en total) para la medida de la carga de cada unidad, 6 termopares de medida de la madurometría [16,17] y gradientes de temperatura [18,19] del hormigón

ubicados tanto en probetas cilíndricas como en la losa, 4 sensores de deformación de fibra óptica en pilares para la medida de la carga de los mismos, y 14 captadores de desplazamiento para la medida de flechas en la losa y la obtención de curvas carga-desplazamiento en puntales.

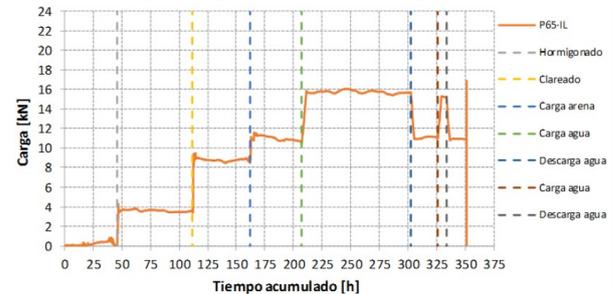


Figura 7. Registro de la carga en uno de los puntales más cargados durante las distintas fases del ensayo. Estado del LL en el momento de más carga de uno de los puntales más cargados.

Los resultados obtenidos fueron realmente satisfactorios y prometedores, aspecto que permitía que los LLs pudieran ser introducidos en el mercado con un amplio respaldo experimental. Dichos resultados serán tratados en profundidad en futuras publicaciones de los autores. A modo de resumen, los LLs se activaron durante la sobrecarga introducida sobre la losa en los puntales más cargados del ensayo experimental. Esto permitió que no se alcanzaran cargas muy elevadas en los puntales, manteniendo a los mismos en cargas muy próximas a sus cargas admisibles. Como se ha comentado anteriormente, el uso de los LLs también implicó: o a) el uso de puntales de menor capacidad resistente a la teóricamente necesaria, o b) el uso de una menor cantidad de puntales. La Figura 7 muestra uno de los resultados

obtenidos de la carga de uno de los puntales más cargados durante el desarrollo del ensayo, así como el estado del LL de uno de los puntales más cargados en el momento de su carga máxima. De esta fotografía puede observarse como con una ligera plastificación del LL se limitó la carga del puntal, redistribuyendo el exceso de carga entre el forjado y los puntales vecinos.

4. Simulación numérica para la evaluación de las mejoras introducidas por el limitador de carga

Adicionalmente a la realización de la extensa validación experimental del comportamiento de los LLs de forma aislada, instalados en puntales y con la ejecución de una prueba de concepto, se realizaron estudios avanzados de simulación numérica con los que evaluar cuantitativamente las mejoras introducidas por el LL durante la fase de construcción y la vida útil de estructuras de edificios. Para ello se escogieron diferentes estructuras de edificios con las que evaluar distintos aspectos: a) una estructura de edificio construida en el año 2007 por el grupo de investigación con propósitos únicamente experimentales, y una estructura de un edificio real (véase Figura 8), ambas estructuras con el objetivo de evaluar y cuantificar la eficiencia estructural introducida por los LLs y su repercusión en la reducción del coste del sistema de apuntalamiento y el aumento de la seguridad estructural; b) la estructura utilizada en la prueba de concepto para analizar qué hubiera ocurrido sin el uso de LLs (véase Figura 9); y c) una estructura real de un edificio de oficinas (véase Figura 9) con la que evaluar y cuantificar las ventajas del uso de LLs para mejorar la seguridad durante la fase de construcción evitando el fallo local del sistema de apuntalamiento que podría desencadenar el colapso progresivo de todo el

edificio o la aparición de defectos permanentes en la estructura de hormigón [20,21].

