

## SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO

Manuel Buitrago<sup>1</sup>, José M. Adam<sup>1</sup>, Juan J. Moragues<sup>1</sup>, Pedro A. Calderón<sup>1</sup> y Yezid A. Alvarado<sup>2</sup>

1: Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH)  
Universitat Politècnica de València  
Camino de Vera s/n, Edificio 4N, 46022 Valencia, España  
e-mail: {mabuimo1@upv.es, joadmar@upv.es, jmorague@upv.es, pcaldero@upv.es}  
<http://www.icitech.upv.es>

2: Departamento de Ingeniería Civil  
Pontificia Universidad Javeriana  
Calle 40 No. 5-50 Ed. José Gabriel Maldonado, S.J., Bogotá, Colombia  
e-mail: [alvarado.y@javeriana.edu.co](mailto:alvarado.y@javeriana.edu.co)

**Palabras clave:** Puntales, Cimbra, Simulación numérica, Encofrado, Clareado, Cimbrado, Recimbrado, Descimbrado.

**Resumen** *En muchas ocasiones, los esfuerzos y deformaciones a los que se ve sometida una estructura durante su construcción son superiores a los que va a experimentar durante su vida útil. Es, por tanto, de especial relevancia, evaluar la seguridad estructural durante las diferentes fases de construcción de una estructura. Como ejemplos claros pueden citarse la construcción de estructuras de edificios, de puentes, de acueductos, etc. Una de las formas más habituales de conocer el comportamiento de las estructuras en construcción ha sido la simulación numérica evolutiva de procesos constructivos. Sin embargo, entre los inconvenientes más destacados que presenta dicha simulación se encuentra el cambio permanente de las propiedades mecánicas de algunos materiales, el cambio en las condiciones de contorno y el cambio de la geometría en las distintas situaciones que presenta la estructura. En este artículo se describe cronológicamente los modelos numéricos que han empleado distintos autores para resolver el caso concreto de la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado. La recopilación se realiza desde los primeros modelos numéricos desarrollados en la segunda mitad del siglo XX hasta aquellos más recientes desarrollados en la Universitat Politècnica de València empleando el software ANSYS. Los últimos avances computacionales, ligados a un mayor conocimiento de la construcción de estructuras de edificios, han permitido abordar su cálculo de forma más eficiente y con una mejor correlación con los datos experimentales.*

## **1. INTRODUCCIÓN**

El cimbrado de plantas sucesivas es el método habitualmente empleado en la construcción de estructuras de edificios de hormigón armado. Este método consiste en el hormigonado de nuevas plantas manteniendo cimbradas total o parcialmente una o más plantas inferiores. El peso de la nueva planta hormigonada, con las posibles sobrecargas de construcción, son entonces distribuidas entre las plantas conectadas por la cimbra. Conocer realmente cómo se distribuyen las cargas entre los distintos forjados conectados por la cimbra es realmente complicado. En este punto es cuando la simulación numérica es realmente importante para conocer cómo se comportan las estructuras sin utilizar grandes recursos económicos, como podría ser la construcción de ensayos experimentales a escala real o a escala reducida [1]. También permite abordar multitud de casos de estudio que de otra forma serían imposibles de acometer porque supondría un coste desmesurado.

En este punto, proporcionar al lector un estado del arte relativo a la realización de estudios numéricos en la construcción de edificios mediante la técnica del cimbrado de plantas sucesivas resulta especialmente interesante y se presenta como principal novedad en este artículo. De esta forma el lector puede conocer de primera mano de qué herramientas y avances se dispone a día de hoy con el objetivo de fomentar su aplicación práctica y mejorar la construcción de estructuras de edificios. Evidentemente es importante conocer de qué herramientas se dispone a día de hoy sin olvidarse de los estudios realizados en el pasado, estudios desde los que se ha podido avanzar en este campo y llegar al estado actual.

En el artículo se presenta, en el apartado 2, una breve descripción del estado del arte de los estudios numéricos llevados a cabo desde la segunda mitad del siglo XX hasta la actualidad relativos a la mejor comprensión de la transmisión de cargas entre forjados y puntales. En el apartado 3, se realiza una breve recopilación de los modelos numéricos llevados a cabo por el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de Valencia (España). En los últimos años, este instituto se ha convertido en el líder de la investigación en este campo desarrollando diversos estudios teóricos y experimentales. Finalmente, en el apartado 4, se establecen una serie de conclusiones.

## **2. ESTADO DEL ARTE SOBRE SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS DURANTE SU CONSTRUCCIÓN**

En los inicios de la construcción de edificios de hormigón armado ejecutados in situ en la primera mitad del siglo XX no existía conocimiento alguno de la transmisión de carga entre las distintas plantas y la cimbra durante la ejecución de estructuras de edificios.

Los primeros estudios teóricos fueron llevados a cabo por Nielsen en 1952 [2] y sobre todo por Grundy and Kabaila en 1963 [3], desarrollando metodologías simplificadas para abordar el cálculo de la construcción de estructuras de edificios mediante el cimbrado de plantas sucesivas que a día de hoy se siguen utilizando. El método de Grundy y Kabaila [3] consideraba infinitamente rígido el sistema de apuntalamiento con forjados de igual rigidez, sin cambios en las propiedades mecánicas del hormigón en el tiempo. Como se observará a continuación, muchos autores han justificado que estas hipótesis, con los métodos de cálculo

existentes actualmente, ya no son válidas [4]. Sin embargo, todavía es un método ampliamente utilizado.

Más tarde, aumentó el interés por conocer cómo se transmitían las cargas entre los forjados y la cimbra, y empezaron a desarrollarse distintos estudios numéricos [5]–[9] que serán descritos a continuación.

### **2.1. Liu et al (1986)**

Liu et al [5] desarrollaron un modelo en tres dimensiones, planteando hipótesis diferentes a las planteadas por Grundy y Kabaila [3], mejorando así el acercamiento de los modelos teóricos a la realidad:

- Se asume un comportamiento elástico de los forjados de hormigón armado, considerando la variación de rigidez con respecto al tiempo.
- Los puntales son considerados con comportamiento elástico con igual rigidez axial.
- Se consideran tres tipos de condiciones de contorno del forjado: continua en todas las direcciones, continua en una sola dirección y aislado.
- La cimentación se considera como infinitamente rígida e indeformable.

