

## PROGRESSIVE COLLAPSE AND ROBUSTNESS OF BUILDINGS AND BRIDGES

### COLAPSO PROGRESIVO Y ROBUSTEZ DE EDIFICIOS Y PUENTES

Adam, José M<sup>1</sup>; Buitrago, Manuel<sup>2</sup>; Makoond, Nirvan<sup>3</sup>.

1: ICITECH

Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España  
e-mail: [joadmar@upv.es](mailto:joadmar@upv.es), web: <https://b-resilient.webs.upv.es/>

2: ICITECH

Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España  
e-mail: [mabuimol@upv.es](mailto:mabuimol@upv.es), web: <https://b-resilient.webs.upv.es/>

3: ICITECH

Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España  
e-mail: [ncmakoon@upv.es](mailto:ncmakoon@upv.es), web: <https://b-resilient.webs.upv.es/>

#### RESUMEN

Los últimos años han estado marcados por un número cada vez más elevado de estudios sobre el colapso progresivo y la robustez estructural como consecuencia de la persistente aparición y aparentemente creciente frecuencia de fallos estructurales catastróficos. En la actualidad, la gran mayoría de estos estudios se centran en simulaciones computacionales y en pruebas de laboratorio de subestructuras a escala reducida. Aunque esta filosofía de estudio ha permitido avanzar sustancialmente en la materia, estas estrategias se caracterizan por sus importantes limitaciones, que sólo pueden superarse mediante ensayos a escala real de las estructuras. Este artículo presenta algunos de los principales trabajos de investigación realizados en este sentido por el grupo de investigación *Building Resilient* del instituto ICITECH de la *Universitat Politècnica de València*. Se presentan los trabajos más importantes relacionados con el cimbrado de edificios, las estructuras de edificios de hormigón armado ejecutadas in situ y prefabricadas, los puentes metálicos en celosía y los edificios segmentados por fusibles, junto con los resultados más significativos obtenidos hasta el momento.

**PALABRAS CLAVE:** Colapso progresivo, robustez, edificios, puentes.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La integridad de estructuras de edificios y puentes es clave para el bienestar de nuestra sociedad. En los últimos años, y a pesar de los esfuerzos y avances realizados, hemos presenciado el incremento de fallos y colapsos en este tipo de estructuras. En el ámbito de los puentes, algunos de los casos recientes con mayor impacto han sido los colapsos del puente de Génova en 2017, el puente Nanfang'ao en Taiwan en 2019, el viaducto del metro de México DF en 2021 y el puente Fern Hollow en Pittsburgh en 2022. En lo relativo a edificios, podemos mencionar los colapsos ocurridos en el año 2021 en las torres Champlain de Miami, el Hotel Siji Kaiyuan en Jiangsu, y el edificio residencial de Peñíscola. Todos estos colapsos presentan como nexo común lo que llamaríamos un colapso en cadena o colapso progresivo, ya que un fallo a escala local se propaga al resto de la estructura, causando un colapso a gran escala.

Estamos presenciando, podríamos pensar, la existencia de infraestructuras menos seguras. No hay que negar que en los últimos años se ha producido un número significativo de colapsos en edificios y puentes. Sin embargo, no podemos afirmar que, en general, estas estructuras no sean seguras, o que su diseño o concepción sean inadecuados. Sin duda, los edificios y puentes están cada vez más expuestos a situaciones extremas causadas por el cambio climático, amenazas terroristas, su propio envejecimiento, o un mantenimiento y conservación inadecuados (v.g. riadas, deslizamientos de ladera, explosiones de gas, impacto de vehículos, huracanes, sismos de gran magnitud, atentados terroristas, etc.). A todo ello se une el hecho de que muchas de estas estructuras están llegando al final de su vida útil, y que en muchas situaciones las cargas actuantes sobre ellas son superiores a las previstas en su diseño inicial.

