

Comportamiento sísmico de edificios patrimoniales en Sevilla, España

*Seismic Performance of Heritage Buildings
in Seville, Spain*

Resumen

Los edificios patrimoniales han sido abordados previamente en la literatura académica; no obstante, los estudios centrados en edificaciones ubicadas en zonas sísmicas con suelos blandos son escasos, especialmente las construidas durante el periodo del Movimiento Moderno arquitectónico (1940-1960). Este artículo analiza el comportamiento sísmico de dos edificios habitacionales patrimoniales construidos en dicho periodo en la ciudad de Sevilla, España, ambos cimentados en suelos arcillosos del valle del Guadalquivir. Para evaluar su respuesta estructural y su nivel de vulnerabilidad, se realizaron análisis sísmicos estáticos y dinámicos, tanto lineales como no lineales, con el objetivo de determinar su capacidad sismorresistente, los niveles de deformación y el índice de daño global acumulado.

Palabras clave: distorsiones, ductilidad, irregularidad, suelos blandos, índice de daño, vulnerabilidad

Abstract

The conservation of heritage buildings has been widely addressed in the academic literature; however, studies focusing on structures in seismic-prone areas with soft soils, particularly those erected during the Modern Movement (1940-1960) remain scarce. This article investigates the seismic performance of two residential heritage buildings constructed during this period in Seville, Spain. Both are founded on clayey soils within the Guadalquivir River valley. To assess their seismic behaviour and vulnerability, a series of linear and non-linear static and dynamic analyses was conducted. These aimed to determine the seismic resistance capacity, deformation levels, and cumulative global damage index of the buildings.

Keywords: interstory drift, ductility, irregularity, soft soil, damage, vulnerability

Perla Santa Ana Lozada

Universidad Nacional
Autónoma de México

Fecha de recepción:

1 de septiembre de 2025

Fecha de aceptación:

20 de noviembre de 2025

[https://doi.org/10.22201/](https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2025.16.32.95039)

[fa.2007252Xp.2025.16.32.95039](https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2025.16.32.95039)



Este trabajo está amparado por
una licencia Creative Commons
Atribución-No Comercial, 4.0

Las construcciones patrimoniales son producto de un diseño y una construcción realizados en un determinado periodo de tiempo, lo que les confiere sus características arquitectónicas, constructivas y estructurales. Para determinar su posible nivel de daño y vulnerabilidad, se debe analizar el comportamiento estructural de la edificación ante las excitaciones a las que esté expuesta, como las cargas gravitacionales y las fuerzas sísmicas.¹

Gran parte de las edificaciones vinculadas al Movimiento Moderno fueron proyectadas y construidas en contextos normativos incipientes o, en muchos casos, inexistentes, según el país en el que se localizaban o aún permanecen en uso. En el caso específico de la ciudad de Sevilla, las construcciones erigidas durante dicho periodo no se ajustaron a ninguna normativa técnica, ya que en ese momento no existía una normativa constructiva vigente en España.

Las dos edificaciones que se presentan en este estudio se ubican en la ciudad de Sevilla y fueron construidas entre 1955 y 1960. Ambas edificaciones corresponden a usos de vivienda, social y residencial, y fueron proyectadas siguiendo las características del modernismo regionalista sevillano.² Las características arquitectónicas y estructurales de estos edificios siguen el uso de los materiales de la época: concreto reforzado y mampostería de barro; sus dimensiones geométricas fueron obtenidas a partir de planos elaborados en levantamientos topo-arquitectónicos actuales.

La ciudad de Sevilla se encuentra en una zona de actividad sísmica de largo periodo de retorno,³ lo que da la impresión de que se trata de una localidad con baja sismicidad; sin embargo, pueden producirse sismos de magnitud importante. Debido a su terreno aluvial arcilloso, las ondas sísmicas pueden sufrir amplificación, lo que afecta las construcciones ubicadas en zonas cercanas a la ribera del Guadalquivir.

El objetivo de este artículo es aportar al estado del arte del patrimonio del Movimiento Moderno, mediante la evaluación del comportamiento sísmico de dos edificaciones habitacionales típicas,

¹ De acuerdo con el catedrático de la Universidad de Minho, Portugal y especialista en estructuras históricas, Paulo Lourenço, "Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney", *Construction and Buildings Materials*, vol. 20, 2006, pp. 239-251.

² Se caracterizan por la eficiencia constructiva y el uso de nuevos materiales, como el concreto reforzado, manteniendo sus elementos decorativos regionales en fachadas y cubiertas, de acuerdo con Alberto Villar M., "Introducción a la arquitectura regionalista. El modelo sevillano", en *Colección Arca Verde*, Universidad de Córdoba, 2007.

³ Producto del movimiento de las placas tectónicas de Eurasia y África, según Beatriz Zapido, "Rehabilitación sísmica estructural de colegios de educación primaria", Universidad de Sevilla, España, 2020, pp.10-21.

catalogadas como edificios patrimoniales por el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.⁴ Para lograr el objetivo, se determinan sus propiedades estáticas y dinámicas, tanto elásticas como inelásticas, analizando su capacidad sismorresistente y relacionando sus deformaciones y niveles de ductilidad con su índice de daño, de forma que se corroboran y se aportan nuevas relaciones para controlar la vulnerabilidad de estos edificios, aplicables a edificaciones construidas en zonas sísmicas similares.

Casos de estudio

Descripción del edificio de la Barriada del Carmen (HB)

El edificio estudiado forma parte del complejo de vivienda social ubicado en la Barriada de Nuestra Señora del Carmen. Construido en 1955, este conjunto se compone de 52 edificios organizados en dos prototipos base: edificaciones de 5 niveles ubicadas en la zona central y de 10 niveles en la zona perimetral del predio (Figura 1). Su ubicación está cerca de la defensa del río Guadalquivir, por lo que el terreno de esta zona presenta arcillas en sus estratos superiores.



Figura 1. Edificios de 10 niveles tipo HB, en su estado actual.

Fuente: propia.

⁴ El Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico se encuentra integrado en el *Documentation and Conservation of buildings, sites and neighbourhoods of the Modern Movement (DoCoMoMo) Ibérico* y la *Dirección General de Arquitectura y Vivienda*.