Adicionalmente también estudiaron la influencia de la rigidez de la cimentación, la deformabilidad de los pilares y la relación largo-ancho del forjado. Se obtuvo una escasa influencia de la rigidez del cimiento en las cargas de los puntales. Se encontró que la influencia de la deformabilidad de los pilares era despreciable en el momento de determinar la distribución de cargas en los puntales. La misma conclusión se obtuvo respecto a la relación largo-ancho del forjado, donde se encontraron diferencias alrededor de un 3% en la carga máxima en puntales.

Finalmente concluyeron por comparación de los valores obtenidos en su estudio con los del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) que este último es adecuado para predecir las cargas en el proceso de construcción, aunque consideran la posibilidad de corregir los coeficientes de carga mediante el uso de un coeficiente (1.05-1.10), que permita contemplar la influencia de aspectos no considerados en dicho método.

### **2.2. Stivaros y Halvorsen (1990)**

El uso del *Equivalent Frame Method* (EFM) fue propuesto por Stivaros y Halvorsen [6] para el cálculo de la transmisión de cargas entre forjados y puntales. Esta metodología fue propuesta en 1970 por el ACI Committee 311, como un método de diseño de estructuras de hormigón. Se propone un modelo en dos dimensiones de la estructura considerando las siguientes hipótesis:

- Se consideran los puntales como apoyos elásticos con un valor de rigidez igual a la rigidez total de los puntales correspondientes.
- Se asume que el nudo entre la losa y el puntal es una articulación.
- Se considera la cimentación como infinitamente rígida.
- Se consideran dos tipos de condiciones de contorno: vano aislado y conjunto de tres vanos.

El modelo representa un edificio en dos dimensiones considerando a los puntales como

elementos verticales tipo barra, con una rigidez equivalente a la rigidez total de los puntales ubicados en la fila. Las losas son representadas con elementos tipo viga, con un ancho igual a la luz entre pilares y canto igual al canto real de la losa. Los pilares se consideran como elementos tipo viga con una sección igual a la sección real.

Tras realizar su estudio aplicado a un caso concreto y comparando los resultados con el método simplificado de Grundy y Kabaila [3] y el método de Liu et al [5] observaron que los tres métodos coinciden en el valor de la carga máxima en forjados así como en el forjado y la operación constructiva en los que se presenta este valor máximo. Sin embargo, encontraron determinadas situaciones en las que esto no ocurre, siendo las diferencias superiores al 5 %. También evidenciaron que es necesario considerar las condiciones de contorno en el cálculo para no incurrir en errores importantes.

### **2.3. Mosallam y Chen (1991)**

Mosallam y Chen [7] desarrollaron un modelo en dos dimensiones con el fin de determinar la distribución de cargas en forjados durante el proceso de construcción, y compararlas con las obtenidas con los modelos de Liu et al. [5], y con el método simplificado de Grundy y Kabaila [3]. Las principales hipótesis del modelo son:

- El comportamiento de los forjados y pilares se considera elástico, y su rigidez dependiente del tiempo.
- Los puntales presentan un comportamiento elástico con una rigidez finita.
- La rigidez de la cimentación se asimila a una losa de cimentación de iguales características que los forjados.
- La distribución de cargas de construcción en puntales y forjados se considera cambiante durante el periodo de tiempo definido entre el hormigonado de forjados consecutivos.

En líneas generales, el modelo es similar al modelo empleado por Liu et al [5] descrito anteriormente. La única diferencia se basa en no despreciar la deformación vertical de los pilares, considerándolos como elementos de hormigón con una sección determinada. De los estudios realizados se obtuvieron las siguientes conclusiones principales:

- La influencia de la rigidez de la cimentación es despreciable para la distribución de cargas en forjados. Sin embargo, en la distribución de cargas en puntales existe un incremento de carga de aproximadamente un 11% cuando la cimentación se considera infinitamente rígida.
- Las condiciones de contorno del forjado tienen muy poca influencia en la distribución de cargas de los forjados. Sin embargo, en la consideración del vano aislado se sobreestima un 43% la carga máxima en puntales.
- La influencia de la rigidez de los forjados es reducida obteniendo diferencias de cargas en forjados inferiores al 10%.
- La consideración de la rigidez real de los puntales tiene una gran incidencia en la carga que asumen estos elementos. Si se consideran como infinitamente rígidos como realizaban algunas metodologías anteriores, la carga máxima en puntales tiende a incrementarse hasta en un 98 %. La carga de los forjados tiende a disminuir hasta en

un 7%.

- Existe una gran influencia en la distribución de cargas entre forjados y puntales entre dos operaciones constructivas debido a la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón.

#### **2.4. Kwak y Kim (2006)**

En 2006, Kwak et al [8] desarrollaron un modelo numérico para simular el comportamiento dependiente del tiempo de una estructura de hormigón armado teniendo en cuenta el proceso constructivo. Este modelo numérico tiene en cuenta:

- La no linealidad del material, incluyendo la fisuración del hormigón y la plastificación de las barras de refuerzo.
- La no linealidad geométrica.
- La fluencia del hormigón.
- La variación de las propiedades del hormigón con el tiempo.

Para el estudio utilizaron un modelo bidimensional similar al empleado por Liu et al. (1985), pero con las siguientes variaciones más importantes:

- La deformación axial de los pilares.
- Fluencia.
- Retracción.
- Se considera el efecto de la distancia entre puntales.
- Se consideran diversos ciclos constructivos.

Los autores concluyeron que si no se tiene en cuenta la variación de las deformaciones del hormigón con el tiempo en el diseño del sistema de apuntalamiento, se producen resultados conservadores para las cargas de los forjados, mientras que se subestiman las cargas de los puntales.

#### **2.5. Díaz (2008)**

Díaz estudió el cimbrado de plantas consecutivas considerando cuatro diferentes hipótesis:

- Cimbrado con puntales de rigidez infinita apoyados sobre un suelo de rigidez infinita.
- Cimbrado con puntales de rigidez finita apoyados sobre un suelo de rigidez infinita.
- Cimbrado con puntales de rigidez infinita apoyados sobre un suelo de rigidez finita
- Cimbrado con puntales de rigidez finita apoyados sobre un suelo de rigidez finita.

De forma adicional a las hipótesis comentadas anteriormente, Díaz considera que todas las plantas de hormigón tienen el mismo módulo de deformación, excepto la recién hormigonada en donde su módulo de deformación se considera como nulo.

Son de resaltar los resultados obtenidos al comparar, para un suelo infinitamente rígido, las cargas obtenidas considerando puntales de rigidez finita y puntales de rigidez infinita. Al considerar puntales con rigidez finita se disminuyen los valores de las cargas actuantes sobre los puntales hasta en un 30% frente a los valores de cargas obtenidos considerando puntales infinitamente rígidos. De igual forma para vigas en donde el coeficiente de carga que se obtiene supone el 67% del valor obtenido considerando puntales infinitamente rígidos.