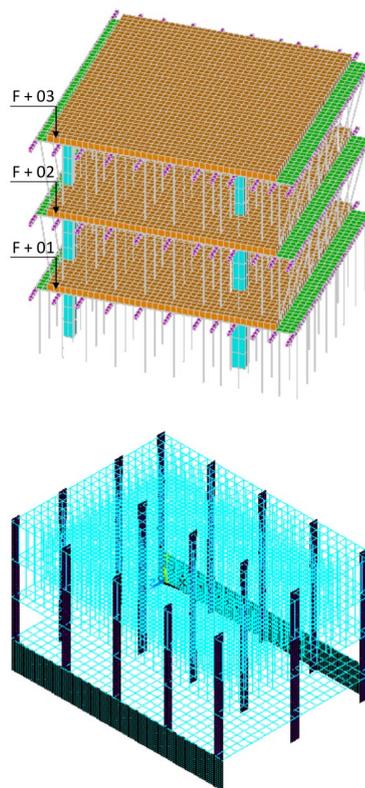


Figura 8. Modelización numérica realizada para una estructura construida con fines experimentales (superior) y otra aplicada a un caso de estudio real (inferior).

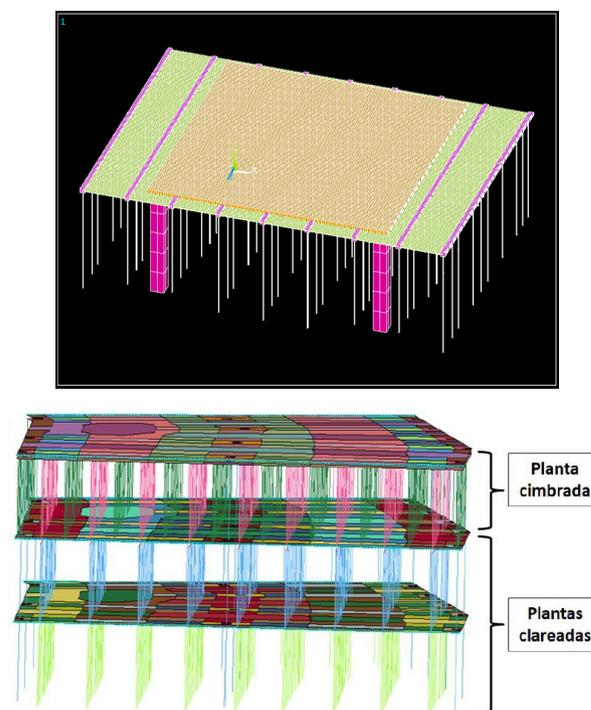


Figura 9. Modelización numérica realizada de la prueba de concepto (superior) y del edificio de oficinas (inferior).