El edificio seleccionado para este estudio presenta una solución geométrica en planta, como se muestra en la Figura 2, con 10 niveles en su cuerpo principal y un cuerpo posterior de 5 niveles, ambos unidos por el núcleo de escaleras. No hay juntas constructivas verticales

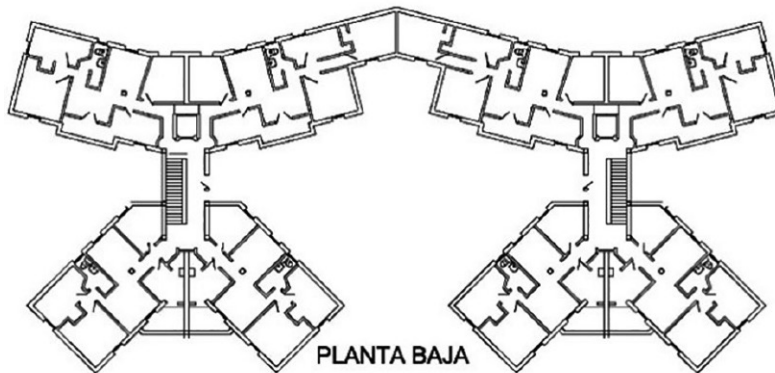


Figura 2a

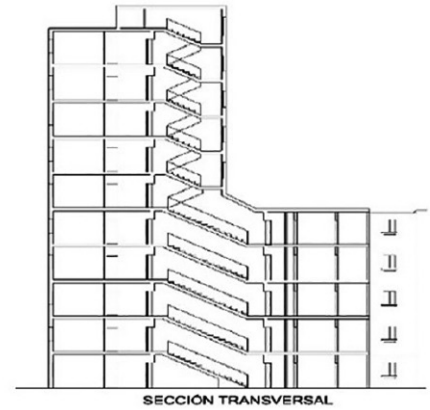


Figura 2b

La configuración estructural del edificio está compuesta por marcos de concreto reforzado, integrados perimetralmente con muros de tabique que actúan como diafragmas. Las dimensiones de los elementos principales son: columnas de 30×30 cm, trabes de concreto reforzado de 30×55 cm, muros de 12 cm y particiones de 10 cm de espesor. El sistema de piso se conforma por viguetas pretensadas en T y bovedillas de concreto de 20 cm de ancho, sobre las cuales se dispone una capa de compresión de 5 cm de espesor.⁶

El esfuerzo de compresión del concreto, f'_c , empleado es de 175 kg/cm^2 y el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo, f_y , es de 2520 kg/cm^2 ; la mampostería tiene un esfuerzo de compresión, f'_c , de 80 kg/cm^2 . Las cargas vivas y muertas empleadas tienen los valores establecidos por la norma SE-AE⁷ para uso habitacional y de cubierta.

⁵ José Luis Gómez Villa (coord.), *re-HABITAR EL CARMEN. Un proyecto sobre patrimonio contemporáneo*, España, Junta de Andalucía, Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico, 2019.

⁶ Perla Santa Ana, *Análisis formal de la arquitectura del siglo XX y su interrelación con el diseño sísmico. Casos de estudio: Ciudad de México y la ciudad de Sevilla*, tesis doctoral, México, UNAM, Facultad de Arquitectura, 2025.

⁷ Documento básico de Seguridad Estructural Acciones en la Edificación, normatividad española de 2009 en el cual se presentan los valores de sobrecarga por uso (carga viva) para vivienda igual a 61.17 kg/m^2 y para azotea de 30.57 kg/m^2 . El peso propio de la losa es de 387 kg/m^2 . Ministerio de Vivienda, *Documento Básico DB SE-AE: Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación*, Gobierno de España, Código Técnico de la Edificación, abril 2009.

Figura 2. Planta arquitectónica de HB, a) Planta tipo; b) Corte longitudinal.

Fuente: José Luis Gómez Villa (coord.), *re-HABITAR EL CARMEN. Un proyecto sobre patrimonio contemporáneo*.⁵

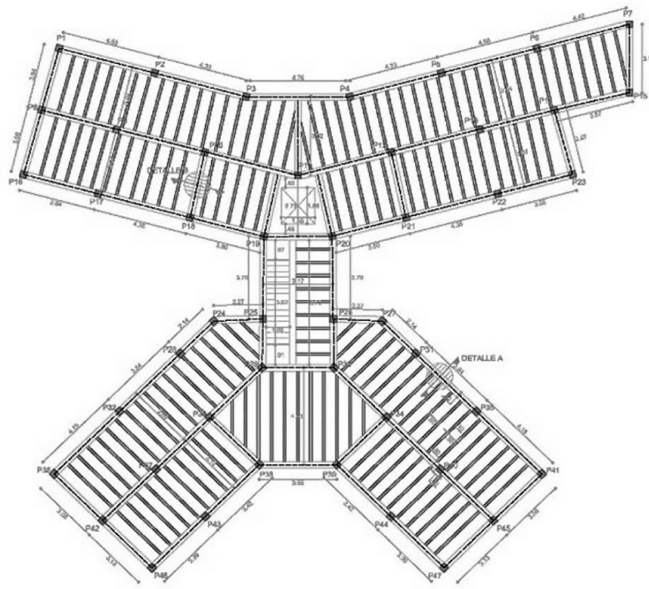


Figura 3. Planta estructural de HB.

Fuente: Perla Santa Ana, *Análisis formal de la arquitectura del siglo XX y su interrelación con el diseño sísmico. Casos de estudio: Ciudad de México y la ciudad de Sevilla.*

El terreno sobre el cual se encuentra desplantado este edificio está compuesto por arcillas y limo-arenosos, con un contenido de humedad considerable. La cimentación del edificio se encuentra resuelta mediante zapatas aisladas y corridas de concreto reforzado.⁹

Descripción del edificio del Conjunto La Estrella (HE)

Este conjunto residencial inició su construcción en 1955 y está formado por 27 edificios agrupados en nueve bloques aislados, cada uno con diez niveles. Al estar este conjunto residencial ubicado al sur de la ciudad, presenta un menor número de estratos formados por arcillas y pocas arenas secas;¹⁰ sin embargo, este suelo blando se cataloga como tipo C, acorde con el Eurocódigo 8 (EC-8).¹¹ Su solución de cimentación consistió en zapatas aisladas y corridas.

⁸ Perla Santa Ana, *op. cit.*

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

¹⁰ La información geotécnica se obtuvo a partir del estudio de mecánica de suelos realizado por la empresa TEDECO Ingenieros SL, con fecha de octubre de 2010 para el "Informe sobre daños en edificación".

