Disponible en www.hormigonyacero.com
Hormigón y Acero, 2025
https://doi.org/10.33586/hya.2025.4044

ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

Robustez estructural de edificios en España. Investigaciones recientes en la Universitat Politècnica de València

Lisbel Rueda-García, Brais Barros, Manuel Buitrago, Jos M. Adam

DOI: https://doi.org/10.33586/hya.2025.4044

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*
Por favor, el presente artículo debe ser citado así:
Rueda-García, L., Barros, B., Buitrago, M., & Adam, J.M. (2025) **Robustez estructural de edificios en España. Investigaciones recientes en la Universitat Politècnica de València,** *Hormigón y Acero*. https://doi.org/10.33586/hya.2025.4044

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.
En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2025 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

Robustez estructural de edificios en España. Investigaciones recientes en la Universitat Politècnica de València

Structural robustness of buildings in Spain. Recent research at the Universitat Politècnica de València

Lisbel Rueda-García, lisruega@upv.es

Brais Barros, bbargon1@upv.es

Manuel Buitrago, mabuimo1@upv.es

Jose M. Adam, joadmar@upv.es

Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, Spain

Resumen

El incremento constante de eventos extremos hace necesario contar con edificios robustos capaces de soportar daños iniciales locales sin que se produzca una propagación de fallos que afecte a toda o gran parte de la estructura. Este artículo analiza el estado actual de la normativa y la investigación en España sobre robustez estructural de edificios, más concretamente aquella llevada a cabo en la *Universitat Politècnica de València*, proporcionando una visión global sobre robustez tanto para profesionales del sector como investigadores. Aunque el Código Estructural español menciona la necesidad de edificios robustos, carece de indicaciones claras sobre su implementación, lo que lleva a la posible adopción de normativas internacionales, como el Eurocódigo 1 Parte 1-7 o la UFC 4-023-03 de EE.UU. Estas normativas contemplan diferentes estrategias para diseñar edificios robustos, entre las que destacan el método de las fuerzas de atado, el método de los caminos de carga alternativos y el diseño de elementos clave. Las características principales de estos métodos también se describen en este artículo. A nivel de investigación, España presenta avances significativos ya que existen importantes proyectos que introducen estrategias innovadoras tanto para mejorar la robustez de estructuras existentes como para frenar el colapso una vez éste se ha iniciado. Estos proyectos destacan el potencial nacional en el desarrollo de enfoques avanzados y efectivos en materia de robustez.

Palabras clave: robustez estructural, colapso progresivo, normativas, investigación, España.

Abstract

The constant increase in extreme events requires robust buildings capable of withstanding initial local damage without causing propagation of failures that could affect the entire

structure or a significant part of it. This article examines the current state of regulations and research on building structural robustness in Spain, more specifically that carried out at the *Universitat Politècnica de València*, offering a comprehensive overview for both industry professionals and researchers. Although the Spanish Structural Code mentions the need for robust buildings, it lacks clear guidance on implementation, leading to the possible adoption of international standards, such as Eurocode 1 Part 1-7 or the U.S. UFC 4-023-03. These standards consider various strategies for designing robust buildings, highlighting the tying forces method, the alternative load path method, and the design of key elements. The main features of these methods are also described in this article. In terms of research, Spain shows significant progress since important projects introduce innovative strategies to enhance the robustness of existing structures or arrest collapse once initiated. These projects highlight the national potential in developing advanced and effective robustness approaches.

Keywords: structural robustness, progressive collapse, standards, research, Spain.

1. Introducción

Los edificios son vulnerables a las devastadoras consecuencias de eventos extremos provocados por accidentes, tales como explosiones o impactos de vehículos, ataques terroristas, el envejecimiento y los fenómenos meteorológicos extremos. En concreto estos últimos son cada vez más habituales: en el período 2000-2019 se registraron 7348 desastres naturales frente a los 4212 de 1980-1999 [1]. Estos sucesos a menudo causan daños locales en elementos estructurales críticos, dando lugar a una cadena de fallos que conducen al colapso parcial o total del edificio, un fenómeno conocido como "colapso progresivo" (Figura 1).

Figura 1. Edificio federal A.P. Murrah tras un ataque terrorista perpetrado con una furgoneta cargada de explosivos (Oklahoma, 1995) [2].

En los últimos años, la prensa ha destacado una serie de colapsos progresivos notorios [3]. Entre los más significativos, ya sea por la cantidad de víctimas, la magnitud de los daños o el impacto social en su momento, se encuentran casos clásicos como Ronan Point (Londres, 1968) y Capitán Arenas (Barcelona, 1972); el cuartel de los Marines de EE.UU. (Beirut, 1983); la Asociación Mutual Israelita Argentina (Buenos Aires, 1994); el edificio Federal A.P. Murrah (Oklahoma, 1995); los grandes almacenes Sampoong (Seúl, 1995); las Torres Gemelas del World Trade Center (Nueva York, 2001); y el centro comercial Achimota Melcom (Acra, 2012).

Los estudios sobre el colapso progresivo de estructuras comenzaron a principios de la década de 1940, cuando Lord Baker analizó el comportamiento de los edificios dañados por bombardeos en Londres durante la Segunda Guerra Mundial [4]. El colapso del bloque de apartamentos Ronan Point (Londres, 1968) marcó un hito a partir del cual los códigos de construcción y las recomendaciones de diseño empezaron a considerar el riesgo de colapso

progresivo. Sin embargo, fue solo después del colapso del edificio Federal A.P. Murrah (Oklahoma, 1995) y de las Torres Gemelas del World Trade Center (Nueva York, 2001) cuando hubo una gran alarma social y se desarrollaron nuevas normas y recomendaciones. La comunidad científica también comenzó a mostrar un interés sostenido en el estudio de este campo. Esto se observa en la tendencia al alza en el número de publicaciones científicas anuales relacionadas con el campo del colapso progresivo de edificios. Según datos de Scopus, en el año 1969 se registraron 3 publicaciones relacionadas, pasando a 123 en el año 1996, 138 publicaciones en el año 2002 e incrementándose exponencialmente desde entonces, registrándose hasta 1647 documentos en el año 2024 (véase el apartado 3.2.1 de este artículo).

Como se ha mencionado, las normativas relacionadas con el colapso progresivo comenzaron a desarrollarse tras el devastador colapso del edificio Ronan Point en 1968. En consecuencia, las regulaciones sobre robustez estructural son relativamente recientes. Para reducir la vulnerabilidad de los edificios al colapso progresivo, se introdujo en las normas de diseño el concepto de "robustez", entendido como la insensibilidad de la estructura a un fallo local. Las normativas más avanzadas en el ámbito de la robustez estructural, como las normas o guías estadounidenses UFC 4-023-03 [5], GSA 2016 [6] o ASCE/SEI 76-23 [7], o la norma europea EN 1990:2023 [8] y EN 1991-1-7:2018 [9], junto con los informes del JRC asociados (*Reliability background of the Eurocodes* [10] y *Guidance on the design for structural robustness* [11]), así como algunos códigos específicos de materiales, como los códigos de hormigón estructural EN 1992-1-1:2023 [12] y *fib* Model Code 2020 [13], tienen como objetivo garantizar la continuidad de las estructuras, permitiendo que las cargas soportadas por los elementos portantes que fallen se transfieran a los elementos adyacentes. Las normas se enfocan en abordar fallos causados por eventos desconocidos, aplicando enfoques de análisis independientes de la causa (los llamados "threat-independent analysis"), y que se centran más en las consecuencias, a nivel estructural, que cualquier evento podría producir. Este enfoque garantiza que las estructuras puedan resistir y redistribuir las cargas de manera segura, independientemente del origen del fallo, promoviendo un diseño más robusto frente a una amplia variedad de escenarios imprevistos. Estos códigos incluyen diversas filosofías de diseño, que varían en complejidad, como el método de las fuerzas de atado, el de los elementos clave o el de los caminos de carga alternativos (se explican en detalle en el apartado 2.3), e incluso filosofías de muy reciente desarrollo como la segmentación. Para determinar qué enfoque o enfoques de diseño deben aplicarse (en cuanto a complejidad se refiere), las normativas clasifican los edificios en distintas categorías según las consecuencias asociadas a su uso, considerando

factores como el propósito del edificio (residencial, educativo, sanitario, etc.), el número de pisos y el grado de ocupación.