Este artículo presenta las investigaciones que llevamos en marcha actualmente en el grupo de investigación *Building Resilient* (<https://b-resilient.webs.upv.es/>), en el marco del instituto ICITECH de la Universitat Politècnica de València. Las investigaciones que llevamos a cabo las centramos en ensayos sobre probetas a escala real. En concreto, en este artículo mostramos los trabajos realizados sobre: 1) estructuras de cimbrado de edificios; 2) edificios de hormigón in situ con forjados de losa maciza; 3) edificios con estructura prefabricada de hormigón; 4) puentes de acero en celosía; y 5) la definición de una nueva filosofía de diseño basada en conectar segmentos de edificios con fusibles estructurales. El conocimiento adquirido está permitiendo definir estrategias de diseño y construcción para conseguir estructuras resilientes, definir actuaciones para reducir la vulnerabilidad de edificios y puentes frente a eventos extremos, y proponer pautas de monitorización para detectar a tiempo el potencial riesgo de colapso progresivo.

## **2. COLAPSO PROGRESIVO Y ROBUSTEZ ESTRUCTURAL**

Un colapso progresivo ocurre cuando un fallo inicial, en una parte de una estructura, inicia un efecto dominó que lleva al colapso de toda la estructura o de una parte desproporcionada de ella. Considerando la importancia que tiene evitar colapsos progresivos, los códigos actuales de diseño han introducido el concepto “robustez”, entendido como la insensibilidad a un fallo inicial-local. En estos momentos existe una clara necesidad de tener edificios y puentes robustos, en los cuales no se propaguen los fallos locales-iniciales provocados por situaciones extremas de diversa índole. Prueba de esta necesidad es la continua actualización de las normas actuales de diseño de estructuras y el crecimiento en el número de publicaciones científicas relacionadas con la robustez estructural [1,2].

Una estructura robusta deberá ser capaz de activar caminos de carga alternativos tras un fallo local-inicial. De este modo, la carga que soportaba el elemento que ha fallado se podrá redistribuir al resto de la estructura. Esta capacidad de activar caminos de carga alternativos se consigue habitualmente dotando a las estructuras de continuidad, redundancia y ductilidad.

## **3. INVESTIGACIÓN SOBRE ROBUSTEZ Y COLAPSO PROGRESIVO DE EDIFICIOS Y PUENTES**

En el grupo de investigación *Building Resilient*, del instituto ICITECH de la Universitat Politècnica de València, tenemos por objetivo contribuir a mejorar la resiliencia de edificios y puentes. Para conseguir este objetivo, investigamos en dos campos: 1) evaluación estructural, incluyendo la monitorización de estructuras y análisis de riesgos; y 2) colapso progresivo y robustez de estructuras. Tradicionalmente, la investigación en el campo de la robustez y colapso progresivo de estructuras se ha centrado en simulaciones computacionales y ensayos de laboratorio sobre probetas a escala reducida. En *Building Resilient* vamos más allá y centramos nuestros trabajos en la experimentación con probetas a escala real. A continuación, se describen brevemente cinco de las investigaciones que llevamos en marcha actualmente en el campo de la robustez y colapso progresivo de edificios y puentes.

### 3.1 Cimbrado de edificios

Considerando las consecuencias que tienen los fallos durante la construcción de estructuras de edificios [3–5], en 2014 arrancamos una nueva línea de investigación relacionada con la robustez y colapso progresivo de edificios en construcción. Esta investigación fue financiada por el *Ministerio de Educación y Formación Profesional* y la *Generalitat Valenciana*. La investigación ha sido pionera a nivel mundial, por ser la primera vez que se analiza cómo el fallo de uno o varios elementos de una cimbra puede llevar al colapso progresivo de toda la cimbra (Figura 1a), o incluso de todo el edificio en construcción. La investigación ha permitido identificar los caminos de carga alternativos que se pueden movilizar ante el fallo de uno o varios elementos de una cimbra [6].

Lo más innovador y de mayor impacto ha venido con el diseño de un novedoso fusible estructural (Figura 1b). Este fusible se coloca en los puntales y, tal y como hemos conseguido demostrar mediante una ambiciosa campaña experimental (Figura 1c) y simulaciones computacionales [7], mejora la robustez de la cimbra y, por tanto, evita la propagación de fallos locales en edificios en construcción [8]. Este dispositivo ha sido patentado, siendo la primera referencia que se tiene del uso de fusibles para evitar el colapso progresivo de estructuras.

