

Incorporación de una nueva última línea de defensa frente a colapsos progresivos en estructuras de hormigón prefabricadas

Incorporating a new last line of defence against progressive collapse in precast concrete structures

Manuel Buitrago^a, Nirvan Makoond^b, Andri Setiawan^c, Jose M. Adam^d

^a PhD Civil Engineering. ICITECH, Universitat Politècnica de València. Established Researcher. mabuimo1@upv.es

^a PhD Civil Engineering. ICITECH, Universitat Politècnica de València. Senior Researcher. ncmakoon@upv.es

^a PhD Civil Engineering. ICITECH, Universitat Politècnica de València. Senior Researcher. asetiaw1@upv.es

^a PhD Civil Engineering. ICITECH, Universitat Politècnica de València. Full Professor. ioadmar@upv.es

RESUMEN

Este artículo describe un nuevo enfoque de diseño, denominado aislamiento del colapso basado en jerarquías, para detener la propagación de fallos en los edificios. Este enfoque garantiza que los edificios tengan suficiente resistencia para soportar cargas en condiciones operativas y pequeños fallos iniciales. Sin embargo, algunos elementos de conexión se diseñan deliberadamente para romperse y aislar el colapso cuando la propagación del fallo es inevitable. Para validar el concepto propuesto, se ensayó una muestra de edificio prefabricado de dos plantas con unas dimensiones planas de 12 × 15 m, y aquí se discuten los principales resultados. Se espera que este trabajo fomente la adopción generalizada de sistemas prefabricados robustos y contribuya a la construcción de edificios más resistentes y sostenibles.

ABSTRACT

The paper describes a new design approach, so-called hierarchy-based collapse isolation, to arrest failure propagation in buildings. The approach ensures that buildings have sufficient resistance to withstand loads under operational conditions and small initial failures. Yet, some connector elements are deliberately designed to break to isolate the collapse when failure propagation is inevitable. To validate the proposed concept, a two-storey purpose-built precast building specimen with 12 m × 15 m plan dimensions was tested and the main findings are discussed here. The work is expected to promote the wider adoption of robust precast systems, contributing to more resilient and sustainable buildings.

PALABRAS CLAVE: colapso progresivo, robustez estructural, estructuras prefabricadas de hormigón.

KEYWORDS: progressive collapse, structural robustness, precast concrete structures.

1. Introducción

Los sistemas prefabricados se han adoptado de forma generalizada en todo el mundo debido a sus ventajas en cuanto a eficiencia, sostenibilidad y rapidez de construcción [1]. Sin embargo, tras

el fallo del sistema de paneles prefabricados en el incidente de Ronan Point, en el Reino Unido (1973), nuestra sociedad empezó a considerarlo un sistema muy vulnerable cuando se ve

sometidos a fenómenos extremos [2], se han llevado a cabo más investigaciones para comprender mejor el comportamiento de estos sistemas prefabricados y proponer mejoras de las prestaciones, principalmente mediante la adopción de varias modificaciones en las conexiones viga-columna [3-6]. Aunque se ha demostrado que estos novedosos sistemas de conexión aumentan la robustez estructural, se diseñaron principalmente para proporcionar una amplia continuidad, de modo que puedan desarrollarse eficazmente trayectorias de carga alternativas. Sin embargo, estudios recientes [7-8] indican que la continuidad extensiva puede ser contraproducente e incluso provocar un fallo mayor, ya que las partes que se derrumban arrastran al resto del edificio que, de otro modo, no se vería afectado. Esto es especialmente relevante en situaciones en las que el edificio tiene grandes luces, pesadas cargas gravitatorias (impuestas) o cuando la magnitud del fallo inicial es significativamente grande en relación con el tamaño del edificio [7]. Hasta ahora, muy pocos o casi ningún estudio ha intentado desarrollar un sistema de conexión que pueda detener la propagación del fallo.