En la práctica actual de los proyectos y obras, la aplicación de los códigos de robustez se encuentra aún en una fase incipiente debido a su relativamente reciente introducción y falta de tradición en su aprendizaje y uso. Aunque la normativa vigente establece pautas, muchos profesionales no han interiorizado completamente estos nuevos estándares. Esto genera incertidumbre sobre las consecuencias que tendrían eventos accidentales no previstos en los edificios actuales. La adopción efectiva de estas normativas requerirá un proceso gradual de formación y ajuste en la práctica profesional, así como un consenso claro sobre las pautas a seguir a nivel normativo.

En este artículo se presenta un resumen detallado de la normativa vigente en España, las principales filosofías de diseño estructural y el panorama actual de la investigación en robustez estructural. Con este enfoque, se busca ofrecer una guía práctica para los profesionales del sector, ayudándoles a comprender las normativas aplicables, los fundamentos de las filosofías de diseño actuales y cómo implementarlas adecuadamente. Además, se pretende proporcionar a la comunidad investigadora una visión general del estado del conocimiento en este campo y destacar las investigaciones realizadas en España, más concretamente en la *Universitat Politècnica de València*, que han alcanzado un reconocimiento significativo a nivel mundial. En última instancia, este trabajo enfatiza la importancia de garantizar el cumplimiento normativo y promover una mayor seguridad en nuestros edificios, contribuyendo así a una construcción más confiable y resiliente.

2. Estado de la normativa en España

2.1. Código Estructural

La normativa más reciente en el ámbito estructural en el contexto español es el Código Estructural [14], vigente desde 2021. A pesar de su reciente publicación, el Código Estructural hace una breve mención a la consideración de la robustez en las estructuras. En concreto, la norma establece en su Artículo 5.2.1.3, sobre "Exigencia de robustez y redundancia", que las estructuras "*deberán ser proyectadas de manera que cualquier evento extraordinario no produzca consecuencias desproporcionadas respecto a la causa original*". Asimismo, se indica que, "*cuando así lo establezca la propiedad, el proyecto deberá contemplar la selección de un esquema estructural y un diseño conceptual que asegure que la eliminación accidental de un elemento o de una parte limitada de la estructura origina daños proporcionados y limitados, de forma que, además, el resto de la estructura no afectada sea capaz de asegurar la estabilidad mínima de la misma*". Finalmente, afirma que

los procedimientos incluidos en el Código "*no son suficientes para el cumplimiento de esta exigencia*".

El Artículo 5.2.1.3 del Código Estructural, aunque exige que las consecuencias de cualquier evento no sean desproporcionadas, da lugar a una interpretación muy abierta de la norma y no detalla el grado de exigencia de este requisito de robustez. En su lugar, y cuando trata de concretar la exigencia en forma de requisito concreto, deja la decisión en manos de la propiedad. Incluso así, cuando la propiedad lo exija, el código no da procedimientos o estrategias para asegurar la robustez de las estructuras. Parece ser que, para estos casos, de aproximación general o específica cuando la propiedad lo requiera, el código exige y da pie a seguir otras recomendaciones de robustez más detalladas para poder cumplir esta exigencia. En el ámbito español, una opción razonable sería recurrir a la normativa europea, que ofrece un desarrollo más avanzado sobre esta materia.

2.2. Normativa europea

En esta sección se recogen los aspectos normativos más relevantes de los códigos europeos actuales en materia de robustez estructural que son de aplicación en España: el Eurocódigo 1 Parte 1-7 sobre acciones accidentales (EN 1991-1-7:2018) [9] y aquellos Eurocódigos de la segunda generación actualmente publicados que tratan la robustez en edificios (el Eurocódigo 0 EN 1990:2023 [8], y el Eurocódigo 2 de hormigón estructural, EN 1992-1-1:2023 [12]), junto con los informes del *Joint Research Centre* (JRC) asociados (*Reliability background of the Eurocodes* [10] y *Guidance on the design for structural robustness* [11]).

El EN 1991-1-7:2018 [9] expone una serie de estrategias a considerar en el proyecto de estructuras frente a acciones accidentales para limitar la extensión de un fallo localizado debido a una causa no especificada (Artículo 3.1). Estas estrategias son tres, que son las comúnmente adoptadas a nivel mundial y que se explican en detalle en la sección 2.3 de este artículo: (i) el método de las fuerzas de atado; (ii) el método de los caminos de carga alternativos, y (iii) el método de diseño de elementos clave. En la segunda generación de los Eurocódigos, el Eurocódigo 0 (EN 1990:2023 [8]) aborda en el Artículo 4.4 y el Anexo E los requerimientos básicos para la robustez de estructuras, presentando un planteamiento muy similar al indicado en el EN 1991-1-7:2018 [9], aunque menos específico que éste. Como novedad, el EN 1990:2023 [8] contempla, como enfoque de diseño, la segmentación.

El uso de cada una de estas estrategias de diseño para mejora de la robustez depende de la clase de consecuencia en la que se clasifique el edificio (Artículo 3.4 del EN 1991-1-7:2018 [9]). Se establecen tres clases según la gravedad de las consecuencias del fallo de la estructura: CC1 a CC3, de menor a mayor gravedad de las consecuencias de fallo.

El Anexo A del EN 1991-1-7:2018 [9], de carácter informativo, profundiza más en las reglas y métodos para el proyecto de edificios para que soporten una extensión del fallo localizado por una causa no especificada sin un colapso desproporcionado. En primer lugar, proporciona una correspondencia entre tipos o usos de edificios y las clases de consecuencias, que se resume en la Tabla 1 (para más ejemplos acudir a la Tabla A.1 del EN 1991-1-7:2018 [9]).

Tabla 1. Ejemplos de clasificación de diferentes tipos de edificios según las clases de consecuencias (adaptado de la Tabla A.1 del EN 1991-1-7:2018 [9]).

Clase de consecuencia	Ejemplos de tipos de edificios
CC1	• Viviendas unifamiliares ≤ 4 alturas • Edificios de uso agrícola
CC2a Grupo de Riesgo bajo	• Viviendas unifamiliares de 5 alturas • Hoteles, bloques de viviendas y oficinas ≤ 4 alturas • Edificios industriales ≤ 3 alturas • Edificios de venta al por menor ≤ 3 alturas y ≤ 1000 m^2 en cada altura • Edificios de uso educativo ≤ 1 altura
CC2b Grupo de Riesgo alto	• Hoteles, edificios residenciales y oficinas entre 5 y 15 alturas • Edificios de venta al por menor entre 4 y 15 alturas • Edificios de uso educativo entre 2 y 15 alturas • Hospitales ≤ 3 alturas • Aparcamientos ≤ 6 alturas
CC3	• Edificios indicados en 2b que excedan el nº de alturas • Edificios con un alto flujo de acceso público • Estadios con aforo > 5000 espectadores • Edificios con mercancías peligrosas

En función de la clase de consecuencia en la que se clasifique un edificio determinado, el EN 1991-1-7:2018 [9] recomienda una serie de estrategias a adoptar que deberían "proporcionar al edificio un nivel aceptable de robustez para soportar un fallo localizado sin un efecto desproporcionado". Esta clasificación, que se resume a continuación, también se encuentra detallada en el informe publicado recientemente por el JRC [10].

- CC1. No es necesario tener en cuenta consideraciones adicionales sobre robustez, siempre y cuando el edificio haya sido diseñado en base al resto de Eurocódigos (Normas EN 1990 a EN 1999).
- CC2a. Aparte de lo indicado para CC1, deberían proporcionarse atados horizontales efectivos (método de las fuerzas de atado).
- CC2b. Aparte de lo indicado para CC1, se deberían proporcionar atados horizontales y verticales efectivos; o bien, asegurar (método de los caminos de carga alternativos) que tras la retirada ficticia de cualquier pilar y cualquier viga soportando un pilar (para pilares apeados) o cualquier sección nominal de un muro portante, el edifico permanece estable y el daño local no excede un cierto límite (v.g. colapsos). Además, cuando la retirada ficticia de tales columnas y secciones de

muros produzca una extensión del daño que supere el límite aceptado, tales elementos deberían designarse como "elementos clave" (método de los elementos clave). El valor recomendado del límite de fallo local admisible es el menor valor entre un 15% del forjado o 100 m^2, en cada una de dos alturas adyacentes.