Díaz también estudió la influencia de algunos factores como la variación del módulo de elasticidad del hormigón con la edad, la variación en las dimensiones de los pilares, variación de rigidez de los puntales comerciales, descimbrado de dos vanos consecutivos manteniendo cimbrados otros tres y el descimbrado de un vano desde el centro hacia los apoyos, encontrando que se alcanza como máximo un 4% de variación frente a los resultados obtenidos en el caso general. Pero hace una especial referencia, argumentado que al descimbrar retirando los puntales desde los apoyos hacia el centro del vano, se produciría un agotamiento de los puntales situados en el centro de este vano.

### **3. MODELOS NUMÉRICOS DESARROLLADOS EN LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

En este apartado se tratan los estudios numéricos llevados a cabo por el ICITECH de la UPV, actualmente un instituto líder en la investigación de este campo. El inicio de esta línea de investigación se remonta a los primeros estudios realizados por Moragues et al [10], [11]. Seguidamente, tras la aprobación de un proyecto nacional en el año 2004 [1] y la colaboración con distintas empresas de la construcción se llevaron a cabo una serie de estudios experimentales y numéricos en condiciones controladas [12]–[14] y en condiciones reales [15]–[18]. Actualmente el grupo sigue trabajando en la optimización de procesos constructivos mediante la simulación numérica [4], [19], el desarrollo de métodos simplificados de cálculo [20]–[22], la obtención de procesos constructivos óptimos [23], [24] y el desarrollo de ensayos experimentales. A continuación, se detallan los estudios numéricos llevados a cabo.

#### **3.1. Moragues et al (1994-1996)**

Después de realizar un extenso estudio de la transmisión de cargas de construcción en edificación, Moragues et al [10] instrumentaron dos edificios con el objeto de medir las cargas originadas durante el proceso constructivo con los medios habituales en España (puede encontrarse una descripción detallada de los medios habitualmente utilizados en España en Adam et al [4]). La diferencia encontrada en los valores de carga de construcción medidos en obra, con las cargas estimadas mediante el método simplificado de Grundy y Kabaila [3], motivaron al desarrollo de una modelización numérica en dos dimensiones [11]. Las hipótesis contempladas para dicho modelo son las siguientes:

- Cálculo lineal, en dos dimensiones.
- Se consideran puntales metálicos de rigidez conocida.
- No se considera el peso propio de los puntales.
- La cimentación se considera como infinitamente rígida.
- Los puntales se consideran apoyados en sus extremos.
- Los efectos de retracción y fluencia son despreciados.

Adicionalmente se consideraron 4 variaciones:

- Supuesto básico (Considerando el conjunto de hipótesis antes mencionadas).
- Variación del módulo de elasticidad del hormigón, con la edad.

- Clareado.
- Variación del módulo de elasticidad del hormigón con la edad, y clareado.

Finalmente concluyeron en la necesidad de realizar más investigaciones que consideren aspectos como las deformaciones producidas por el proceso constructivo, la posible fisuración del hormigón joven y la influencia que pueden tener las deformaciones de retracción y térmicas durante el proceso constructivo.

### **3.2. Alvarado et al (2009-2010)**

Alvarado et al [14] desarrollaron un modelo numérico en 3D en el que se incluye un cálculo evolutivo, cuyo objeto es simular el proceso constructivo considerando la evolución de las propiedades del hormigón con el tiempo. Las hipótesis adoptadas para realizar el modelo de elementos finitos fueron las siguientes:

- Comportamiento elástico y lineal del forjado de hormigón armado, considerando la variación de su rigidez en el tiempo.
- Pilares con comportamiento elástico y lineal, considerando la variación de su rigidez con respecto al tiempo.
- Puntales considerados como elementos elásticos con una rigidez finita, apoyados en sus extremos.
- Tableros de encofrado considerados como elementos con un comportamiento elástico y lineal y de rigidez finita.
- Sopandas consideradas como elementos con un comportamiento elástico y lineal, con una rigidez finita.
- Cimentación considerada infinitamente rígida.
- No se consideran los efectos de fluencia y retracción en el hormigón, ni los cambios de temperatura en los diferentes elementos de la estructura.

Dada la importancia de la simulación numérica realizada en este estudio que supuso un avance significativo en el conocimiento de la transmisión de cargas entre forjados y puntales, y que dicha simulación fue utilizada en futuros trabajos dentro de la misma línea de investigación, a continuación se trata en profundidad cómo se realizó la simulación numérica. El modelo de elementos finitos se realizó con el software comercial ANSYS [25]. Para la discretización de cada una de las partes de la estructura se utilizaron elementos tipo SHELL, BEAM y LINK.

Los forjados de hormigón y los tableros de encofrado de madera se modelizaron mediante elementos bidimensionales tipo SHELL63. Este elemento está formado por 4 nodos, con 6 grados de libertad por nodo (traslaciones y giros en X, Y, Z) y un espesor “h”. El elemento SHELL63 admite realizar un cálculo evolutivo mediante el uso de la opción Birth and Death y el comando MPCHG, que permiten considerar la aparición de nuevos elementos en el cálculo y variar las propiedades de los materiales en el tiempo respectivamente.

Los puntales metálicos se modelizaron mediante elementos unidimensionales de 2 nodos tipo LINK1 con 3 grados de libertad por nodo (traslaciones en X, Y, Z). El elemento LINK1 también permite el empleo de la opción Birth and Death que posibilita, para el caso de los puntales, modelar las operaciones de cimbrado, clareado y descimbrado.

Para modelizar los pilares de hormigón y las sopandas de acero se emplearon elementos tipo BEAM44. El elemento BEAM44 tiene dos nodos (I, J) y un tercer nodo opcional (K) que define la orientación del elemento. Este elemento cuenta con 6 grados de libertad por nodo (traslaciones y giros en X, Y, Z). Dicho elemento permite desplazar sus nodos a partir del eje de la sección (ideal para desplazar los nodos al punto de crecimiento de cada uno de los pilares). Al igual que el resto de elementos empleados en el modelo, el elemento BEAM44 admite la opción Birth and Death y el comando MPCHG.