En el marco de Endure, un proyecto ERC Consolidator Grant albergado en la Universitat Politècnica de València, se está desarrollando actualmente un novedoso enfoque de diseño denominado segmentación basada en fusibles para detener la propagación del colapso en edificios. El enfoque, que se consigue controlando la jerarquía de fallos de los componentes estructurales dentro del sistema, se inspira en cómo las lagartijas mudan la cola para escapar de los depredadores [8]. Combina armoniosamente la continuidad para permitir la redistribución de las fuerzas internas en caso de pequeños fallos iniciales y la segmentación para detener la propagación del colapso en caso de fallos mayores (o en cualquier otro escenario en el que la propagación del colapso sea inevitable). En un sistema de construcción, los pilares o muros (elementos verticales) son los elementos

estructurales clave para mantener la integridad y estabilidad de todo el sistema. En este sentido, estos elementos verticales deben diseñarse para soportar las fuerzas máximas que se espera que transfieran los sistemas de forjados (vigas y losas) durante un proceso de colapso. Para garantizar que el diseño de estos elementos verticales siga siendo práctico y económico, una estrategia clave consiste en limitar la capacidad de la conexión entre los sistemas de forjados y estos elementos verticales (límite superior). Así, cuando se supera un determinado umbral de fuerza, la conexión se rompe y detiene la transmisión de fuerzas, protegiendo los elementos verticales de daños adicionales. No obstante, la conexión no puede diseñarse demasiado débil, ya que debe proporcionar continuidad en situaciones en las que la redistribución de la carga aún es posible (límite inferior). Para confirmar la aplicabilidad del concepto propuesto, se llevó a cabo una campaña experimental única en una muestra a escala real de un edificio prefabricado [8-9]. A continuación, se describirá brevemente la campaña de ensayos, incluyendo el diseño de la muestra del edificio, la instrumentación y el sistema de monitorización, el protocolo de carga y algunos resultados clave obtenidos en el ensayo.

2. Edificio probeta

El espécimen construido al efecto tenía dos pisos de 2,6 m de altura con una planta de 15 x 12 m. El vano más largo del edificio tenía tres tramos con una longitud de 5 m, y el más corto constaba de dos tramos con una luz de 6 m (Fig. 1a). Los pilares estaban formados por elementos prefabricados de 40 x 40 cm, mientras que las vigas eran parcialmente prefabricadas con una profundidad de 61,5 cm (35 cm prefabricada + 26,5 cm ejecutada in situ) y una anchura de 40 cm. Las armaduras de continuidad superiores de las vigas se instalaron de forma continua de un extremo a otro del edificio mediante empalmes

(en los vanos interiores) y acopladores mecánicos de barras de refuerzo (en las columnas de esquina). Estas armaduras de continuidad se pasaron a través de tubos preparados explícitamente en la columna prefabricada en el lugar de conexión viga-columna. Se utilizaron tres barras de $\Phi 20$ para las vigas perimetrales y $\Phi 25$ para las internas. Encima de las ménsulas de los pilares se colocaron apoyos elastoméricos para proporcionar soporte vertical a las vigas. La parte inferior de las vigas (la parte prefabricada) se unió a las ménsulas mediante pasadores de 2-20 mm. Los forjados estaban formados por losas alveolares con una profundidad total de 26,5 cm (20 cm prefabricado + 6,5 cm de capa de compresión) y una anchura unitaria de 1,2 m, con una luz de 6 m entre las vigas. Se instalaron elementos de unión entre las unidades de placas alveolares adyacentes y entre las placas alveolares y las vigas para cumplir los requisitos de robustez estructural. En estos estudios [10-11] se puede encontrar información más detallada sobre el diseño de la muestra del edificio.