- CC3. Se requiere un estudio más detallado, llevando a cabo una estimación sistemática del riesgo, teniendo en cuenta tanto los peligros previsibles como los no previsibles (Anexo B del EN 1991-1-7:2018 [9]).

El EN 1990:2023 [8] muestra una recomendación menos detallada de los métodos de diseño a utilizar, pero añade el método de la segmentación en los edificios clasificados como CC2. Adicionalmente a lo indicado por EN 1991-1-7:2018 [9] para CC3, sugiere considerar eventos potenciales de fallo inicial, así como la propagación del fallo.

Mientras que las normas mencionadas proporcionan una serie de reglas prescriptivas para el atado horizontal y vertical de los elementos, y dan una breve indicación sobre cómo abordar el diseño de los elementos clave, no facilitan pautas para la aplicación del método de los caminos de carga alternativos, lo que obliga a acudir a otras normas internacionales. La sección 2.3 de este artículo profundiza en ello.

Como material adicional al presentado, conviene destacar la existencia de la guía sobre robustez estructural desarrollada por el CEN/TC 250 Working Group 6 sobre robustez con la participación del JRC (*Guidance on the design for structural robustness* [11]) que constituye un recurso valioso, ya que ofrece un resumen detallado del estado actual de la normativa y del conocimiento en la materia; así como el *fib* Model Code 2020 [13] sobre hormigón estructural, que contiene un enfoque más general del tema de la robustez, incluyendo una posible estrategia práctica para el proyecto, así como una propuesta de requisitos de fiabilidad para los elementos clave.

2.3. Estrategias de proyecto

Existen varios grupos de métodos de diseño que pueden identificarse fácilmente en la normativa de aplicación en España; tres de ellos son ampliamente reconocidos y se explican en detalle a continuación. Los métodos de las fuerzas de atado y de los caminos de carga alternativos consideran la posibilidad de fallos locales, mientras que el método de diseño de elementos clave se orienta a prevenir el fallo local de elementos críticos.

Por otro lado, como se ha indicado en la sección 2.2, el reciente EN 1990:2023 [8] ha incorporado como método de diseño la segmentación, entendida como la separación de la estructura en partes distintas mediante uno o más elementos estructurales más débiles, de modo que cada parte pueda colapsar de forma independiente sin comprometer la seguridad

de las demás. A pesar de ello, las normativas vigentes en España e internacionales aún no incluyen directrices específicas para su aplicación, ni se ha abordado en informes técnicos relevantes, como el del JRC sobre robustez [15]. Por el momento, su desarrollo permanece en un ámbito predominantemente científico.

Finalmente, las normas contemplan un último método para el estudio de edificios de la clase de consecuencia más alta (CC3) consistente en la evaluación de riesgos, que envuelve un análisis más complejo (ver Anexo B del EN 1991-1-7:2018 [9] y sección 3.10 del *Reliability background of the Eurocodes* [10] del JRC).

Por los motivos expuestos, se desarrollan en este artículo únicamente los tres métodos habituales mencionados.

2.3.1. Método de las fuerzas de atado

Las reglas de las fuerzas de atado se recomiendan comúnmente en las normativas internacionales para estructuras con bajo riesgo de colapso progresivo. Estas reglas están orientadas a proporcionar niveles mínimos de atado, continuidad y ductilidad, aunque normalmente no se realiza una verificación explícita de esta última característica [3]. El enfoque de las fuerzas de atado se emplea en numerosos códigos como EN 1991-1-7:2018 [9], ASCE/SEI 76-23 [7] y UFC 4-023-03 [5]. Este método suele clasificarse como un "enfoque de diseño indirecto", ya que la resistencia al colapso progresivo se considera de forma implícita, mediante la provisión de niveles mínimos de resistencia, continuidad y ductilidad.

En general, el atado se asegura mediante la implementación de atados horizontales y verticales, logrados a través de la prescripción de una fuerza de atado mínima, que suele ser consistente en las distintas normativas. No es posible cuantificar con precisión el aumento en los niveles mínimos de robustez proporcionado por las distintas reglas de fuerzas de atado, ya que uno de los desafíos asociados a la robustez estructural es la carencia de una medida cuantitativa concreta de ésta [16,17]. Aun así, se acepta generalmente que el atado tiene un efecto positivo en la robustez de las estructuras [18,19]. No obstante, algunos códigos, como GSA 2013 [6], excluyen este enfoque de diseño, debido a que se ha demostrado que las rotaciones requeridas en los elementos para aportar el necesario comportamiento de catenaria son inalcanzables en algunos casos.

Las normativas que incluyen el método de las fuerzas de atado, como EN 1991-1-7:2018 [9], indican la carga de tracción mínima que deben soportar los atados, en función de las características geométricas de la estructura y de las cargas que recibe en la situación de proyecto accidental. Además, los códigos especifican el área donde deben concentrarse los

atados. Existen diferentes enfoques en cuanto a su disposición: el código EN 1991-1-7:2018 [9], por ejemplo, indica que los atados deben ser continuos y colocarse lo más cerca posible de los bordes de los forjados y de las líneas de pilares y muros, asegurando una distribución efectiva de las cargas. En contraste, UFC 4-023-03 [5] excluye la fuerza de atado en las vigas internas y de borde. Esta decisión se basa en la capacidad reducida de las vigas de desarrollar las grandes rotaciones necesarias para asegurar el desarrollo completo de la acción de catenaria. Este atado, en cambio, se recomienda disponerlo únicamente en los forjados, elementos con mayor capacidad de rotación, para así desarrollar el atado interno a través de la acción de membrana. De esta forma, las rotaciones requeridas para una adecuada redistribución de fuerzas pueden ser significativamente menores, evitando así el problema de la rotación insuficiente de las vigas que se indicaba anteriormente. En la Figura 2 se muestra un esquema de la distribución de los diferentes atados en una estructura porticada de acuerdo con las indicaciones de la UFC 4-023-03[5].

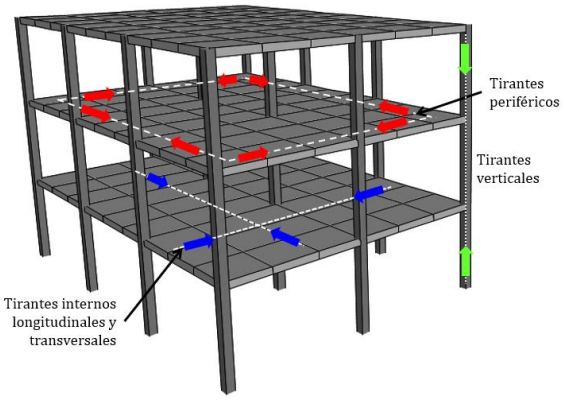

Figura 2. Fuerzas de atado en una estructura porticada.

Los atados pueden implementarse de diversas formas, dependiendo del tipo de estructura y de los materiales empleados. Los atados pueden estar compuestos de perfiles laminados de acero, barras de refuerzo en losas de hormigón, o malla de acero y láminas de acero en forjados compuestos de acero y hormigón (siempre que se conecten directamente a las vigas de acero mediante conectadores). En muchos casos, es común emplear una combinación de estos tipos de atados para lograr una distribución más efectiva de la fuerza de atado.

En términos generales, el método de las fuerzas de atado es sencillo de aplicar, lo cual lo convierte en una opción práctica para mejorar la robustez estructural en el diseño frente a eventos extremos no identificados. En el caso específico de la norma EN 1991-1-7:2018 [9], el cálculo de las fuerzas de tracción necesarias en los tirantes se realiza mediante una serie de fórmulas básicas, detalladas en los apartados A.5 y A.6 de la norma. Estas fórmulas permiten determinar con rapidez el nivel de tracción requerido en los distintos elementos

de atado de la estructura. Una vez calculadas estas fuerzas de tracción, se verifica si la armadura obtenida por medio de las reglas de diseño habituales, o los elementos estructurales en sí, pueden soportar dichas tracciones. En caso de que la resistencia de estos elementos resulte insuficiente, se procede a reforzarlos hasta alcanzar los valores mínimos exigidos por la norma. De esta manera, el método permite asegurar un nivel básico de resistencia sin necesidad de procedimientos de cálculo complejos.

