

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en conjuntos habitacionales del movimiento moderno en Sevilla

Seismic vulnerability assessment of modernist housing complexes in Seville

Perla Rafael Santa Ana Lozada* 

Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

María Victoria Requena García de la Cruz 

Antonio Morales Esteban** 

Universidad de Sevilla, Sevilla, España

*psal@unam.mx

**ame@us.es

DOI: 10.61820/dcuaq.2395-8847.2061

Fecha de recepción: 20 de octubre del 2025

Fecha de aceptación: 13 de mayo del 2026

Resumen

Entre 1923 y 1950, la construcción en Sevilla se centró en la vivienda de tipo social. De este periodo datan dos conjuntos representativos con edificios patrimoniales del movimiento moderno: la barriada del Carmen, en la ribera del río Guadalquivir, y La Estrella, al sur de la ciudad. Si bien las edificaciones preceden a las normas de construcción y sísmicas españolas, actualmente siguen en uso sin daños relevantes. Sin embargo, la región presenta actividad sísmica, por lo que se encuentran en riesgo debido a su solución arquitectónica volumétrica, orgánica e irregular, junto con su cimentación en suelo blando. En este trabajo, se evaluó su vulnerabilidad de manera híbrida utilizando el método de Benedetti y Petrini (1984) y un método mecánico basado en las curvas de capacidad de los edificios. La resistencia y el posible nivel de daño se determinaron mediante modelos de elementos finitos. Los resultados muestran que estas construcciones podrían sufrir daños significativos por su configuración formal, los materiales empleados y el tipo de suelo. La relevancia del estudio radica en que sus conclusiones pueden aplicarse en otras zonas sísmicas con suelos similares, como la Ciudad de México, donde edificaciones con características análogas enfrentan riesgos comparables.



Palabras clave: análisis estructural, arquitectura patrimonial, interacción suelo-estructura, movimiento moderno, solución formal orgánica, vulnerabilidad sísmica

Abstract

Between 1923 and 1950, construction in Seville focused on social housing. Two representative complexes were built during this period: barriada del Carmen, located on the banks of the Guadalquivir River, and La Estrella, in the southern area of the city. Buildings from both places are deemed heritage sites of modernist architecture. Despite being erected prior to Spanish construction and seismic regulations, they remain in use without major damage. Nevertheless, given the region's seismic activity, they are vulnerable to earthquakes due to their architectural solutions –volumetric, organic and irregular–, as well as their foundations on soft soil. This work evaluates their seismic vulnerability through a hybrid approach that combines the Benedetti and Petrini (1984) method, and a mechanical approach based on capacity curves for each building. Structural capacity and potential damage levels were obtained with finite element modeling. Results indicate that the buildings' volumetric configuration, construction materials and soil conditions make them prone to significant damage under seismic action. The study's relevance lies in the applicability of its findings, which can be extended to other seismic regions with similar soil characteristics, notably Mexico City, where comparable vulnerabilities exist.

Keywords: heritage architecture, organic geometry, seismic vulnerability, soil-structure interaction, modernism, structural analysis

Antecedentes

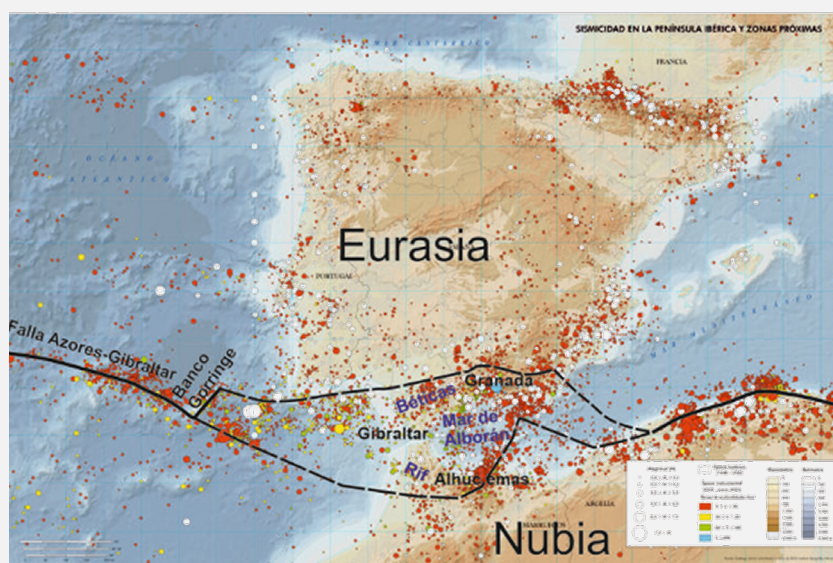
La interacción entre las placas euroasiática y africana (Fig. 1), en el mar Mediterráneo y el estrecho de Gibraltar, ocasiona movimientos sísmicos que provocan numerosas fallas en las regiones sur y suroeste de la península ibérica. Pese al nivel de riesgo del lugar, la población lo ignora debido al largo periodo de retorno de los sismos (Morales-Esteban et al., 2014, citado en Zapico Blanco, 2020).¹ En esta región de alta actividad sísmica se encuentra Sevilla, ubicada en la comunidad autónoma de Andalucía, en España, donde dichos fenómenos se atribuyen tanto a las fallas geológicas mencionadas como a fallas geotécnicas locales.

¹ Los sismos ocurridos en la región Algarve-Huelva, por ejemplo, presentan parámetros M_w (magnitud de momento) superiores a 6 (Zapico Blanco, 2020).

En la ciudad se han registrado sismos con epicentros cercanos, entre los cuales destaca el de febrero de 1969, de 8 M_s (magnitud de ondas superficiales), que causó daños graves en la catedral (donde una bóveda colapsó parcialmente) e intermedios en otras edificaciones. Si bien se considera una zona de riesgo sísmico moderado por presentar valores aproximados de PGA (aceleración máxima del suelo) de entre 0.08 y 0.10 g, puede alcanzar los 0.30 g para sismos con periodos de retorno de 580 años, de acuerdo a Fazendeiro Sá *et al.* (2021).

Figura 1

Límite de las placas tectónicas entre Eurasia y África



Fuente: García Ruiz (2021)

Entre 1920 y 1929, la población de Sevilla tuvo un aumento significativo, acentuado con la Exposición Iberoamericana de 1929, lo que suscitó una crisis habitacional² y una subsecuente construcción masiva de vivienda social. A partir de 1950 se erigieron 43,000 unidades en las periferias de la ciudad. Las denominadas *barriadas* estaban compuestas por edificios que variaban en altura, niveles y número de viviendas. Debido a su ubicación marginal, el proyecto urbano de estos conjuntos carecía de áreas comerciales o de esparcimiento. Mientras tanto, también se levantaron algunas viviendas residenciales con espacios recreativos y cercanas al equipamiento de la zona (Marchena Gómez y Hernández Martínez, 2016).

² Debido a la Guerra Civil que sufrió España (1936-1939), no se construyeron las viviendas necesarias en todas las ciudades. En Sevilla, donde había una demanda de 140,000, se edificaron 13,000 en este periodo (Marín de Terán, 1980).

En su mayoría, ambos tipos de vivienda se proyectaron con edificaciones funcionales, económicas en su construcción y exentas de ornamentos, expresando los principios del movimiento racionalista o moderno (MoMo).³ Muchas de las soluciones arquitectónicas formales fueron orgánicas y volumétricamente irregulares. Por otra parte, la implementación de este estilo se vio limitada por el predominio del regionalismo, que dio lugar a obras singulares donde convergen los ideales modernos y soluciones adaptadas al contexto sevillano (Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 2012).

La primera norma sísmica española se publicó hasta 1969,⁴ por lo que en el diseño arquitectónico y constructivo de las viviendas procedentes del MoMo sevillano no se siguieron las recomendaciones para soportar ex profeso las fuerzas sísmicas (Presidencia del Gobierno de España, 1969). Adicionalmente, al situarse en la ribera del río Guadalquivir, la ciudad presenta terrenos aluviales y arcillosos que han provocado hundimientos en las construcciones y, en algunos casos, han intensificado los efectos sísmicos (*Protocolo de Inspección Técnica de Edificaciones*, 2005).