El concepto de segmentación basado en fusibles se implementó en la muestra del edificio mediante el uso de una conexión viga-columna de resistencia parcial en la que las columnas se diseñaron para tener una capacidad más fuerte que las fuerzas máximas que puede transmitir el sistema de forjado (viga + losa). La conexión de resistencia parcial (Fig. 1b) se diseñó para proporcionar una continuidad suficiente para redistribuir las fuerzas internas durante pequeños fallos, pero se rompe cuando se supera un determinado umbral de fuerzas. Para ello se seleccionó cuidadosamente la dimensión de las barras de espiga que conectan la ménsula de los pilares a las vigas para utilizarlas como «limitador de fuerza» en el sistema. A continuación, se volvió a comprobar la capacidad de los pilares con respecto a este umbral de fuerza y se realizó un proceso iterativo para garantizar que se cumple la jerarquía de fallos. Es importante señalar también que, además de esta

comprobación basada en componentes, es necesaria una simulación global del edificio, ya que la redistribución de fuerzas durante un proceso de colapso es compleja y sistémica [8].

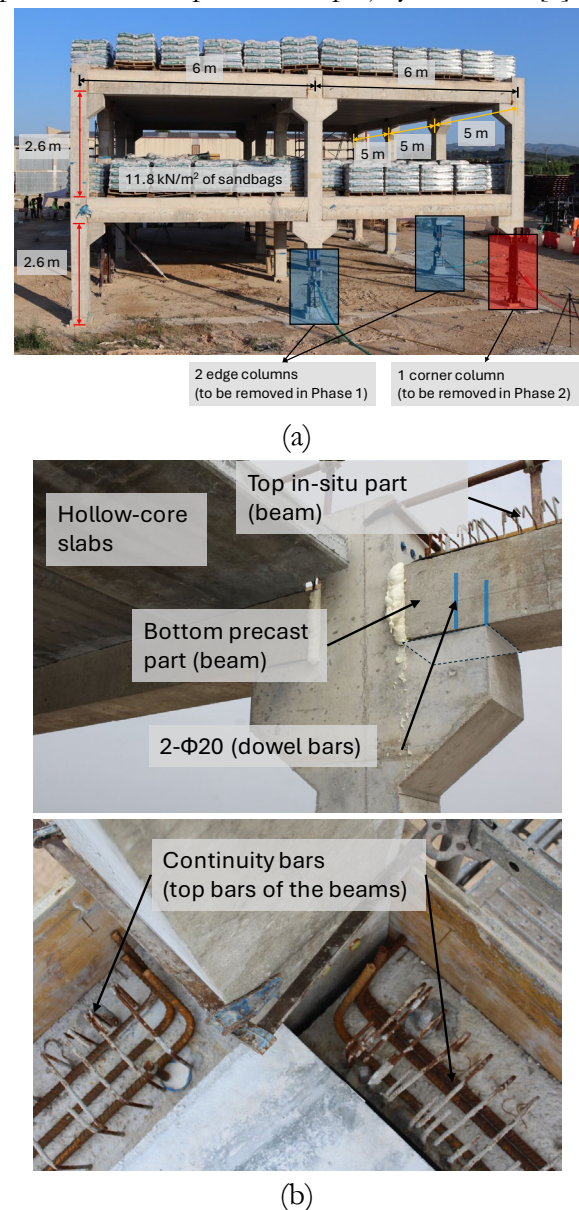


Figura 1. (a) Disposición y geometrías clave de la probeta prefabricada construida al efecto (los pilares que deben retirarse también están resaltados en colores rojo y azul); (b) La conexión viga-pilar de resistencia parcial.

3. Cargas, protocolo de ensayo y instrumentación

Antes de realizar el proceso de retirada de columnas, el edificio se cargó con más de 8.000 sacos de arena, lo que representa una carga

uniformemente distribuida de 11,8 kN/m². La magnitud de las cargas es aproximadamente el doble de la carga accidental de diseño del edificio para representar una condición de sobrecarga (y para tener en cuenta parcialmente el factor de aumento dinámico que no se consideró explícitamente en la fase 1 de la prueba). Los sacos de arena se colocaron únicamente en los tramos adyacentes a los pilares retirados (Fig. 1a). Las simulaciones computacionales preliminares indicaron que tales configuraciones de carga parcial inducen fuerzas desequilibradas más críticas a las partes verticales restantes cuando se comparan con la configuración de carga completa; por lo tanto, finalmente se adoptó la primera.

