

ROBUSTEZ DE ESTRUCTURAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN: SIMULACIÓN COMPUTACIONAL MEDIANTE APPLIED ELEMENT METHOD

Manuel Buitrago¹, Nirvan Makoond¹, Eduardo J. Mezquida-Alcaraz¹ y José M. Adam¹

1: Instituto Universitario de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH)
Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain
e-mail: mabuimo1@upv.es; ncmakoon@upv.es; edmezal@upv.es; joadmar@upv.es
web: <https://b-resilient.webs.upv.es/>

Palabras clave: Colapso progresivo, Estructura prefabricada de hormigón, Simulación computacional, Applied Element Method, Robustez, Caminos Alternativos de Carga.

Resumen: *El colapso progresivo puede definirse como el proceso por el cual un daño local inicial pone en marcha una cadena de fallos, que a veces puede conducir a un colapso desproporcionado o total. Se trata de un fenómeno que a menudo puede ser desencadenado por cargas anormales causadas por eventos extremos, a los que pueden estar expuestos todo tipo de edificios. A pesar de que las estructuras prefabricadas de hormigón, cada vez más utilizadas, pueden ser especialmente vulnerables al colapso progresivo, se han realizado relativamente pocos estudios sobre la robustez de esta tipología estructural en comparación con las estructuras hormigonadas in situ. Los modelos computacionales validados a partir de resultados experimentales son una de las herramientas más prometedoras para comprender mejor la respuesta de las estructuras prefabricadas de hormigón frente a acciones accidentales. Este trabajo presenta el empleo de una nueva estrategia de modelización, el Applied Element Method, que se ha empleado para predecir el comportamiento de un edificio-probeta de hormigón prefabricado bajo diferentes escenarios de retirada de columnas. Estos resultados se han utilizado para planificar la estrategia de monitorización y el esquema de carga para las pruebas experimentales en una estructura real de dos plantas de 15 m x 12 m que se construirá y monitorizará durante la retirada repentina de tres columnas diferentes.*

1. INTRODUCCIÓN

El colapso progresivo puede definirse como el fenómeno por el que un fallo inicial localizado se propaga a otras partes de un sistema estructural, lo que suele conducir al colapso de toda la estructura o de una parte desproporcionada de la misma. Estos sucesos suelen producirse cuando las estructuras están expuestas a eventos extremos y suelen tener

consecuencias negativas importantes para la sociedad. Algunos ejemplos clásicos de colapso progresivo de estructuras de edificios son el de la torre Ronan Point (Londres, 1968) y el del edificio federal A.P. Murrah (Oklahoma, 1995), mientras que otros más recientes son el colapso del hotel Hard Rock (Nueva Orleans, 2019) y el de las torres Champlain (Miami, 2021). La ocurrencia de este tipo de sucesos a lo largo de los años y las enormes pérdidas que conllevan han contribuido, sin duda, a aumentar la conciencia sobre la necesidad de contar con estructuras robustas e insensibles a fallos locales. Esto se evidencia claramente en el creciente número de publicaciones sobre colapso progresivo y robustez estructural [1].

Los componentes prefabricados de hormigón armado se utilizan cada vez más en la actualidad debido a las notables ventajas en términos de rentabilidad, garantía de calidad y durabilidad. Sin embargo, esta tipología estructural puede percibirse como más vulnerable frente a colapso progresivo debido posibles líneas de debilidad que puede presentar esta tipología en las uniones entre componentes prefabricados que pueden contribuir a limitar los caminos de carga alternativas disponibles en caso de colapso local o parcial.

A pesar de este hecho, la gran mayoría de las investigaciones sobre robustez estructural que se han llevado a cabo hasta ahora se han centrado en estructuras de acero o de hormigón ejecutado in situ y sobre subestructuras formadas, en la mayoría de las ocasiones, por pórticos de pequeña escala y aislados del resto del edificio. De hecho, aunque existen ejemplos de pruebas experimentales que implican la retirada repentina de columnas de estructuras de edificios a escala real [2–5], nunca se ha realizado una prueba de este tipo en estructuras prefabricadas de hormigón.