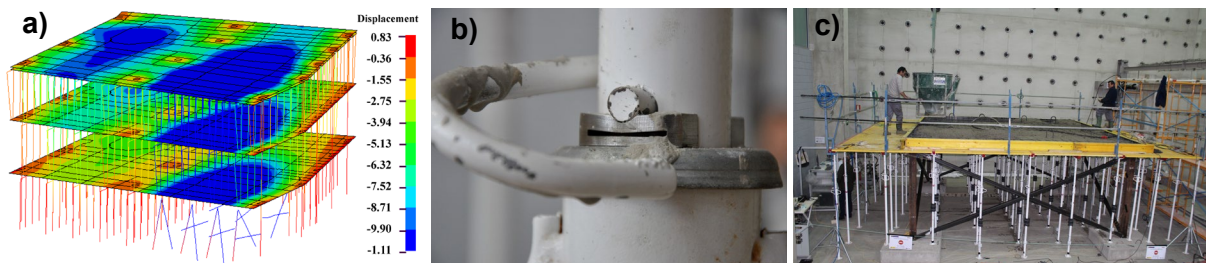


Figura 1: Imágenes representativas de los trabajos llevados a cabo en el cimbrado de edificios: a) simulación computacional, b) imagen del fusible estructural, y c) ensayo a escala real.

### 3.2 Edificios con estructura de hormigón ejecutada in situ

Gracias a la financiación recibida por la *Fundación BBVA* a través de una *Beca Leonardo*, hemos llevado a cabo un proyecto de investigación en el que se ha ensayado un edificio-probeta a escala real, que ha sido sometido a diferentes escenarios de fallo en sus columnas de esquina (Figura 2a). Las columnas de esquina de un edificio son precisamente las más expuestas a eventos extremos, como pueden ser los debidos a ataques terroristas, impactos de vehículos, o acciones medioambientales extremas, siendo además uno de los fallos más vulnerables de un edificio al ser difícil encontrar caminos de carga alternativos.

Esta investigación ha permitido conocer y evaluar los caminos de carga alternativos que se pueden activar tras el fallo de columnas de esquina, teniendo en cuenta los efectos dinámicos provocados por la retirada repentina de la columna [9,10]. Considerando la magnitud de los ensayos, esta es una de las investigaciones más ambiciosas que se han llevado a cabo hasta la fecha en el campo de la robustez y colapso progresivo de edificios. La campaña experimental también incluyó un escenario de ensayo en el cual se disponían cerramientos de ladrillo (Figura 2b), con el fin de estudiar cómo dichos elementos contribuyen a activar caminos de carga alternativos [11]. El trabajo actual se está centrando en la simulación computacional avanzada [12], con el fin de extrapolar los resultados experimentales a situaciones diferentes a las ensayadas.



Figura 2: Ensayos llevados a cabo en edificios con estructura de hormigón ejecutada in situ, con y sin tabiques de fachada.

### 3.3 Edificios con estructura prefabricada de hormigón

Las especiales características de las construcciones prefabricadas de hormigón, sobre todo en lo que a las uniones entre elementos se refiere, las hacen, a priori, más vulnerables a eventos extremos. Con el proyecto *PREBUST*, financiado por el *Ministerio de Ciencia e Innovación*, estamos trabajando para mejorar la robustez de edificios con estructura prefabricada de hormigón.

La parte más ambiciosa de *PREBUST* es la campaña experimental que estamos llevando a cabo sobre un edificio-probeta a escala real, construido específicamente para este proyecto. El edificio tiene dos alturas y unas dimensiones en planta de 15x12 m<sup>2</sup> (Figura 3a) Dicho edificio está siendo sometido a la retirada repentina de una serie de columnas, en tres escenarios de ensayo diferentes. Los resultados preliminares de que se dispone [13] indican que, con adecuados detalles constructivos, las estructuras prefabricadas aportan la robustez suficiente para evitar la propagación de fallos locales-iniciales. De este modo, es posible construir edificios con elementos prefabricados que sean seguros ante situaciones extremas (Figura 3b).