El protocolo de pruebas se diseñó en dos fases sucesivas. En la primera fase (Fase 1), se retiraron dos columnas de borde (de forma casi estática) para representar un tamaño de fallo inicial de pequeño a moderado en el que se espera que la continuidad permita el desarrollo de trayectorias de carga alternativas para evitar el inicio del colapso. Esto se hizo descargando gradualmente los gatos hidráulicos que soportaban las dos columnas (mostradas como cajas sombreadas en azul en la Fig. 1a). Como ya se ha mencionado, la retirada de los soportes se realizó de forma casi estática, por lo que no se tuvo en cuenta el efecto dinámico, que se compensó introduciendo cargas más pesadas en el edificio. Después de que el edificio volviera a una posición estable, se realizó la segunda fase de pruebas retirando repentinamente una columna adicional entre las dos columnas anteriores (véase el recuadro sombreado en rojo en la Fig. 1a). En total, se eliminaron tres columnas, lo que representaba un gran fallo inicial en el que se esperaba que se produjera una segmentación y se evitara que el colapso se propagara más allá de las regiones inicialmente afectadas. La eliminación dinámica de la tercera columna fue posible gracias al uso de una columna de acero de tres bisagras especialmente diseñada. La bisagra central se desestabilizó para

desencadenar la retirada del soporte tirando de él con una cuerda desde una distancia segura fuera del edificio.

En cuanto a la instrumentación, se utilizaron varios tipos de sensores (Fig. 2):

- 18 transductores de desplazamiento (incluido un sensor de cable de gran dimensión) en diferentes lugares del edificio para controlar el desplazamiento vertical de los pilares retirados, el desplazamiento lateral (deriva horizontal) de cada planta y medir el desplazamiento relativo (separación) entre las vigas y las placas alveolares y entre dos unidades de placas alveolares adyacentes.
- 57 galgas extensométricas en las barras de refuerzo del interior de los pilares, losas, vigas y ménsulas. Las barras de refuerzo de los pilares se instrumentaron para controlar la redistribución de las cargas axiales durante la prueba. Las barras de continuidad superiores de las vigas cerradas a la parte colapsada se instrumentaron para comprender la evolución de la deformación durante la fase de trayectoria de carga alternativa (ALP) y el colapso. Los pasadores que conectan la viga con la ménsula se monitorizaron para comprender mejor el papel y la activación de los pasadores en el mantenimiento de la integridad de la conexión viga-columna en la Fase 1 y cómo la fractura de los pasadores permite la segmentación de las partes colapsadas de las intactas en la Fase 2.
- 5 acelerómetros para medir las vibraciones verticales (caída libre) de los tramos de fallo previstos, la vibración vertical de las partes verticales antes y después del fallo parcial, y las aceleraciones horizontales en ambos ejes principales del edificio inducidas por el proceso de segmentación.

- 5 cámaras de alta resolución y 2 drones para documentar la evolución de los daños en diferentes ángulos del edificio durante la prueba y para realizar una inspección sistemática tras el derrumbe.

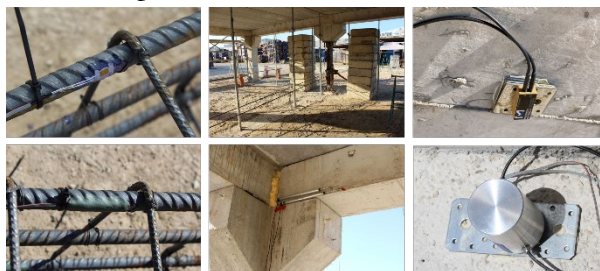


Figura 2. Sistema de monitorización (instrumentación) instalado en la muestra del edificio, incluidos transductores de desplazamiento, extensómetros y acelerómetros.