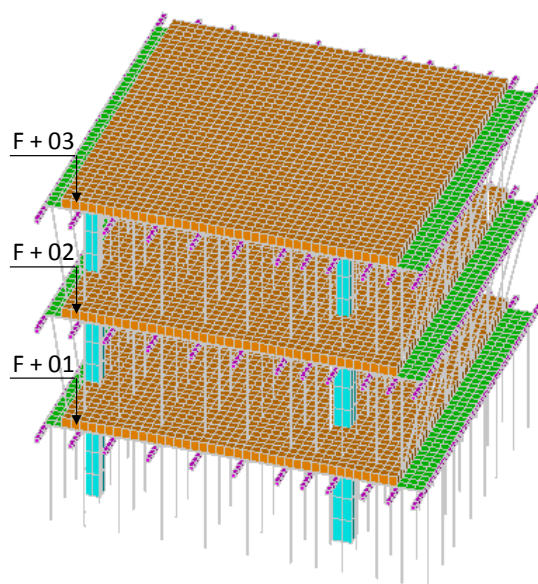
El modelo desarrollado consistió en una estructura de carácter evolutivo. Más concretamente, se trata de una estructura en donde las condiciones de apoyo (puntales, sopandas y encofrado), y las características de los materiales (hormigón), son cambiantes con el tiempo. Viendo la necesidad de realizar éste cálculo evolutivo se planteó la necesidad de utilizar un programa de elementos finitos que permita considerar dicha particularidad. El programa ANSYS [25] permitió realizar el mencionado cálculo.

El cálculo evolutivo en ANSYS se realiza en diferentes pasos de carga (Load Steps). Un paso de carga consiste en calcular la estructura con la geometría y las propiedades de los materiales correspondientes a cada una de las fases constructivas consideradas. Así, una vez resuelto el primer paso de carga, el cálculo de un segundo paso parte de los valores de deformación y esfuerzos obtenidos en el primero. De esta forma, se consigue realizar un cálculo evolutivo considerando tantos pasos de carga como fases de construcción del edificio. Para conseguir esto, ANSYS dispone de las opciones Birth and Death y el comando MPCHG. La opción Birth and Death consiste en activar o desactivar elementos de la estructura a calcular. Para desactivar elementos de la estructura en un paso de carga, se utiliza el comando EKILL. Este comando reduce el valor de rigidez del elemento considerado, multiplicándola por un factor muy pequeño (valor que incluso se puede modificar). Igualmente, al desactivar un elemento, las cargas asociadas a éste son nulas. Para activar un elemento se emplea el comando EALIVE. Este comando asigna a los elementos considerados su rigidez correspondiente, y recupera los valores de carga asociados a dichos elementos.

La evolución del módulo de elasticidad del hormigón en el tiempo se realiza utilizando el comando MPCHG. Este comando permite cambiar el material asignado a los elementos seleccionados. De esta forma, en la construcción del modelo se crean materiales con módulos de elasticidad correspondientes a la edad del hormigón de cada uno de los forjados, en cada una de las fases de construcción. Posteriormente, en cada uno de los pasos de carga, el módulo de elasticidad de los elementos de los forjados se cambia dependiendo de la edad del hormigón para la fase constructiva considerada. Para simulación realizada en este estudio, la evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados se estimó a partir del ensayo en laboratorio de probetas normalizadas y empleando la técnica de la madurez [26].

El proceso de modelado de la estructura está compuesto por tres fases. La primera fase o pre-proceso consiste en definir el tipo de elementos finitos a utilizar, las características de los materiales, la geometría y mallado de la estructura, y la aplicación de las cargas en los elementos. En esta fase se define completamente el modelo: los forjados, los pilares y la estructura provisional de apuntalamiento y encofrado. La Figura 1 muestra la estructura modelada una vez terminado el pre-proceso.





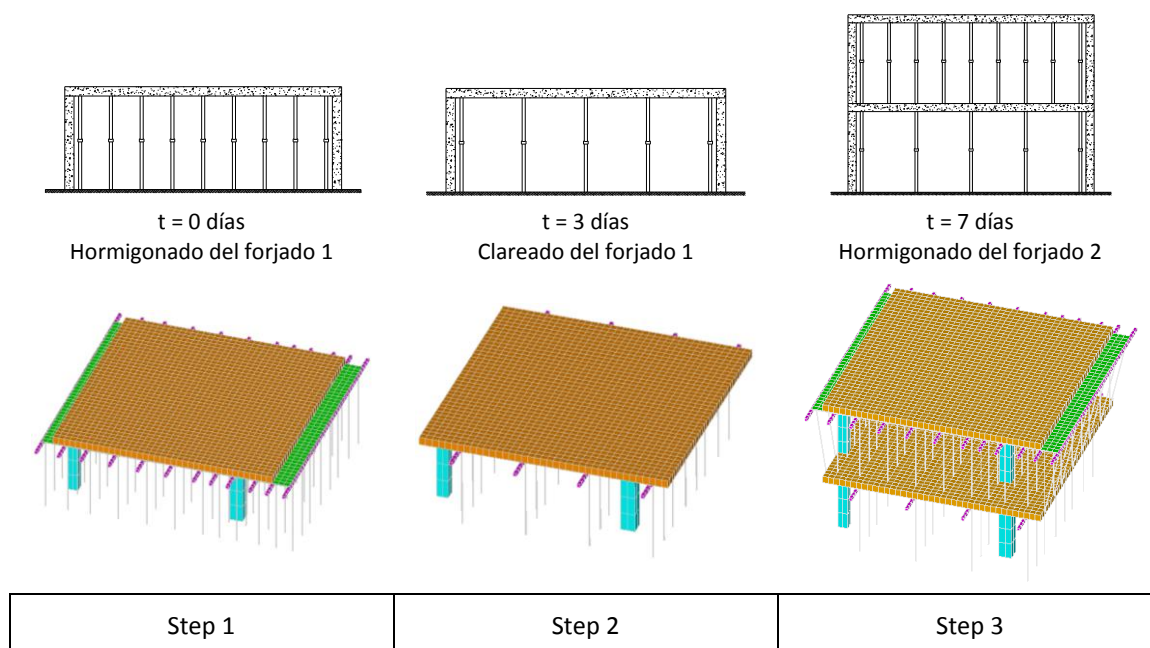
**Figura 1.** Vista tridimensional del modelo de elementos finitos.

La segunda fase consiste en resolver los pasos de carga correspondientes a las fases constructivas. Para el caso concreto estudiado, se detallan en las Figura 2, Figura 3 y Figura 4 cada uno de los pasos de carga del modelo de elementos finitos.