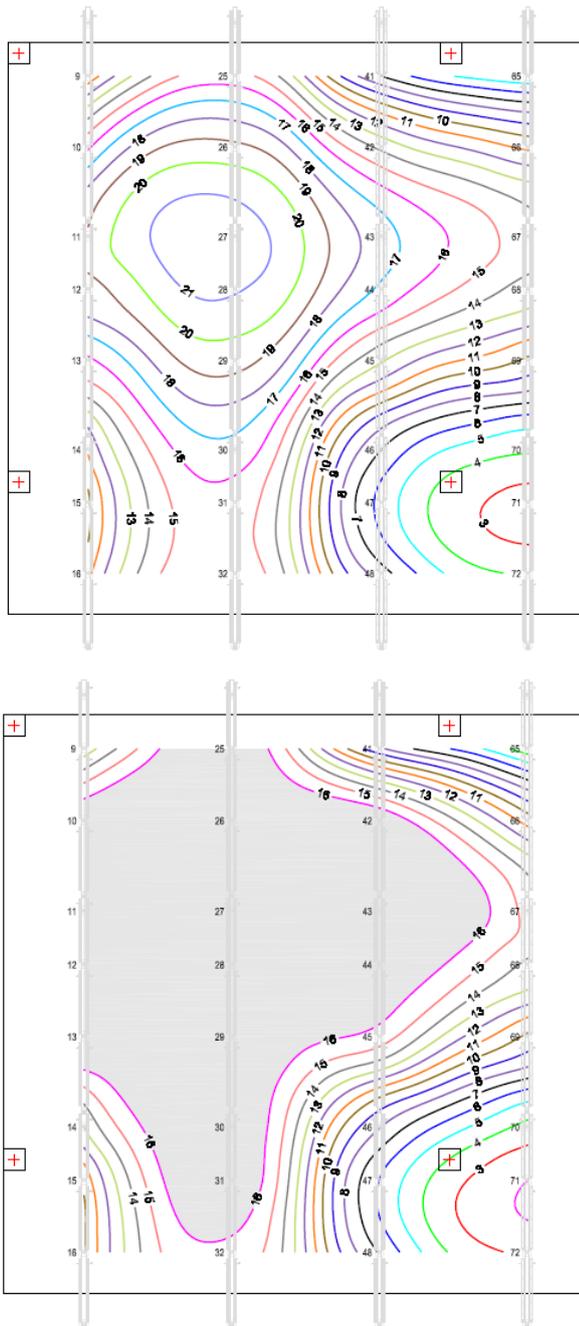


Figura 10. Distribución de cargas en puntales bajo el forjado 1 durante el hormigonado del forjado 2 del edificio experimental sin el uso de LLs (superior) y con el uso de LLs de 16kN (inferior).

De estos tres estudios distintos de simulación numérica, junto con la amplia validación experimental llevada a cabo, se establecieron y cuantificaron las mejoras introducidas por los LLs, quedando definidos como puntos más importantes los siguientes:

- El uso de LLs puede permitir el uso de puntales con menor capacidad resistente a la requerida. Existe una elevada

heterogeneidad en las cargas que reciben los puntales de una misma planta (véase Figura 10) que con el uso de LLs puede uniformizarse, haciendo trabajar más a los puntales menos cargados y reduciendo notablemente las cargas máximas. En el ejemplo de la Figura 10 pudo reducirse la carga máxima de más de 21kN a 16kN con el uso de LLs de 16kN, requiriendo, consecuentemente, puntales de menor capacidad resistente.

- El uso de LLs permite la modificación de la carga máxima de cálculo, aspecto que puede permitir a las empresas de encofrado y cimbras elegir, dentro de unos límites razonables, la carga máxima que recibirán los puntales. De esta forma se podría emplear una mayor parte del stock de puntales disponible al poder emplear los puntales de una menor capacidad resistente a la teóricamente exigida sin el uso de LLs.
- El uso de LLs permite el empleo de una cantidad menor de puntales. Aunque teóricamente las cargas máximas serían superiores, con el empleo de LLs se puede acotar este valor a valores inferiores a la capacidad resistente de los puntales.
- Las tres primeras ventajas provocan que el coste del sistema de apuntalamiento sea significativamente inferior con el uso de LLs.
- Adicionalmente, el uso de LLs mejora notablemente la seguridad durante la fase de construcción en los siguientes aspectos:
 - Protegen al puntal de fallos y descargas repentinas, permitiendo su reutilización.
 - Protegen a la estructura permanente, mitigando el riesgo de colapso y fallo durante la construcción. Históricamente, muchas estructuras de edificios han colapsado durante la fase de construcción, siendo la carga en puntales superior a la admisible una de las principales causas de colapso [12].

Con el uso de LLs se introduce un comportamiento plástico del conjunto puntal-LL, con el que es posible aumentar la ductilidad de la estructura. Adicionalmente, evitando fallos no tan graves como el colapso total de la estructura permanente (v.g. fallos del sistema de apuntalamiento), también se mejora el comportamiento de la estructura durante la construcción, reduciendo la fisuración, flechas instantáneas y cargas de los forjados, y consecuentemente mejorando la respuesta de la estructura a largo plazo y su durabilidad. Como ejemplo, del estudio realizado sobre el edificio de oficinas se obtuvo que con el uso de LLs pueden evitarse fallos del sistema de apuntalamiento que pueden conducir al colapso progresivo del mismo e incluso al colapso de la estructura completa (véase Figura 11).