Cabe destacar que el recientemente publicado Eurocódigo 2 sobre diseño de estructuras de hormigón (EN 1992-1-1:2023 [12]) incluye en su articulado (en concreto en el Artículo 12.9) una serie de prescripciones para el sistema de atado en edificios de hormigón. Dichas fórmulas son similares a las contenidas en el EN 1991-1-7:2018 [9].

2.3.2. Método de los caminos de carga alternativos

Los caminos de carga alternativos, o ALPs (del inglés "alternate load paths"), se pueden describir como rutas dentro de una estructura a través de las cuales las cargas pueden redistribuirse tras la pérdida de un elemento (ver Figura 3), permitiendo a la estructura soportar fallos locales sin comprometer su estabilidad global [20]. Este enfoque tiene como objetivo demostrar explícitamente la robustez de la estructura ("enfoque de diseño directo") mediante el análisis bajo condiciones de daño preestablecidas, evaluando la capacidad de la estructura para redistribuir las cargas adicionales que provienen de las áreas afectadas por el daño local [3].

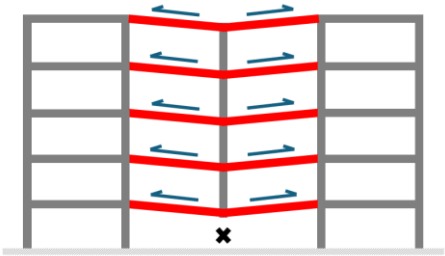

Figura 3. Esquema ilustrativo del funcionamiento de los caminos de carga alternativos, destacando específicamente el mecanismo de acción de catenaria.

Tanto el Código Estructural [14] como el EN 1991-1-7:2018 [9] coinciden en que se debe asegurar que la eliminación accidental de un elemento, un solo elemento, no desemboca en el colapso progresivo de la estructura. Sin embargo, no dan indicaciones sobre cómo abordar este análisis. Es posible recurrir a otros códigos, como la UFC 4-023-03 [5], para obtener directrices específicas sobre la implementación de este método, y así poder seleccionar elementos de la estructura, estratégicamente ubicados, para proceder al análisis de retirada de elementos.

Un dato importante para la aplicación del método de los ALPs que proporcionan algunos códigos es la ubicación de los elementos estructurales que deben ser retirados para verificar la robustez del edificio. Según las indicaciones de la UFC 4-023-03 [5], se deberán retirar las columnas externas que se muestran en la Figura 4a, que atienden a los siguientes criterios:

- Retirar, como mínimo, una columna cerca del centro del lado corto, otra cerca del centro del lado largo y otra en una esquina.
- Retirar columnas en áreas donde la geometría en planta varíe significativamente, como en reducciones abruptas de la longitud de un vano o en esquinas reentrantes.
- Si en el paño asociado a la columna retirada, de dimensiones L x l, existe una columna situada a una distancia menor al 30% de la dimensión mayor del paño (L), ésta debe retirarse simultáneamente (ver ejemplo de la Figura 4a).
- Realizar el análisis para cada localización definida anteriormente en los siguientes niveles: (a) primer piso sobre el nivel del suelo; (b) piso inmediatamente debajo del tejado; (c) piso a media altura, y (d) piso ubicado por encima de una unión entre columnas o cambio de sección en la columna.

Además, se deberán retirar columnas internas en el caso de estructuras que posean estacionamientos subterráneos o áreas de acceso público no controlado (como "halls" públicos), donde se recomienda retirar columnas internas cercanas al centro de los lados corto y largo, así como en esquinas (Figura 4b). Esta retirada solo debe realizarse en el nivel donde se encuentre el estacionamiento o el área de acceso no controlado. Si alguna otra columna está situada a menos del 30% de la dimensión mayor del vano asociado desde el lugar de retirada, debe también retirarse simultáneamente.

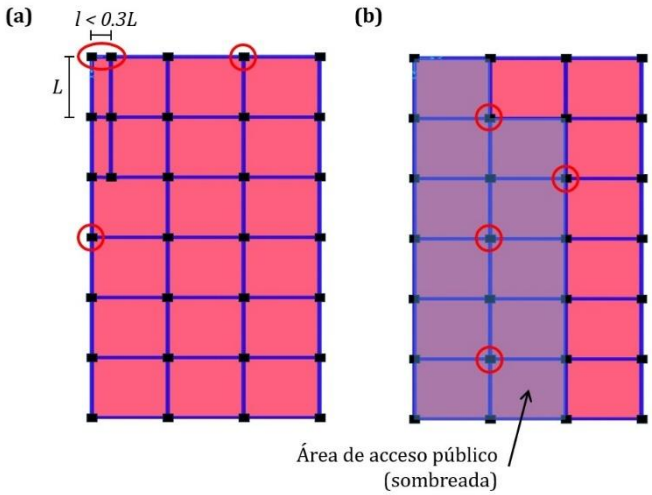

Figura 4. Esquema de la localización en planta de las columnas a retirar según la norma UFC 4-023-03 [5]: (a) Retirada de columnas interiores; (b) Retirada de columnas exteriores. Figura elaborada a partir de las indicaciones de la UFC 4-023-03 [5].

Aunque los fundamentos de este método son claros, en la práctica el análisis mediante ALP requiere diversas suposiciones y simplificaciones que pueden llevar a soluciones de diseño o evaluación con distintos niveles de robustez [3]. Algunos de los aspectos a considerar para este análisis incluyen la precisión en la introducción de los efectos dinámicos, la no linealidad de los materiales, efectos de la velocidad de deformación, grandes deformaciones de los elementos, y la capacidad de deformación de las conexiones [18]. Aunque el uso de modelos numéricos dinámicos no lineales ofrece mayor precisión, estos son complejos y más exigentes en términos computacionales. El grado de refinamiento de los modelos de análisis requerido por la normativa dependerá de la categoría de riesgo en la que se clasifique la estructura. La normativa UFC 4-023-03 [5] permite, en ciertos tipos de estructuras, acudir a modelos más simples como son los modelos estáticos lineales y no lineales. Para ello proporciona reglas sobre cómo amplificar la carga aplicada para tener en cuenta, indirectamente en los modelos lineales, el efecto de la no linealidad estructural (geométrica) y de materiales, así como los efectos dinámicos característicos de fallos ocasionados por eventos extremos. Por otro lado, tal y como indican [3,15], existen otras alternativas para llevar a cabo el análisis de los ALPs de forma simplificada, como el análisis estático incremental no lineal ("pushdown"), como el propuesto por Izzuddin et al. [21] en su metodología de evaluación de robustez basada en la ductilidad, que ha sido reconocido como una herramienta eficaz y ha sido aplicado en varios tipos de estructuras [22–24]. De forma alternativa, para evitar tanto el uso de análisis dinámicos como de factores de amplificación dinámica, se desarrolló el método energético, que permite derivar una curva de capacidad dinámica a partir de un análisis estático de tipo "pushdown" [25,26].

Es evidente que el método de los ALPs proporciona resultados más fiables sobre la robustez de la estructura objeto de análisis que, por ejemplo, el método de las fuerzas de atado; de ahí que sea el método más empleado en investigaciones en este campo, pese a su complejidad.

2.3.3. Método de los elementos clave

El método de los elementos clave se recomienda en códigos y guías como un método de último recurso cuando el método de los ALPs no es capaz de demostrar una redistribución de cargas suficiente en la estructura. Este enfoque se centra en identificar los elementos clave, es decir, aquellos elementos estructurales cuyo fallo podría activar un colapso progresivo, y rediseñarlos para resistir cargas accidentales con el fin de evitar fallos locales en cada uno de estos elementos.