La vulnerabilidad sísmica de una edificación se entiende como su predisposición a sufrir daños por movimientos sísmicos. Este riesgo dependerá de los parámetros considerados, comúnmente los correspondientes a los elementos estructurales, dada su importancia en la seguridad de las construcciones. La ingeniería sísmica emplea distintas formas de evaluación, incluyendo los métodos de gran escala, relacionados con el riesgo sísmico a nivel territorial y utilizados para detectar las edificaciones que requieren refuerzo o mantenimiento. Estos se dividen en tres tipos: empíricos, mecánicos e híbridos (Puncello y Caprili, 2023).

Se han realizado diversos estudios sobre la vulnerabilidad de edificios patrimoniales, en particular iglesias, templos y construcciones con bloques de tierra cocida y mampostería de barro cocido sin refuerzo o con refuerzo mínimo (Asteris *et al.*, 2014; Boschi *et al.*, 2018; Cunalata y Caiza, 2022; Moreno González y Bairán García, 2012). Como resultado se han encontrado niveles altos de vulnerabilidad debido a las propiedades de la mampostería sin refuerzo, así como al tipo de suelo. No obstante, pocas veces se han analizado los edificios de concreto reforzado y mampostería integrada que datan de mediados del siglo XX. Algunos trabajos tratan sobre el comportamiento

³ Movimiento promovido en Europa a inicios del siglo XX.

⁴ La primera norma sismorresistente española fue la PGS-1, parte A, aplicada provisionalmente a todos los proyectos.

de edificios italianos contruidos con mampostería sin reforzar (Di Domenico *et al.*, 2023), el comportamiento sísmico de distintos casos generales de edificios sin diseño normativo con muros diafragma y marcos de concreto (Falcão Moreira *et al.*, 2023) o la determinación de la vulnerabilidad de casos generales (Messaoudi *et al.*, 2025).

Esta investigación busca examinar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de vivienda representativas del MoMo en la ciudad de Sevilla. Se emplea un método híbrido que comprende analizar las condiciones de las obras de acuerdo con las normativas española, europea y mexicana, determinar el índice de vulnerabilidad a partir de sus características estructurales según el método empírico de Benedetti y Petrini (1984) y verificar los resultados con un método mecánico basado en los espectros de capacidad. Este último punto contempla modelos de elemento finito, considerando la caracterización del terreno, materiales y elementos estructurales, así como un análisis elástico y no elástico paso a paso de ambos edificios. Los objetos de estudio son la barriada del Carmen y La Estrella, ejemplos pioneros de la vivienda moderna tanto social como residencial y que han sido catalogados por el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico como edificios patrimoniales.⁵

Paralelamente, en la Ciudad de México, en la década de 1970, las viviendas multifamiliares de mediana y gran altura se edificaron con sistemas constructivos similares a los ya expuestos (con muros diafragma y marcos de concreto reforzado), y muchas siguen en funcionamiento (Sarmiento Ocampo, 2023). Por lo tanto, se plantea aplicar allí las conclusiones del contexto sevillano. Esta propuesta responde a que, si bien las edificaciones mexicanas tienen un riesgo sísmico mayor que las españolas, casi todos los parámetros en las evaluaciones de vulnerabilidad de ambos países coinciden, debido a que sus sistemas constructivos, condiciones de terreno y exposición sísmica son compatibles.

Características de la barriada del Carmen y La Estrella

Las características geométricas de los edificios se obtuvieron a partir de los planos arquitectónicos originales. Las características de sus elementos estructurales y las propiedades de los materiales de construcción provienen de estudios, memorias de cálculo e información de análisis previos.

⁵ El Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico está integrado en el Documentation and Conservation of buildings, sites and neighbourhoods of the Modern Movement (DOCOMOMO) Ibérico.

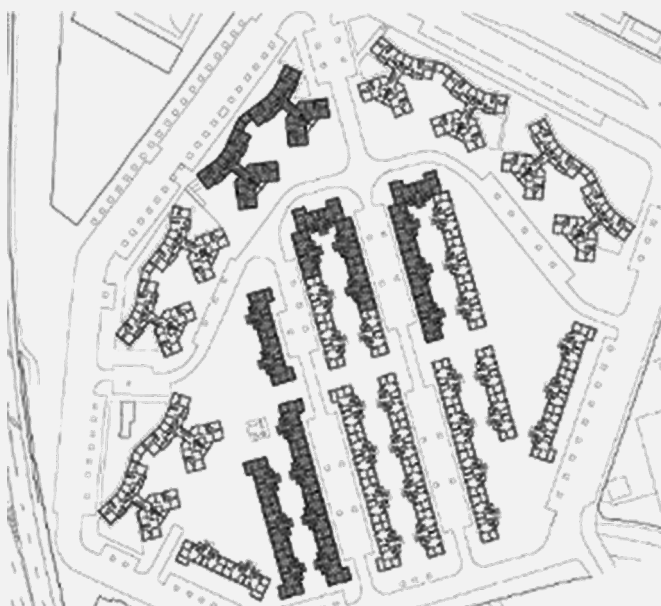
Barriada del Carmen

La barriada de Nuestra Señora del Carmen es un conjunto habitacional de vivienda social colectiva proyectado por el arquitecto Luis Recaséns⁶ y construido entre 1955 y 1958. Fue promovido por el Instituto Nacional de la Vivienda para beneficiar a las clases obreras. El terreno, cedido por el ayuntamiento de Sevilla, se localiza en la periferia, desconectado de la ciudad. En específico, se encuentra al poniente de la barriada El Tardón, en Triana, junto al muro de defensa del río Guadalquivir (re-HABITAR, s.f.).

La barriada se compone de 636 viviendas, distribuidas en 52 edificios que parten de dos prototipos: edificaciones con geometría en forma de “X”, con una altura de 10 niveles en el cuerpo principal y 5 en un cuerpo anexo, ubicadas perimetralmente en el conjunto, y edificaciones rectangulares de media altura con 4 niveles (Fig. 2). Ambos modelos conforman unidades habitacionales reducidas, con un área construida de entre 45 y 50 m². Se dispusieron con base en la geometría de la parcela para asegurar la eficiencia espacial y la orientación solar. En el ámbito urbano, las viviendas se organizan en torno a tres plazas y calles interiores peatonales pensadas para fomentar el encuentro vecinal (re-HABITAR, s.f.).

Figura 2

Planta de la barriada de Nuestra Señora del Carmen, con los dos tipos de edificaciones



Fuente: Gómez Villa *et al.* (2019)

⁶ Luis Recaséns Méndez-Queipo de Llano fue un arquitecto nacido en Madrid, autor de importantes proyectos en Sevilla, como el conjunto de viviendas Los Diez Mandamientos o la Iglesia de San Pedro y San Pablo.

Los materiales de construcción empleados en estas edificaciones fueron concreto reforzado colado en sitio, tabiques de arcilla recocida prefabricados y los elementos para el forjado o sistema de piso: viguetas pretensadas en forma de “T” invertidas y bovedillas de concreto, en consonancia con la practicidad constructiva del MoMo. Las soluciones estructurales son simples y repetitivas para facilitar la ejecución en serie (Pérez Escolano, 1998).

Para el presente análisis de vulnerabilidad sísmica se seleccionó el módulo habitacional con el mayor número de niveles. Este edificio presenta una solución geométrica en planta similar a una “X”, donde un núcleo de circulación vertical une un cuerpo de 10 niveles (Fig. 3) con otro de 5, formando una sola edificación sin juntas constructivas verticales. Los primeros 5 niveles tienen 4 viviendas en total, 1 en cada ala (Fig. 4). Espacialmente, los módulos cuentan con elementos de soporte formados por trabes y columnas de concreto reforzado colado en sitio, espaciados a cada 4.50 m máximo en ambas direcciones. No hay balcones, y las cornisas de la cubierta forman parte de la losa con el mismo espesor y armado.

Figura 3

Edificios altos de la barriada del Carmen en su estado actual



Fuente: Santa Ana Lozada (2025)

Figura 4

Vista posterior de dos edificios tipo “X” en la barriada del Carmen



Fuente: Santa Ana Lozada (2025)

A continuación, se describen las características constructivas de la edificación. En primer lugar, presenta marcos de concreto con acero de refuerzo ligados con muros de arcilla recocida prefabricada (en contacto directo con las trabes de concreto) que actúan como fachada principal perimetral y, por lo tanto, funcionan estructuralmente como muros diafragma. En ningún punto de la planta ni de elevación se encuentran juntas verticales constructivas.