La investigación que se presenta en este trabajo pretende contribuir a una mejor comprensión de los caminos alternativos de carga que pueden activarse en las estructuras prefabricadas de hormigón armado tras la pérdida repentina de columnas. Actualmente se está llevando a cabo una campaña experimental en la que se someterá a un edificio de hormigón armado prefabricado a escala real a diferentes escenarios de retirada repentina de pilares. La estructura de dos plantas y $15 \times 12 \text{ m}^2$ estará fuertemente monitorizada durante las pruebas y los resultados adquiridos se emplearán para calibrar modelos numéricos adecuados. Estos se utilizarán para extrapolar la respuesta observada experimentalmente a otras situaciones extremas de diseño que sean relevantes. En este artículo se presentan los resultados de las simulaciones realizadas antes del ensayo experimental en la estructura real. Éstos se han utilizado para apoyar las decisiones clave sobre el diseño final de la estructura y sobre la estrategia de carga y control que se empleará durante las pruebas. Además, se describen las conclusiones preliminares sobre la eficacia de las posibles medidas para mejorar la robustez de este tipo de estructuras.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

El edificio, que se someterá a la retirada repentina de columnas, tiene dos plantas y una forma rectangular en planta (Fig. 1). El esqueleto de la estructura está formado por vigas y columnas de hormigón armado prefabricadas. Las vigas descansan sobre ménsulas dispuestas en las columnas. Cada planta está formada por losas alveolares y una capa de compresión de hormigón armado ejecutada in situ, con las losas alveolares prefabricadas colocadas en la

dirección que se indica en las líneas de puntos de la Fig. 1. La estructura se diseñó de acuerdo con el Eurocódigo 2 [6].

Los detalles de refuerzo específicos para mejorar la continuidad se diseñaron basándose en los requisitos y recomendaciones de robustez estructural que se encuentran en los códigos y directrices de diseño pertinentes [6–11]. El diseño inicial de estos elementos se basó en los requisitos prescriptivos de fuerza de atado, que pueden diferir sustancialmente de un código de construcción a otro [12]. Los requisitos establecidos en el UFC 4-023-03 [10] se emplearon finalmente para el diseño final.