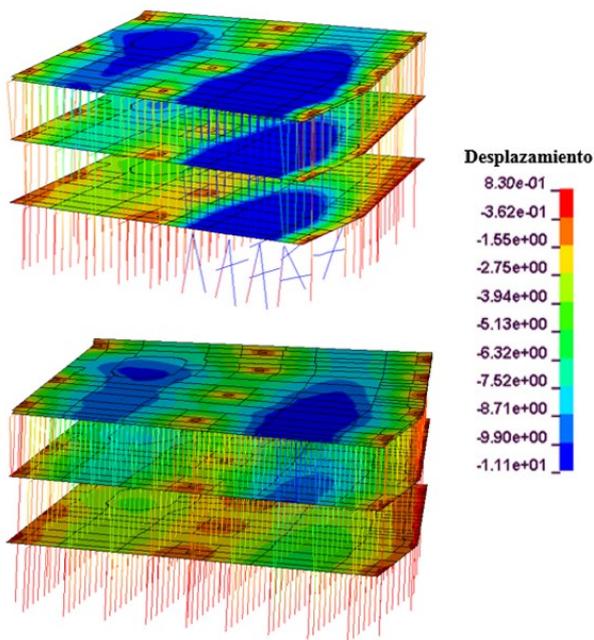


Figura 11. Comportamiento estructural del conjunto formado por el sistema de apuntalamiento y la estructura permanente de hormigón sin (superior) y con (inferior) el uso de LLs.

5. Conclusiones

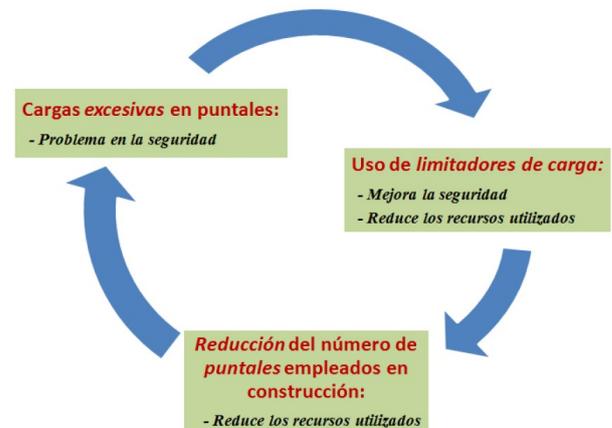


Figura 12. Principales ventajas del uso de LLs en puntales durante la construcción de edificios.

Su introducción en el mercado puede suponer una revolución de las técnicas de cimbrado utilizadas actualmente, que mejorará la seguridad, eficiencia y coste de los sistemas de apuntalamiento y que puede mejorar también las condiciones de servicio y durabilidad de las estructuras.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su gratitud al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la financiación recibida bajo: a) el programa FPU [FPU13/02466] y la financiación complementaria para la realización de una estancia en la University of Surrey (Reino Unido), y b) el programa de movilidad (Salvador de Madariaga 2017) para la promoción del talento y empleabilidad perteneciente al programa estatal de Investigación e Innovación 2013-2016 [PRX17/00302]. Los autores también quieren agradecer a la Generalitat Valenciana por la financiación recibida [GV/2015/063], y a las empresas Encofrado J. Alsina S.A. y Levantina, Ingeniería y Construcción S.L. por su invaluable cooperación.