Las secciones de los elementos estructurales en concreto reforzado son las siguientes: columnas de 30 cm [x] 30 cm, trabes de 30 [cm x] 55 cm, muro de mampostería ligado a los marcos de tabique de barro de 12 cm de ancho, muros divisorios de mampostería de 10 cm de base y forjado de 25 cm. Este sistema de piso está formado por viguetas pretensadas en T invertidas y bovedillas de concreto de 20 cm de ancho con 5 cm de capa de compresión (Santa Ana Lozada, 2025, p. 268).

El concreto empleado tiene un esfuerzo resistente a la compresión (f'_c) de 175 kg/cm² y el acero de refuerzo (varilla grado 36) presenta un esfuerzo de fluencia (f_y) de 2,530 kg/cm² y una densidad de 2500 kg/m³.⁷ Las cargas vivas y muertas

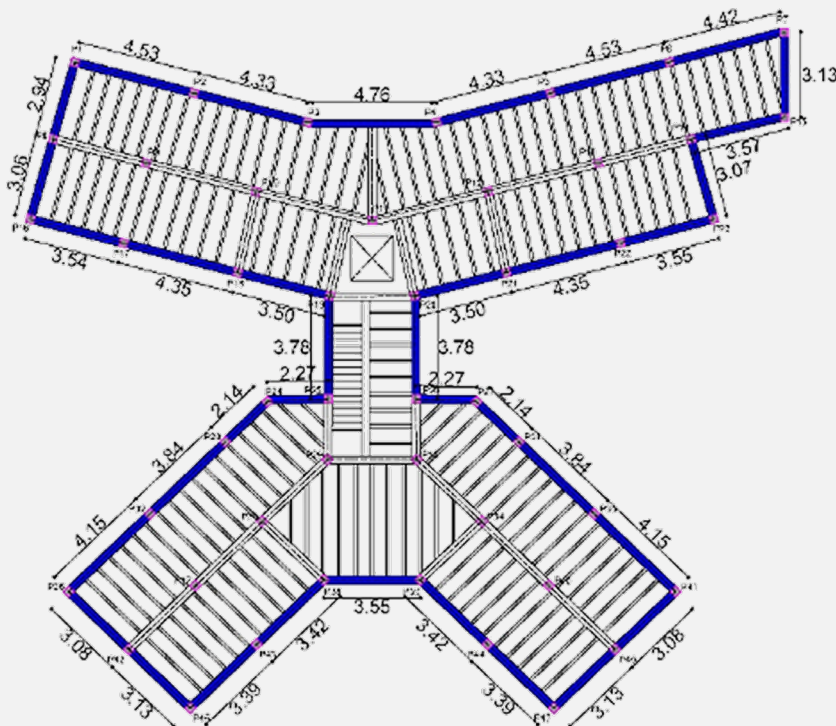
⁷ Las propiedades mecánicas de los materiales se obtuvieron a partir de los planos estructurales originales, mientras que las secciones de los elementos fueron corroboradas en sitio a partir de los planos estructurales del edificio.

se obtuvieron de la norma SE-AE⁸ para uso habitacional y de cubierta (Código Técnico de la Edificación, 2009). Las losas o forjados se encuentran al mismo nivel y están ligadas a las trabes y columnas de concreto, de modo que transmiten adecuadamente la fuerza cortante sísmica a estas últimas. La losa de cubierta, al presentar una sola pendiente, no cuenta con trabe de cumbrera.

Los claros de esta edificación, en promedio, son de 4.50×2.80 m. La altura de entrepiso es de 3 m en todos los niveles. El núcleo de circulación vertical que une los dos cuerpos es de 3.70 m de largo $\times$ 3.20 m de ancho (Fig. 5). La dimensión total de la edificación consta de 28 m de largo en horizontal y 23 m de ancho en vertical.

Figura 5

Planta estructural del cuerpo analizado de la barriada del Carmen



Fuente: Santa Ana Lozada (2025)

El terreno donde se ubica la barriada del Carmen se caracteriza por sus estratos profundos (-10 a -20 m) formados por arcillas limoarenosas con contenido de humedad considerable y plasticidad media. En los niveles intermedios (-3 a -10 m), el suelo

⁸ El Documento Básico SE-AE. Seguridad estructural. Acciones en la edificación (2009) es la normativa española donde se muestran los valores de sobrecarga por uso (carga viva) para vivienda (61.17 kg/m^2) y azotea (30.57 kg/m^2). El peso propio de la losa es de 387 kg/m^2 .

se compone de arcillas limosas de plasticidad media, con consistencia blanda, mientras que el estrato superficial (0 a -3 m) está constituido por rellenos de arcillas limosas alteradas muy blandas, así como restos de cascajo.⁹ Con base en lo anterior, la solución de cimentación empleada para estas edificaciones consistió en zapatas aisladas de concreto reforzado, desplantadas a una profundidad de -3.5 m, sin trabes de liga.

Conjunto residencial La Estrella

Al sur de Sevilla, en la avenida Manuel Siurot, cerca del parque de María Luisa, con infraestructura y zonas verdes alrededor, se construyó el conjunto residencial La Estrella, conformado por 9 bloques dispuestos de forma perimetral en el terreno (Fig. 6). La conexión entre las alas del edificio dio lugar a un espacio ajardinado central al interior, el cual refuerza el carácter comunitario y la sensación abierta del sitio (Vázquez Consuegra y Consejería de Obras Públicas y Transportes, 1992).

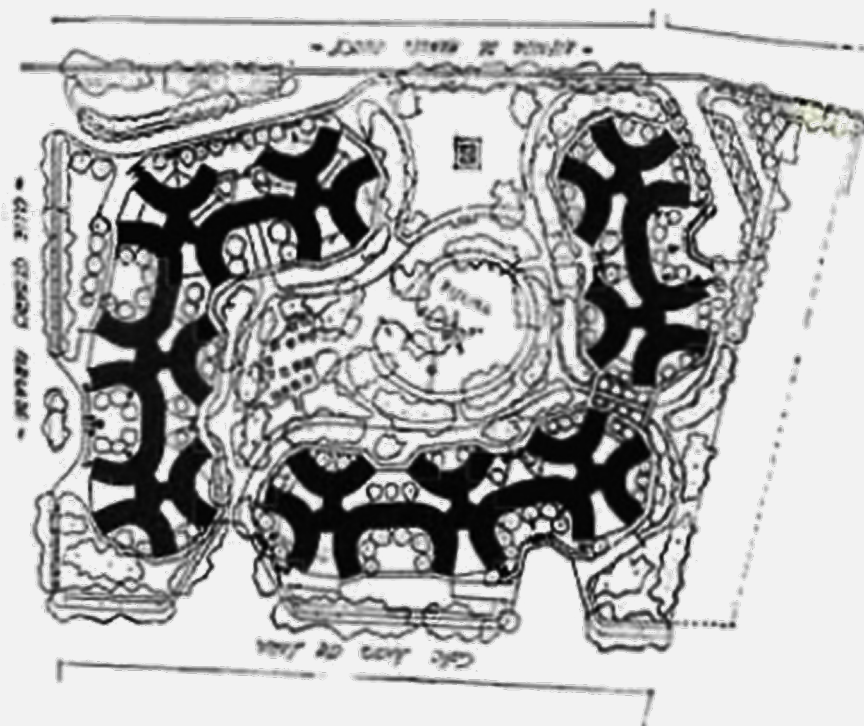
Este proyecto fue realizado por los arquitectos Rodrigo y Felipe Medina Benjumea¹⁰ entre 1955 y 1963, con una propuesta de tres alas curvas en planta que, al estar unidas por un núcleo central, forman una planta en estrella. Se trata de una reinterpretación de la tipología en forma geométrica de “H” empleada en las barriadas, acorde a los cánones arquitectónicos del MoMo y enfocada en las viviendas residenciales intensivas para la clase media. Espacialmente, cada módulo cuenta con trabes y columnas de concreto reforzado colado en sitio, espaciadas a cada 7 m máximo en ambas direcciones. Los balcones están integrados en la misma losa de entrepiso, soportados por trabes principales, y no tienen cornisas debido al pretil con el que cuentan, sujeto adecuadamente a la losa principal de la cubierta.

⁹ La información geotécnica se obtuvo a partir de un estudio de mecánica de suelos realizado en octubre del 2006 por la empresa Codexsa para un conjunto de viviendas plurifamiliares en la calle de Mosquera de Figueroa, en Sevilla.

¹⁰ Rodrigo y Felipe Medina Benjumea fueron arquitectos sevillanos titulados en la Escuela de Arquitectura de Madrid. Juntos realizaron distintos proyectos en su ciudad natal como la Universidad Laboral, Dos Hermanas o la Sede Social de la Compañía Sevillana de Electricidad.