¹¹ Asociación Española de Normalización (UNE), UNE-EN 1998-1:2018, Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para la edificación, España, 2018.

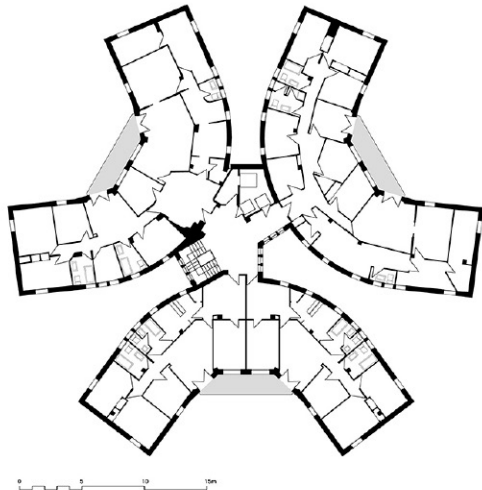


Figura 4a.



Figura 4b.

Cada bloque está conformado por tres edificios, con el núcleo de escaleras en el centro; sin embargo, cada edificio se comporta como un elemento único, pues se presentan juntas verticales a lo largo de todo el núcleo central. Todos los edificios son similares, por lo que se seleccionó un único cuerpo para este estudio.

La estructura de cada edificio se compone de marcos de concreto, integrados por columnas de 40×55 cm y trabes de 25×55 cm. Los muros de fachada, contruidos con mampostería de 12 cm de espesor, están vinculados a los marcos estructurales y funcionan como muros diafragma. El sistema de losa presenta un peralte total de 20 cm, conformado por viguetas y bovedillas, sobre las cuales se dispone de una capa de compresión de 5 cm. Las propiedades mecánicas de los materiales son: resistencia a la compresión del concreto $f'_c = 255$ kg/cm², esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo $f_y = 5097$ kg/cm², y resistencia a compresión de la mampostería $f^* = 80$ kg/cm². Las cargas permanentes y variables se determinaron a partir del peso propio de los materiales y la carga viva especificada en el reglamento SE-AE.¹³

Figura 4. Planta y elevación de bloques edificios HE:

a) Planta del bloque tipo.

Fuente: José Ignacio Sánchez, et al., *Arquitectura del Racionalismo en Sevilla*.¹²

b) Vista frontal de dos bloques.

Fuente: propia.

¹² José Ignacio Sánchez-Cid Endériz, Ignacio Capilla Roncero y Amadeo Ramos-Carranza, *Arquitectura del Racionalismo en Sevilla*, España, Universidad de Sevilla, 2003, pp. 228-240.

¹³ *Ibidem*, p. 5.

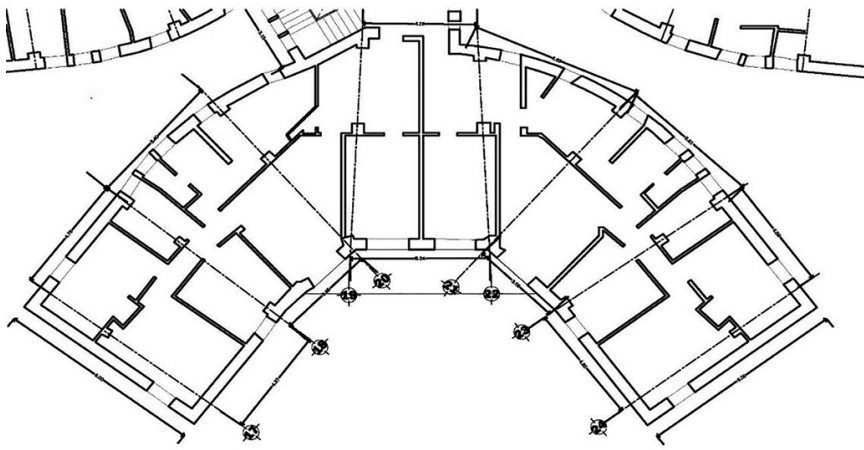


Figura 5. Planta estructural del edificio HE.

Fuente: Perla Santa Ana, *Análisis formal de la arquitectura del siglo xx y su interrelación con el diseño sísmico. Casos de estudio: Ciudad de México y la ciudad de Sevilla.*¹⁴

Evaluación de la respuesta sísmica

Para determinar el comportamiento sísmico de las edificaciones, se evaluó su respuesta estática y dinámica, tanto en el comportamiento elástico como inelástico, con el objetivo de obtener sus periodos, deformaciones elásticas, capacidad y demanda de capacidad, y su índice de daño global. Este último parámetro se relacionó con las distorsiones o desplomes globales, así como con el nivel de ductilidad global.

Propiedades dinámicas elásticas

Las propiedades dinámicas elásticas de ambas edificaciones se analizaron mediante un modelo modal espectral implementado en el *software* SAP2000 NL.¹⁵ Las columnas y las trabes se representaron como elementos tipo barra, mientras que los muros se modelaron mediante dos diagonales equivalentes articuladas, activas únicamente en compresión. El sistema de losa se definió para cada edificio con el objetivo de generar un diafragma rígido y las columnas se consideraron empotradas en su base. Para incorporar los efectos del terreno, se utilizaron espectros de diseño y registros sísmicos correspondientes al tipo de suelo considerado; sin embargo, no se incluyó la interacción suelo-estructura en el modelo.

¹⁴ Perla Santa Ana, *op. cit.*

¹⁵ Programa desarrollado por Computers and Structures, Inc. SAP2000 NL - Integrated Software for Structural Analysis and Design, Versión 24.2.0 Berkeley, California, USA, CSI, 2023.