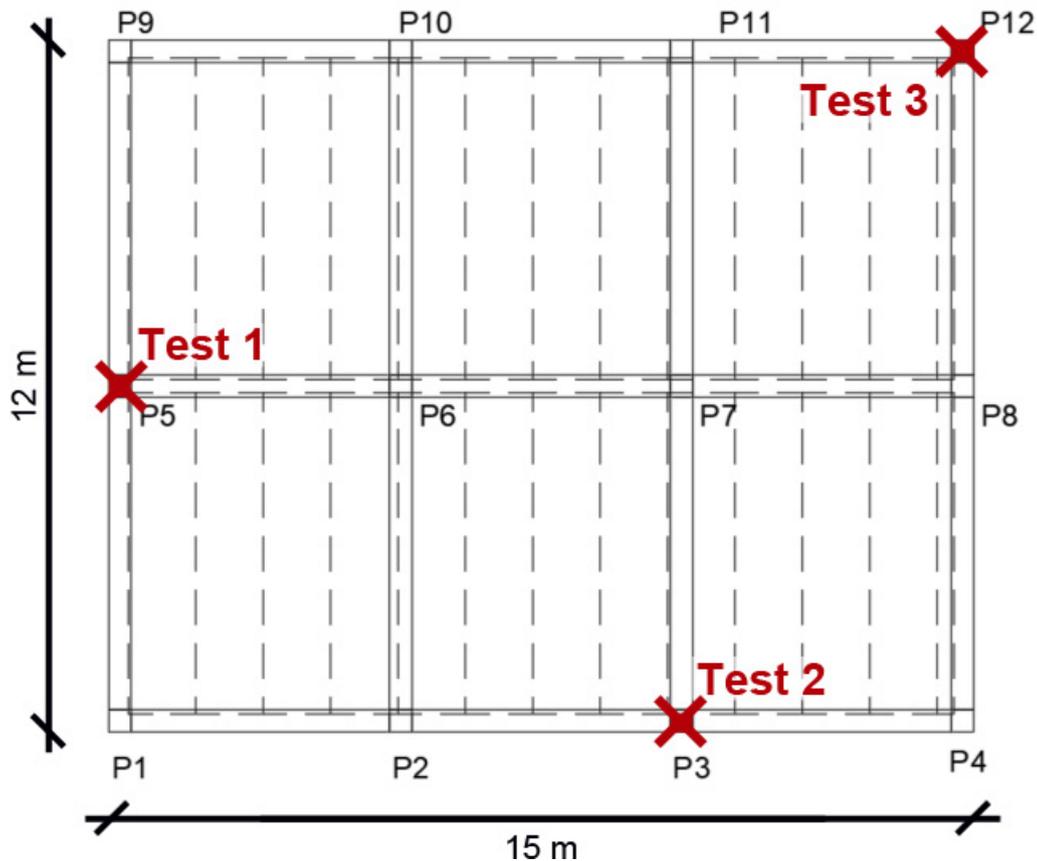


Figura 1. Vista en planta del edificio y localización de las columnas que serán retiradas durante los ensayos.

El programa experimental previsto incluye tres pruebas, cada una de ellas destinada a simular la pérdida repentina de una columna específica de borde o esquina de planta baja (Fig. 1). La eliminación de la columna se realizará utilizando una columna articulada. Se empleó un procedimiento similar para la eliminación repentina de columnas en pruebas anteriores en las que se investigó la robustez de las estructuras de edificios hormigonadas in situ [2,13].

Adicionalmente, se desarrolló una estrategia de monitorización adecuada para capturar adecuadamente la respuesta estructural durante cada prueba. Como resultado, se han colocado un total de 146 galgas extensométricas en las barras de armado para monitorizar las

deformaciones en lugares clave (véase un ejemplo en Fig. 2). Además, se utilizarán 38 transductores de desplazamiento y 9 acelerómetros, junto con el empleo de cámaras convencionales y de alta velocidad, para controlar la deformación, la deriva y la vibración del edificio durante las pruebas.



Figura 2. Galga extensométrica dispuesta en columnas antes del hormigonado.

3. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

El *Applied Element Method* (AEM) se ha utilizado para realizar simulaciones computacionales dinámicas no lineales de los escenarios de retirada repentina de pilares, debido a su capacidad para representar con precisión las diferentes etapas de fallo, incluyendo el agrietamiento, la separación y la colisión [14].

Antes de realizar cualquier simulación predictiva de la respuesta dinámica del edificio de prueba, se llevó a cabo un ejercicio de validación reproduciendo los resultados experimentales reportados en la literatura que involucraban pruebas de retirada de columnas realizadas en subestructuras de hormigón armado, tanto ejecutas in situ como prefabricadas. Los casos utilizados para la validación fueron objeto de otra publicación [15]. Para todos los casos de validación, se pudo obtener una muy buena concordancia entre la respuesta experimental observada y la predicha por las simulaciones, incluso cuando se considera el comportamiento dinámico. Por lo tanto, la estrategia elegida para realizar las simulaciones computacionales se consideró adecuada.

Tras el ejercicio de validación, se creó un modelo detallado de la estructura de prueba utilizando elementos sólidos y resortes para representar diferentes componentes prefabricados y la interfaz entre ellos, así como refuerzos específicos (ver Fig. 3). Para más detalles sobre la geometría del modelo y los parámetros de los materiales empleados, véase la publicación anteriormente comentada [15].

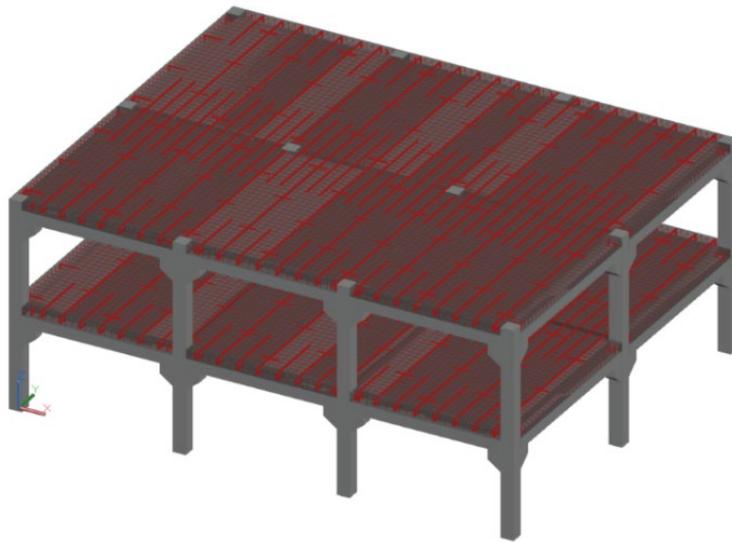


Figura 3. Geometría del modelo computacional utilizado para la simulación de la retirada repentina de columnas.