Figura 6

Planta del conjunto La Estrella, con sus 9 cuerpos



Fuente: Ramos Carranza et al. (2003)

La planta de cada bloque está formada por tres edificaciones semicirculares, unidas en el centro por el núcleo de servicios; cada edificio alberga dos departamentos. Esta solución formal permite una mejor ventilación directa en todos los espacios de la casa, así como una mayor iluminación natural. El uso de tabiques de arcilla horneados prefabricados en la fachada le otorga un valor expresivo con formas orgánicas, al estilo de las que proponían los arquitectos modernos de entonces.¹¹ Cada edificio cuenta con diez niveles y un núcleo central de servicios a 2 m por encima de la cubierta general; sin embargo, un pretil de 3 m de altura cubre todos los equipos de cubierta (Fig. 7) (Sánchez-Cid Endériz et al., 2003).

¹¹ En ese momento, arquitectos como Sven Markelius, al norte de Europa, planteaban proyectos modernos como el Plan General de Estocolmo.

Figura 7

Dos bloques de edificios del conjunto residencial
La Estrella en su estado actual



Fuente: Santa Ana Lozada (2025)

Las secciones de los elementos estructurales de concreto reforzado son las siguientes: columnas de 40 cm × 55 cm, trabes de 25 cm × 65 cm en su eje semicircular interior, 25 cm × 55 cm en sus ejes semicirculares interior y exterior, y 25 cm × 25 cm en los ejes perpendiculares. Los muros de fachada fueron construidos con mampostería de 12 cm de espesor, la cual está vinculada a la estructura principal, y un forjado de 25 cm formado por vigueta y bovedilla con un peralte de 20 cm y una capa de compresión de 5 cm (Santa Ana Lozada, 2025, p. 296).

En la cubierta no hay trabes de cumbrera debido a que cuenta con una sola pendiente; sin embargo, las trabes de la cubierta se encuentran al mismo nivel y están ligadas a las columnas de concreto, de modo que transmiten adecuadamente la fuerza cortante sísmica a estas últimas (Fig. 8).

Obtención de la vulnerabilidad de las edificaciones

Los reglamentos de construcción proporcionan condiciones de regularidad para determinar aspectos que pueden implicar un riesgo de daño en las edificaciones. Conocer estos criterios facilita la evaluación empírica para obtener el índice de vulnerabilidad, ya que se complementan o son similares.

Condiciones de regularidad

El primer punto para determinar la posible vulnerabilidad sísmica de las edificaciones es la revisión denominada “Condiciones de regularidad”.¹⁴ Todos los reglamentos sísmicos solicitan realizar esta verificación, considerando los mismos aspectos geométricos y formales arquitectónicos, con ligeras variaciones en algunos puntos. A continuación, en la Tabla 1 se presentan las revisiones de ambos tipos de edificios, tomadas de la Norma de Construcción Sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02) (Ministerio de Fomento, 2009) de España, el Eurocódigo 8 (2004) y la Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo del Reglamento de Construcción de la CDMX (NTCDS, 2023).

Tabla 1
Revisión de las condiciones de regularidad de la barriada del Carmen y La Estrella conforme a las normativas española, europea y mexicana

NCSE-02 Condiciones de regularidad	Edificio “X” de la barriada del Carmen	Edificio de La Estrella
La disposición geométrica en planta es simétrica y regular, con una composición con dos ejes de simetría ortogonales	No	No
Si un edificio es asimétrico, presenta juntas verticales para la separación en cuerpos regulares independientes	No	No
La distribución de los elementos estructurales es uniforme y simétrica	No	No
Si se tienen plantas diáfanas con el resto de las plantas muy compartimentadas, debe tenerse en cuenta la diferencia de rigidez entre las plantas	No aplica	No aplica
Cuando la aceleración sísmica de cálculo (a_c) es mayor a 0.12 g, la masa no debe exceder por más del 15% la de las plantas contiguas	No aplica	No aplica

¹⁴ En la NTCDS, el quinto capítulo “Estructuras irregulares” establece los puntos de evaluación para determinar si un edificio es irregular. La NCSE-02 indica las condiciones geométricas para las edificaciones en el capítulo IV. Finalmente, en el inciso 4.3 del Eurocódigo 8 se evalúa la regularidad de la edificación y sus elementos.

Si se confía la resistencia de los esfuerzos horizontales a elementos como muros, estos deben colocarse al menos en dos direcciones, en posición simétrica y en el perímetro exterior de la planta	Sí	Sí
La distancia entre los ejes de la viga y de los pilares ¹⁵ debe ser menor a $30 \text{ cm}/4 = 7.5 \text{ cm}$ (barriada del Carmen) o menor a $40 \text{ cm}/4 = 10 \text{ cm}$ (La Estrella)	Sí	Sí
Se evita que sobre las vigas principales descansen otros elementos resistentes estructurales	No	No
Los elementos secundarios tendrán la capacidad para desplazarse	No	No
Eurocódigo 8 Condiciones de regularidad		
La forma en planta debe ser compacta. Las salientes deben ser menores al 5% de la dimensión del entrepiso en planta	No	No
La rigidez de las salientes debe ser igual a la rigidez de la parte central	No	No
La relación entre el lado largo y el lado corto debe ser menor a 4. Para la barriada del Carmen, $26 \text{ m}/6 \text{ m} = 4.33 > 4$, y para La Estrella, $36.9 \text{ m}/7.5 \text{ m} = 4.89 > 4$	No	No
Las columnas, trabes y muros portantes no se interrumpen en la altura	Sí	Sí
El peso de los entrepisos se mantiene constante	Sí	Sí
Existe diferencia de tamaño en las plantas de losa de entrepisos	Sí	No
NTCDS Condiciones de regularidad		
El desplazamiento lateral no debe exceder por más del 15% el desplazamiento lateral promedio (irregularidad por torsión)	No	No
El desplazamiento lateral no debe exceder por más del 30% el desplazamiento lateral promedio (fuerte irregularidad por torsión)	Sí	Sí
Sus entrantes y salientes deben ser menores al 40% de la dimensión paralela del edificio en planta	Sí	Sí
No hay irregularidad por flexibilidad excesiva en el diafragma	Sí	Sí
La planta del edificio no debe tener una reducción mayor al 40% del ancho de la losa debido a vanos en esta	Sí	Sí
No hay irregularidad por reducción geométrica en elevación	No	Sí
No hay irregularidad en elevación por reducciones bruscas de rigidez lateral	No	Sí
No hay fuerte irregularidad en elevación por reducciones bruscas de rigidez lateral	Sí	Sí

Fuente: elaboración propia, con información tomada de la NCSE-02 (Ministerio de Fomento, 2009), el Eurocódigo 8 (2004) y la NTCDS (2023)

¹⁵ En este artículo, *viga* es equivalente a *trabe*, mientras que *pilar* es equivalente a *columna*.

Las normas españolas evalúan la solución formal del edificio con base en su simetría y el uso de juntas verticales constructivas. Para zonas con mayor aceleración sísmica, se solicita que el peso de los entrepisos no exceda por más del 15% el de los entrepisos contiguos. Por otra parte, se revisa que todos los elementos portantes (p. ej., columnas y trabes) se encuentren en la misma posición en todos los niveles, que sobre las trabes no se apoyen muros y columnas y que estos últimos lleguen a la cimentación, y que los elementos estructurales secundarios (p. ej., muros divisorios) sean capaces de desplazarse. Asimismo, se consideran las plantas diáfanas y la separación entre los ejes de las columnas y las trabes. Las edificaciones de la barriada del Carmen y La Estrella incumplen cinco de los puntos requeridos para clasificarse como estructuras regulares, lo que implica un alto índice de vulnerabilidad ante un evento sísmico.

El Eurocódigo 8 verifica la ausencia de salientes del edificio con un área mayor al 5% con respecto a la del entrepiso, que la rigidez en planta de los entrepisos no supere la de los elementos portantes verticales y, en el caso de geometrías con salientes, donde la rigidez de las ramas laterales debe ser similar a la del cuerpo central, la esbeltez de la edificación se revisa con la proporción de su geometría en planta. Adicionalmente, se verifica que los elementos portantes principales corran a lo largo del edificio sin interrupciones y que el peso y el tamaño de cada nivel sean similares en altura. En este caso, ambos edificios cumplen con la mitad de las condiciones de regularidad.