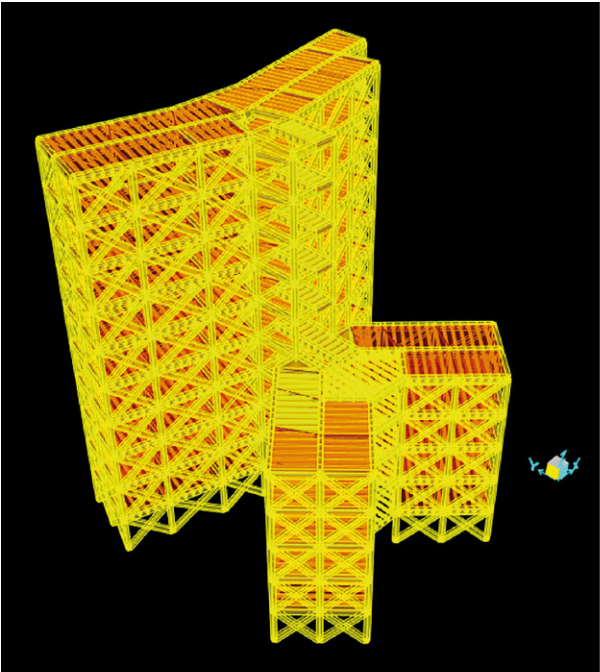


Figura 6a

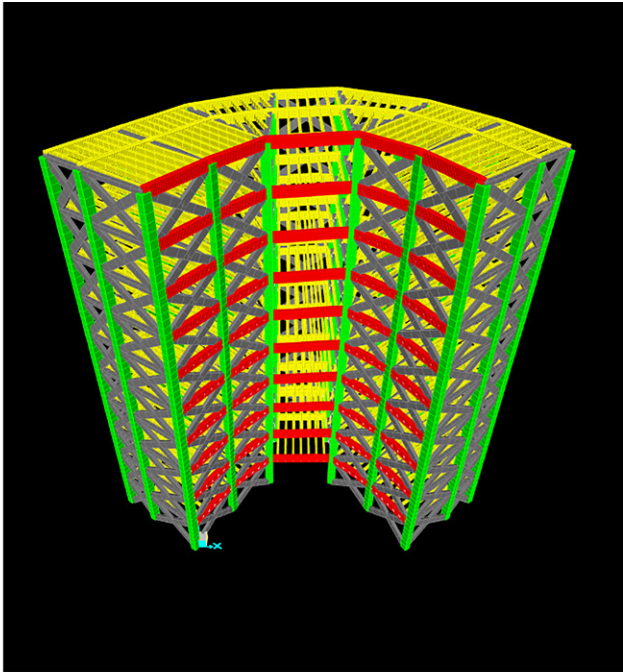


Figura 6b

En la Tabla 1 se presentan los valores de los tres primeros modos de vibración de cada edificio: periodos y direcciones.

Ambos edificios presentan una mayor masa normalizada en dirección transversal; para el edificio HB, dicha dirección corresponde al modo fundamental; mientras que en el edificio HE corresponde al segundo modo. El efecto de la torsión está presente en ambas edificaciones con una participación importante, debido a su solución formal arquitectónica irregular.

Figura 6. Modelos estructurales de los edificios:

a) HB; b) Edificio HE.

Fuente: Perla Santa Ana, *Análisis formal de la arquitectura del siglo XX y su interrelación con el diseño sísmico. Estudios de caso: Ciudad de México y Sevilla*.¹⁶

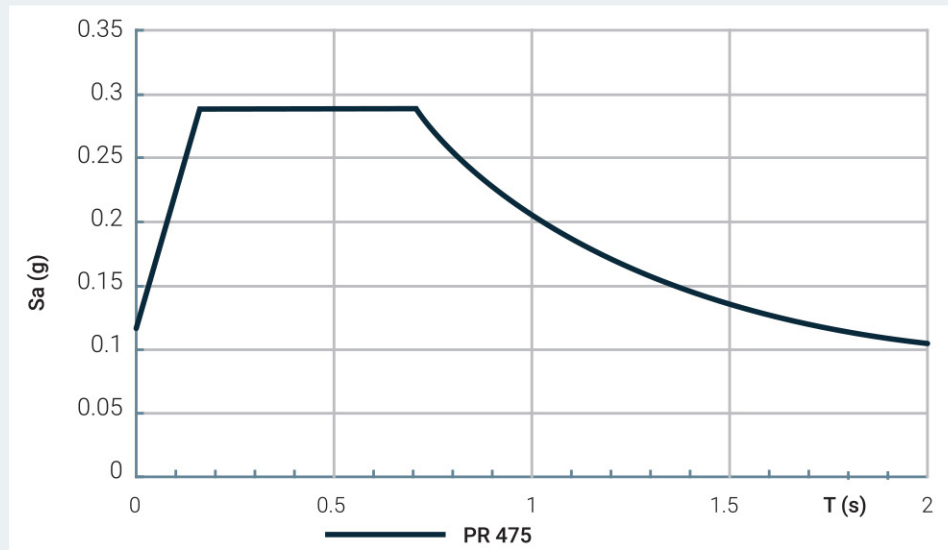
Edificio HB			Edificio HE		
Periodo	M_n/M_T	Dirección	Periodo	M_n/M_T	Dirección
$T_1 = 1.13 \text{ s}$	$M_1/M_T = 0.57$	Transversal (lado corto)	$T_1 = 1.20 \text{ s}$	$M_1/M_T = 0.50$	Longitudinal (lado largo)
$T_2 = 0.90 \text{ s}$	$M_2/M_T = 0.48$	Torsión (planta)	$T_2 = 1.15 \text{ s}$	$M_2/M_T = 0.97$	Transversal (lado corto)
$T_3 = 0.75 \text{ s}$	$M_3/M_T = 0.52$	Longitudinal (lado largo)	$T_3 = 0.79 \text{ s}$	$M_3/M_T = 0.51$	Torsión (planta)

El análisis modal espectral se desarrolló considerando un periodo de retorno de 475 años, correspondiente al estado límite de diseño y de acuerdo con los lineamientos establecidos en las normativas

Tabla 1. Propiedades elásticas de los edificios: a) HB; b) HE.

¹⁶ Perla Santa Ana, *op. cit.*

NCSE-02¹⁷ y EC-8. El espectro de diseño obtenido para este análisis se presenta en la Figura 7.



Las distorsiones obtenidas a partir del análisis modal espectral sirven para estimar el posible daño que el edificio podría sufrir y verificar que no se excedan los límites establecidos por la normatividad, los cuales aseguran que el edificio no rebase el estado de seguridad de vida (SV), es decir, que no sufra daños severos. De acuerdo con el EC-8, este límite máximo es 0.005. Las mayores distorsiones en el edificio HB se registran en ambas direcciones en el nivel seis, donde el cuerpo posterior del edificio termina; en el caso de HE, la máxima distorsión se presenta en el tercer nivel en ambas direcciones, sin embargo, en sentido transversal, las distorsiones son mayores con respecto al sentido longitudinal, especialmente en los niveles superiores.