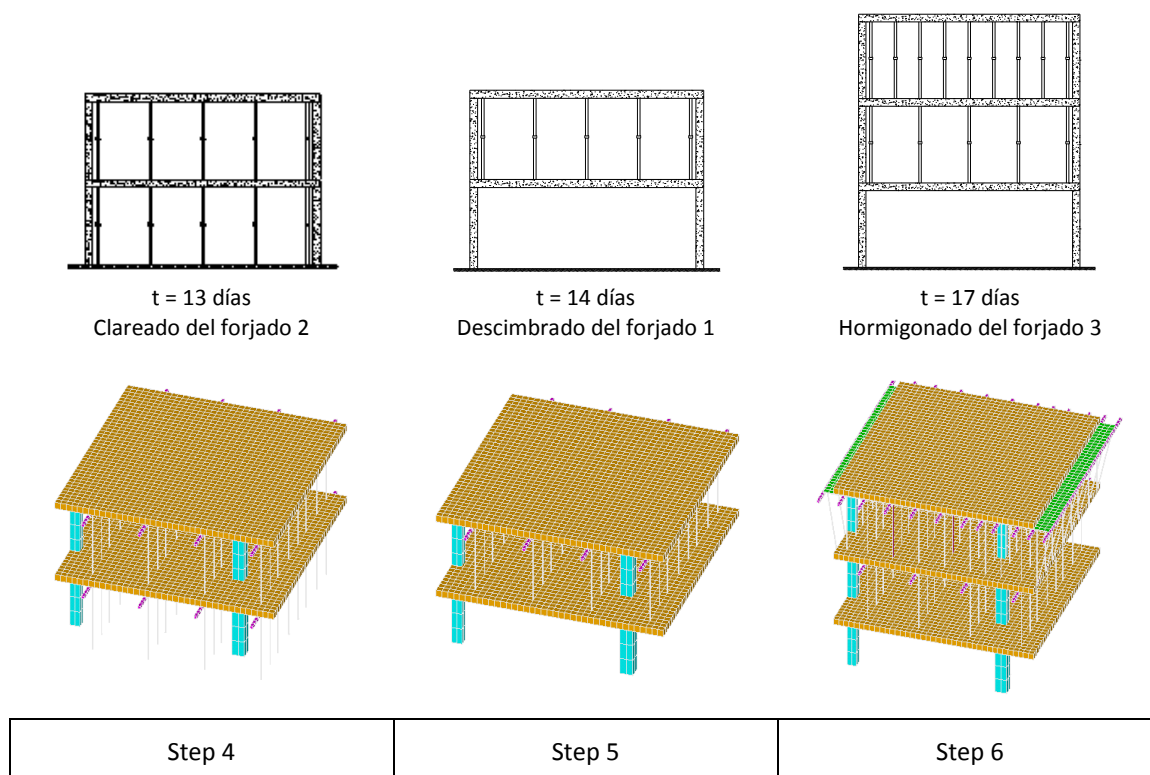
Tal y como se ha indicado con anterioridad, la modelización de la estructura está compuesta por 3 fases. Mientras que las dos primeras fases han sido expuestas con anterioridad, cabe mencionar que la tercera fase o post-proceso, consiste en extraer los resultados de cada uno de los pasos de carga considerados.

Este modelo numérico resultó validado y muy cercano a los valores experimentales [12] concluyendo, por tanto, que la metodología adoptada mediante la simulación por el método de los elementos finitos es realmente adecuada para simular los procesos constructivos de estructuras de edificios durante su construcción.

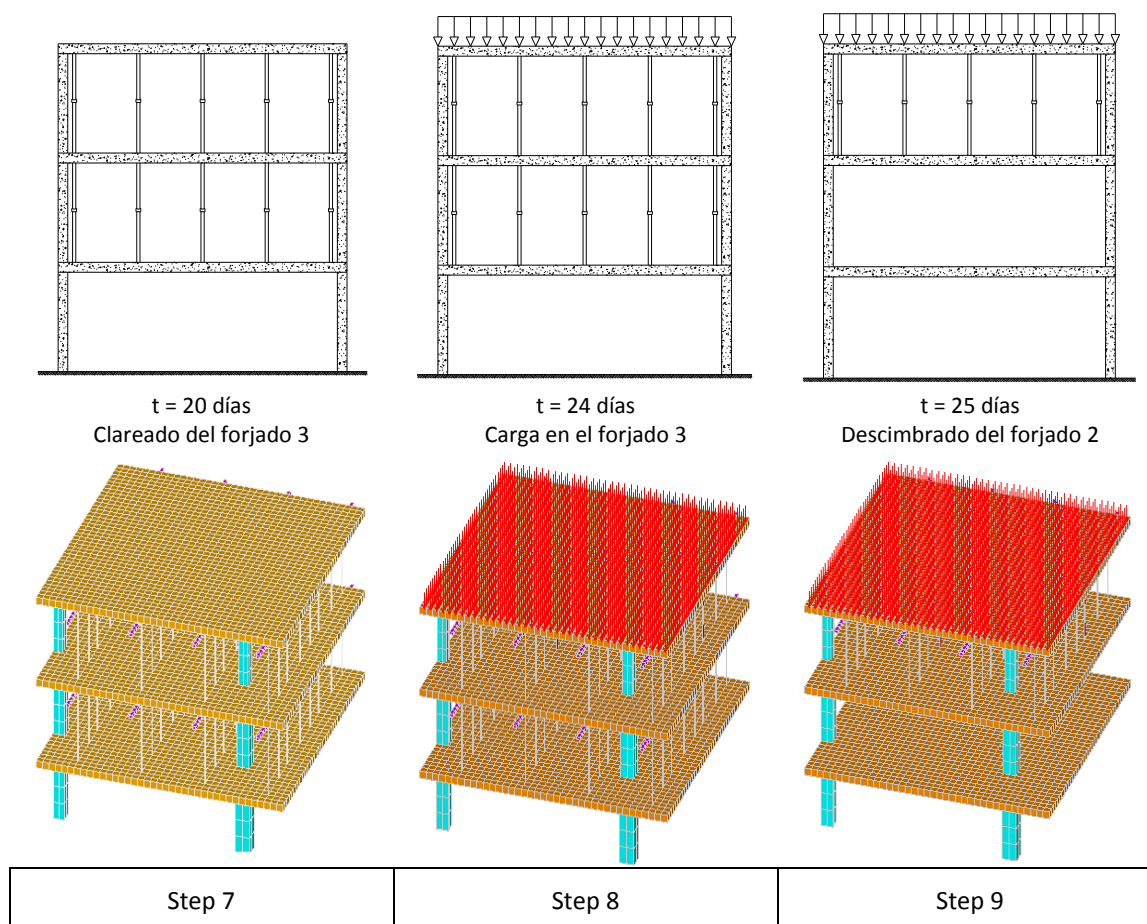
El siguiente paso fue realizar modelos de elementos finitos similares al planteado, con el objeto de analizar los procesos constructivos con tan solo cimbrado/descimbrado y los procesos con recimbrado, dos de los procesos constructivos adicionales a la aplicación de la técnica del clareado más utilizados a nivel internacional. Los resultados pueden observarse en las publicaciones del autor [13], [14].