Según la regulación mexicana, se debe efectuar un análisis estático del edificio aplicando fuerzas laterales para determinar los desplazamientos laterales en diferentes puntos tanto en planta como en elevación y, con ello, calcular valores como la torsión sísmica del edificio, la flexibilidad del diafragma rígido y el cambio de rigidez lateral en algún entrepiso.¹⁶ En este sentido, a falta de un análisis dinámico elástico, a partir de la solución geométrica sólo es posible obtener los parámetros referentes al tamaño y la posición de los vanos en planta, o visualizar una reducción geométrica en elevación. Por ello, a diferencia de otras normativas, con esta resulta difícil conocer la vulnerabilidad del edificio de forma directa y simplificada.

¹⁶ La torsión sísmica es el giro de un edificio en torno a un eje vertical; se determina de forma aproximada con base en la relación entre los desplazamientos laterales de un extremo del edificio y los de otro contrario al aplicar una fuerza horizontal por nivel en la edificación. El diafragma rígido se refiere a elementos rígidos horizontales (sistemas de piso o losas) que conservan su forma ante las fuerzas laterales de un sismo, y solo pueden desplazarse en dos direcciones. El cambio de rigidez lateral significa el aumento o la disminución del tamaño o el número de elementos verticales portantes en un entrepiso.

De acuerdo con los criterios citados de la NTCDs (2023), el edificio de la barriada del Carmen se clasifica como fuertemente irregular, tanto en planta como en elevación, al incumplir tres de los requerimientos de regularidad. Por su parte, el edificio de la Estrella solo falta al primer punto relativo a la torsión, por lo que se describe como irregular.

Índice de vulnerabilidad

A partir del análisis referente a las normativas, se procede a calcular el índice de vulnerabilidad de ambos edificios mediante una evaluación basada en el método de Benedetti y Petrini (1984). En la Tabla 2 se muestra la matriz de los parámetros utilizados y se desglosan los puntos considerados para determinar sus valores.

Tabla 2
Parámetros de evaluación del método de Benedetti y Petrini

Parámetros	Clase K_i				Peso W_i
	A	B	C	D	
1. Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1.00
2. Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25
3. Resistencia convencional	0	5	25	45	1.50
4. Posición del edificio y cimentación	0	5	25	45	0.75
5. Diafragmas horizontales	0	5	15	45	1.00
6. Configuración en planta	0	5	25	45	0.50
7. Configuración en elevación	0	5	25	45	1.00
8. Distancia máxima entre los muros	0	5	25	45	0.25
9. Tipo de cubierta	0	5	25	45	1.00
10. Elementos no estructurales	0	5	25	45	0.25
11. Estado de conservación	0	5	25	45	1.00

Nota: K_i es el grado de vulnerabilidad específico asociado al parámetro i y W_i es su factor de importancia.

Fuente: Benedetti y Petrini (1984)

En la Tabla 3 se presentan los niveles de vulnerabilidad de acuerdo con este método, en función de la relación entre el porcentaje obtenido y el valor total posible.

Tabla 3

Niveles de vulnerabilidad según el método de Benedetti y Petrini

Nivel de vulnerabilidad	Índice de vulnerabilidad en porcentaje
Baja	0-25%
Media	26-50%
Alta	51-100%

Fuente: Benedetti y Petrini (1984)

Para determinar el índice de vulnerabilidad de cada una de las edificaciones, se tomaron en cuenta las siguientes características finales basadas en las condiciones de las normativas antes mencionadas:

- a) **Organización del sistema resistente:** ambas edificaciones se ubican en la clase B, pues en sus estructuras las trabes se conectan a las columnas y forman marcos rígidos que contribuyen a soportar las fuerzas cortantes verticales sísmicas.
- b) **Calidad del sistema resistente:** ambas edificaciones se califican en la clase A, dado que sus muros de mampostería se componen de tabiques prefabricados homogéneos, constantes, de buena calidad y unidos entre sí con mortero.
- c) **Resistencia convencional:** en ambas edificaciones, el sistema de marcos de concreto con muros de mampostería tipo diafragma presenta una resistencia a cortante de la clase A para sismos de diseño en la zona.
- d) **Posición del edificio y cimentación:** ambos casos se ubican en la clase D, ya que la cimentación del edificio en la barriada del Carmen se encuentra desplantada a una profundidad superior a 1 m, igual que ocurre en el edificio de La Estrella, situado sobre un terreno arcilloso con una pendiente aproximada del 10%.
- e) **Diafragmas horizontales:** ambas edificaciones se encuentran en la clase A debido a que, en cuanto a sus forjados, los diafragmas horizontales se encuentran al mismo nivel; su deformabilidad es despreciable y su conexión con los elementos de concreto reforzado es adecuada.
- f) **Configuración en planta:** el edificio de la barriada del Carmen se considera en la clase D, ya que en este parámetro es irregular y asimétrico en una dirección, mientras que el edificio de La Estrella se considera en la clase B,

pues su configuración es asimétrica en una dirección, pero no tiene otro tipo de saliente ni irregularidad.

- g) **Configuración en elevación:** el edificio de la barriada del Carmen se sitúa en la clase D por ser irregular, al presentar una discontinuidad importante en el sexto nivel. A su vez, el edificio de la Estrella es continuo en toda su altura, por lo que se sitúa en la clase A.
- h) **Distancia máxima entre los muros:** ambas edificaciones alcanzan la clase A puesto que la distancia entre los marcos de concreto y la ubicación de los muros perimetrales de mampostería son adecuadas.
- i) **Tipo de cubierta:** ambos casos se calificaron en la clase B porque su tipo de cubierta es estable y está bien conectada a los marcos de concreto, sin una trabe de cumbrera.
- j) **Elementos no estructurales:** el edificio de la barriada del Carmen (colocado en la clase C) presenta cornisas integradas al forjado del último nivel, mientras que el de La Estrella cuenta con balcones integrados a la estructura de los diafragmas. Solo el edificio de La Estrella cuenta con parapetos, los cuales están correctamente sujetos a la estructura principal, por lo que está en la clase B.
- k) **Estado de conservación:** tanto el edificio de La Estrella como el de la barriada del Carmen se consideran en la clase A, ya que mayormente se encuentran en buen estado, sin lesiones ni grietas visibles.

Con base en este método, el edificio de la barriada del Carmen tiene un índice de vulnerabilidad de 114.25, es decir, un nivel medio (30%), mientras que el de La Estrella es de 47.5, por lo que su nivel es bajo (12.03%). Si a estos resultados unimos las observaciones referentes a las normativas, se confirma que la vulnerabilidad sísmica del edificio de la barriada del Carmen es media-alta debido a su solución volumétrica irregular, y que la del edificio de la Estrella es baja, de acuerdo con su solución formal arquitectónica. Para validar estos hallazgos, se utilizó el método mecánico, con conocimiento previo del comportamiento elástico de los edificios.

Evaluación mecánica: respuesta sísmica

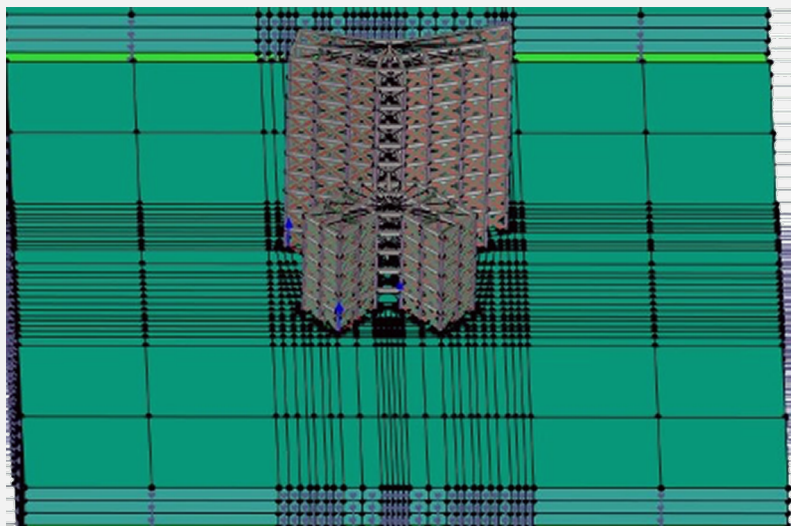
Siguiendo las normativas NCSE-02, Eurocódigo 8 y NTCDS, la respuesta sísmica se evaluó en función de dos parámetros de demanda (propiedades elásticas y espectros de capacidad), con los cuales se comparó la demanda sísmica con la capacidad de las edificaciones, considerando la interacción suelo-estructura. Para ello, se elaboraron modelos numéricos

con el programa OpenSees y la interfaz STKO.¹⁷ Los aspectos principales contemplados para el modelado de los edificios fueron los siguientes: el peso de los entrepisos, distribuido como masa concentrada en los nudos; los elementos estructurales, como columnas, trabes y muros diafragma (perimetrales de fachada); y el sistema de losa prefabricada con capa de compresión, que forma un diafragma rígido porque no se deforma en su propio plano. Los muros divisorios se excluyeron y los muros diafragma se modelaron como puntales equivalentes (macromodelación).