4. Resultados

4.1 Fase 1: desarrollo de caminos alternativos de carga

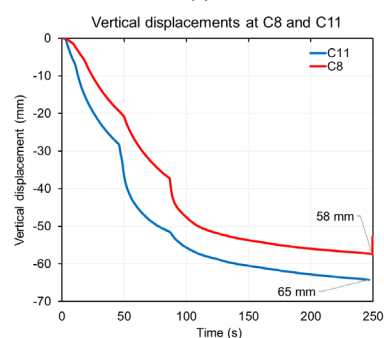
Tras la retirada de las dos columnas de los bordes (Fig. 3a), el edificio se estabilizó a unos 250 segundos del inicio de la fase de carga (indicado por las mediciones estacionarias). Los desplazamientos verticales máximos medidos en la ubicación de las columnas retiradas fueron de aproximadamente 58-65 mm (Fig. 3b). Estos desplazamientos indujeron una rotación de cuerda estimada de aproximadamente 0.01 - 0.015 radianes (menos de 1°) a las vigas conectadas a estas columnas removidas. Este nivel de desplazamiento puede considerarse pequeño teniendo en cuenta que el edificio perdió dos apoyos simultáneamente. De hecho, estas vigas soportaban principalmente las cargas mediante mecanismos de flexión sin entrar en ningún estado catenarior. Normalizando los desplazamientos verticales con la profundidad de la viga, se obtiene un valor de aproximadamente 0,1. Este valor está muy por debajo de la relación en la que la catenaria se produce. Este valor es muy inferior a la relación en la que se activa el mecanismo catenarior (a una

relación de aproximadamente 1,0), lo que confirma aún más la afirmación anterior.

No obstante, algunas de las barras de continuidad superiores en el apoyo adyacente a las ubicaciones de los pilares retirados cedieron debido a momentos flectores negativos significativos. Esto no es sorprendente, ya que se espera que el momento flector se multiplique por cuatro al duplicarse la longitud del vano debido a la pérdida del apoyo. Simultáneamente, algunos tirantes que conectan las unidades de tableros adyacentes se tensaron, lo que indica la activación de los tirantes en la redistribución de las cargas. En esta fase, la deformación en las barras de los pasadores indicó algunos aumentos de las deformaciones, pero relativamente pequeños en comparación con la deformación de fractura. Esto confirma que el diseño de las barras de pasadores era suficiente para permitir el desarrollo de trayectorias de carga alternativas para fallos iniciales de pequeños a moderados, cumpliendo con las normas de robustez actuales [12-14]. Los resultados cuantitativos detallados no se presentan aquí en aras de la brevedad y los lectores interesados pueden encontrarlos aquí [8].



(a)



(b)

Figura 3. (a) Estado deformado de la muestra del edificio - Fase 1; (b) Deflexiones verticales en las ubicaciones de los pilares retirados (C8 y C11).

4.2 Fase 2: segmentación para detener la propagación del colapso

Tras realizar el procedimiento de retirada en la fase 1 (descrito en la sección 4.1), se hizo una pausa de 10 minutos antes de pasar a la fase 2 para garantizar que el edificio tuviera tiempo suficiente para estabilizarse. Simultáneamente, durante esta pausa, también nos aseguramos de haber monitorizado y registrado toda la información clave de los sistemas de medición. A continuación, se procedió a la eliminación dinámica de la columna desestabilizando la columna de acero de tres bisagras. Inmediatamente, el colapso se inició a partir de los tramos cargados en los que se retiraron los tres apoyos. Sin embargo, el colapso no se propagó al resto del edificio ya que el frente de colapso fue detenido por el mecanismo de segmentación. La instantánea del proceso de colapso se presenta en la Fig. 4 para dar una idea de la evolución de los daños en el sistema durante la prueba.