**Figura 2.** Fases constructivas del estudio realizado (1).



**Figura 3.** Fases constructivas del estudio realizado (2).



**Figura 4.** Fases constructivas del estudio realizado (3).

### 3.3. Gasch et al (2012)

En el año 2012 Gasch et al [15], siguiendo la metodología y la modelización de procesos constructivos realizada por Alvarado et al [13], modelizaron 3 tipologías de edificios distintas con el método de los elementos finitos. Fueron analizados, modelizados y monitorizados edificios reales con forjados tipo losa [18], forjados reticulares de casetón perdido [17] y forjados reticulares de casetón recuperable [19]. También estudiaron de forma numérica por el método de los elementos finitos [16] el efecto de la temperatura ambiente sobre los forjados, tanto con incrementos uniformes de temperatura como con los gradientes de temperatura en los forjados durante su construcción que se registraron realmente en los edificios monitorizados. El estudio experimental del efecto de la temperatura en la transmisión de cargas entre forjados y puntales ya había sido realizado por diversos autores, demostrando que es uno de los efectos que más influyen en esta transmisión de cargas. Sin embargo, esta vez, además del estudio experimental que trató también el tema de los gradientes de temperatura a través del espesor del forjado, se realizó un estudio numérico por el método de los elementos finitos que permitió estudiar correctamente cómo afecta la temperatura a esta transmisión de

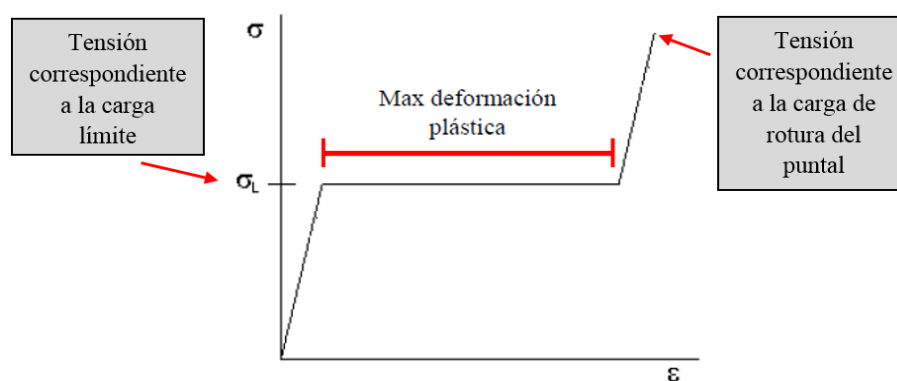
cargas, entender las razones por las que ocurre y cuáles son sus consecuencias.

Llegaron a la conclusión de que los gradientes de temperatura registrados en el espesor del forjado influyen enormemente en la carga que absorbe tanto el sistema de apuntalamiento como el forjado. Este gradiente provoca el descenso o ascenso del forjado cargando y descargando los puntales respectivamente. Para gradientes de temperatura de tan solo  $1^{\circ}\text{C}$ , la carga por unidad de superficie de los puntales varió entre  $0.13 \text{ kN/m}^2$  y  $0.34 \text{ kN/m}^2$  representando un 2% y un 6% del peso propio de los forjados respectivamente. Experimentalmente se registraron gradientes de hasta  $10^{\circ}\text{C}$  pudiendo suponer, por tanto, variaciones de la carga entre un 20% y un 60% del peso propio del forjado.

En definitiva, los modelos realizados demostraron la fiabilidad del método de los elementos finitos para predecir la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante la construcción de estructuras de edificios reales durante su construcción, teniendo en cuenta además el efecto de la temperatura y de los gradientes de temperatura de los forjados.

### 3.4. Buitrago et al (2015)

En el año 2015, Buitrago et al [19] introdujeron el concepto de limitador de carga en puntales. El limitador de carga nace de la necesidad de reducir los problemas de seguridad registrados durante la construcción de edificios [4], [21], [22] debido a las sobrecargas que pueden experimentar los puntales. Estos limitadores de carga instalados en los puntales provocan que el puntal trabaje por debajo de su carga admisible, manteniendo dicho valor de la carga admisible cuando el puntal alcanza este valor. De esta forma, ningún puntal supera en ningún momento la carga admisible de trabajo. Esto se consigue a través de un comportamiento teórico elasto-plástico perfecto como el de la Figura 5.