Para el análisis no lineal paso a paso, se recrearon las columnas y trabes teniendo en cuenta la plasticidad distribuida y los materiales uniaxiales (concreto y acero de refuerzo), mientras que los muros perimetrales de fachada de tabique de barro se modelaron como diagonales de compresión.¹⁸ En este tipo de estudios se tiende a representar los edificios empotrados en la base, de modo que se desprecian los efectos del suelo, como mayores deformaciones debidas a la disminución de rigidez. Por lo tanto, en el presente trabajo se decidió modelar el suelo (Fig. 9), empleando sus parámetros principales: densidad, velocidad de onda de cortante y de compresión, así como los módulos de cortante, elásticos, de volumen y de Poisson.

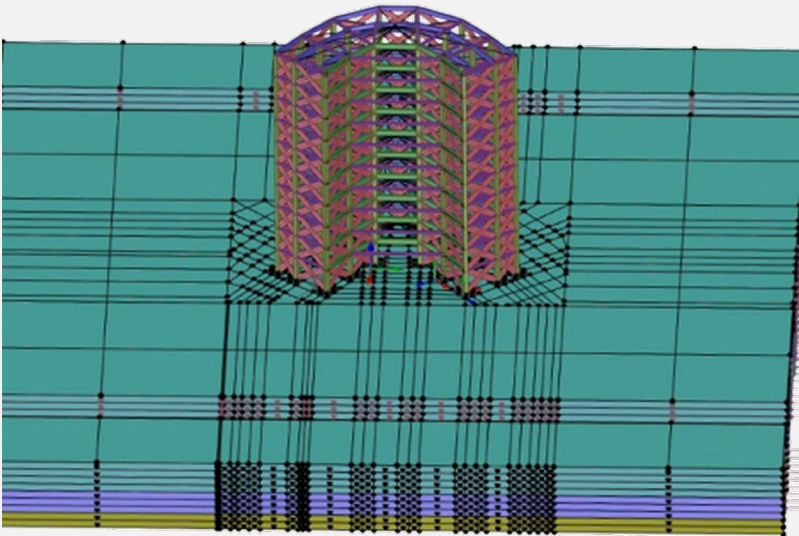
Figura 9

Modelos analíticos de los edificios de la barriada del Carmen (arriba) y de La Estrella (abajo) considerando la participación del suelo



¹⁷ El software Scientific ToolKit for OpenSees (STKO) es una interfaz gráfica de usuario que simplifica el modelado complejo en OpenSees (STKO-OpenSees software GUI, 2026).

¹⁸ El método de diagonal equivalente o de diagonal de compresión biarticulada en sus extremos cumple con las condiciones propuestas por Celarec et al. (2012).



Fuente: elaboración propia

Respuesta elástica Las características dinámicas elásticas de los edificios estudiados se verificaron mediante la obtención del periodo fundamental, del segundo y del tercer modo de vibración, así como de su dirección y de la respectiva masa modal efectiva normalizada, como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4
Propiedades elásticas de los edificios de la barriada del Carmen y La Estrella

Edificio de la barriada del Carmen			Edificio de La Estrella		
Periodo	M_n/M_T	Dirección	Periodo	M_n/M_T	Dirección
$T_1 = 1.98 \text{ s}$	$M_1/M_T = 0.32$	Transversal (lado corto)	$T_1 = 1.58 \text{ s}$	$M_1/M_T = 0.71$	Longitudinal (lado largo)
$T_2 = 1.85 \text{ s}$	$M_2/M_T = 0.19$	Longitudinal (lado largo)	$T_2 = 1.18 \text{ s}$	$M_2/M_T = 0.74$	Transversal (lado corto)
$T_3 = 1.41 \text{ s}$	$M_3/M_T = 0.13$	Torsión (planta)	$T_3 = 0.85 \text{ s}$	$M_3/M_T = 0.66$	Torsión (planta)

Nota: M_n es la masa del modo n y M_T es la masa total.

Fuente: elaboración propia

En ambos casos, se observa que el valor del periodo fundamental es elevado en función del número de niveles, lo cual significa que las edificaciones presentan un comportamiento flexible ante las fuerzas sísmicas. El edificio de La Estrella presenta mayor flexibilidad en el sentido longitudinal debido a su

geometría semicircular y el de la barriada del Carmen lo supera en el sentido transversal (lado corto) porque es el de menor dimensión.

Con base en los periodos de ambos edificios, se concluye que el de la barriada del Carmen es más flexible que el de La Estrella, si bien ambos tienen el mismo número de niveles y la superficie construida del primero es mayor. La diferencia radica en que la solución formal geométrica en la edificación de la barriada del Carmen es más irregular en planta y en elevación, pues la disminución a partir del sexto nivel aumenta la flexibilidad en la parte superior. Este comportamiento corrobora el índice de vulnerabilidad previamente establecido.

Análisis no lineal estático

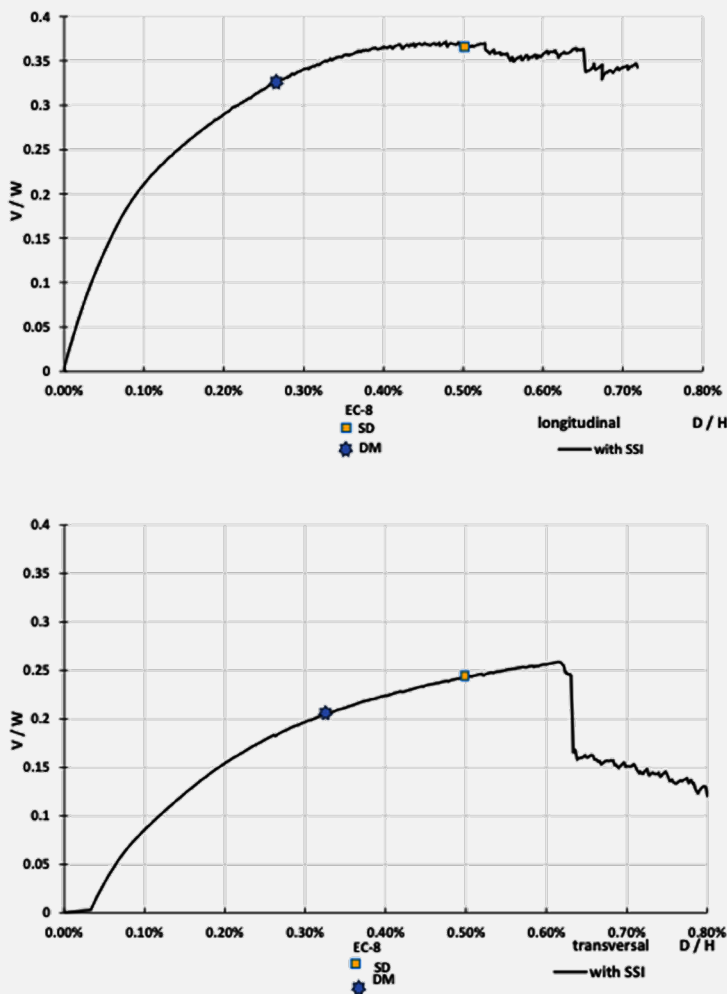
En el análisis no lineal paso a paso, se consideraron los diagramas de interacción entre columnas para generar el modelo de articulaciones plásticas. La degradación de la resistencia se basó en las sugerencias de la normativa ATC-40 (Applied Technology Council, 1996), que contempla el esfuerzo resistente del concreto, la carga axial y los refuerzos longitudinal y transversal (nivel de confinamiento). La relación esfuerzo-deformación utilizada en el comportamiento de las diagonales equivalentes que representan los muros se obtuvo según el método propuesto por Panangiotakos y Fardis (2001).