Figura 7. Espectro elástico de diseño para la ciudad de Sevilla, acorde con el NCSE-02.

Fuente: propia.

¹⁷ NCSE-02. *Normas de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación*, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Gobierno de España, 2009.

Edificios	HB		HE	
	Dirección			
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Nivel	Distorsión NCSE-02	Distorsión NCSE-02	Distorsión NCSE-02	Distorsión NCSE-02
10	0.0013	0.0031	0.0005	0.0012
9	0.0017	0.0035	0.0009	0.0016
8	0.0020	0.0038	0.0012	0.0021
7	0.0023	0.0039	0.0015	0.0025
6	0.0025	0.0043	0.0018	0.0028
5	0.0023	0.0023	0.0020	0.0030
4	0.0023	0.0023	0.0022	0.0032
3	0.0021	0.0023	0.0024	0.0033
2	0.0020	0.0023	0.0023	0.0033
1	0.0017	0.0019	0.0015	0.0022

Tabla 2. Distorsión elástica de los edificios HB y HE, de acuerdo con el NCSE-02.

En todos los casos, como se observa en la Tabla 2, las distorsiones no exceden los límites establecidos por la norma, lo que indica que ambos edificios permanecerán sin daños severos tras un sismo con una aceleración similar a la de diseño.

Propiedades estáticas y dinámicas inelásticas

En el análisis plástico, para los elementos de concreto reforzado se empleó el modelo de Mander, con el cual se determinó la curva de momento de rotación de las trabes y columnas. Las articulaciones plásticas se ubicaron en los extremos de los elementos, en los puntos 5% y 95% de su longitud, considerando flexión uniaxial en las trabes y la interacción entre la carga axial y la flexión en las columnas, conforme a los lineamientos del ATC-40.¹⁸ Para representar el comportamiento de los muros mediante diagonales equivalentes, se utilizó la curva esfuerzo-deformación propuesta por Panangiotakos y Fardis.¹⁹

¹⁸ ATC-40 es el reporte publicado por el Applied Technology Council para evaluar y proponer métodos de análisis para rehabilitar edificaciones construidas en concreto reforzado. Applied Technology Council, *ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Redwood City, Estados Unidos, 1996.

¹⁹ T. B. Panangiotakos y M.N. Fardis, "Deformations of reinforced concrete at yielding and ultimate", *ACI Structural Journal*, 2001, vol. 98, núm. 2, pp. 135-148.

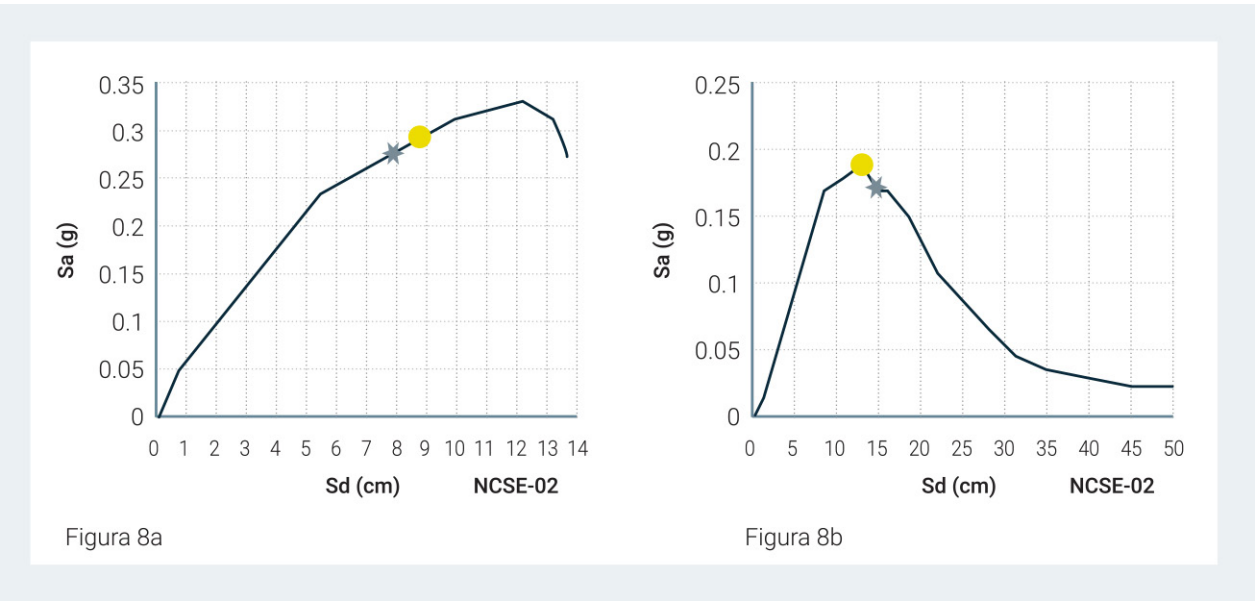
El índice de daño se calculó con base en el método propuesto por Rodríguez y Padilla,²⁰ adaptado a sistemas estructurales que incorporan muros diafragma de mampostería. Los parámetros que vinculan los distintos niveles de daño con los valores del índice se resumen en la siguiente tabla.

$0 < I_d < 0.1$	Sin daño	Agrietamiento menor, inicio de la fluencia
$0.1 \leq I_d < 0.5$	Daño reparable	Agrietamiento mayor, inicio del desprendimiento del recubrimiento, inicio del aplastamiento del concreto
$0.5 \leq I_d < 1.0$	Daño no reparable	Refuerzo longitudinal y transversal visible, inicio del pandeo, colapso incipiente

Tabla 3. Relación daño-estado de los elementos estructurales de concreto reforzado y de mampostería.

Fuente: Mario Rodríguez y Daniel Padilla (2009).²¹

Se obtuvieron los espectros de capacidad de cada edificio en ambas direcciones ortogonales, como se ilustra en la Figura 8. En ellas, el punto amarillo indica la capacidad estructural conforme al estado límite de diseño, mientras que la estrella representa la demanda de capacidad establecida por las normativas NCSE-02 y Eurocódigo 8.