(1)



(2)



(3)

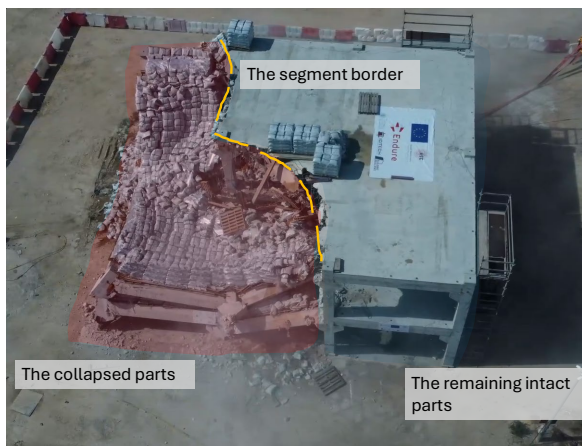


(4)

Figura 4. Evolución de los estados de daño del espécimen del edificio durante la Fase 2.

La Fig. 5a muestra la vista aérea del espécimen de edificio tras producirse el derrumbe parcial. El borde del segmento separa claramente las partes colapsadas de las partes intactas/en pie del edificio. Después de la prueba se realizó una inspección sistemática posterior al colapso para documentar los mecanismos de fallo responsables de la segmentación. Algunos de los fenómenos clave se muestran en la Fig. 5b, incluyendo la fractura del pasador y de las barras de continuidad superiores en el lugar de la conexión viga-columna y el desprendimiento de la malla de refuerzo de la losa (topping) debido a deslizamientos. Es importante mencionar que, aunque la segmentación consiguió detener el colapso, esto no significa que las partes intactas del edificio sobrevivieran sin daños. Se observaron diversos grados de daños en la parte intacta pero, en general, las regiones más cercanas al borde del segmento fueron las más gravemente afectadas (dañadas) y se observaron menos daños en las regiones más alejadas. En el estudio correspondiente [9] se presenta una inspección detallada de estos daños. El éxito de esta campaña de pruebas demostró que la

continuidad y la segmentación podían combinarse sinérgicamente para mejorar la robustez estructural de los edificios cuando se someten a diferentes tamaños de fallo inicial. La continuidad ayuda a redistribuir las cargas de los elementos fallidos a su entorno y a evitar cualquier colapso tras pequeños fallos iniciales. Por el contrario, la segmentación evita la propagación del colapso tras grandes fallos iniciales, proporcionando la última línea de defensa cuando fallan otras medidas.



(a)



(b)

Figura 5. (a) Una vista aérea del espécimen del edificio mostrando el borde del segmento; (b) Mecanismos clave de fallo que permiten que se produzca la segmentación.

5. Conclusiones

El trabajo presenta la validación del enfoque de segmentación basado en fusibles aplicado a sistemas de construcción prefabricados. A continuación se resumen las principales conclusiones del trabajo:

- La segmentación basada en fusibles combina sinérgicamente la continuidad para redistribuir las cargas tras pequeños fallos iniciales y la segmentación del edificio en diferentes partes para aislar el colapso tras producirse un gran fallo inicial. El concepto se aplicó al diseño de un espécimen de edificio prefabricado construido ex profeso y probado hasta el fallo. El sistema de construcción adopta una conexión viga-columna de resistencia parcial que limita la transferencia de fuerzas de los sistemas de suelo a las columnas durante un proceso de colapso, protegiendo las columnas de daños graves.
- Se adoptó un programa de pruebas en dos fases para comprobar la capacidad del sistema de construcción de redistribuir las cargas en caso de fallo pequeño a moderado y de detener el colapso en caso de fallo mayor. En la fase 1, gracias a la continuidad proporcionada por los tirantes y los pasadores en la conexión viga-columna, pueden desarrollarse eficazmente trayectorias de carga alternativas para redistribuir las cargas de los elementos fallidos a sus alrededores. En la Fase 2, la fuerza superó el umbral y las barras de pasadores se rompieron seguidas de la fractura de las barras longitudinales superiores, aislando las regiones inicialmente colapsadas del resto del edificio.
- Aunque las partes intactas restantes resultaron dañadas por el proceso, aún puede realizarse una evacuación segura,

lo que minimiza la pérdida de vidas humanas durante estos sucesos extremos.