De acuerdo con la norma EN 1991-1-7:2018 [9], el diseño de elementos clave forma parte del enfoque de los ALPs para estructuras de la Clase de consecuencia 2b. En estas

estructuras, cuando la retirada ficticia de ciertas columnas o secciones de muros conduce a una extensión del daño que excede el límite aceptado (el menor valor entre un 15% del forjado o 100 m^2, en cada una de dos alturas adyacentes, según EN 1990:2023 [8] y EN 1991-1-7:2018 [9]), tales elementos deben designarse como "elementos clave". En el caso de estructuras de Clase de consecuencia 3, consideradas de alto riesgo, en las que se requiere una estimación sistemática del riesgo, una evaluación de riesgos podría requerir, entre otras medidas, que ciertos elementos o grupos de elementos se diseñen como elementos clave.

Según esta norma, un elemento clave debe ser capaz de soportar una acción accidental de cálculo (A_d) aplicada en direcciones tanto horizontal como vertical (no simultáneamente). Para estructuras de edificación, el valor recomendado de A_d es 34 kN/m^2.

En contraste, la norma UFC 4-023-03 [5] adopta un enfoque diferente al del EN 1991-1-7:2018 [9]. Esta norma establece de forma sistemática que, en los edificios pertenecientes a las categorías de riesgo más altas (III y IV de dicha norma), además de asegurar el cumplimiento de los ALP, se debe mejorar la resistencia local de todas las columnas perimetrales en la planta baja. El enfoque de diseño en esta norma es asegurar un mecanismo de fallo dúctil de los elementos clave.

3. Avances en investigación

3.1 Estadísticas de publicaciones sobre robustez

Al igual que ha pasado con las normativas existentes, las cuales han sufrido un gran desarrollo en el campo de la robustez estructural, el creciente interés por el campo de la robustez ha provocado un notable incremento del número de publicaciones. Con el fin de cuantificar estas tendencias se ha empleado la base de datos Scopus para recopilar todas las investigaciones del área. Para filtrar la búsqueda se ha utilizado como criterio de búsqueda que estuviesen contenidas en el título, el resumen o en las palabras clave el siguiente conjunto de palabras: ("Building") ***AND*** ("Robustness" ***OR*** "Collapse" ***OR*** "Failure") ***AND*** "(Structure") y además las búsquedas se han limitado al ámbito de ingeniería.

Como resultado se han obtenido un total de 18.420 documentos. En la Figura 5 pueden observarse el número de publicaciones anuales donde se percibe claramente como a partir del año 2000 el crecimiento es casi exponencial. Actualmente en 2024 se ha llegado a su máximo de publicaciones anuales con más de 1500 documentos de los cuales el 62.9% son artículos de investigación y 31.7% artículos de conferencia.

Figura 5. Número de publicaciones por año sobre robustez usando la base de datos Scopus.

Si desgranamos estos documentos por país de origen podemos ver una clara hegemonía de China seguido de EEUU, que son los países con más publicaciones, con más de 4728 y 2991 respectivamente (ver Figura 6). España se encuentra en el puesto 13 de los países con más publicaciones con un total de 353 documentos.

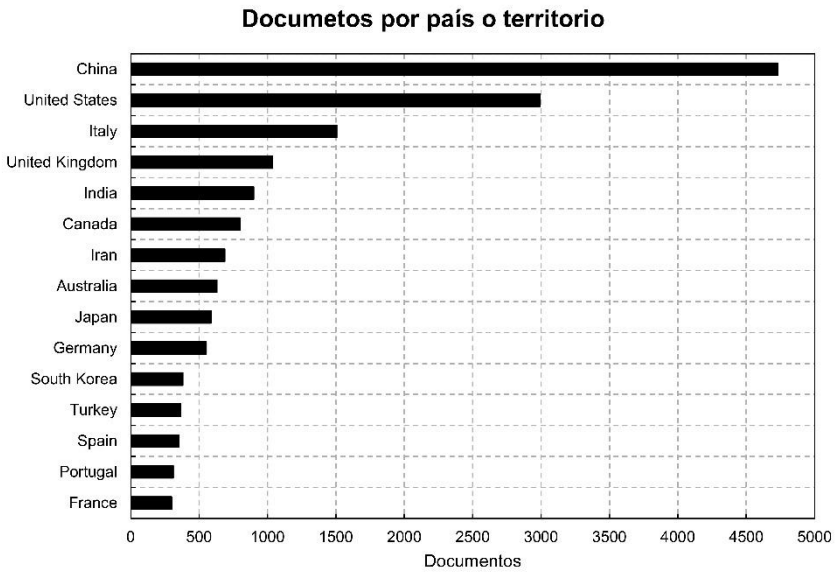

Figura 6. Número de publicaciones sobre robustez por países usando la base de datos Scopus.

Tal y como se mencionó anteriormente, la mejora de la robustez de las estructuras puede darse siguiendo dos enfoques diferentes: buscar soluciones estructurales para una amenaza concreta o bien buscar la mejora de la robustez sin tener en cuenta la amenaza, es decir, teniendo en cuenta solo sus consecuencias (fallo de una columna, viga etc.). El primer tipo de investigación es el más abundante en el ámbito nacional, donde pueden encontrarse un amplio abanico de investigaciones sobre sismo [27–31], explosiones [32–34] y fuego [35–

38] entre otras amenazas. No obstante, este artículo se centra en el estudio de investigaciones sobre la robustez estructural, con el enfoque de independencia de la amenaza, las cuales son más escasas. En concreto, el siguiente apartado se centra en las investigaciones llevadas a cabo en la *Universitat Politècnica de València* (UPV).

3.2 Estudios de robustez en la *Universitat Politècnica de València*

Dentro de las investigaciones de robustez desde un enfoque independiente de la amenaza se ha establecido una clasificación atendiendo a si son investigaciones llevadas a cabo en subconjuntos (o subensamblajes o subestructuras), es decir, unidades estructurales más pequeñas que representan la interacción entre algunos elementos clave de la estructura general, como columnas, vigas y conexiones, o bien si son investigaciones que contemplan el edificio completo a escala real. Dentro de estos últimos se han subdividido las investigaciones en función de si conllevaban el ensayo experimental del edificio o no.

3.2.1 Estudios sobre subconjuntos

Como se ha señalado previamente, existe un elevado número de publicaciones que analizan o emplean elementos estructurales o subconjuntos aislados en el estudio de fenómenos específicos. Este enfoque es comúnmente utilizado en las etapas iniciales de investigación de un fenómeno, particularmente para evaluar aspectos relacionados con la robustez estructural. En este contexto, efectos como la acción de membrana o la catenaria en estructuras de hormigón y acero han sido ampliamente estudiados mediante subconjuntos antes de proceder a la realización de ensayos a escala real [39–42]. Sin embargo, en otros tipos de estructuras, como las de madera, que han recibido menos atención en estudios de robustez, este tipo de ensayos específicos no se han llevado a cabo de manera sistemática.

La UPV fue beneficiaria del proyecto ENROOT, financiado por la Generalitat Valenciana, que trató sobre la robustez de estructuras de madera mediante el diseño y la evaluación de sus conexiones. Para ello se evaluó experimentalmente la robustez de dos conexiones ampliamente utilizadas en el sector mediante el uso de subconjuntos estructurales para aislar y analizar el problema con mayor detalle. Estos subconjuntos estaban compuestos por tres columnas (incluyendo la columna eliminada) y dos vigas, las cuales se sometieron a cargas verticales en la columna central para simular la pérdida de la columna (Figura 7). En este proyecto también se ensayaron diseños mejorados de las citadas conexiones que serán optimizados para conseguir la mejor configuración posible.

Figura 7. Foto de uno de los ensayos llevados a cabo en el proyecto ENROOT.