A partir del análisis anterior, se generaron los espectros de capacidad de los edificios en ambas direcciones. Para elaborar la gráfica correspondiente al edificio de la barriada del Carmen (Fig. 10), el cortante basal (V) se relacionó con el peso total de la edificación (W), y el desplazamiento máximo de la azotea (D) se relacionó con la altura total del edificio (H), a fin de obtener un valor de distorsión total. Asimismo, se estableció el límite de daño, denominado daño significativo (SD), según el Eurocódigo 8 (EC-8), bajo condiciones de diseño, considerando los muros de mampostería de fachada como elementos divisorios. La estrella azul corresponde al punto de desempeño o demanda del edificio (DM) para un periodo de retorno de 475 años (condición de diseño), determinado por la NCSE-02¹⁹ para el sistema de grado de libertad equivalente.

¹⁹ El método N2 se basa en obtener el punto de rendimiento a partir de la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro inelástico sísmico (Anexo B de la norma UNE-EN 1998-1:2011 / A1:2014 (Eurocódigo 8), en combinación con las aceleraciones y espectros definidos en su correspondiente Anejo Nacional Español).

Figura 10

Curva de capacidad del edificio de la barriada del Carmen en los sentidos longitudinal (arriba) y transversal (abajo)



Fuente: elaboración propia

Al comparar las gráficas, se observa que la capacidad resistente del edificio en el sentido longitudinal es mayor en un 30% que la del transversal. En ambas partes, la demanda (DM) presenta valores menores que la capacidad máxima obtenida y la solicitada por el EC-8; esto significa que, pese a la caída de capacidad sufrida en el sentido transversal, el edificio cuenta con la capacidad suficiente para satisfacer de forma adecuada la demanda que será impuesta por el sismo de diseño en ambas direcciones. Dicha caída se atribuye al mecanismo en el sexto nivel derivado de la reducción de los elementos portantes.

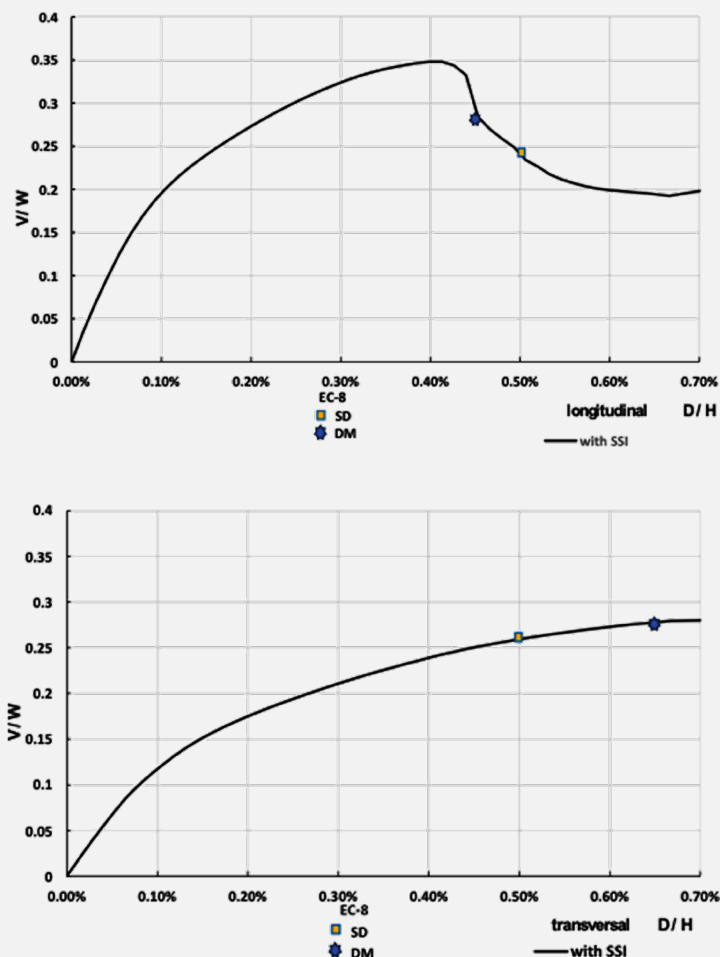
La diferencia en la distribución de capacidad entre el sentido longitudinal y el transversal se debe al mayor número de marcos en el lado largo de la edificación, mientras que en el lado corto hay menos crujeas y elementos portantes para so-

portar las fuerzas sísmicas. Además, en este último influye el ángulo importante de los marcos con respecto a la ortogonal (ejes esviados).

En la gráfica que representa la capacidad del edificio de La Estrella (Fig. 11) se advierte que, si bien tiene dimensiones menores en planta y, por ende, mayor esbeltez,²⁰ sus valores de capacidad máxima superan en sentido transversal y similan en sentido longitudinal los del edificio de la barriada del Carmen. A su vez, su capacidad es ligeramente inferior a la demanda que la NCSE-02 solicita transversalmente al sistema, por lo que resulta vulnerable en ese aspecto. En la parte longitudinal, el valor de la demanda se presenta de manera posterior y por debajo del punto de capacidad máxima, es decir que la configuración estructural-arquitectónica se considera adecuada.

Figura 11

Curva de capacidad del edificio La Estrella en los sentidos longitudinal (arriba) y transversal (abajo)



Fuente: elaboración propia

²⁰ Relación entre la dimensión del lado más corto en planta y la altura total del edificio.

En la Tabla 5 se presentan los valores del índice de vulnerabilidad según Benedetti y Petrini (1984), de la demanda y de la capacidad máxima sísmica de los edificios estudiados. Se aprecia nuevamente que el edificio con menor índice de vulnerabilidad empírica presenta una menor capacidad resistente frente a la demanda requerida, por lo que varía según el método analítico.

Tabla 5
Resumen del índice de vulnerabilidad, de demanda y de capacidad sísmica correspondientes a las edificaciones de la barriada del Carmen y La Estrella

	Edificio de la barriada del Carmen	Edificio de La Estrella
Índice de vulnerabilidad	114.25 (30%)	47.5 (12.03%)
Demanda sísmica máxima	0.32 V/W	0.26 V/W
Capacidad sísmica máxima	0.36 V/W	0.25 V/W

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

El análisis sobre los edificios de la barriada del Carmen y de La Estrella, representativos del movimiento moderno en Sevilla, evidencia que la vulnerabilidad sísmica de estas construcciones patrimoniales no solo depende de criterios estructurales generales, sino también de decisiones arquitectónicas propias de su época. La revisión bajo tres marcos normativos (español, europeo y mexicano), junto con la aplicación del método de Benedetti y Petrini, permitió identificar que la irregularidad geométrica, la discontinuidad de los elementos portantes y la configuración volumétrica son factores críticos que amplifican el riesgo sísmico en este tipo de edificaciones y, por ende, su índice de vulnerabilidad.

El edificio de la barriada del Carmen, con una solución formal fuertemente irregular y asentado sobre un terreno de baja rigidez, presenta una alta vulnerabilidad sísmica, especialmente en el sentido transversal. Sin embargo, debido a la dimensión de sus elementos, al número de muros perimetrales que trabajan estructuralmente y a su disposición, resultó tener una mayor capacidad resistente con respecto a la demanda sísmica impuesta de acuerdo con el marco europeo. En contraste, el edificio de La Estrella, calificado como irregular, presenta un índice de vulnerabilidad menor gracias a su geometría semicircular y a una distribución más homogénea de la rigidez. Sin embargo,

carece de la capacidad resistente transversal requerida por la normativa, lo que demuestra una vulnerabilidad importante.

Ambos edificios exhiben periodos fundamentales elevados que indican una respuesta flexible ante solicitaciones sísmicas. Por otra parte, hay diferencias significativas en la capacidad resistente entre sus ejes principales, donde el tipo de suelo sobre el cual se desplantan también incrementa su nivel de vulnerabilidad y contribuye a dicha flexibilidad. Este efecto se observa principalmente en suelos blandos, como el que presenta más notoriamente el edificio en la barriada del Carmen.

Estos hallazgos confirman los resultados de estudios anteriores sobre la vulnerabilidad de edificios históricos construidos previo a la publicación del reglamento de construcción y las normas sísmicas españolas. Sus propiedades materiales y el nivel de refuerzo corresponden a estructuras con poca ductilidad y a una capacidad resistente al límite de la requerida por la norma actual.

También se observó que la vulnerabilidad de los edificios va más allá de la solución formal arquitectónica y la estructuración general. El análisis no lineal paso a paso mostró que uno de los edificios no presenta la capacidad resistente requerida en un sentido, lo que eleva su nivel de vulnerabilidad de forma significativa con respecto al índice obtenido empíricamente.