El edificio HB, debido a su solución geométrica y orientación de las columnas de concreto, presenta una mayor capacidad resistente

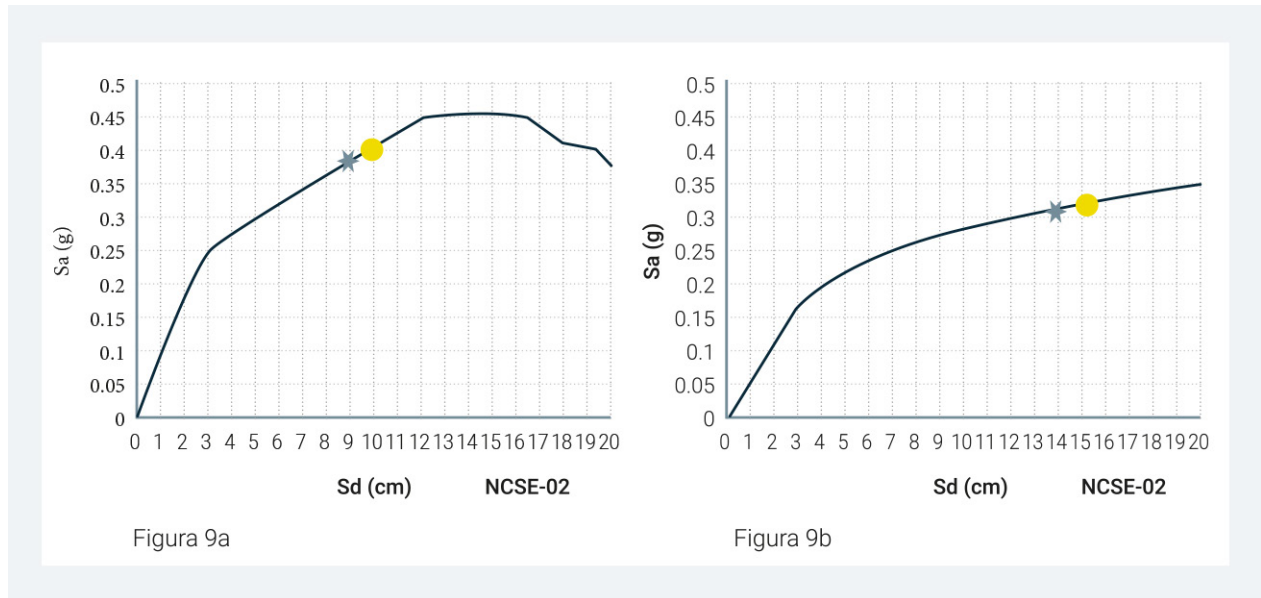
Figura 8. Espectro de capacidad del edificio HB, sentido:

- a) longitudinal
- b) transversal

²⁰ Mario Rodríguez y Daniel Padilla, "A damage index for the seismic analysis of reinforced concrete members", *Journal of Earthquake Engineering*, 2009, pp. 27-58.

²¹ *Idem*.

en sentido longitudinal. En sentido transversal, el espectro de capacidad presenta el comportamiento característico de la aportación de los muros diafragma como elementos sismorresistentes. La relación demanda-capacidad en sentido longitudinal es aceptable, con un valor de 0.96; sin embargo, en sentido transversal, la demanda supera su capacidad resistente en un 10%.



Para el edificio HE, se observa que, al igual que en el edificio HB, la capacidad resistente es mayor en sentido longitudinal que en sentido transversal. Sin embargo, en este caso, la capacidad del edificio supera la demanda de diseño con valores de 0.90 y 0.94 en dirección longitudinal y transversal, respectivamente.

Figura 9. Espectro de capacidad del edificio HE, en los sentidos:
a) longitudinal
b) transversal

Índice de daño global

El análisis dinámico no lineal de ambas edificaciones se llevó a cabo mediante 14 registros sísmicos bidireccionales seleccionados de European Strong Motion Database,²² correspondientes a condiciones de sitio tipo C en la ciudad de Sevilla. Los registros empleados representan un sismo de diseño con un periodo de retorno de 475 años.

Se presenta gráficamente la relación entre el índice de daño y la distorsión del edificio, así como con el nivel de ductilidad global (Figuras 10 y 11). En las gráficas donde se relacionan las distorsiones globales con el índice de daño, la línea de color azul corresponde al

²² European Commission, *European Strong Motion Database (ESM)*. Data.europa.eu. Última actualización: 2025, <https://data.europa.eu/data/datasets/world-seismicity-database?locale=es>.

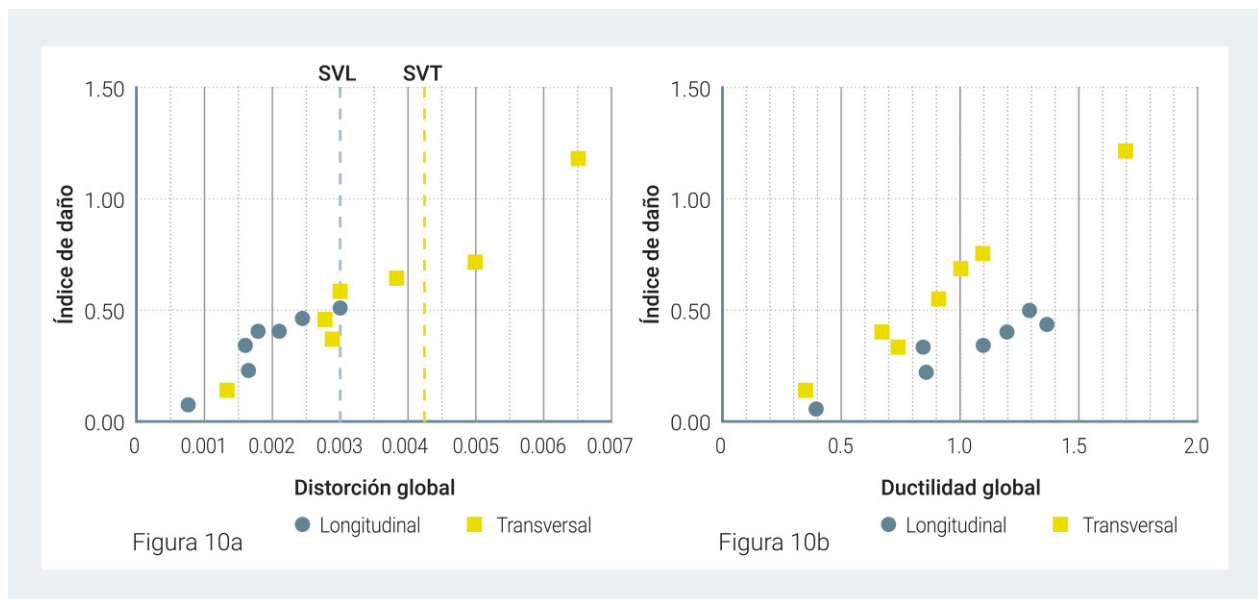
límite del estado de seguridad de vida en la dirección longitudinal (svL) y la línea amarilla, a la correspondiente en la dirección transversal (svT), acorde con las recomendaciones de diseño europeas RISK-UE.²³ Los círculos en ambas gráficas representan la respuesta del edificio en sentido longitudinal, mientras que los cuadrados corresponden a la respuesta en sentido transversal.