3.2.3 Estudios teóricos de robustez sobre edificios

Hay múltiples investigaciones sobre edificios que abordan distintos aspectos de la robustez estructural sin necesidad de acudir a la experimentación, empleando únicamente simulaciones numéricas que siempre han venido validadas previamente en base a ensayos experimentales. En este contexto, en la UPV se han desarrollado estudios como el presentado por Caredda et al. [43] que desarrolla una metodología para definir posibles configuraciones de segmentación basadas en fusibles estructurales para detener la propagación horizontal del colapso en edificios. Por otro lado, también se encuentran investigaciones más centradas en el análisis estructural como [17], donde se propone una metodología práctica para evaluar la robustez estructural de edificios de hormigón armado combinando una estrategia de modelización eficiente y unos índices de robustez adecuados. En concreto, en este estudio se compararon cuatro índices de tipo "reserve-based", que son aquellos basados en estimar la capacidad de carga restante de un sistema estructural después de un fallo inicial [44] y que han demostrado ser particularmente adecuados para evaluar la efectividad de las medidas que buscan garantizar la disponibilidad de ALPs. Se llegó a la conclusión de que, teniendo en cuenta la precisión y el tiempo de cálculo, el índice propuesto por Bao et al. en [26] es el más práctico, ya que requiere sólo un análisis estático no lineal de tipo "pushdown", pero considera los efectos dinámicos mediante el principio basado en la energía. Este método ha sido utilizado para evaluar el nivel de daño en componentes y comparar soluciones de refuerzo.

También se están desarrollando en la UPV cuatro proyectos que abarcan la simulación de edificios completos. El primero de estos proyectos es ENTIRE que trata sobre el desarrollo de nuevos sistemas estructurales de estabilización para prevenir el colapso progresivo de edificios. Estos sistemas de estabilización se basan en el uso de elementos de estabilización de columnas que funcionan bajo cargas de compresión axial, de forma similar a como lo hacen los apuntalamientos en vaciados o excavaciones. Con conexiones adecuadas a los

pilares, puenteando el pilar que falla y estabilizando los pilares adyacentes a éste, se permite que los tirantes funcionen a plena capacidad bajo las acciones catenarias en vigas (o de membrana en forjados) provocadas por el fallo de un elemento portante, evitando así el colapso progresivo [45].

Otro de los proyectos financiados es EVOLVE, llevado a cabo gracias a la financiación de la Generalitat Valenciana, que estudia cuando las normativas actuales pueden contribuir a un colapso desproporcionado en estructuras de hormigón armado. Para ello se está trabajando en una metodología de evaluación del rendimiento para determinar cuándo una mayor conectividad y continuidad pueden aumentar el riesgo de colapso desproporcionado en las estructuras de hormigón armado. Para ello se han calibrado modelos computacionales que son capaces de simular todas las fases del colapso, incluyendo el agrietamiento, la separación de elementos y la colisión de escombros. Con estos modelos se determinan los niveles óptimos de continuidad para mejorar la robustez de los edificios [46].

La UPV también ha sido financiada por la Generalitat Valenciana para desarrollar el proyecto ENHANCE, el cual consiste en el desarrollo de un novedoso planteamiento de rehabilitación de edificios existentes basado en colgar los forjados del tejado para garantizar que cumplen los últimos requisitos de robustez estructural (Figura 8). Para ello en este proyecto se están estudiando, mediante modelización computacional, distintas disposiciones de viga de refuerzo con el fin de explorar la eficacia y limitaciones de este sistema. Este estudio numérico será complementado con una campaña experimental donde se validarán los resultados obtenidos mediante el ensayo de subconjuntos.

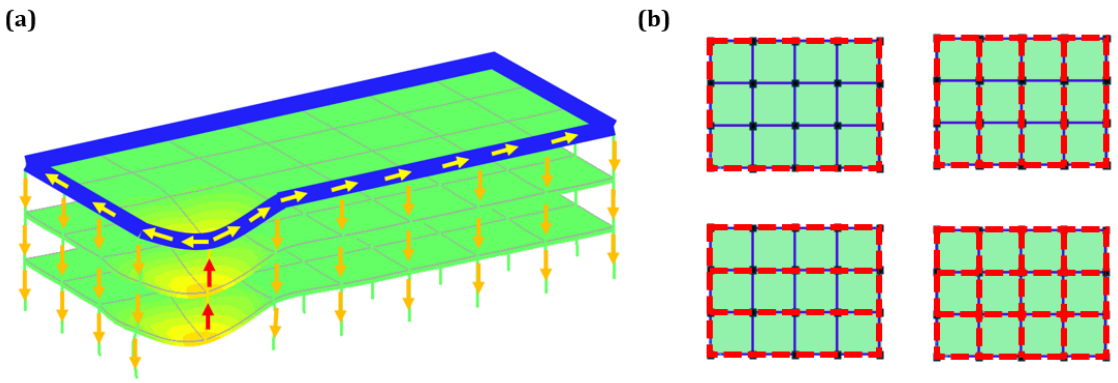

Figura 8. Método de refuerzo del proyecto ENHANCE: (a) Esquema del funcionamiento estructural; (b) Ejemplos de posibles disposiciones de la viga de refuerzo en cubierta.

Por último, la propia UPV ha financiado el proyecto ENFORCE, cuyo objetivo es proporcionar una herramienta de fácil manejo para evaluar el riesgo de colapso de edificios existentes en la Comunitat Valenciana. Se utilizarán simulaciones numéricas de diseños típicos cuidadosamente definidos para evaluar el efecto de diversos parámetros clave sobre

la robustez estructural de los edificios. Estos resultados se utilizarán para definir categorías de riesgo que permitan una clasificación de edificios a escala urbana más precisa que la que puede conseguirse basándose en la información proporcionada en códigos actuales. Con esta información se pretende elaborar mapas de riesgo de colapso de los principales núcleos urbanos de la Comunitat Valenciana que sirvan de apoyo a la toma de decisiones sobre la mejora de la robustez de los edificios existentes. Las inundaciones ocurridas en Valencia el 29 de octubre de 2024, las cuales tuvieron un impacto devastador en la región, evidencian la necesidad de contar con este tipo de recursos para optimizar la toma de decisiones.

3.2.3 Campañas experimentales sobre edificios

La UPV destaca a nivel mundial por sus campañas experimentales de edificios a escala real para el estudio de la robustez. El primero de los especímenes ensayados fue realizado gracias a la financiación de la Beca Leonardo de la Fundación BBVA. En este proyecto se empleó un edificio-probeta a escala real (Figura 9), en el cual se ensayaron diferentes escenarios de fallo en sus columnas de esquina [47]. Como fruto de esta investigación se evaluaron los caminos de carga alternativos que se pueden desencadenar debido al fallo de las columnas de esquina. Además, debido a la naturaleza del ensayo (retirada repentina de una columna) se pudieron considerar los efectos dinámicos del escenario de fallo [47,48]. La campaña experimental también incluyó un ensayo en el cual se disponían cerramientos de tabiquería con el fin de estudiar su influencia en los caminos de carga alternativos [49]. Posteriormente se desarrolló un trabajo de simulación computacional con el objetivo de analizar situaciones de diseño accidentales y evaluar los caminos de carga alternativos para establecer recomendaciones prácticas para las situaciones de diseño [50].

Figura 9. Fotos del edificio con el cerramiento de tabiquería ensayado con la financiación de la beca Leonardo.

El segundo de los especímenes se realizó dentro del proyecto PREBUST financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. La campaña experimental conllevó el desarrollo de un edificio-probeta a escala real de dos alturas de 2.6 m y unas dimensiones en planta de 15×12 m^2 (Figura 10). Dicho edificio fue sometido a diversos escenarios de fallo de retirada

repentina de columna de esquina y columnas de medianería para analizar las rutas de carga alternativas. Durante los ensayos se adquirieron datos de un total de 106 sensores, incluidos 59 galgas extensiométricas, 38 transductores de desplazamiento y 9 acelerómetros. Los resultados obtenidos del ensayo mostraron una respuesta estructural gobernada por la acción de Vierendeel con una clara contribución de los forjados. A partir de los resultados de las pruebas se analizó en detalle el comportamiento estructural y se obtuvieron factores de amplificación de la carga para tener en cuenta los efectos dinámicos no lineales [51,52].

Figura 10. Foto de edificio de hormigón prefabricado ensayado con la financiación dentro del proyecto PREBUST [51].

El último de los tests llevados a cabo por la UPV ha sido realizado gracias a la financiación *Consolidator Grant* del *European Research Council*, con un presupuesto de 2.5 millones de euros, para la ejecución del proyecto ENDURE. Este proyecto desarrolla una nueva filosofía dentro de la robustez. Mientras que la mayoría de las investigaciones se centran en la mejora de la continuidad para evitar la propagación de un fallo local, este proyecto se basa en el concepto de segmentación estructural. Para ello desarrollan el concepto de fusible estructural con el fin de parar la propagación del colapso una vez se ha iniciado y evitar daños desproporcionados tras un fallo inicial (ver Figura 11).