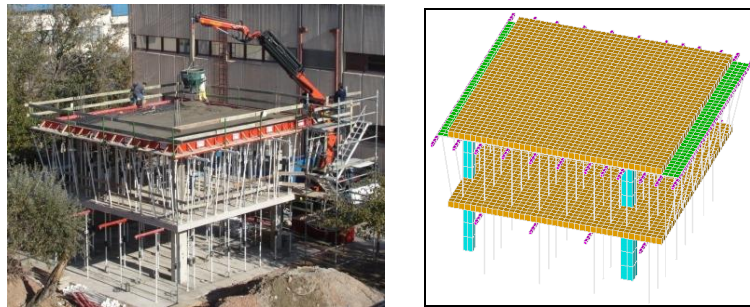


**Figura 5.** Comportamiento teórico de los puntales con limitador de carga.

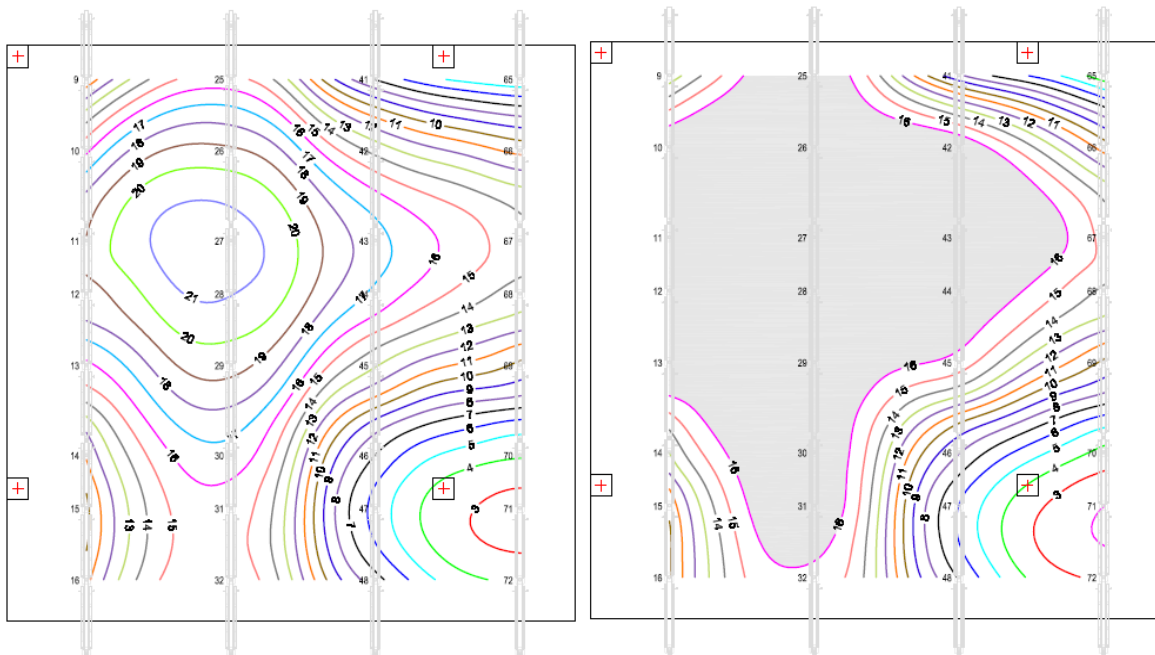
Como se puede observar en la Figura 5, cuando el puntal alcanza la carga límite, el comportamiento global es un comportamiento plástico debido al limitador de carga, permitiendo el descenso de ese puntal que iba a ser sobrecargado y buscando la colaboración de puntales vecinos, que a su vez llevan instalados limitadores de carga. Esta deformación plástica del limitador de carga viene limitada por un valor máximo para evitar descensos significativos de los forjados que podrían producir fisuras en los mismos durante su fase de

construcción, y por tanto afectar a las condiciones de servicio y durabilidad de la estructura. Cuando se alcanza la deformación máxima plástica permitida, el puntal vuelve a absorber más carga hasta la rotura del mismo.

Buitrago et al [19] demostraron su viabilidad técnica y económica introduciendo los limitadores de carga en los modelos numéricos previamente desarrollados por Alvarado et al [13] y Gasch et al [15], modelos que previamente, y como se ha comentado en apartados anteriores, fueron calibrados y validados con datos experimentales. En la Figura 6 se puede observar el edificio en construcción durante el hormigonado de la planta 2 y la simulación del edificio en esta operación constructiva. En la Figura 7 se puede observar las cargas que recibirían los puntales de la planta baja cuando se ha hormigonado la segunda planta, sin limitador de carga y con limitador de carga de 16 kN.



**Figura 6.** Edificio en construcción durante el hormigonado de la planta 2 (izquierda) y simulación numérica de la operación constructiva (derecha).



**Figura 7.** Cargas en los puntales de planta baja sin limitador de carga (izquierda) y con limitadores de carga de 16 kN (derecha).

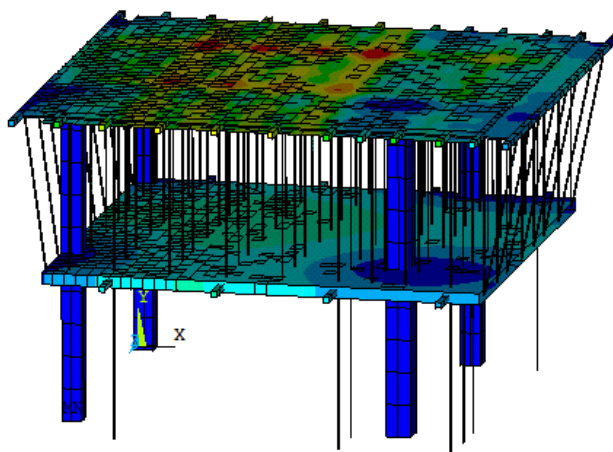
Como se puede observar en la Figura 7, las cargas máximas en puntales son superiores a los 21 kN cuando no se emplean limitadores de carga, mientras que cuando se ha limitado la carga a 16 kN (carga admisible de un puntal más económico), todos aquellos puntales bajo la zona sombreada están trabajando a su carga límite, sin superar su carga admisible y aprovechando en mayor medida la capacidad resistente de todos los puntales. De esta forma, y a través de la simulación numérica, se demostró la viabilidad técnica y económica del empleo de limitadores de carga en puntales.

### 3.5. Línea de trabajo actual

La línea de trabajo del ICITECH de la UPV ha seguido con el diseño, fabricación y comprobación del comportamiento real de los limitadores de carga en puntales. De hecho, dicho dispositivo está actualmente en proceso de protección por lo que no se pueden mostrar todavía imágenes ni resultados (Solicitud de Patente nº P201730339 en la Oficina Española de Patentes y Marcas el día 15 de marzo de 2017).

Para su diseño, se ha utilizado la técnica del diseño de experimentos con ayuda de Statgraphics [27] junto con la simulación numérica detallada del limitador de carga mediante ANSYS [25]. En la simulación numérica se ha considerado tanto el comportamiento no-lineal de los materiales como la interacción entre los distintos elementos de un puntal mediante las superficies de contacto. También se ha realizado una prueba de concepto del empleo del limitador de carga en la construcción de un edificio a escala real en las instalaciones del ICITECH que también ha sido modelizado empleando un modelo de elementos finitos mediante ANSYS [25] siguiendo las pautas marcadas en los anteriores apartados y con la inclusión de los limitadores de carga en los puntales.

Paralelamente se ha iniciado el estudio del colapso progresivo de estructuras de edificios durante su construcción mediante la aplicación del método de elementos finitos [28] como se puede observar en la Figura 8, y la aplicación del cálculo explícito [29] para considerar de mejor forma los aspectos dinámicos que gobiernan el proceso de colapso progresivo de una estructura.



**Figura 8.** Simulación numérica del colapso progresivo de puntales tras el fallo del primer puntal.

#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha recopilado un estado del arte relativo a la realización de estudios numéricos en la construcción de edificios mediante la técnica del cimbrado de plantas sucesivas. De esta forma el lector ha podido conocer de primera mano de qué herramientas y avances se dispone a día de hoy con el objetivo de fomentar su aplicación práctica y mejorar la construcción de estructuras de edificios. Se ha podido observar cómo tras más de 60 años de estudios numéricos realizados, la técnica y el conocimiento de los procesos constructivos de estructuras de edificios ha mejorado sustancialmente y carece de sentido seguir aplicando técnicas de mediados del siglo XX para resolver un problema de este tipo. De hecho, actualmente, el método de los elementos finitos es el método más utilizado a nivel internacional y que ha permitido abordar el cálculo de los procesos constructivos de forma muy precisa, eficiente y con una mejor correlación con los datos experimentales.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su gratitud al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España por la financiación recibida del programa FPU [FPU13/02466], a la Generalitat Valenciana [GV/2015/063], y también a las empresas Levantina, Ingeniería y Construcción S.L. y Encofrados J. Alsina S.A. por su invaluable colaboración.