Para cada uno de los escenarios de prueba previstos, se realizaron dos series de simulaciones dinámicas con una duración de análisis de 2 s tras la retirada repentina de un pilar. La primera consistió en evaluar la respuesta estructural bajo el efecto de una carga uniformemente distribuida de 4 kN/m^2 impuesta en los vanos adyacentes al pilar que se iba a retirar. Esta carga se reproducirá durante los ensayos experimentales previstos y corresponde al valor mínimo de carga que debe considerarse para las situaciones de diseño accidental según el Eurocódigo [8]. Estas simulaciones son útiles para predecir los caminos alternativos de carga que se espera que se desarrollen durante las pruebas (véase Fig. 4 - izquierda) y la magnitud de los parámetros físicos clave cuyo seguimiento es de interés para caracterizar la respuesta estructural del edificio. La segunda serie de simulaciones dinámicas consistió en aumentar gradualmente la carga distribuida hasta que se produjera el colapso (véase Fig. 4 - derecha) con el fin de estimar la capacidad residual de la estructura tras la pérdida de la columna.

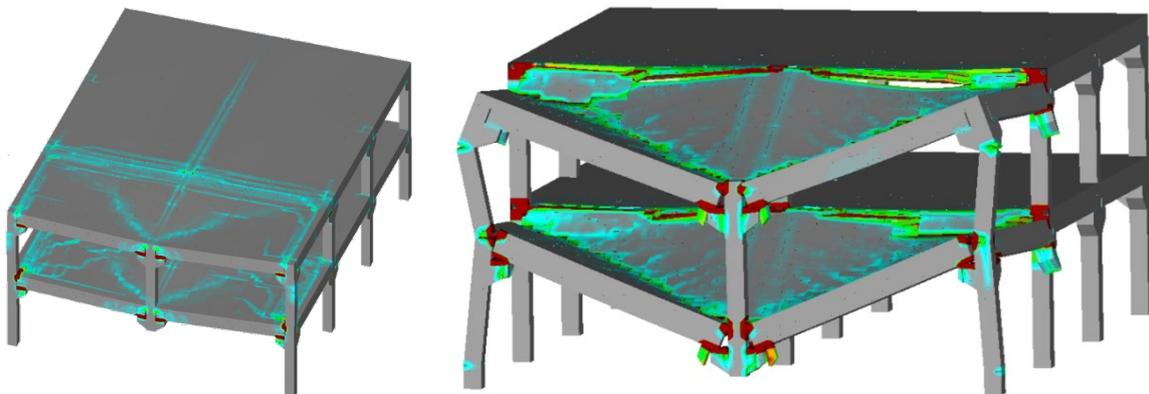


Figura 4. Caminos de carga alternativos (izquierda) y colapso de la estructura (derecha).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Predicción de la respuesta experimental

Como se ha mencionado anteriormente, para el diseño de los refuerzos de atado se consideraron tanto los requisitos de fuerza de atado establecidos en el Eurocódigo [7] como en el UFC 4-023-03 (véase la Sección 2) [10]. Las dos series de simulaciones dinámicas descritas anteriormente se realizaron para ambas opciones de diseño posibles. La Tabla 1 muestra el desplazamiento máximo esperado justo por encima del pilar retirado junto con un factor calculado como la carga de colapso estimada dividida por la carga experimental de 4 kN/m². La estimación de esta carga de colapso para el caso del Test 1 se presenta en la Fig. 5, que muestra la respuesta prevista por las simulaciones dinámicas no lineales del edificio de prueba bajo el efecto de diferentes cargas uniformemente distribuidas.

	Descenso máximo [mm]		Factor para alcanzar la rotura	
	EC	UFC	EC	UFC
Test 1	-31.4	-26.4	1.50	1.81
Test 2	-32.0	-23.9	1.13	1.38
Test 3	-24.6	-22.3	1.75	2.13

Tabla 1. Resultados obtenidos en función de la normativa considerada.