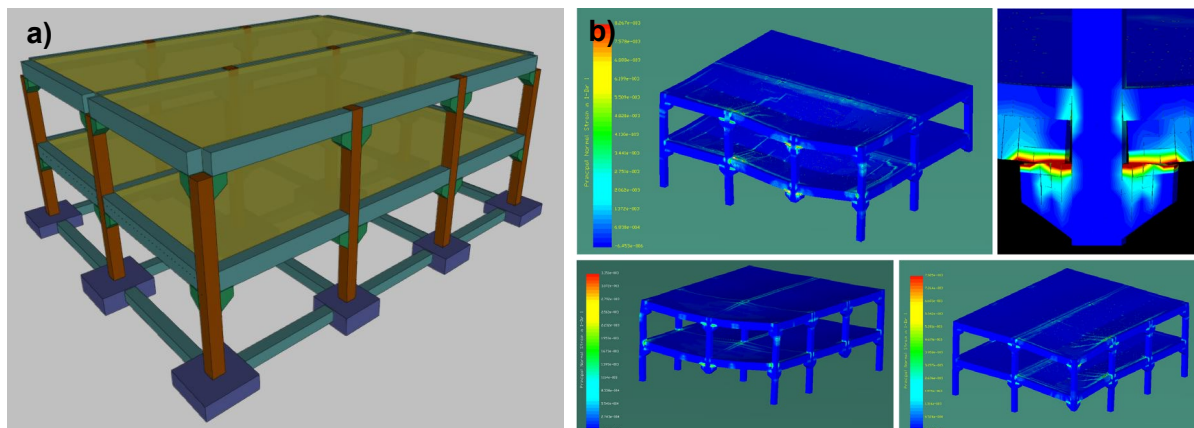


Figura 3: Diseño del edificio con estructura prefabricada de hormigón (a) y resultados preliminares (b).

### 3.4 Puentes de acero en celosía

Los puentes metálicos en celosía son especialmente sensibles al colapso progresivo. Esto significa que un fallo local se puede propagar al resto del puente, con consecuencias catastróficas. En *Building Resilient* y en la empresa spin-off de *Calsens* estamos investigando el modo en que se activan caminos de carga alternativos tras fallos locales-iniciales en este tipo de puentes. Para ello, hemos contado con



la financiación de *FGV (Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana)* y de la UTE formada por las empresas *FCC, Convensa* y *CHM*.

El trabajo llevado a cabo ha incluido el ensayo en laboratorio de un tramo de puente de ferrocarril de 21 m de longitud (Figura 4a), sobre el cual se han eliminado una serie de barras con el fin de evaluar la posible propagación del daño [14]. Esta campaña experimental ha permitido evaluar la robustez del puente y definir pautas de monitorización para localizar potenciales fallos locales que se puedan propagar, así como definir árboles de fallo para evaluar la seguridad de puentes de acero históricos [15]. El trabajo actual lo llevamos a cabo con simulaciones computacionales [16], en las cuales analizamos diferentes escenarios de fallo y su posible propagación al resto del puente (Figura 4b). El conocimiento adquirido lo estamos aplicando a tres puentes reales de ferrocarril, que están ampliamente monitorizados y controlados a tiempo real las 24 horas del día [17].

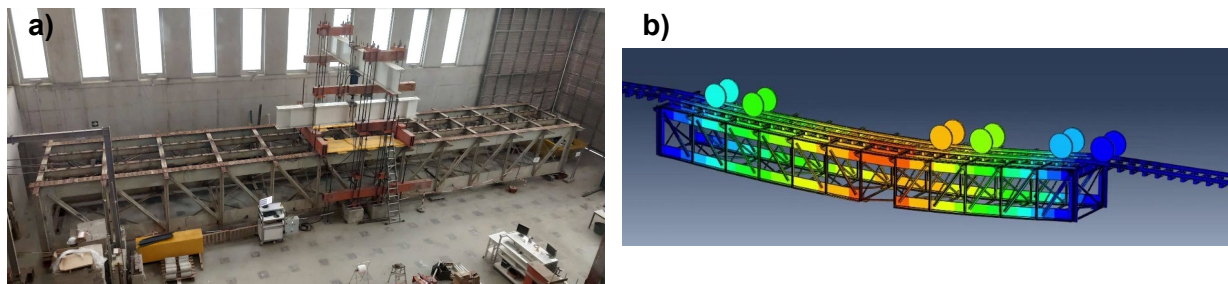


Figura 4: Ensayo en laboratorio (a) y simulaciones computacionales (b) realizadas para puentes de acero en celosía.