El índice de daño longitudinal del edificio HB, representado en la Figura 10a, presenta valores inferiores a 0.5, lo que corresponde a daños reparables. Los valores de distorsión correspondientes a dichos índices de daño son menores que 0.003, lo cual es adecuado para sistemas con muros diafragma de mampostería. En sentido transversal, esta edificación presenta índices de daño superiores a 0.5 y distorsiones globales entre 0.003 y 0.005, lo que implica daños significativos. En esta dirección se presenta un caso con un índice de daño mayor que el de la unidad y una distorsión de 0.0065.

En cuanto a los valores de ductilidad (Figura 10b), se observa que el edificio en sentido longitudinal presenta ductilidades mayores que en sentido transversal. Con valores de ductilidad entre 0.8 y 1.4, se observa la aportación de un número importante de crujías en sentido longitudinal, lo que, además, limita las distorsiones y el índice de daño. En sentido transversal, se observa un mayor índice de daño con ductilidades entre 1.0 y 1.10; el caso con índice de daño mayor que la unidad presenta una ductilidad de 1.70.

Figura 10. Relación del índice de daño del edificio HB con respecto a:

- a) Distorsión global
- b) Ductilidad global en ambas direcciones



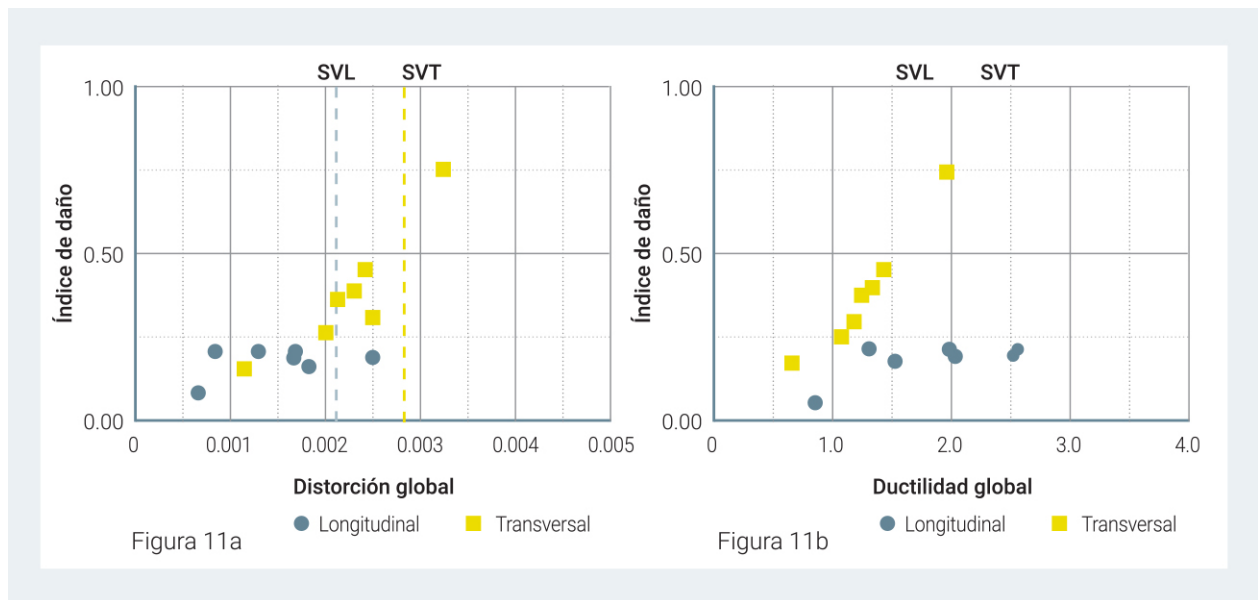
²³ El método propuesto por el proyecto denominado Risk-UE, que establece límites de estado de servicio según el nivel de deformaciones. Risk-UE, "An Advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European", RISK-UE Project (FP5-CORDIS-European Commission), Cordis-EU Research Results, 2022.

En la Gráfica 11a se observa que los valores del índice de daño del edificio HE son menores que la unidad en ambas direcciones, debido a que cuenta con columnas y trabes de dimensiones generosas, a pesar de ser un edificio esbelto en sentido transversal. Se observan nuevamente valores más altos del índice de daño en sentido transversal, entre 0.25 y 0.75, con distorsiones entre 0.002 y 0.0032.

Considerando los valores de ductilidad global, el edificio HE presenta valores superiores a los del edificio HB, especialmente en el sentido longitudinal, como se muestra en la Figura 11b. Dichos valores de ductilidad oscilan entre 1 y 2,5 en la dirección longitudinal, mientras que alcanzan un valor de 2.0 en la dirección transversal.

Figura 11. Relación del índice de daño del edificio HE con respecto a:

- a) Distorsión global
- b) Ductilidad global en ambas direcciones



Conclusiones

La evaluación sísmica de edificaciones patrimoniales construidas durante el Movimiento Moderno en Sevilla resulta importante para el análisis de inmuebles históricos ubicados en zonas con suelos blandos.

Los resultados analíticos de los casos estudiados, obtenidos mediante modelos dinámicos y estáticos, tanto elásticos como inelásticos, muestran diferencias significativas en su comportamiento sísmico. En el caso del edificio HB, se observó una mayor vulnerabilidad en sentido transversal, con distorsiones que alcanzan valores superiores al límite de seguridad de vida (SVT) y un índice de daño que supera la unidad en al menos un escenario, lo que indica un daño irreparable. En contraste, el edificio HE mostró un desempeño más favorable, con desplomes y distorsiones dentro de los rangos normativos y valores de índice de daño inferiores a 0.75 en ambas

direcciones, lo que sugiere un mejor comportamiento estructural ante sollicitaciones sísmicas a pesar de presentar una geometría irregular en planta.