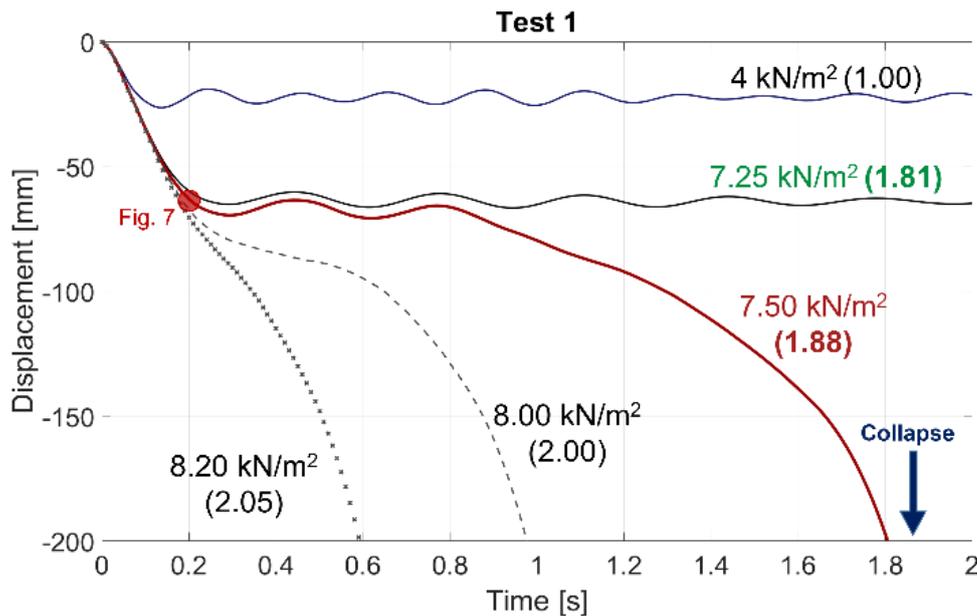


Figura 5. Respuesta dinámica tras la retirada repentina de la columna correspondiente al Test 2 bajo el efecto de diferentes niveles de carga.

Los resultados de la simulación revelan que el escenario de prueba para el que se puede esperar el menor desplazamiento y el mayor factor de carga se refiere Test 3. Esto puede atribuirse al hecho de que el área tributaria realmente soportada por esta columna es menor

que la de los otros dos casos. Por otro lado, la hipótesis de ensayo para la que cabe esperar el mayor desplazamiento y el menor factor de carga de colapso se refiere al Test 2. Esto puede atribuirse al hecho de que en la dirección perpendicular al pórtico no existen vigas, y solo se cuenta con la contribución del forjado formado por placas alveolares.

Los resultados presentados en la Tabla 1 también muestran que, si se emplean los requisitos de fuerza de atado del Eurocódigo para el diseño, el factor de carga estimado para alcanzar el colapso en el caso del Test 2 es bajo (1.13), especialmente si se tienen en cuenta las numerosas fuentes posibles de incertidumbre presentes en el análisis. Por esta razón, se emplearon los requisitos de fuerza de atado establecidos en el UFC 4-023-03 para el diseño final.

4.2. Mecanismos resistentes activados justo antes de alcanzar la rotura

El análisis de los mecanismos de resistencia predichos en diferentes etapas después de la pérdida repentina de la columna y bajo el efecto de diferentes cargas mostró que el principal mecanismo que se puede esperar que proporcione caminos de carga alternativos durante las pruebas experimentales se refiere al comportamiento tipo Vierendeel del pórtico sobre la columna que falla (véase Fig. 6). Nótese que el tiempo de análisis correspondiente al gráfico de contorno mostrado en la Fig. 6 se indica en la Fig. 5.