### 3.5 Proyecto Endure

Los códigos actuales de diseño de edificios se basan en dotar a las estructuras de un alto grado de continuidad. De este modo, cuando falla un elemento, su carga se podrá redistribuir entre el resto de los elementos de la estructura. Esta filosofía de diseño ha sido efectiva en muchas ocasiones, aunque también es cierto que existen ciertos escenarios en que no lo es, llegando incluso a incrementar el riesgo de colapso progresivo [18].

El objetivo del proyecto *Endure* es desarrollar una nueva filosofía de diseño de edificios basada en la segmentación con fusibles, con el fin de evitar la propagación de fallos. Con esta nueva filosofía se pretende proteger a los edificios frente a colapso progresivo, conectando diferentes segmentos de un edificio mediante fusibles estructurales. Estos fusibles darán continuidad a la estructura ante las situaciones expresadas en los códigos actuales de diseño, separando los diferentes segmentos en situaciones excepcionales en las que los códigos de diseño no son eficaces y la propagación de un fallo es inevitable. Este proyecto, que ha sido financiado por el *Consejo Europeo de Investigación (European Research Council)* con 2,5 millones de euros, conllevará: 1) el desarrollo teórico de la nueva filosofía de diseño, 2) el diseño y fabricación de fusibles, y 3) la implementación y validación de la nueva filosofía en dos edificios reales (Figura 5).

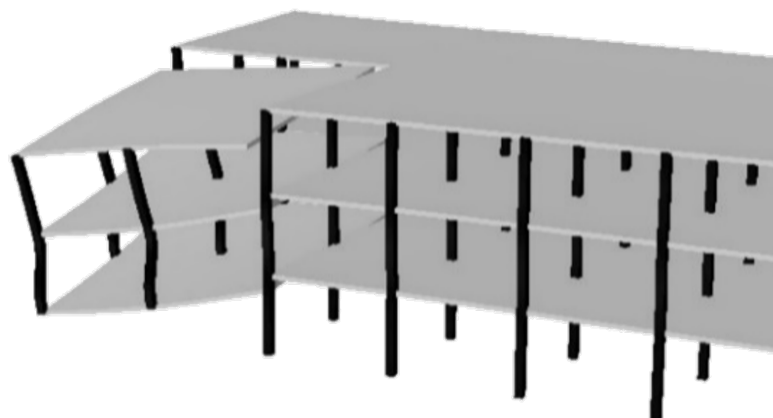


Figura 5: Ejemplo de edificio-probeta a escala real para ensayo en Endure.

#### 4. CONCLUSIONES

Uno de los retos sociales actuales está en conseguir infraestructuras y edificios resilientes, que sean capaces de recuperarse tras situaciones extremas o anormales. Estas situaciones suelen provocar daños locales-iniciales en los elementos críticos de puentes y edificios, que pueden desencadenar en colapsos progresivos.

En este artículo se han mostrado los trabajos llevados a cabo en el instituto *ICITECH* de la *Universitat Politècnica de València* en el marco del colapso progresivo y robustez de edificios y puentes. Estos trabajos están dando sus frutos al conseguir una mejor comprensión de los caminos de carga alternativos que se activan ante fallos locales-iniciales en edificios y puentes. Con ello, se están definiendo: 1) dispositivos que evitan la propagación de fallos en cimbras; 2) pautas de diseño simplificado de edificios robustos con forjados de losa maciza de hormigón in situ; 3) detalles constructivos para que los edificios resueltos con elementos prefabricados sean robustos; 4) pautas de monitorización para puentes metálicos en celosía que detecten la potencial propagación de fallos locales; y 5) una nueva filosofía de diseño de edificios que compense las limitaciones de los códigos actuales.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo es fruto de la dedicación e ilusión de muchas personas, mereciendo un agradecimiento especial: Pedro A. Calderón, Juan J. Moragues y Elisa Bertolesi.