La evaluación de la capacidad resistente frente a la demanda sísmica revela que, mientras el edificio HE supera los requerimientos normativos en ambas direcciones ortogonales, el edificio HB presenta una relación demanda-capacidad crítica en sentido transversal excedida. Esta diferencia se atribuye a la configuración volumétrica y a las dimensiones estructurales de cada edificación. La ductilidad global obtenida en los análisis no lineales refuerza esta observación, mostrando valores más elevados en el edificio HE, especialmente en el sentido longitudinal, lo que contribuye a limitar las distorsiones y a mantener el índice de daño en niveles aceptables.

A partir del análisis de los resultados, se puede concluir que las edificaciones de concreto reforzado con muros diafragma en suelos blandos presentan mayores índices de daño en construcciones esbeltas con irregularidades verticales, como el edificio HB, lo que las vuelve más vulnerables. Los edificios irregulares en planta, con un eje de simetría como el de HE, pueden disminuir su vulnerabilidad al incorporar elementos estructurales con dimensiones considerables en función de su altura.

Los resultados obtenidos mediante simulaciones dinámicas no lineales, apoyadas en registros sísmicos representativos, permiten establecer correlaciones entre la forma geométrica arquitectónica, la configuración estructural y los niveles de daño acumulado, parámetros que afectan la vulnerabilidad de los edificios, sirviendo de ejemplo para otros casos en contextos similares, como el de la Ciudad de México.

Referencias

APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL

- 1996 *ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Redwood City, CA: Applied Technology Council.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN (UNE)

- 2018 UNE-EN 1998-1:2018, Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para la edificación, España.

CELAREC, DANIEL, PAOLO RICCI Y MATJAŽ DOLŠEK

- 2012 "The Sensitivity of Seismic Response Parameters to the Uncertain Modelling Variables of Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames", *Engineering Structures*, núm. 35, pp. 165-177.

COMPUTERS AND STRUCTURES, INC.

- 2023 *SAP2000NL - Integrated Software for Structural Analysis and Design*, versión 24.2.0, Berkeley, California, USA: CSI.

EUROPEAN COMMISSION

- 2025 *European Strong Motion Database (ESM)*. Data.europa.eu. Última actualización: 2025, <https://data.europa.eu/data/datasets/world-seismicity-database?locale=es>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN)

- 2004 *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*. EN 1998-1:2004. Brussels: CEN.

GOBIERNO DE ESPAÑA

- 2021 *Boletín Oficial del Estado*, núm. 190, sec. 1, 97664-99452.

GÓMEZ VILLA, JOSÉ

- 2019 *Re-HABITAR EL CARMEN: Un proyecto sobre patrimonio contemporáneo*, Sevilla, Junta de Andalucía, Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico.

INSPECCIÓN TÉCNICA DE EDIFICACIONES (ITE)

- 2000 *Protocolo de inspección técnica de edificaciones*, Sevilla: Fundación para la Investigación y Difusión de la Arquitectura (FIDAS).

INSTITUTO ANDALUZ DEL PATRIMONIO HISTÓRICO Y UNIVERSIDAD DE SEVILLA
2012 *Cien años de arquitectura en Andalucía: el Registro Andaluz de Arquitectura Contemporánea, 1900-2000*, Cuadernos.

LOURENÇO, PAULO
2006 "Recommendations for Restoration of Ancient Buildings and the Survival of a Masonry Chimney", *Construction and Building Materials*, vol. 20, pp. 239-251.

MINISTERIO DE FOMENTO
2009 *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación (NCSE-02)*, Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, Madrid, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica.

MINISTERIO DE VIVIENDA
2009 *Documento Básico DB SE-AE: Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación*, Madrid, Gobierno de España, Código Técnico de la Edificación, abril.

PANAGIOTAKOS, TELEMACHOS B. Y MICHAEL N. FARDIS
2001 "Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate", *ACI Structural Journal*, vol. 98, núm. 2, pp. 135-148.

PGS-1
1968 Norma sismorresistente PGS-1, Parte A, *Boletín Oficial del Estado*, España, vol. 30, pp. 1658-1675.

RISK-UE PROJECT
2022 *An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns*, FP5-CORDIS-European Commission, Brussels: Cordis-EU Research Results.

RODRÍGUEZ, MARIO Y DANIEL PADILLA
2009 "A Damage Index for the Seismic Analysis of Reinforced Concrete Members", *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 27-58.

SÁNCHEZ-CID ENDÉRIZ, JOSÉ IGNACIO, IGNACIO CAPILLA RONCERO Y AMADEO RAMOS-CARRANZA
2003 *Arquitectura del Racionalismo en Sevilla*, Sevilla, Universidad de Sevilla.

SANTA ANA, PERLA

- 2025 *Análisis formal de la arquitectura del siglo xx y su interrelación con el diseño sísmico. Casos de estudio: Ciudad de México y la ciudad de Sevilla*, tesis de doctorado en Arquitectura, México, Universidad Nacional Autónoma de México.

VILLAR M., ALBERTO

- 2007 "Introducción a la arquitectura regionalista. El modelo sevillano", *Colección Arca Verde*, Universidad de Córdoba.

ZAPIDO, BEATRIZ

- 2020 *Rehabilitación sísmica estructural de colegios de educación primaria*, Editorial Universidad de Sevilla, España, pp. 10-21.

Perla Santa Ana Lozada

Facultad de Arquitectura

Universidad Nacional Autónoma de México

perla.santana@fa.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-7631-0895>

Profesora de tiempo completo en la Facultad de Arquitectura de la UNAM. Autora del Laboratorio Virtual de Sistemas Estructurales de la FA y del libro *Sistemas Estructurales, Prácticas con Modelos Físicos*. Coautora de las publicaciones: *Evolución de los sistemas constructivos y su repercusión en la arquitectura en la Ciudad de México*; *Del papel a la obra: cimentaciones y su representación gráfica*; *Viento: principios básicos para la arquitectura*. Tutora de la licenciatura en Arquitectura y del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la UNAM. Líneas de Investigación: Historia de los materiales y sistemas constructivos desde el siglo XIX; Entornos digitales para el aprendizaje de los sistemas constructivos; Influencia de la forma arquitectónica en el sistema estructural de los edificios.