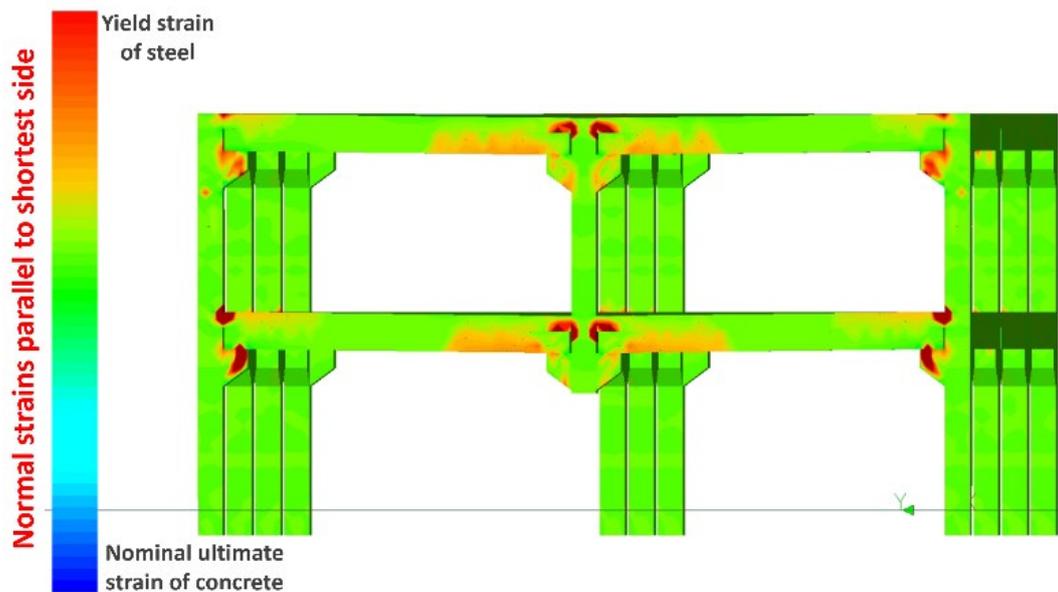


Figura 6. Comportamiento tipo Vierendeel del pórtico donde se ha retirado la columna.

Para los tres escenarios de retirada de pilares, las simulaciones realizadas con cargas más elevadas revelaron que siempre se produce el fallo de los pilares o ménsulas adyacentes antes de que pueda establecerse un estado de equilibrio basado en la acción de la catenaria. La Fig. 7 muestra el fallo de los pilares adyacentes en el caso del escenario de retirada de pilares correspondiente al Test 1. Se trata de una observación importante, ya que las normas de diseño de robustez prescriptivas existentes para establecer los requisitos de fuerza de atado

suelen basarse en la suposición de que puede desarrollarse una acción catenaria de tracción que en estos escenarios es muy difícil de movilizar. Esto subraya la importancia de los ensayos a escala real para comprender mejor el comportamiento estructural en condiciones extremas y en situaciones donde los códigos actuales pueden fallar.