Figura 11. Foto del edificio de hormigón prefabricado construido dentro del proyecto ENDURE antes del ensayo.

Dicho edificio fue diseñado mediante un enfoque basado en jerarquía, el cual emplea conexiones de rigidez parcial y un sistema estructural con columnas fuertes capaz de aislar el fallo a una zona pequeña del edificio. Con esta filosofía, los fallos en las conexiones siempre se van a dar antes que en las columnas. Esto garantiza que el colapso siempre se limite a los componentes inmediatamente adyacentes a los directamente implicados en el fallo inicial [53]. La campaña experimental fue complementada con computación numérica mediante Applied Element Method (AEM). Se realizaron dos modelos, uno siguiendo el enfoque basado en jerarquía y otro siguiendo un enfoque convencional de diseño. El enfoque basado en jerarquía consiguió limitar el colapso a las inmediaciones del fallo inicial mientras que el diseño convencional propagaba el colapso al resto de la estructura. Estos resultados fueron validados por lo observado en la campaña experimental donde el colapso se limitó a las zonas adyacentes del fallo inicial (ver Figura 12) validando por lo tanto la eficacia del diseño basado en fusibles.

Figura 12. Foto del edificio de hormigón prefabricado construido dentro del proyecto ENDURE tras el ensayo.

4. Conclusiones y futuras aproximaciones

La robustez estructural es un tema de creciente interés tanto a nivel nacional como internacional, dada su importancia para garantizar la seguridad de las estructuras frente a eventos extremos.

Aunque las normativas en esta materia son relativamente recientes, se han dado importantes avances en su desarrollo. En España, el Código Estructural exige considerar la robustez en el diseño, pero proporciona escasas indicaciones prácticas sobre cómo abordar este desafío, lo que nos lleva a recurrir a otras normativas como el Eurocódigo 1 Parte 1-7, que establece reglas para diseñar con criterios de robustez, o incluso a normativas de otros países, como la estadounidense UFC 4-023-03, cuando se requiere mayor detalle.

Las normas de robustez se basan principalmente en tres estrategias de diseño: (i) el método de las fuerzas de atado, donde se proporciona un nivel mínimo de atado vertical y horizontal en las estructuras para ofrecerles continuidad en caso de fallo de un elemento estructural; (ii) el método de los caminos de carga alternativos, consistente en garantizar que la estructura es capaz de generar vías alternativas para la transmisión de las cargas mediante el análisis de diferentes escenarios de fallo, y (iii) el método de los elementos clave, que identifica los elementos clave en el colapso de una estructura y los rediseña para resistir cargas accidentales con el fin de evitar fallos locales en cada uno de estos elementos. La elección del método más adecuado depende de las posibles consecuencias asociadas al colapso de la estructura.

En el ámbito de la investigación, el número de estudios en robustez ha aumentado significativamente. A nivel nacional, España cuenta con proyectos innovadores que abren nuevos horizontes en materia de robustez. Algunos ejemplos son los proyectos desarrollados en la *Universitat Politècnica de València*, como ENDURE, que implementa fusibles estructurales en estructuras de nueva construcción para frenar el colapso una vez iniciado, y el proyecto ENHANCE, que desarrolla una solución de refuerzo estructural para edificios existentes que involucra y aprovecha toda la estructura, en su conjunto, en la resistencia al colapso progresivo. Estas iniciativas destacan el potencial nacional en el desarrollo de enfoques avanzados y efectivos en materia de robustez estructural.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento al profesor Antonio Marí, cuya excepcional trayectoria académica y humana ha sido una fuente de inspiración para colegas y estudiantes a lo largo de los años. Este artículo, elaborado en reconocimiento a su dedicación incansable y en agradecimiento por la valiosa amistad que nos une, forma parte de un homenaje merecido a su destacada labor y al impacto duradero de su legado.

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo de la Generalitat Valenciana por la subvención otorgada al proyecto ENHANCE (CIPROM/2022/47), así como al MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y a la "Unión Europea NextGenerationEU/PRTR" por la financiación recibida a través de la beca postdoctoral IJC2020-042642-I. Asimismo, los autores agradecen el apoyo recibido para el desarrollo del proyecto ENTIRE, financiado en el marco de la convocatoria de Ayudas para Primeros Proyectos de Investigación (PAID-06-22) del Vicerrectorado de Investigación de la Universitat Politècnica de València. De igual manera, este artículo forma parte del proyecto ENFORCE, financiado por la convocatoria PAID-06-24 del mismo Vicerrectorado.

Referencias

[1] CRED UNDRR, The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019), 2020.

[2] FBI Federal Bureau of Investigation, Oklahoma City Bombing, (n.d.). https://www.fbi.gov/history/famous-cases/oklahoma-city-bombing#Additional-Information (accessed December 9, 2024).

[3] J.M. Adam, F. Parisi, J. Sagaseta, X. Lu, Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century, Eng Struct 173 (2018) 122–149. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082.

[4] J.F. Baker, E.L. Williams, D. Lax, The Design of Framed Buildings against High-Explosive Bombs., in: The Civil Engineer in War, Thomas Telford Ltd, London, 1948: pp. 3: 80-112. https://doi.org/10.1680/ciwv3.45170.0006.

[5] Department of Defense (DoD), Unified Facilities Criteria (UFC) Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, 2024. http://dod.wbdg.org/.

[6] GSA, Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance, General Services Administration, Washington DC, USA, 2016.

[7] ASCE/SEI 76-23, Standard for Mitigation of Disproportionate Collapse Potential in Buildings and Other Structures, 2023.

[8] CEN, EN 1990:2023 - Eurocode - Basis of structural and geotechnical design, Brussels, 2023.

[9] CEN, EN 1991-1-7 - Eurocode 1, Actions on structures - Part 1-7 General Actions - Accidental actions, Brussels, 2018.

[10] V. T, D. S, S. ML, M. J, M. G, K. U, T. A, J. R, J. W, S. T, F. P, S. D, S. JD, S. P, S. M, F. M, C. P, Z. B, T. P, K. J, M. M, A. J, S. R, K. J, B. T, M. J, A. D, S. J, Reliability background of the Eurocodes, (2024). https://doi.org/10.2760/9482837 (online).

[11] A. J, A. M, B. B, B. F, C. R, D. J, I. B, M. P, M. T, O. A, P. F, S. J, S. ML, T. T, C. R, T. T, S. ML, Guidance on the design for structural robustness, (2024). https://doi.org/10.2760/525706 (online),10.2760/4945167 (print).

[12] CEN, EN 1992-1-1:2023. Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures, 2023.

[13] International Federation for Structural Concrete (fib), fib Model Code for Concrete Structures (2020), Lausanne, 2024.

[14] Gobierno de España, Código Estructural BOE Real Decreto 470/2021, 2021.

[15] A. J, A. M, B. B, B. F, C. R, D. J, I. B, M. P, M. T, O. A, P. F, S. J, S. ML, T. T, C. R, T. T, S. ML, Guidance on the design for structural robustness, (2024). https://doi.org/10.2760/525706 (online),10.2760/4945167 (print).

[16] E. Díaz-Pavón Cuaresma, J. León González, J. Ley Urzáiz, Robustez estructural: la cualidad que echó de menos Ribera en 1905, Hormigón y Acero 68 (2017) 171–183. https://doi.org/10.1016/j.hya.2017.04.011.

[17] A. Setiawan, D. Cetina, N. Makoond, M. Buitrago, J.M. Adam, Practical methodology for quantifying the structural robustness of RC building structures, Structures 70 (2024) 107898. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107898.

[18] Arup, Review of international research on structural robustness and disproportionate collapse, 2011.

[19] Y. Li, X. Lu, H. Guan, L. Ye, An improved tie force method for progressive collapse resistance design of reinforced concrete frame structures, Eng Struct 33 (2011) 2931–2942. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.06.017.