Agradecimientos

Este artículo forma parte de un proyecto (Endure) que ha recibido financiación del Consejo Europeo de Investigación (ERC) en el marco del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea (Grant agreement No. 101000396). Los autores también desean expresar su agradecimiento por la financiación recibida en el marco de los programas postdoctorales IJC2020-042642-I financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la «NextGenerationEU/PRTR» de la Unión Europea, de la Generalitat Valenciana/Fons Social Europeu [CIAPOS/2023/216] y del proyecto Evolve (ref. CIGE/2023/199).

Referencias

- [1] Tam, V. W. Y., Fung, I. W. H., Sing, M. C. P., & Ogunlana, S. O. 2015. Best practice of prefabrication implementation in the Hong Kong public and private sectors. *Journal of Cleaner Production*. Vol 109, pp. 216 - 231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.045>
- [2] Russell, J.M., Sagaseta, J., Cormie, D., & Jones, A. E. K. 2019. Historical review of prescriptive design rules for robustness after the collapse of Ronan Point. *Structures*. Vol 20, pp 365 – 373. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.011>
- [3] Qian, K., Liang, S-L., Fu, F., & Fang, Q. 2019. Progressive collapse resistance of precast concrete beam-column sub-assemblages with high-performance dry connections. *Engineering Structures*. Vol 198, 109552. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109552>
- [4] Quiel, S. E., Naito, C. J., & Fallon, C. T. 2019. A non-emulative moment connection for progressive collapse resistance in precast concrete building frames. *Engineering Structures*. Vol 179, pp. 174 – 188. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.027>
- [5] Gu, X, Zhang, B., Huang, X., & Wang, X. 2022. Experimental investigation on progressive collapse resistance of precast concrete frame structures with different beam-column connections. *Journal of Building Engineering*. Vol 56, 104803. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104803>
- [6] Zhao, Z., Cheng, X., Li, Y., Diao, M., Guan, H., Zhang, W., & Liu, Y. 2024. Progressive collapse resistance of precast concrete beam-column assemblies using dry connections under uniformly distributed loading condition. *Engineering Structures*. Vol 306, 117820. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117820>
- [7] Makoond, N., Setiawan, A., Orton, S. L., & Adam, J. M. 2024. The effect of continuity reinforcement on the progression of collapse in reinforced concrete buildings. *Structures*, Vol 61, 105981. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105981>
- [8] Makoond, N., Setiawan, A., Buitrago, M., & Adam, J. M. 2024. Arresting failure propagation in buildings through collapse isolation. *Nature*, Vol 629, pp. 592–596. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07268-5>
- [9] Buitrago, M., Setiawan, A., Makoond, N., Gerbaudo, M. L., Marin, L., Cetina, D., Caredda, G., Sempertegui, G., Oliver, M., & Adam, J. M. 2024. Failure analysis after the progressive collapse of a precast building. *Engineering Structures*, Volume 321, 118893. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118893>

- [10] Buitrago, M., Makoond, N., Moragues, J. J., Sagaseta, J., & Adam, J. M. 2023. Robustness of a full-scale precast building structure subjected to corner-column failure. *Structures*. Vol 52, pp. 824 – 841. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.146>
- [11] Buitrago, M., Sagaseta, J., Makoond, N., Setiawan, A., & Adam, J. M. 2025. Robustness of a full-scale precast building structure after edge column failure. *Engineering Structures*. Vol 326, 119495. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119495>
- [12] The Institution of Structural Engineers (IStructE). Practical guide to structural robustness and disproportionate collapse in buildings 2010.
- [13] FIB Commission 6. Guide to good practice: Structural connections for precast concrete buildings. Lausanne (Switzerland): 2008.
- [14] FIB Commission 6. Guide to good practice: Design of precast concrete structures against accidental actions. Lausanne (Switzerland): 2012.