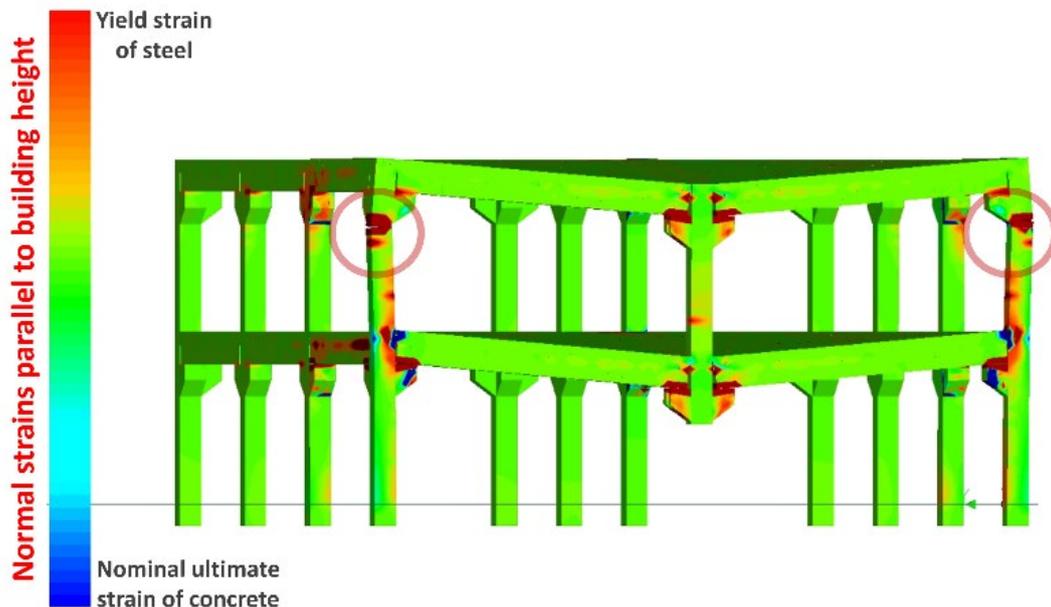


Figura 7. Fallo de columnas adyacentes al incrementar la carga.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presentan los resultados preliminares de las simulaciones realizadas antes de una campaña experimental en la que se retirarán repentinamente los pilares de los bordes y las esquinas de un edificio de hormigón armado prefabricado de dos plantas y de $15 \times 12 \text{ m}^2$ construido únicamente con fines experimentales. La utilidad de estas simulaciones preliminares se basa en la toma de decisiones clave tanto en el diseño estructural como en el montaje experimental a emplear.

Además, los resultados también muestran que, si se utilizan reglas de diseño de robustez prescriptivas para establecer los requisitos de fuerza de atado, también es importante evaluar si las partes adyacentes de una estructura pueden soportar las fuerzas transferidas a ellas durante la acción de la catenaria. Como se ha podido observar en los resultados, aunque la estructura está preparada para soportar grandes esfuerzos de catenaria, estos esfuerzos nunca se llegan a movilizar debido a la pérdida de equilibrio que existe en las columnas de esquina, que incluso llegan a producir la rotura de estos elementos antes de que puedan movilizarse las fuerzas tipo catenaria.

6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo no habría sido posible sin la financiación recibida del Ministerio de Ciencia e Innovación para el proyecto PREBUST (BIA2017-88322-R-AR) y

para la ayuda Juan de la Cierva-Incorporación (IJC2020-042642-I). Los autores desean agradecer a Pedro A. Calderón y Juan J. Moragues su inestimable ayuda y apoyo. También se agradece a Ayman El-Fouly, de Applied Science International, su inestimable colaboración.

REFERENCIAS

- [1] Adam JM, Parisi F, Sagaseta J, Lu X. "Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century". *Eng Struct* 2018;**173**:122–49. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082>.
- [2] Adam JM, Buitrago M, Bertolesi E, Sagaseta J, Moragues JJ. "Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under corner-column failure scenario". *Eng Struct* 2020;**210**:110414. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110414>.
- [3] Bermejo M, Santos AP, Goicolea JM. "Development of Practical Finite Element Models for Collapse of Reinforced Concrete Structures and Experimental Validation". *Shock Vib* 2017;1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/4636381>.
- [4] Sasani M, Bazan M, Sagiroglu S. "Experimental and analytical progressive collapse evaluation of actual reinforced concrete structure". *ACI Struct J* 2007;**104**:731–9. <https://doi.org/10.14359/18955>.
- [5] Song BI, Giriunas KA, Sezen H. "Progressive collapse testing and analysis of a steel frame building". *J Constr Steel Res* 2014;**94**:76–83. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2013.11.002>.
- [6] EN 1992-1-1. *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*; 2004.
- [7] EN 1991-1-7. *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions*; 2006.
- [8] EN 1990. *Eurocode: Basis of structural design*; 2002.
- [9] FIB Commission 6. *Guide to good practice: Design of precast concrete structures against accidental actions*. Lausanne (Switzerland): 2012.
- [10] DoD. Department of Defense. *Design of buildings to resist progressive collapse* (UFC 4-023-03); 2009.
- [11] GSA. *Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance* 2013.
- [12] Russell JM, Sagaseta J, Cormie D, Jones AEK. "Historical review of prescriptive design rules for robustness after the collapse of Ronan Point". *Structures* 2019;**20**:365–73. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.011>.
- [13] Buitrago M, Bertolesi E, Sagaseta J, Calderón PA, Adam JM. "Robustness of RC building structures with infill masonry walls: tests on a purpose-built building". *Eng Struct* 2021;**226**:111384. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111384>.
- [14] Meguro K, Tagel-Din H. "Applied Element Method for structural analysis: Theory and application for linear materials". *Doboku Gakkai Ronbunshu* 2000;**17**:31–45. https://doi.org/10.2208/jscej.2000.647_31.
- [15] Makoond N, Buitrago M, Adam JM. *Progressive collapse assessment of precast*

reinforced concrete structures using the Applied Element Method (AEM). 6th Int. Conf. Mech. Model. Struct. Eng. (CMMoST 2021), Valladolid (Spain): 2021, p. 1–18.