Los resultados subrayan la necesidad de incorporar criterios de regularidad estructural, análisis dinámicos y contexto geotécnico en la conservación y rehabilitación del patrimonio moderno en zonas sísmicas con suelos blandos. Ejemplo de ello es la Ciudad de México, donde muchos edificios del movimiento moderno mantienen soluciones geométricas formales poco regulares y se componen de marcos de concreto reforzado y muros diafragma de tabique de barro recocido.

De tal forma, la preservación de este tipo de edificios en cualquier zona sísmica debe ir acompañada de estrategias de refuerzo que respeten su valor arquitectónico sin comprometer su seguridad estructural. En este sentido, la vulnerabilidad sísmica representa un parámetro esencial en la gestión patrimonial responsable, puesto que el legado moderno convive con los riesgos naturales latentes. Finalmente, se sugiere emplear métodos híbridos para evaluar con mayor precisión el nivel de vulnerabilidad de las edificaciones.

Referencias

- Applied Technology Council. (1996). ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings.
- Asteris, P.G., Chronopoulos, M.P., Chrysostomou, C.Z., Varum, H., Plevris, V., Kyriakides, N. y Silva, V. (2014). Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems. *Engineering Structures*, 62-63, 118-134. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.01.031>
- Benedetti, D. y Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: proposte di un metodo di valutazione. A method for evaluating the seismic vulnerability of masonry buildings. *L'industria delle Costruzioni*, (149), 66-74.
- Boschi, S., Borghini, A., Pintucchi, B. y Zani, N. (2018). Seismic vulnerability of historic masonry buildings: a case study in the center of Lucca. *Procedia Structural Integrity*, 11, 169-176. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2018.11.023>
- Celarec, D., Ricci, P. y Dolšek, M. (2012). The sensitivity of seismic response parameters to the uncertain modelling variables of masonry-infilled reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 35, 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.007>
- Código Técnico de la Edificación. (2009). *Documento Básico SE-AE. Seguridad estructural. Acciones en la edificación*. Código Técnico de la Edificación. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>
- Cunalata, F. y Caiza, P. (2022). Estado del arte de estudios de vulnerabilidad sísmica en Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(1), 55-64. <https://doi.org/10.33333/RP.VOL50N1.06>
- Di Domenico, M., De Risi, M.T., Manfredi, V., Terrenzi, M., Camata, G., Mollaioli, F., Noto, F., Ricci, P., Franchin, P., Masi, A., Spacone, E. y Verderame, G.M. (2023). Modelling and seismic response analysis of Italian pre-code and low-code reinforced concrete buildings. Part II: infilled frames. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(6), 1534-1564. <https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2086189>
- Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. EN-1198-1:2004, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings* (Eurocódigo 8). (2004). European Commission. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>
- Falcão Moreira, R., Varum, H. y Castro, J.M. (2023). Influence of masonry infill walls on the seismic assessment of non-seismically designed RC framed structures. *Buildings*, 13(5), 1148. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13051148>
- Fazendeiro Sá, L., Morales-Esteban, A. y Durand Neyra, P. (2021). A deterministic seismic risk macrozonation of Seville. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2392. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08626-7>

- García Ruiz, J.M. (29 de enero del 2021). *Diálogo: los terremotos y la actividad sísmica en Granada*. Fundación Descubre. <https://fundaciondescubre.es/noticias/dialogo-los-terremotos-y-la-actividad-sismica-en-granada/>
- Gómez Villa, J.L., García-Casasola, M. y Del Espino Hidalgo, B. (Eds.). (2019). *re-HABITAR El Carmen: Un proyecto sobre patrimonio contemporáneo*. Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico. Junta de Andalucía. https://repositorio.iaph.es/bitstream/11532/330631/1/Rehabitar_alan%C3%ADs_alda_almod%C3%B3var_patrimonio_contempor%C3%A1neo_2019.pdf
- Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (Coord.). (2012). *Cien años de arquitectura en Andalucía. El Registro Andaluz de Arquitectura Contemporánea, 1900-2000*. Junta de Andalucía. Consejería de Cultura.
- Marchena Gómez, M.J. y Hernández Martínez, E. (2016). Sevilla en la primera década del siglo XXI: transformaciones urbanas hacia un nuevo modelo de ciudad. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (70), 393-417. <https://doi.org/10.21138/bage.2176>
- Marín de Terán, L. (1980). *Sevilla: centro urbano y barriadas*. Servicio de Publicaciones del Ayuntamiento de Sevilla.
- Messaoudi, A., Mohamed, H., Chebili, R., Abdesselam, I. y Rodrigues, H. (2025). Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete frames with various masonry infill patterns. *Structures*, 82, 110536. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110536>
- Ministerio de Fomento. (2009). *Norma de Construcción Sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02)*. Gobierno de España. https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf
- Morales-Esteban, A., Martínez-Álvarez, F., Scitovski, S. y Scitovski, R. (2014). A fast partitioning algorithm using adaptive Mahalanobis clustering with application to seismic zoning. *Computers & Geosciences*, 73(2), 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.09.003>
- Moreno González, R. y Bairán García, J.M. (2012). Evaluación sísmica de los edificios de mampostería típicos de Barcelona aplicando la metodología Risk-UE. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 28(3), 161-169. <https://doi.org/10.1016/J.RIMNI.2012.03.007>
- Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo (NTCDS). (2023). https://www.smie.org.mx/uploads/2/2023-11/ntc_cdmx_2023.pdf
- Panagiotakos, T.B. y Fardis, M.N. (2001). Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate. *ACI Structural Journal*, 98(2), 135-148.
- Pérez Escolano, V. (1998). Sevilla al final del siglo XX. La transformación de la ciudad. *Cuadernos Hispanoamericanos*, 573, 27-37. <https://>

idus.us.es/server/api/core/bitstreams/a58392fb-c8b4-4328-9687-b965e6644885/content

Presidencia del Gobierno de España. (1969). Decreto 106/1969, de 16 de enero, por el que se aprueba la aplicación de la «Norma sismorresistente PGS-1 (1968), parte A». *Boletín Oficial del Estado*, (30), 1658-1675. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1969-148

Protocolo de Inspección Técnica de Edificaciones. (2005). Colegio de Arquitectos de Sevilla/Fundación para la Investigación y Difusión de la Arquitectura.

Puncello, I. y Caprili, S. (2023). Seismic assessment of historical masonry buildings at different scale levels: a review. *Applied Sciences*, 13(3), 1941. <https://doi.org/10.3390/app13031941>

Ramos Carranza, A., Sánchez-Cid Endériz, J.I. y Capilla Roncero, I. (2003). *Arquitectura del Racionalismo en Sevilla. Inicios y continuidades*.

re-HABITAR. (s.f.). *El Carmen*. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. <https://www.iaph.es/rehabitar/el-carmen/>

Sánchez-Cid Endériz, J.I., Capilla Roncero, I. y Ramos Carranza, A. (2003). *Arquitectura del Racionalismo en Sevilla*. Colegio Oficial de Arquitectos de Sevilla/Fundación para la Investigación y Difusión de la Arquitectura, Sevilla/Ayuntamiento de Sevilla. <https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/0db65496-dd17-4eae-a643-a85cb57892d1/content>

Santa Ana Lozada, P.R. (2025). *Análisis formal de la arquitectura del S. XX y su interrelación con el diseño sísmico; casos de estudio Ciudad de México y la Ciudad de Sevilla* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México/Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/items/d0685c87-eb52-44d3-8f09-f3fad5f614da>

Sarmiento Ocampo, J. (2023). Los multifamiliares en Ciudad de México: laboratorios urbanos y arquitectónicos. *Academia XXII*, 14(28), 195-222. <https://doi.org/10.22201/FA.2007252XP.2023.14.28.87244>

STKO-OpenSees software GUI. (2026). <https://www.stko.net/>

Vázquez Consuegra, G. y Consejería de Obras Públicas y Transportes (1992). *Guía de arquitectura de Sevilla*. Dirección General de Arquitectura y Vivienda. https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/guia_sevilla.pdf

Zapico Blanco, B. (Coord.). (2020). *Rehabilitación sísmica estructural de colegios de educación primaria. Proyecto PERSISTAH (Projetos de Escolas Resilientes aos SISMos no Território do Algarve e de Huelva)*. Universidad de Sevilla. <https://doi.org/10.12795/9788447230358>