[20] A. Elshaer, H. Mostafa, H. Salem, Progressive collapse assessment of multistory reinforced concrete structures subjected to seismic actions, KSCE Journal of Civil Engineering 21 (2017) 184–194. https://doi.org/10.1007/s12205-016-0493-6.

[21] B.A. Izzuddin, A.G. Vlassis, A.Y. Elghazouli, D.A. Nethercot, Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part I: Simplified assessment framework, Eng Struct 30 (2008) 1308–1318. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.011.

[22] A.G. Vlassis, B.A. Izzuddin, A.Y. Elghazouli, D.A. Nethercot, Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part II: Application, Eng Struct 30 (2008) 1424–1438. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.08.011.

[23] K. Khandelwal, S. El-Tawil, Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis, Eng Struct 33 (2011) 2653–2661. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.05.013.

[24] G. Mucedero, E. Brunesi, F. Parisi, Nonlinear material modelling for fibre-based progressive collapse analysis of RC framed buildings, Eng Fail Anal 118 (2020) 104901. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104901.

[25] G. Xu, B.R. Ellingwood, An energy-based partial pushdown analysis procedure for assessment of disproportionate collapse potential, J Constr Steel Res 67 (2011) 547–555. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.09.001.

[26] Y. Bao, J.A. Main, S.-Y. Noh, Evaluation of Structural Robustness against Column Loss: Methodology and Application to RC Frame Buildings, Journal of Structural Engineering 143 (2017). https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001795.

[27] M.V. Requena-Garcia-Cruz, A. Morales-Esteban, P. Durand-Neyra, Assessment of specific structural and ground-improvement seismic retrofitting techniques for a case study RC building by means of a multi-criteria evaluation, Structures 38 (2022) 265–278. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.015.

[28] S. Villar-Salinas, S. Pacheco, J. Carrillo, F. López-Almansa, Influence of high axial compression ratios in RC columns on the seismic response of MRF buildings, Structural Engineering and Mechanics 90 (2024) 51–70.

[29] M.-V. Requena-Garcia-Cruz, A. Morales-Esteban, P. Durand-Neyra, B. Zapico-Blanco, Influence of the constructive features of RC existing buildings in their ductility and seismic performance, Bulletin of Earthquake Engineering 19 (2021) 377–401. https://doi.org/10.1007/s10518-020-00984-z.

[30] R. Moreno-Gonzalez, J.M. Bairan, Seismic Damage Assessment for Waffled-Slabs Reinforced Concrete (RC) Buildings in Barcelona, International Journal of Architectural Heritage 7 (2013) 116–134. https://doi.org/10.1080/15583058.2011.616619.

[31] B. Guaygua, A.J. Sánchez-Garrido, V. Yepes, Life cycle assessment of seismic resistant prefabricated modular buildings, Heliyon 10 (2024) e39458. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39458.

[32] A.P. Santos, R. Castedo, L.M. López, M. Chiquito, J.I. Yenes, A. Alañón, E. Costamagna, S. Martínez-Almajano, Reinforced Concrete Building with IED Detonation: Test and Simulation, Applied Sciences 12 (2022) 7803. https://doi.org/10.3390/app12157803.

[33] R. Castedo, A.P. Santos, A. Alañón, C. Reifarth, M. Chiquito, L.M. López, S. Martínez-Almajano, A. Pérez-Caldentey, Numerical study and experimental tests on full-scale RC slabs under close-in explosions, Eng Struct 231 (2021) 111774. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111774.

[34] M. Chiquito, L.M. López, R. Castedo, A. Pérez-Caldentey, A.P. Santos, Behaviour of retrofitted masonry walls subjected to blast loading: Damage assessment, Eng Struct 201 (2019) 109805. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109805.

[35] E. Garcia-Castillo, I. Paya-Zaforteza, A. Hospitaler, Fire in heritage and historic buildings, a major challenge for the 21st century, Developments in the Built Environment 13 (2023) 100102. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100102.

[36] J.A. Capote Abreu, D. Alvear, M. Lázaro, J. Crespo, I. Fletcher, S. Welch, J. Torero, Modelado de las solicitaciones de los elementos estructurales de hormigón en edificios de gran altura en incendios reales, Informes de La Construcción 63 (2011) 83–91. https://doi.org/10.3989/ic.09.005.

[37] E. Garcia-Castillo, I. Paya-Zaforteza, A. Hospitaler, Analysis of the fire resistance of timber jack arch flooring systems used in historical buildings, Eng Struct 243 (2021) 112679. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112679.

[38] E. Menéndez, L. Vega, Analysis of the behaviour of the structural concrete after the fire at the Windsor Building in Madrid, Fire Mater 34 (2010) 95–107. https://doi.org/10.1002/fam.1013.

[39] N. Stathas, S.N. Bousias, X. Palios, E. Strepelias, M.N. Fardis, Tests and Simple Models of RC Frame Subassemblies for Postulated Loss of Column, Journal of Structural Engineering 144 (2018). https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001951.

[40] S.-B. Kang, K.H. Tan, Behaviour of precast concrete beam–column sub-assemblages subject to column removal, Eng Struct 93 (2015) 85–96. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.027.

[41] D.-Y. Kong, Y. Yang, S. Li, B. Yang, J.Y.R. Liew, Experimental and Analytical Study on Progressive Collapse of 3D Composite Floor System under Corner

Column Loss, Journal of Structural Engineering 148 (2022). https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003288.

[42] D.-Y. Kong, Y.-F. Lyu, Y.-R. Dong, H. Wang, Y. Yang, Large-scale test of a 3D steel moment-resisting frame with composite slab subject to penultimate interior column loss, J Constr Steel Res 201 (2023) 107763. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107763.

[43] G. Caredda, N. Makoond, M. Buitrago, J. Sagaseta, M. Chryssanthopoulos, J.M. Adam, Enhancing building robustness through a fuse-based segmentation framework, Developments in the Built Environment 19 (2024) 100515. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100515.

[44] U. Starossek, Measures of robustness and collapse resistance, in: Progressive Collapse of Structures, n.d.: pp. 129–140. https://doi.org/10.1680/pcos.61682.129.

[45] M. Buitrago, G. Sempértegui, N. Makoond, J.M. Adam, New structural stabilisation systems to prevent building progressive collapse, in: 31st Int. Work. Intell. Comput. Eng., Vigo, 2024: pp. 256–263.

[46] N. Makoond, A. Setiawan, S.L. Orton, J.M. Adam, The effect of continuity reinforcement on the progression of collapse in reinforced concrete buildings, Structures 61 (2024) 105981. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105981.

[47] J.M. Adam, M. Buitrago, E. Bertolesi, J. Sagaseta, J.J. Moragues, Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario, Eng Struct 210 (2020) 110414. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110414.

[48] J. Garzón-Roca, J. Sagaseta, M. Buitrago, J.M. Adam, Dynamic Punching Assessment of Edge Columns after Sudden Corner Column Removal, ACI Struct J 118 (2021). https://doi.org/10.14359/51728195.

[49] M. Buitrago, E. Bertolesi, J. Sagaseta, P.A. Calderón, J.M. Adam, Robustness of RC building structures with infill masonry walls: Tests on a purpose-built structure, Eng Struct 226 (2021) 111384. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111384.

[50] M. Buitrago, E. Bertolesi, J. Garzón-Roca, J. Sagaseta, J.M. Adam, A Parametric Computational Study of RC Building Structures under Corner-Column Removal Situations, Applied Sciences 10 (2020) 8911. https://doi.org/10.3390/app10248911.

[51] M. Buitrago, N. Makoond, J.J. Moragues, J. Sagaseta, J.M. Adam, Robustness of a full-scale precast building structure subjected to corner-column failure, Structures 52 (2023) 824–841. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.146.

[52] M. Buitrago, J. Sagaseta, N. Makoond, A. Setiawan, J.M. Adam, Robustness of a full-scale precast building structure after edge column failure, Eng Struct 326 (2025) 119495. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119495.

[53] N. Makoond, A. Setiawan, M. Buitrago, J.M. Adam, Arresting failure propagation in buildings through collapse isolation, Nature 629 (2024) 592–596. https://doi.org/10.1038/s41586-024-07268-5.