Referencias

- [1] Calderón PA, Alvarado YA, Adam JM. A new simplified procedure to estimate loads on slabs and shoring during the construction of multistorey buildings. *Eng Struct* 2011;33:1565–75. doi:10.1016/j.engstruct.2011.01.027.
- [2] Adam JM, Buitrago M, Moragues JJ, Calderón PA. Limitations of Grundy & Kabaila's simplified method and its repercussion on the safety and serviceability of successively shored building structures. *J Perform Constr Facil* 2017;31:1–10. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001038.
- [3] Buitrago M, Adam JM, Moragues JJ, Calderón PA. Load transmission between slabs and shores during the construction of RC building structures - A review. *Eng Struct* 2018;173:951–9. doi:10.1016/j.engstruct.2018.07.046.
- [4] Grundy P, Kabaila A. Construction Loads on Slabs with Shored Formwork in Multistorey Buildings. *J Proc* 1963;60:1729–38.
- [5] Duan MZ, Chen WF. Improved simplified method for slab and shore load analysis during construction. *Proj Rep CE-STR-95-21* 1995.
- [6] Fang DP, Geng CD, Zhu HY, Liu X La. Floor load distribution in reinforced concrete buildings during construction. *ACI Struct J* 2001;98:149–56.
- [7] Buitrago M, Adam JM, Alvarado YA, Calderón PA, Gasch I. Maximum loads on shores during the construction of buildings. *Proc Inst Civ Eng - Struct Build* 2016;169:538–45. doi:10.1680/jstbu.15.00089.
- [8] Buitrago M, Adam JM, Calderón PA, Alvarado YA, Moragues JJ. Estimating loads on shores during the construction of RC building structures. *Struct Concr* 2016;17:502–12. doi:10.1002/suco.201500130.
- [9] Buitrago M, Adam JM, Alvarado YA, Moragues JJ, Gasch I, Calderón PA. Designing construction processes in buildings by heuristic optimization. *Eng Struct* 2016;111:1–10. doi:10.1016/j.engstruct.2015.12.009.
- [10] Alvarado YA, Buitrago M, Gasch I, Domínguez MN, Cipagauta MA. Short- and long-term deflections of RC building structures influenced by construction processes. *Struct Eng Mech* 2017;64:173–81. doi:https://doi.org/10.12989/sem.2017.64.2.173.
- [11] Alvarado YA, Buitrago M, Gasch I, Prieto CA, Ardila YA. Stage of construction: An essential consideration in designing reinforced concrete building structures. *Struct Concr* 2017:1–9. doi:10.1002/suco.201700128.
- [12] Buitrago M, Moragues JJ, Calderón PA, Adam JM. Structural failures in cast-in-place RC building structures under construction. In: Makhlof ASH, Aliofkhazraei M, editors. *Handb. Mater. Fail. Anal. with Case Stud. from Constr. Ind.* Vol. 6. 1st ed, Butterworth-Heinemann, Elsevier; 2018, p. 560. doi:10.1016/B978-0-08-101928-3.00008-2.

- [13] Calderón PA, Adam JM, Buitrago M, Alvarado YA, Moragues JJ. Limitador de carga para puntales telescópicos de obra. Patent number ES2636833, 2017.
- [14] Buitrago M, Adam JM, Calderón PA, Moragues JJ. Load limiters on shores: Design and experimental research. *Eng Struct* 2018;173:1029–38. doi:10.1016/j.engstruct.2018.07.063.
- [15] Buitrago M, Alvarado YA, Adam JM, Calderón PA, Gasch I, Moragues JJ. Improving construction processes of concrete building structures using load limiters on shores. *Eng Struct* 2015;100:104–15. doi:10.1016/j.engstruct.2015.06.007.
- [16] Alvarado YA, Calderón PA, Adam JM, Payá-Zaforteza IJ, Pellicer TM, Pallarés FJ, et al. An experimental study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistory buildings using partial striking. *Eng Struct* 2009;31:2132–40. doi:10.1016/j.engstruct.2009.03.021.
- [17] Alvarado YA. Estudio experimental y numérico de la construcción de forjados hormigonados in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas. PhD Thesis - Universitat Politècnica de València. [In Spanish], 2009.
- [18] Gasch I, Alvarado YA, Calderón PA. Temperature effects on load transmission between slabs and shores. *Eng Struct* 2012;39:89–102. doi:10.1016/j.engstruct.2012.02.004.
- [19] Gasch I. Estudio de la evolución de cargas en forjados y estructuras auxiliares de apuntalamiento durante la construcción de edificios de hormigón in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas. PhD Thesis - Universitat Politècnica de València. [In Spanish], 2012.
- [20] Buitrago M, Sagaseta J, Adam JM. Avoiding failures during building construction using structural fuses as load limiters on temporary shoring structures. *Eng Struct* 2019.
- [21] Buitrago M, Sagaseta J, Adam JM. Effects of sudden failure of shoring elements in concrete building structures under construction. *Eng Struct* 2018;172:508–22. doi:10.1016/j.engstruct.2018.06.052.