Estos trabajos no hubieran dado sus frutos sin la financiación y ayuda recibidas por: *FGV (Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana)*, *Calsens*, *Ministerio de Ciencia e Innovación*, *Generalitat Valenciana*, *Ministerio de Educación y Formación Profesional*, *Fundación BBVA*, *European Research Council*, *LIC – Levantina*, *Ingeniería y Construcción*, y *Encofrados Alsina*.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] El-Tawil S, Li H, Kunnath S. Computational Simulation of Gravity-Induced Progressive Collapse of Steel-Frame Buildings: Current Trends and Future Research Needs. *J Struct Eng* 2014;140:1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000897](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000897).

[2] 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>.

- [3] Carper KL. Structural Failures During Construction. *J Perform Constr Facil* 1987;1:132–44. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(1987\)1:3\(132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(1987)1:3(132)).
- [4] Hadipriono FC, Wang H-K. Causes of falsework collapses during construction. *Struct Saf* 1987;4:179–95. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(87\)90012-9](https://doi.org/10.1016/0167-4730(87)90012-9).
- [5] Buitrago M, Moragues JJ, Calderón PA, Adam JM. Structural failures in cast-in-place RC building structures under construction. In: Makhoulf ASH, Aliofkhazraei M, editors. *Handb. Mater. Fail. Anal. with Case Stud. from Constr. Ind.* Vol. 6. 1st ed, Butterworth-Heinemann, Elsevier; 2018, p. 560. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101928-3.00008-2>.
- [6] 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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.052>.
- [7] Buitrago M, Calderón PA, Moragues JJ, Alvarado YA, Adam JM. Load Limiters on Temporary Shoring Structures: Tests on a Full-Scale Building Structure under Construction. *J Struct Eng* 2021;147:04020345. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002948](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002948).
- [8] Buitrago M, Sagaseta J, Adam JM. Avoiding failures during building construction using structural fuses as load limiters on temporary shoring structures. *Eng Struct* 2020;204:109906. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109906>.
- [9] 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>.
- [10] Garzón-Roca J, Sagaseta J, Buitrago M, Adam JM. Dynamic punching assessment of edge columns after sudden corner column removal. *ACI Struct J* 2021;118(2):1-14.
- [11] 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>.
- [12] Buitrago M, Bertolesi E, Garzón-Roca J, Sagaseta J, Adam JM. A parametric computational study of RC building structures under corner-column removal situations. *Appl Sci* 2020;10:8911. <https://doi.org/10.3390/app10248911>.
- [13] 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.
- [14] Buitrago M, Bertolesi E, Calderón PA, Adam JM. Robustness of steel truss bridges: laboratory testing of a full-scale 21-metre bridge span. *Structures* 2021;29:691–700. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.005>.
- [15] Sangiorgio V, Nettis A, Uva G, Pellegrino F, Varum H, Adam JM. Analytical Fault Tree and Diagnostic Aids for the Preservation of Historical Steel Truss Bridges. *Eng Fail Anal* 2022;133:105996.
- [16] Buitrago M, Bertolesi E, Caredda G, Orrù M, Porcu MC, Adam JM. Avoiding failure propagation in steel truss bridges: A case study. 6th Int. Conf. Mech. Model. Struct. Eng. (CMMoST 2021), Valladolid (Spain): 2021, p. 1–12.

[17] Adam J, Calderón P, Buitrago M, Bertolesi E, Moragues J, Ivorra S, et al. Fatigue Assessment of Old Riveted Railway Bridges: Laboratory Testing of a Real Bridge. In: Roca P, Pelà L, Molins C, editors. 12th International Conf. Struct. Anal. Hist. Constr. (SAHC 2020), Barcelona: 2021, p. 626–38. <https://doi.org/10.23967/sahc.2021.109>.

[18] Adam JM, Buitrago M, Bertolesi E. How to limit failure propagation in building structures: a novel design approach. 3rd Int. Conf. Recent Adv. Nonlinear Des. Resil. Rehabil. Struct. (CoRASS 2019), Coimbra (Portugal): 2019, p. 1–10.