#### REFERENCIAS

- [1] BIA2004-02085, “Estudio experimental y numérico de la construcción de forjados de hormigón in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas,” *Res. Proj. - Spanish Minist. Sci. Technol.*, 2004.
- [2] K. Nielsen, “Loads on reinforced concrete floor slabs and their deformations during construction,” *Final Report, 15*, Stockholm, 1952.
- [3] P. Grundy and A. Kabaila, “Construction Loads on Slabs with Shored Formwork in Multistory Buildings,” *J. Proc.*, vol. 60, no. 12, pp. 1729–1738, Dec. 1963.
- [4] J. M. Adam, M. Buitrago, J. J. Moragues, and P. A. Calderón, “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.
- [5] X. L. Liu, W. F. Chen, and M. D. Bowman, “Shore-Slab Interaction in Concrete Buildings,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 112, no. 2, pp. 227–244, Jun. 1986.
- [6] P. C. Stivaros and G. T. Halvorsen, “Shoring/Reshoring Operations for Multistory Buildings,” *Struct. J.*, vol. 87, no. 5, pp. 589–596, Sep. 1990.
- [7] K. H. Mosallam and W.-F. Chen, “Determining Shoring Loads for Reinforced Concrete Construction,” *Struct. J.*, vol. 88, no. 3, pp. 340–350, Mar. 1991.
- [8] H.-G. Kwak and J.-K. Kim, “Determination of efficient shoring system in RC frame structures,” *Build. Environ.*, vol. 41, no. 12, pp. 1913–1923, Dec. 2006.
- [9] J. Díaz, *Criterios técnicos para el descimbrado de estructuras de hormigón*. Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [10] J. J. Moragues, J. Catalá Alís, and E. Pellicer Armiñana, “Mediciones en obra y análisis teórico de estructuras de edificación, de hormigón armado, durante el proceso de

- cimbrado consecutivo de forjados,” *Hormigón y acero*, vol. 190, pp. 83–91, 1994.
- [11] J. J. Moragues, J. Catala, and E. Pelicer, “An Analysis Of concrete Framed Structures During The Construction Process,” *Concr. Int.*, vol. 18, no. 11, pp. 44–48, Nov. 1996.
- [12] Y. A. Alvarado, P. A. Calderón, J. M. Adam, I. J. Payá-Zaforteza, T. M. Pellicer, F. J. Pallarés, and J. J. Moragues, “An experimental study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistorey buildings using partial striking,” *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 9, pp. 2132–2140, Sep. 2009.
- [13] Y. A. Alvarado, *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.
- [14] Y. A. Alvarado, P. A. Calderón, I. Gasch, and J. M. Adam, “A numerical study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistorey buildings. Comparison of partial striking with other techniques,” *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 10, pp. 3093–3102, Oct. 2010.
- [15] I. Gasch, *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.
- [16] I. Gasch, Y. A. Alvarado, and P. A. Calderón, “Temperature effects on load transmission between slabs and shores,” *Eng. Struct.*, vol. 39, pp. 89–102, Jun. 2012.
- [17] I. Gasch, Y. A. Alvarado, P. A. Calderón, and B. Torres, “Transmisión de cargas entre forjados y puntales en un edificio de forjado reticular de casetón perdido utilizando clareado,” *Inf. la Construcción*, vol. 65, no. 530, pp. 195–202, Jun. 2013.
- [18] I. Gasch, Y. A. Alvarado, P. A. Calderón, and S. Ivorra, “Construction loads using a shoring–clearing–striking process,” *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.*, vol. 167, no. 4, pp. 217–229, May 2015.
- [19] M. Buitrago, Y. A. Alvarado, J. M. Adam, P. A. Calderón, I. Gasch, and J. J. Moragues, “Improving construction processes of concrete building structures using load limiters on shores,” *Eng. Struct.*, vol. 100, pp. 104–115, 2015.
- [20] P. A. Calderón, Y. A. Alvarado, and J. M. Adam, “A new simplified procedure to estimate loads on slabs and shoring during the construction of multistorey buildings,” *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 5, pp. 1565–1575, May 2011.
- [21] M. Buitrago, J. M. Adam, Y. A. Alvarado, P. A. Calderón, and I. Gasch, “Maximum loads on shores during the construction of buildings,” *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.*, vol. 169, no. 7, pp. 538–545, Jan. 2016.
- [22] M. Buitrago, J. M. Adam, P. A. Calderón, Y. A. Alvarado, and J. J. Moragues, “Estimating loads on shores during the construction of RC building structures,” *Struct. Concr.*, vol. 17, no. 3, pp. 502–512, Dec. 2016.
- [23] M. Buitrago, J. M. Adam, P. A. Calderón, and J. J. Moragues, “Automatic design of building construction processes by simulated annealing. A measure to improve sustainability, time, financial and computational costs,” in *Proceedings of the Second International Conference on Concrete Sustainability (ICCS 16)*, 2016, pp. 191–202.



- [24] M. Buitrago, J. M. Adam, Y. A. Alvarado, J. J. Moragues, I. Gasch, and P. A. Calderón, “Designing construction processes in buildings by heuristic optimization,” *Eng. Struct.*, vol. 111, pp. 1–10, Mar. 2016.
- [25] ANSYS 15.0, “Theory reference” ANSYS Inc., 2014.
- [26] J. M. Adam, F. J. Pallarés, P. A. Calderón, and I. J. Payá, “A study of the conditions of use of a new safety system for the building industry,” *Eng. Struct.*, vol. 29, no. 8, pp. 1690–1697, 2007.
- [27] Statgraphics, “Statgraphics Centurion XVI.” StatPoint Technologies, Inc., 2013.
- [28] D. Di Palma, *Measures to minimize the risk of progressive collapse of reinforced concrete building structures during construction. Application at buildings with flat slabs*. Polytechnic University of Valencia, 2017. (<http://hdl.handle.net/10251/78147>)
- [29] LSTC Lawrence Software Technology Corporation, “LS-DYNA theory manual.” Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, 2012.